

Auftragszuteilungsverfahren für Staplerleitsysteme

Dipl.-Ing. **M. Mirlach**, Prof. Dr.-Ing. **W. Günthner**, Lehrstuhl für Fördertechnik Materialfluss Logistik, Technische Universität München; Dr.-Ing. **A. Ulbrich**, Dr.-Ing. **K. Beckhaus**, Jungheinrich AG, Moosburg

Kurzfassung

In komplexen Transportsystemen mit räumlich verteilten Quellen und Senken kann das eingesetzte Auftragszuteilungsverfahren die Systemleistung erheblich beeinflussen. In diesem Beitrag werden ausgewählte Verfahren für Staplerleitsysteme vorgestellt und mittels Simulation verglichen. Der Einsatz eines agentenbasierten Auktionsverfahrens mit vorausplanenden Disponenten zur Auftragsvergabe in Staplerleitsystemen wird beschrieben und in der Simulation herkömmlichen Verfahren gegenübergestellt.

1. Aufgaben eines Staplerleitsystems

Ein Staplerleitsystem (SLS) ist ein IT-System, das den Einsatz von Flurförderzeugen, insbesondere Staplern, koordiniert. Ein SLS nimmt über eine oder mehrere Schnittstellen Transportaufträge entgegen, teilt diese den verfügbaren Flurförderzeugen auf geeignete Weise zu und überwacht die Ausführung. Dabei werden die Staplerbediener über Dialoge – meist Bildschirmdialoge auf einem am Stapler angebrachten Terminal – durch den Prozess geführt. Mittels verschiedener Identifikationstechnologien (Barcode, RFID) sowie indirekt durch Lokalisierung kann eine automatische Prozessüberwachung zur Fehlererkennung erfolgen.

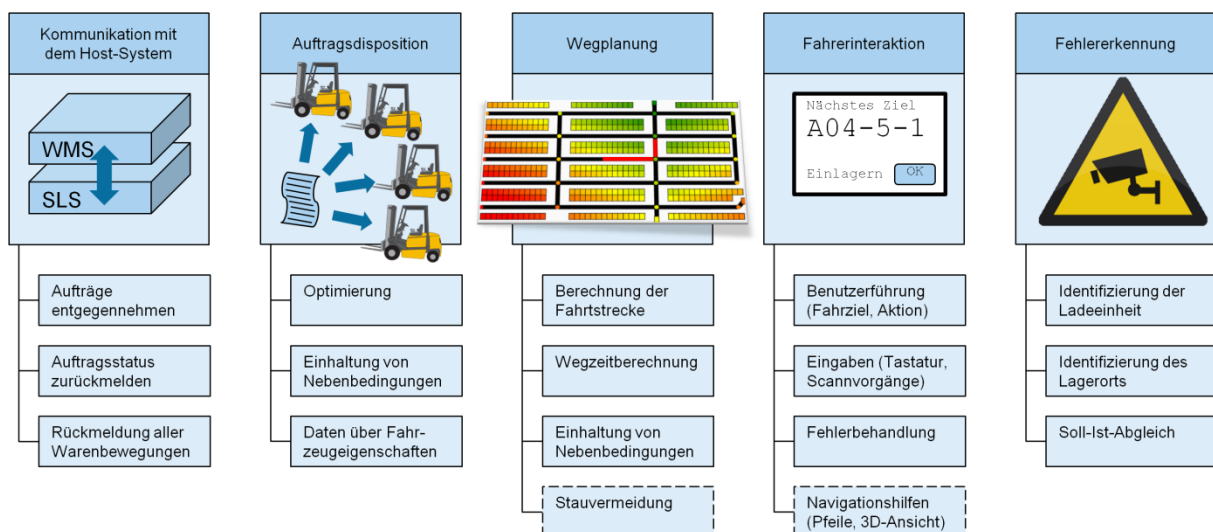


Abbildung 1: Aufgaben eines Staplerleitsystems

Nach *Hafner* [1] sind typische Verbesserungsziele beim Einsatz von Staplerleitsystemen u.a.:

- Erhöhung der Umschlagleistung, z. B. durch Reduzierung der Fahrstrecken
- Reduzierung von Transportzeiten und Fehltransporten
- Minimierung von Suchzeiten und Suchfahrten
- Erhöhung von Transparenz und Nachverfolgbarkeit
- automatisierte Datengewinnung / -auswertung
- Aufwandsreduktion für Auftragsübernahme und -quittierung

Im Folgenden wird eine wichtige Teilfunktionalität jedes SLS, die Auftragsdisposition, als Optimierungsproblem betrachtet und die simulative Untersuchung verschiedener Auftragszuteilungsverfahren beschrieben. Die vorgestellten Verfahren sind nicht auf den Einsatz in Staplersystemen beschränkt, sondern können auch auf andere flur- und schienengebundene Transportsysteme, wie z. B. Fahrerlose Transportsysteme, übertragen werden.

2. Auftragsdisposition als Optimierungsproblem

Ein Staplerleitsystem hat die Aufgabe, die vorhandenen Aufträge den verschiedenen Flurförderzeugen zuzuordnen und dabei vorgegebene Optimierungsziele zu verfolgen, wie z. B. die Minimierung von Leerfahrten durch Bildung optimaler Touren. Die Zielfunktion kann je nach Einsatzfall angepasst werden: Neben der Vermeidung von Leerfahrten kann beispielsweise auch die Berücksichtigung von zeitlichen Aspekten, Energieverbräuchen, gleichmäßiger Fahrzeugauslastung oder Fahrerwünschen sinnvoll sein.

Nebenbedingungen schränken die Freiheit bei der Auftragszuteilung ein. Technische Beschränkungen der einzelnen Flurförderzeuge (Traglast, Hubhöhe, Lastaufnahmemittel) und organisatorische Einschränkungen (Auftragsfristen, festgelegte Einsatzbereiche, Pausenzeiten) müssen beachtet werden und reduzieren somit die Anzahl der zulässigen Lösungen. Dabei kann zwischen strikten und weichen Nebenbedingungen unterschieden werden, also solchen, die in jedem Fall eingehalten werden müssen (z. B. zulässige Traglast eines Staplers), und solchen, die nötigenfalls verletzt werden dürfen (z. B. Auftragsfristen).

Die Problemstellung weist eine enge Verwandtschaft zum „Vehicle Routing Problem“ auf, einem viel behandelten kombinatorischen Optimierungsproblem, das hauptsächlich im Kontext der Transportlogistik bei der Planung von LKW-Touren betrachtet wird.

Abbildung 2 zeigt verschiedene Wegplanungsmethoden im Vergleich. Für fünf gegebene Transportaufträge in der freien Ebene soll eine Ausführungsreihenfolge mit möglichst geringem Leerfahrtsanteil gefunden werden. Die Start- und Zielpunkte der Transportaufträge sind jeweils als Kreise dargestellt. Die Ausgangsposition des Gabelstaplers ist mit (S)

markiert. Für fünf Transportaufträge ergeben sich bereits $5! = 120$ mögliche Ausführungsreihenfolgen.

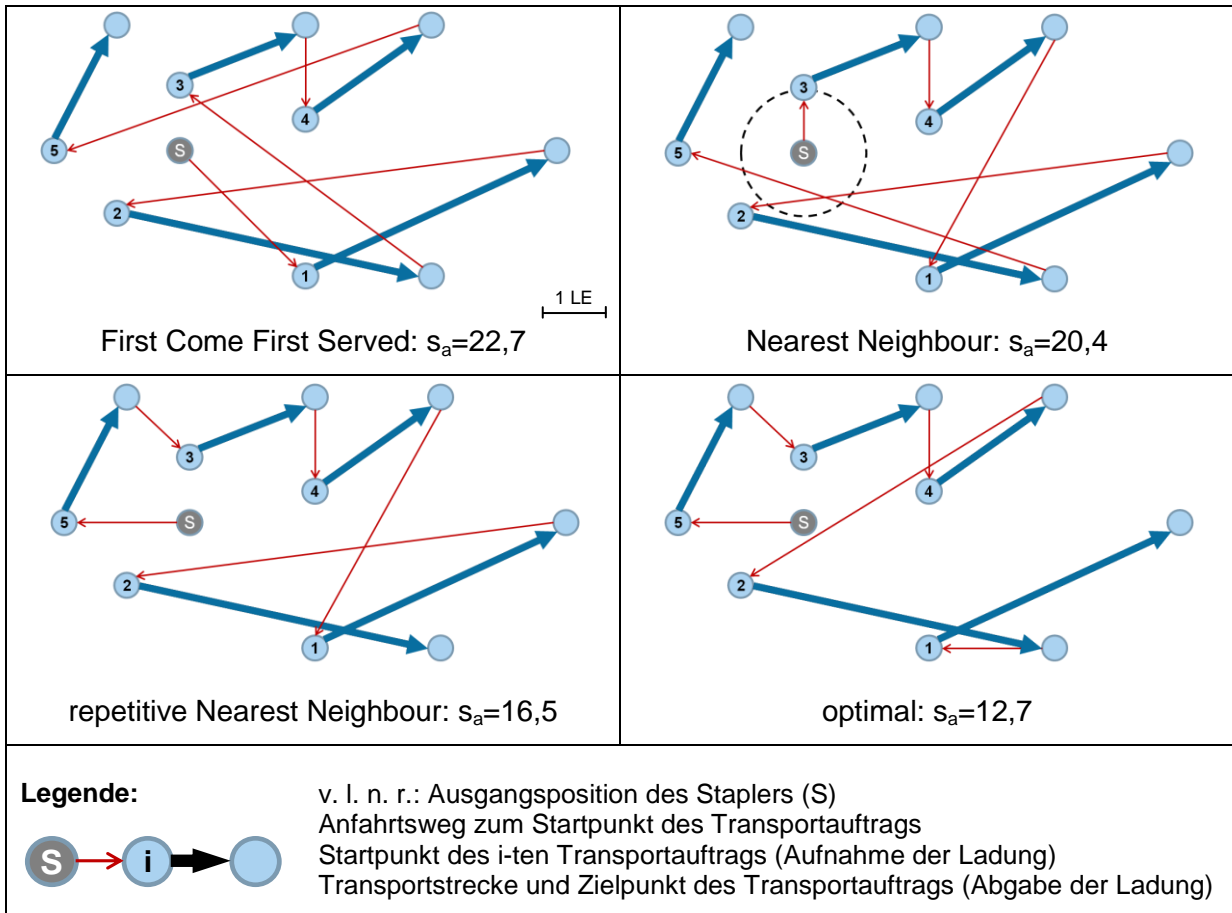


Abbildung 2: Illustration verschiedener Wegplanungsmethoden

Bei der Ausführung der Aufträge in der Reihenfolge des Auftragseingangs (First Come First Served, FCFS) ergibt sich eine Leerfahrtsstrecke von $s_a = 22,7$ Längeneinheiten. Ein naheliegendes Verfahren zur Reduzierung von Leerfahrten besteht darin, aus allen offenen Aufträgen als nächstes denjenigen zu wählen, dessen Startpunkt der momentanen Staplerposition am nächsten gelegen ist (Nearest Neighbour). Diese sogenannte „Greedy-Heuristik“ (engl. greedy: gierig), bei der alle Entscheidungen auf kurze Sicht, d. h. nur auf Grundlage des Anfahrtswegs zum jeweils nächsten Auftrag getroffen werden, führt jedoch im Allgemeinen nicht zum optimalen Ergebnis. Zuweilen kann es vorteilhaft sein, vereinzelt längere Anfahrten in Kauf zu nehmen, wenn sich dadurch die verbleibenden Aufträge zu besseren Touren kombinieren lassen. Die „repetitive Nearest Neighbour“-Heuristik lässt zumindest für den ersten Auftrag einen längeren Anfahrtsweg zu und erreicht so mit einer

Leerfahrtsstrecke von nur 16,5 LE eine insgesamt kürzere Tour. Bei der optimalen Ausführungsreihenfolge liegt in diesem (zur besseren Verdeutlichung speziell konstruierten) Beispiel die Leerfahrtsstrecke mit 12,7 LE nochmals deutlich geringer.

Die Anzahl der Kombinationsmöglichkeiten und damit der Aufwand zum Finden der optimalen Lösung wächst jedoch mit steigender Auftrags- und Staplerzahl rasant an („Kombinatorische Explosion“), so dass das einfache Durchprobieren aller möglichen Kombinationen im praktischen Einsatz, bei dem kurze Antwortzeiten gefragt sind, nicht zielführend ist. Fortgeschrittene Optimierungsverfahren schränken den Suchraum deshalb geeignet ein, um die optimale Lösung schneller zu finden. Grundsätzlich ist immer ein Kompromiss zwischen Lösungsqualität, Speicherverbrauch und Rechenzeit zu treffen. Bei vielen Verfahren ist es darüber hinaus möglich, die Berechnung vorzeitig abzubrechen, wenn zu einem Zeitpunkt ein Ergebnis benötigt wird, und die beste bis dahin gefundene Lösung zu verwenden.

Einschränkend ist zu erwähnen, dass eine echte Optimierung im streng mathematischen Sinn in der Praxis nicht möglich ist. Dies liegt daran, dass die Transportaufträge in der Regel im Tagesverlauf eingesteuert werden und nicht bereits zu Beginn in ihrer Gesamtheit bekannt sind. Somit können sich Entscheidungen, die auf Basis der zu einem Zeitpunkt verfügbaren Informationen getroffen wurden, im Nachhinein als suboptimal herausstellen.

3. Simulationsmodell

Zur Untersuchung und Bewertung verschiedener Auftragszuteilungsverfahren wurde ein Simulationsmodell erstellt. Dieses untergliedert sich in die Modellierung der Gabelstapler, der Umgebung (Fahrwege und Regale) und der Auftragsstruktur.

Das verwendete Zustandsmodell der Gabelstapler ist in Abbildung 3 dargestellt. Für alle Zustandsübergänge wurden die dafür benötigten Zeitdauern nach der Arbeitsablauf-Zeitanalyse (engl.: methods-time measurement, MTM) aus dem Handbuch MTM-Logistik [2] gewonnen.

Das Staplermodell beschreibt alle üblichen Arbeitsvorgänge, die mit einem Stapler in einem Palettenregallager ausgeführt werden können. Zusätzlich wird ein Einsatzmodell benötigt, das den tatsächlichen Einsatz eines Flurförderzeugs in einem bestimmten Szenario beschreibt. Dies umfasst beispielsweise Arbeitszeiten, Pausen und sonstige Unterbrechungen oder Nebentätigkeiten. Für die hier vorgestellten allgemeinen Untersuchungen wurde ein idealisiertes und vereinfachtes Modell zu Grunde gelegt. So werden beispielsweise keine zufälligen Abweichungen bei den Arbeitsvorgängen, Verzögerungen durch Fehler oder Pausen berücksichtigt. Auch für die Erfassung und Quittierung der Aufträge (Bildschirm-dialoge, Barcode-Scan, Prüzfifferneingabe etc.) wurden keine Zuschläge vorgesehen. Da die

hier vernachlässigten Einflüsse zwischen verschiedenen Unternehmen stark variieren und entsprechend der jeweils tatsächlich herrschenden Einsatzbedingungen zu berücksichtigen sind, sind die erzielten Ergebnisse nicht unmittelbar übertragbar. Die tendenziellen Aussagen zur Güte der verschiedenen Verfahren bleiben davon jedoch unberührt.

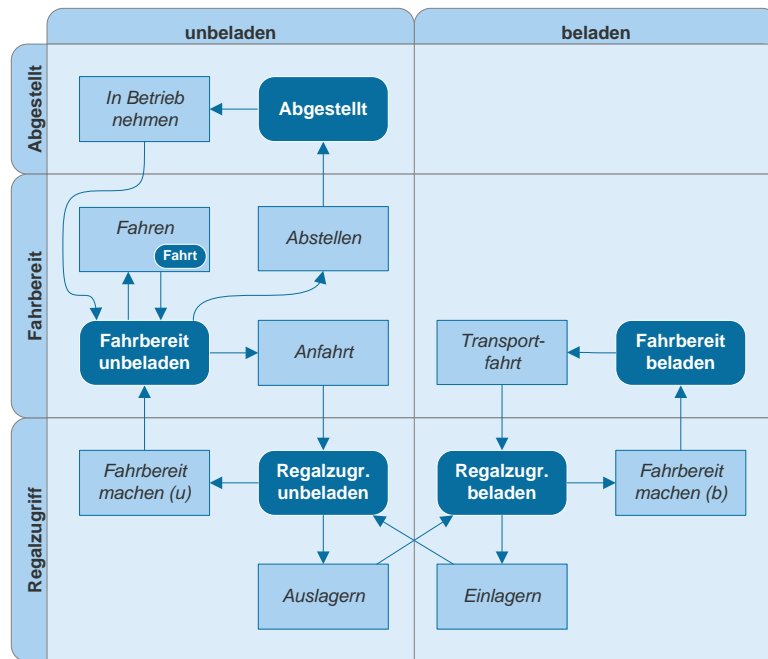


Abbildung 3: Zustandsmodell des Gabelstaplers

Die hier vorgestellten Untersuchungen basieren auf einem realen Warenverteilzentrum zur Distribution von Waren an den Einzelhandel. Das Warenverteilzentrum verfügt über ein Palettenregallager und ein Bodenblocklager sowie über Bereitstellflächen für die Mann-zur-Ware-Kommissionierung.

Tabelle 1: Daten des der Simulation zugrunde liegenden Warenverteilzentrums

Lager (Palettenregal- und Bodenlager)		Kommissionierung	
Grundfläche	8.000 m ²	Grundfläche	5.000 m ²
Palettenstellplätze	ca. 10.000	Artikel im Zugriff	1.200
Ø Lagerreichweite	7 Tage	Aufträge pro Tag	2.700
Stapler-Transportaufträge		Warenzu- und -abgang	
Anzahl pro Tag	6.900	Anlieferung	100 LKW/d
mittlere Transportdistanz	124,1 m	Versand	180 LKW/d
mittlere Auftragsfrist	47,6 min	Paletten pro LKW	15

Die Simulationsdauer umfasst 10 Arbeitstage à 16 Arbeitsstunden (Zweischichtbetrieb). Die Prozesse, aus denen sich die Transportaufträge für die Stapler ergeben, sind in Abbildung 4 beschrieben. Zunächst werden sortenreine Paletten per LKW an den Ladetoren angeliefert. Die 15 Paletten einer Lieferung müssen innerhalb einer Frist von 60 Minuten abtransportiert werden, damit das Ladetor wieder frei wird. Die Kommissionierung erzeugt Nachschubaufträge, die von den Staplern mit Fristen von 15 oder 30 Minuten bedient werden müssen. Für den Versand werden fertig kommissionierte Mischpaletten direkt aus der Kommissionierung oder aus dem Lager zufallsverteilt 15, 30 oder 60 Minuten vor der geplanten Abfahrt des LKWs abgerufen. Insgesamt ergeben sich so ca. 430 Transportaufträge pro Stunde mit Fristen zwischen 15 und 60 Minuten.

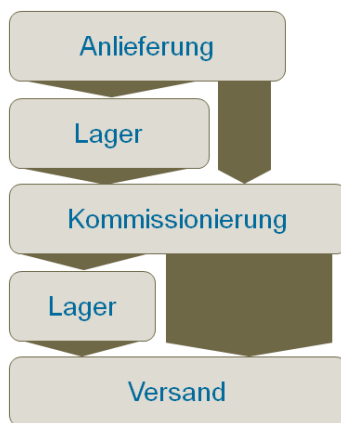


Abbildung 4: Prozessablauf

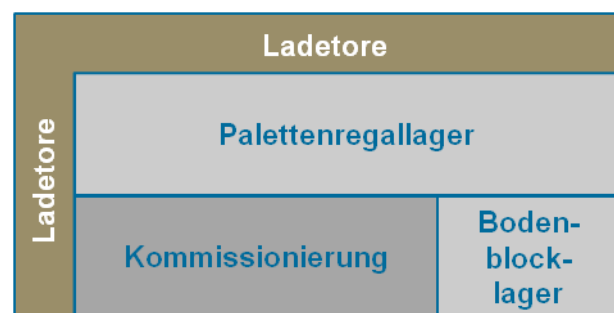


Abbildung 5: Schematischer Grundriss

Die Transportfahrt dauert im Simulationsszenario im Mittel 64 Sekunden pro Auftrag, für die Lastwechselforgänge werden durchschnittlich 31 Sekunden benötigt (Lastaufnahme und -abgabe zusammen). Diese Werte sind charakteristisch für das gewählte Szenario und unabhängig vom verwendeten Auftragszuteilungsverfahren. Zur Bearbeitungszeit eines Auftrags kommt noch die Zeitdauer für die Anfahrt zum Startpunkt hinzu, die durch die Auftragsdisposition des Staplerleitsystems maßgeblich beeinflusst wird.

Durch die verschiedenen Transportbeziehungen zwischen den Funktionsbereichen ergibt sich im gewählten Szenario ein großes Optimierungspotenzial durch die geschickte Aneinanderreihung von Transportaufträgen. Die Tourenplanung gestaltet sich in einem solchen System mit mehreren verteilten Quellen und Senken deutlich komplexer als bei einfachen Systemen, wo oft schon die Bildung von Doppelspielen zu zufriedenstellenden Ergebnissen führt. Voraussetzung für eine wirksame Optimierung ist natürlich, dass Entscheidungsalternativen vorhanden sind. Aus diesem Grund sollte immer ein gewisser Bestand an Aufträgen und / oder Flurförderzeugen vorhanden sein, aus dem gewählt werden kann.

4. Vergleich verschiedener Auftragszuteilungsverfahren

Als Maß für die Güte eines Auftragszuteilungsverfahrens wird die minimale Anzahl an Staplern verwendet, die benötigt wird, um die gegebenen Transportaufträge fristgerecht auszuführen.

4.1 First Come First Served (FCFS)

Bei der einfachen Abarbeitung der Aufträge in der Reihenfolge des Auftragseingangs (First Come First Served, FCFS), d. h. ohne jegliche Optimierung, werden 24 Stapler benötigt, um alle Aufträge fristgerecht zu bearbeiten. Dabei ergibt sich ein Leerfahrtenanteil von $\alpha=48,6\%$.

4.2 Earliest Deadline First (EDF)

Mit dem Verfahren „Earliest Deadline First“ (EDF), bei dem einem freien Stapler, unabhängig von seinem momentanen Standort, der dringendste Auftrag (d. h. der mit der kürzesten verbleibenden Zeit bis zum Fristablauf) zugewiesen wird, kann die Auftragslast mit 21 Staplern bewältigt werden. Da auch bei diesem Verfahren keinerlei Wegeoptimierung vorgenommen wird, ergibt sich hier ebenfalls ein Leerfahrtenanteil von $\alpha=48,6\%$.

4.3 Kombinierte Greedy-Heuristik

Zur Erzielung weiterer Einsparungen ist die Reduzierung der Anfahrtswege unbedingt erforderlich. Durch die Verringerung der Zeitanteile, die durch Leerfahrten verschwendet werden, steht mehr Zeit für produktive Tätigkeiten (Transportfahrt) zur Verfügung, und die Effizienz des Staplereinsatzes kann gesteigert werden. Hierfür wird zunächst eine kombinierte Greedy-Heuristik betrachtet, bei der der nachfolgende Auftrag auf Basis des Anfahrtswegs und der verbleibenden Zeit bis zum Fristablauf ausgewählt wird. Dabei kann die Gewichtung frei zwischen Frist und Anfahrtsweg verschoben werden. Die Simulationsergebnisse mit variierter Gewichtung sind in Abbildung 6 dargestellt.

Der Grenzfall mit 100% Gewichtung der Frist entspricht dem zuvor dargestellten Verfahren „Earliest Deadline First“ (EDF), bei dem 21 Stapler benötigt werden. Mit zunehmender Gewichtung der Anfahrtsstrecke sinkt, wie zu erwarten, der Leerfahrtenanteil, und die Auftragslast kann bei einem Leerfahrtenanteil von $\alpha=41,8\%$ mit 19 Staplern fristgerecht bewältigt werden. Wird die Gewichtung der Anfahrt weiter gesteigert, so fällt zwar auch der Leerfahrtenanteil weiter. Bei der Auswahl der Transportaufträge wird jedoch die Frist immer weniger berücksichtigt, so dass auch unkritische Aufträge, die räumlich günstig liegen, bearbeitet werden, während dringende Aufträge liegen bleiben, bis ihre Frist nicht mehr eingehalten werden kann.

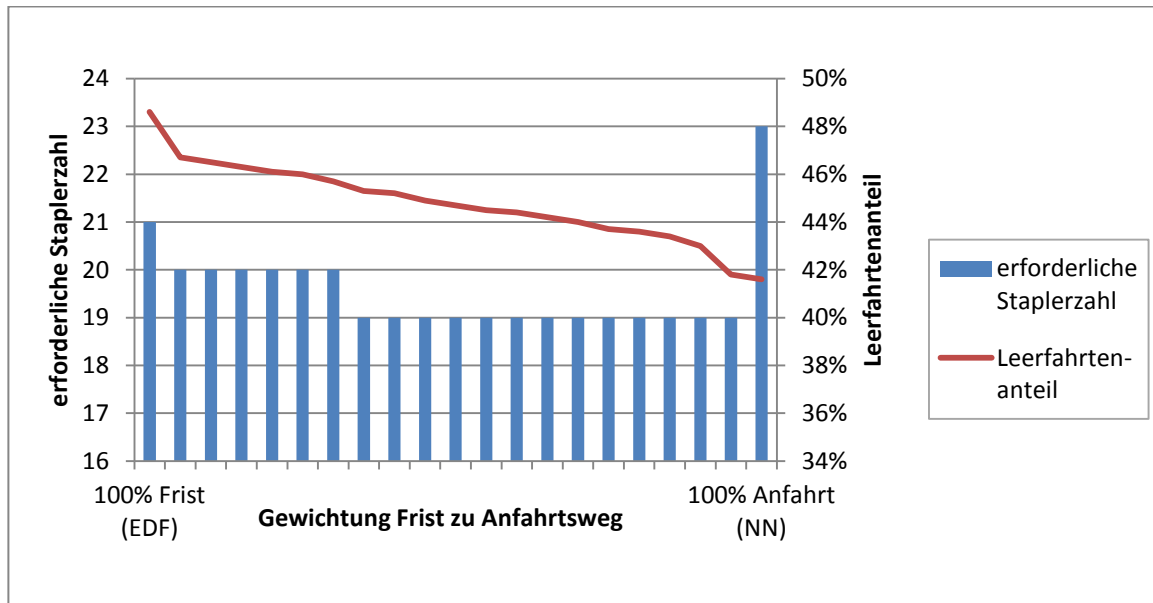


Abbildung 6: Simulationsergebnis mit kombinierter Greedy-Heuristik

4.4 Kombinierte Greedy-Heuristik mit begrenzter Fristvorlaufzeit

Die Berücksichtigung von Fristen wirkt sich (ebenso wie andere Nebenbedingungen und „Neben-Optimierungsziele“, bspw. Prioritäten) im Allgemeinen negativ auf die Qualität der Wegeoptimierung aus. Um diese Auswirkungen gering zu halten, empfiehlt es sich, die verbleibende Zeit bis zum Fristablauf erst ab einem gewissen Schwellwert zu berücksichtigen. Solange kein Auftrag diese Schwelle unterschreitet, wird die Auftragsauswahl rein nach dem Kriterium des geringsten Anfahrtswegs durchgeführt. Bei diesem Algorithmus kommt neben dem Gewichtungsfaktor der Frist als zweiter Einstellparameter die Fristvorlaufzeit hinzu. Die optimale Einstellung dieser Parameter ist abhängig von der Auftragsstruktur und Fristenverteilung und kann durch eine Simulationsstudie ermittelt werden. Für das vorliegende Szenario sind in Abbildung 7 die Simulationsergebnisse für verschiedene Parameter-einstellungen dargestellt. Die vorher beschriebenen Verfahren sind wieder als Grenzfälle enthalten (FCFS: links unten; EDF: rechts unten; Kombinierte Heuristik: rechte Spalte).

Die Simulation liefert darüber hinaus weitere Ergebnisse, die zur einsatzspezifischen Parametrierung und Optimierung herangezogen werden können, beispielsweise den Leerfahrtenanteil und die Auslastung der Fahrzeuge. Durch weitere Simulationsexperimente können auch Aussagen zur Robustheit des Verfahrens bei Überlastung getroffen werden.

Bei optimaler Einstellung dieser kombinierten Heuristik mit begrenzter Fristvorlaufzeit lässt sich die geforderte Auftragslast mit 18 Staplern bei einem Leerfahrtsanteil von $\alpha=39,4\%$ bewältigen.

		Fristvorlaufzeit t_{vF} [min]														
		(kurz)						(lang)								
		0	5	10	15	20	25	30	35	40	45	50	55	60		
w_{tF} [1/s]	0	23	23	23	23	23	23	23	23	23	23	23	23	23	100	(NN)
	5	23	23	22	21	21	20	20	19	19	19	19	19	19	95	
	10	23	23	21	20	19	18	18	18	19	19	19	19	19	90	
	15	23	23	21	19	18	18	18	18	19	19	19	19	19	85	
	20	23	23	20	18	18	18	18	19	19	19	19	19	19	80	
	25	23	23	19	18	18	18	18	19	19	19	19	19	19	75	
	30	23	23	19	18	18	18	18	19	19	19	19	19	19	70	
	35	23	23	18	18	18	18	19	19	19	19	19	19	19	65	
	40	23	23	18	18	18	19	19	19	19	19	19	19	19	60	
	45	23	23	18	18	18	19	19	19	19	19	19	19	19	55	
w_{SA} [1/m]	50	23	23	18	18	19	19	19	19	19	19	19	19	50		
	55	23	23	18	18	19	19	19	19	19	19	19	19	45		
	60	23	22	18	18	19	19	19	19	19	19	19	19	40		
	65	23	22	18	18	19	19	19	19	19	19	20	20	35		
	70	23	22	18	18	19	19	19	19	19	19	20	20	30		
	75	23	20	18	18	19	19	19	19	20	20	20	20	25		
	80	23	21	18	18	19	19	19	20	20	20	20	20	20		
	85	23	20	18	18	19	19	19	20	20	20	20	20	15		
	90	23	20	18	19	19	19	19	20	20	20	20	20	10		
	95	23	21	18	19	19	19	20	20	20	20	20	20	5		
100	24	22	21	21	21	21	21	21	21	21	21	21	0	(EDF)		

Abbildung 7: Erforderliche Stapleranzahl für fristgerechte Bearbeitung mit kombinierter Greedy-Heuristik

Einfache Heuristiken, die bei der Auftragsvergabe nur den unmittelbar nächsten Auftrag berücksichtigen, erreichen in komplexen Szenarien nur eine begrenzte Optimierungsqualität. Eine bessere Leistung kann durch Vorausplanung erzielt werden, also durch die vorausschauende Tourenplanung unter Berücksichtigung aller bis dahin bekannter Transportaufträge. Auf diese Weise können geringere Leerfahrtsanteile erzielt und Fristen bedarfsgerecht, d. h. abhängig von der momentanen Auslastung, berücksichtigt werden.

Für den effektiven Einsatz vorausplanender Algorithmen wird eine möglichst exakte Modellierung der Arbeitsvorgänge benötigt, um die für die einzelnen Aufträge benötigte Zeitdauer abschätzen zu können. Dies setzt wiederum planbare und wiederholbare Arbeitsabläufe voraus. Sind die Arbeitsabläufe hingegen mit größeren Unsicherheiten behaftet, so müssen diese durch Sicherheitsmargen in der Vorausplanung abgefangen werden, welche wiederum die erzielbare Optimierungsqualität beeinträchtigen.

Ein Auftragsvergabeverfahren mit Vorausplanung wird im nächsten Kapitel dargestellt.

5. Agentenbasiertes, vorausplanendes Auftragszuteilungsverfahren

Der Einsatz von Software-Agentensystemen zur Steuerung von Produktionssystemen und Logistikprozessen wird bereits seit vielen Jahren diskutiert. Schon im Jahr 1999 wurde bei Daimler-Chrysler eine durch Software-Agenten gesteuerte Anlage, die im Rahmen des Projekts „Production 2000+“ entstand, produktiv in der Zylinderkopffertigung eingesetzt [3]. Der Einsatz der Agententechnologie zur Steuerung intralogistischer Fördertechnik wurde umfassend untersucht, beispielsweise an den Technischen Universitäten in München und Dortmund [4], und in Versuchsanlagen realisiert. Der Einsatz der Agententechnologie verspricht eine vereinfachte Komplexitätsbeherrschung und eine erhöhte Flexibilität des Systems, da die Steuerungssoftware in kleinere, überschaubare Einheiten unterteilt wird, die flexibel miteinander kommunizieren und einfach miteinander kombiniert werden können. Aus dieser Motivation heraus wurde die Entwicklung agentenbasierter Auftragszuteilungsalgorithmen (u.a. für Staplerleitsysteme) angestoßen.

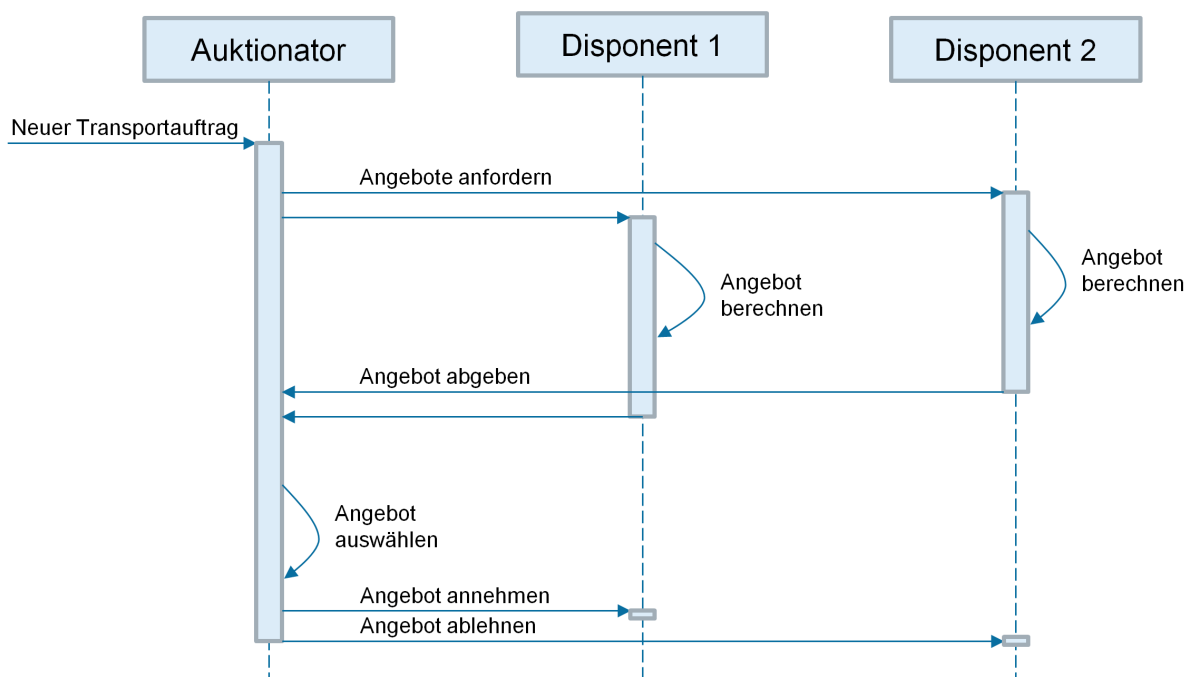


Abbildung 8: Ablaufdiagramm der Auftragsvergabe bei agentenbasiertem Verfahren

In dem am Lehrstuhl für Fördertechnik Materialfluss Logistik der TUM mit Unterstützung der Jungheinrich AG verfolgten Ansatz wird jedes Flurförderzeug durch einen virtuellen Staplerdisponenten repräsentiert, der die dem Förderzeug zugewiesenen Aufträge zu einer möglichst kurzen Tour zusammenstellt und dabei auf die Einhaltung der Auftragsfristen achtet. Sobald ein neuer Auftrag in das System eingesteuert wird, fragt ein virtueller Auktionator bei allen

Staplerdisponenten an, zu welchem „Preis“ diese den Auftrag übernehmen würden (Abbildung 8). Die Staplerdisponenten berechnen nun unabhängig voneinander ihr Angebot unter Verwendung ihrer jeweiligen Optimierungsalgorithmen und Vorhersagemodelle und berücksichtigen dabei die bereits angenommenen Aufträge sowie die Eigenschaften und Fähigkeiten ihres jeweiligen Flurförderzeugs. Durch die Aufspaltung in mehrere unabhängige Optimierungsprobleme lassen sich diese auf modernen Mehrkernprozessoren sehr gut parallel lösen. Auch die konsistente Einbindung verschiedenartiger Flurförderzeuge, die sich in ihren Eigenschaften und Fähigkeiten stark unterscheiden, ist mit diesem Verfahren sehr leicht möglich. Es wird lediglich ein neuer Disponent benötigt, der über ein geeignetes Modell des Flurförderzeugs und passende Optimierungsalgorithmen verfügt, während der Rest des Systems unverändert bleibt.

Der „Preisgestaltung“ der Disponenten kommt bei diesem Verfahren eine Schlüsselrolle zu, da sie die Optimierungsziele widerspiegelt. Neben der Länge der Leerfahrtsstrecken einer Tour und Strafen für Fristüberschreitungen können auch weitere Optimierungsziele (beispielsweise der Energieverbrauch verschiedener Staplermodelle) zur Preisbildung beitragen. Ein weiteres Schlüsselement ist das eingesetzte Vorausplanungsmodell, auf dessen Basis ein Disponent den Einsatz des ihm zugeordneten Fördermittels plant. Die Angebotserstellung muss fair und auf Basis realistischer Modelle erfolgen, so dass die Angebote nicht mit einer „zu optimistischen“ Planung erstellt werden.

Zur Optimierung der Touren durch die einzelnen Disponenten können wiederum verschiedene Optimierungsverfahren mit ihren jeweiligen Vor- und Nachteilen eingesetzt werden. In vielen Fällen erzielen die oben beschriebenen Heuristiken bereits hinreichend gute Lösungen. Im hier vorgestellten Simulationsszenario wurde zur Erzielung deutlicher Einsparungen jedoch ein Optimierungsalgorithmus verwendet, mit dem bis zu 10 Aufträge pro Stapler zu optimalen Touren zusammengestellt werden können. Damit ist es möglich, die Auftragslast im hier betrachteten Szenario mit nur 17 Staplern ohne Fristverletzungen bei einem Leerfahrtsanteil von $\alpha = 34,5\%$ zu bewältigen.

Die Qualität des vorgeschlagenen Verfahrens wird durch die sequenzielle Versteigerung der Transportaufträge begrenzt. Komplexere Auftragsvergabeverfahren, die beispielsweise kombinatorische Auktionen verwenden oder in Form einer Börse den nachträglichen Tausch von Aufträgen zwischen den Disponenten erlauben, können – zum Preis eines höheren Berechnungsaufwands – noch bessere Leistungen erzielen.

6. Zusammenfassung

Durch den Einsatz von Computersimulationen können Auftragsvergabeverfahren für Staplerleitsysteme evaluiert und für spezifische Einsatzfälle parametrisiert werden. Der Einfluss der korrekten, an die Auftragsstruktur angepassten Parametrisierung auf die Systemleistung wurde dargestellt.

An der Technischen Universität München wurde ein agentenbasiertes, vorausplanendes Auftragsvergabeverfahren entwickelt, mit dem im Vergleich zu herkömmlichen Heuristiken eine deutliche Effizienzsteigerung möglich ist. Das Verfahren zeichnet sich durch eine hohe Flexibilität, die konsistente Einbindung verschiedenartiger Förderzeuge und die effektive Ausnutzung moderner Mehrkern-Prozessoren aus. Tabelle 2 zeigt die Kennzahlen der vorgestellten Verfahren beim Einsatz im zu Grunde liegenden Referenzszenario im Überblick.

Tabelle 2: Vergleich der untersuchten Auftragszuteilungsverfahren

Verfahren	erforderliche Staplerzahl	Leerfahrtsanteil α
First Come First Served (FCFS)	24	48,6%
Earliest Deadline First (EDF)	21	48,6%
kombinierte Heuristik	19	41,8%
kombinierte Heuristik mit begrenztem Fristvorlauf	18	39,4%
vorausplanende Auftragsdisposition	17	34,5%

Das agentenbasierte, vorausplanende Auftragszuteilungsverfahren zeigt sehr vielversprechende Leistungen. Für die erfolgreiche Übertragung des Verfahrens aus der Simulation in den praktischen Einsatz sind allerdings noch einige Fragestellungen zu klären, beispielsweise der Umgang mit Unsicherheiten bei der Vorausplanung und die Behandlung von Ereignissen, die eine komplette Revision der Planung erforderlich machen. Diese Fragestellungen werden in aktuellen und künftigen Forschungsarbeiten adressiert.

7. Literaturhinweise

- [1] Hafner, N.: Staplerleitsysteme: Optimierte Anwendungen, Funktionen und Technik. In: Tagungsband zur Flurförderzeugtagung 2011, VDI Verlag, Düsseldorf, 2011
- [2] Deutsche MTM-Vereinigung e.V.: Handbuch MTM-Logistik
- [3] Bussmann, S.; Schild, K.: An Agent-based Approach to the Control of Flexible Production Systems. In Proc. of the 8th IEEE Int. Conf. on Emergent Technologies and Factory Automation (ETFAs 2001). Antibes Juan-les-pins, 2001
- [4] Günthner, W.; ten Hompel, M. (Hrsg.): Internet der Dinge in der Intralogistik. Springer-Verlag, Berlin Heidelberg, 2010