

Entwicklung und Analyse einer multikriteriellen Einsatzsteuerung von Staplern in einem manuell bedienten Distributionslager

Development and analysis of a multi-attribute forklift fleet control in a manually operated distribution warehouse

Uwe Clausen, Peiman Dabidian, Daniel Diekmann, Ina Goedicke, Moritz Pötting,
TU Dortmund - Institut für Transportlogistik, Dortmund (Germany),
clausen@itl.tu-dortmund.de, dabidian@itl.tu-dortmund.de,
diekmann@itl.tu-dortmund.de, goedicke@itl.tu-dortmund.de,
poeting@itl.tu-dortmund.de

Abstract: Due to strong market competition, operators of production and logistics systems are constantly looking for measures to increase the efficiency of internal handling and storage processes. The content of this application-oriented paper is a manually operated distribution warehouse with a capacity of more than 40.000 pallets connected to an order-picking and a value-added-service area. A detailed simulation of internal material flows in this warehouse enables the testing of intelligent multi-attribute dispatching strategies for forklift fleet control. These strategies intend to minimize the empty travel time of forklifts under consideration of practical restriction such as cut off times and buffer capacities. The results of this application-oriented study show that the concept is applicable on real systems and can increase efficiency of warehouse operations. It is demonstrated that empty travel time is reduced significantly and a higher flexibility in capacity adjustment can be reached.

1 Motivation und Hintergrund

Aufgrund des starken Wettbewerbsdrucks sind Betreiber von Logistikanlagen ständig auf der Suche nach Maßnahmen zur Steigerung der Effizienz von innerbetrieblichen Umschlag- und Lagerprozessen. Der vorliegende Anwendungsbeitrags beschreibt die Entwicklung und Analyse einer multikriteriellen Einsatzsteuerung von Staplern in einem manuell bedienten Distributionslager. Dieses verfügt über eine Lagerkapazität von ca. 40.000 Vollpaletten mit angeschlossenem Kommissionier- und Value-Added-Service-Bereich. Die bisherige Arbeitsweise des Systems, welche typisch für manuell bediente Lager dieser Art ist, sieht getrennte Wareneingangs- und Warenausgangsteams vor. Die

Transportaufträge werden nach dem First-Come-First-Serve eingelagert bzw. nach einer gemäß den Abfahrzeiten vorgegebenen Auslagerreihenfolge abgefertigt (Scheid 2001; Helle 2011). Durch die Installation eines Staplerleitsystems mit einer intelligenten, teamübergreifenden Auftragsvergabe erhofft sich der Betreiber der Anlage Effizienzsteigerungen, deren Potential aufgrund der Größe des Lagers (täglich ca. 3.000 Transportbewegungen) und der Komplexität der Prozesse mit ihren Wechselwirkungen (z.B. Stauwirkungen) schwer abzuschätzen ist. Für eine entsprechende Analyse sind daher das Distributionslager sowie dessen Lagerverwaltungssystem und Staplersteuerungen in ein ereignisorientiertes Simulationsmodell überführt worden.

2 Systembeschreibung

Das untersuchte Lager ist ein überregionales Distributionslager mit Palettenregalen in parallel angeordneten Lagerreihen. Die Lagerfläche erstreckt sich über mehrere aneinander liegende Hallen und verfügt über einen durchgehenden Mittelgang. Für die Lagerartikel findet eine Zonenteilung sowohl über Gewichts- und Artikelklassen, als auch über Gefahrgutmerkmale statt. Darüber hinaus gibt es eine Value-Added-Service-Zone, in denen kundenindividuell Aktionsware hergestellt wird. Das Lager erstreckt sich über eine Gesamtfläche von ca. 30.000 m² mit einer zusätzlichen Value-Added-Service-Fläche von ca. 5.000 m² und ist in Abbildung 1 mit den Hauptverkehrsströmen dargestellt.

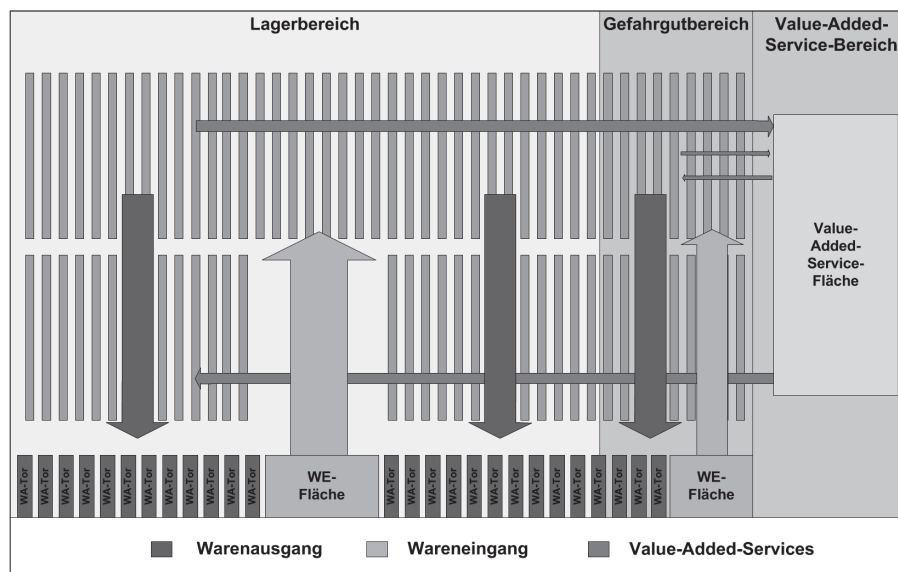


Abbildung 1: Layout und schematischer Warenfluss der Anlage

Die Transportauftragsvergabe wird von einer zentralen Einsatzsteuerung durchgeführt und über mobile Terminals an die Fahrer übermittelt. Die Übernahme eingehender Güter erfolgt mit Ausnahme der Gefahrgutartikel über eine zentrale Wareneingangsfläche. Für Gefahrgutartikel steht eine separate Eingangsfläche

innerhalb des Gefahrgutbereiches zur Verfügung. Ausgehende Ware wird von den Staplern aus dem Palettenregallager ausgelagert und an den Bereitstellflächen vor den jeweiligen Ausgangstoren bzw. im Kommissionierbereich bereitgestellt. Abhängig von der Tageszeit und Schichtplanung sind bis zu 15 Stapler gleichzeitig im Einsatz, aufgeteilt auf 3 autonome Teams: Wareneingangs-, Warenausgangs- und Value-Added-Service-Team.

3 Theoretische Grundlagen

Eine Einsatzsteuerung steuert die Zuordnung von Transportaufträgen und Staplern. Grundsätzlich lassen sich Steuerungssysteme in dezentrale und zentrale Systeme unterscheiden. Bei dezentralen Steuerungssystemen werden Steuerungsentscheidungen verteilt und auf Basis lokaler Informationen getroffen. Dieses bietet Vorteile in Hinblick auf praktische Anwendbarkeit und Reaktionsfähigkeit insbesondere bei der Steuerung komplexer Systeme mit kurzen Antwort- bzw. Entscheidungsintervallen (Günther et al. 2001; Fay 2008). Zentrale Steuerungssysteme hingegen besitzen den Vorteil, dass sie durch die Verfügbarkeit aller entscheidungsrelevanten Informationen zu einem globalen Optimum führen können (Scholl et al. 2005).

Um die Zuordnung von Transportaufträgen und Staplern zu steuern, existieren sowohl ein- als auch multikriterielle Dispositionsstrategien. Diese haben einen wesentlichen Einfluss auf die Leistungsfähigkeit des logistischen Systems, wie die Arbeiten von Koo und Jang sowie Clausen für den Anwendungsfall eines AGV-Systems bzw. einer Stückgutspeditionsanlagen zeigen (Koo und Jang 2002; Clausen et al. 2011).

Einkriterielle Dispositionsstrategien lassen sich, wie in Abbildung 2 dargestellt, gemäß ihrer Zielstellung in entfernungsbasierte, auslastungsbasierte und zeitbasierte Dispositionsregeln gruppieren (Le-Anh und De Koster 2006). Entfernungsbasierte Strategien, wie z.B. STTF (Shortest-Travel-Distance-First) oder NVF (Nearest-Vehicle-First), verfolgen das Ziel, den nächsten Transporter bzw. den am nächsten gelegenen Auftrag auszuwählen und die Leerfahrten zu minimieren. Diese Strategien verbessern die Performance der Transportflotte, führen allerdings auch zu sehr langen Wartezeiten von Transportaufträgen, die aufgrund ihrer ungünstigen Lage im Layout selten angefahren werden (De Koster et al. 2004). Auslastungsbasierte Strategie, wie z.B. MOQS (Maximum-Outgoing-Queue-Size) überprüfen die Pufferzustände der Quellen und Senken der Transportaufträge. Sie verfolgen das Ziel ein Überlaufen und somit Blockaden in vor- oder nachgelagerten Prozessen zu verhindern. Zeitbasierte Strategien, wie z.B. FCFS (First-Come-First-Serve) zielen auf die rechtzeitige Abarbeitung von Aufträgen ab und nutzen Ankunftszeiten bzw. auch Abfahrtszeiten (CutOffs) von Aufträgen als Entscheidungskriterium. Egbelu und Tanchoco führen neben der Basisstrategie FCFS auch Modifikationen in Bezug auf das Abrufverhalten ein. So verbietet die MFCFS-Regel das Erstellen mehrerer Transportaufträge einer Quelle. Dahinter steht die Überlegung, dass Transportfahrzeuge mit größeren Kapazitäten mehrere Aufträge auf einer Fahrt übernehmen können. Nur wenn die Auslastung der Aufträge einer Quelle die Kapazität übersteigt, kann ein weiteres Transportfahrzeug gerufen werden (Egbelu 1984).

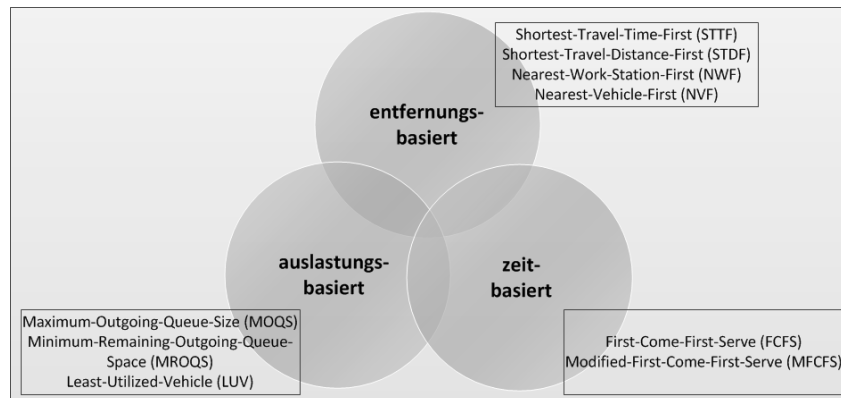


Abbildung 2: Einkriterielle Dispositionsstrategien einer Einsatzsteuerung

Da einkriterielle Dispositionsregeln im realen Betrieb häufig nicht alle Zielausrichtungen hinreichend erfüllen können, müssen diese zu multikriteriellen Strategien zusammengesetzt werden. Dabei bedarf es neben der Auswahl geeigneter einkriterieller Strategien vor allem einer zweckmäßigen Methode zur Kombination einzelner einkriterieller Regeln. Vier grundsätzliche Verknüpfungsmöglichkeiten, z.B. in Form einer additiven Gewichtungen oder auch Zugehörigkeitsfunktionen, werden von Klein und Kim für Fahrerlose Transportsystem vorgestellt und deren positive Eigenschaften in Hinblick auf die Zielerreichung in anschließenden Simulationsläufen nachgewiesen (Klein und Kim 1996). Ein weiteres Anwendungsbeispiel einer kombinierten Strategie beschreibt Lampe. Für eine Kransteuerung in Terminals des Kombinierten Verkehrs wird dabei eine Prioritätskennzahl entwickelt, die mithilfe von binären, multiplen Priorisierungsparametern und Ausschlusskriterien konträre Einzelzielsetzungen, z.B. in Form von möglichst geringen Entfernungen oder der Einhaltung der Abfahrtszeiten, bestmöglich verknüpft (Lampe 2006).

4 Modellierung

Zur Analyse von Auswirkungen strategischer und operativer Entscheidungen hat das Institut für Transportlogistik eine Transportlogistikumgebung entwickelt. Basierend auf der Simulationssoftware Enterprise Dynamics ermöglicht das Tool ED Transport die Darstellung und Simulation von Material- und Informationsflüssen in logistischen Knoten des Güterverkehrs. Dabei erfolgt die Modellierung der Systemlayouts, Prozesse, Ressourcen und Systemlast auf einer mikroskopischen Ebene. Darüber hinaus können realitätsgetreue Steuerungsstrategien ausgewählt, parametrisiert und angepasst werden. (Deymann und Neumann 2008; Clausen et al. 2012)

Für die Modellierung eines Systems werden allgemein drei Datentypen benötigt: Technische Daten, Organisationsdaten und Systemlastdaten (VDI-Richtlinie 3633 Blatt 1 2010). Zu Beginn der Simulationsstudie wurden alle diese Daten aus detaillierten Informationen, welche über das reale System verfügbar waren, gewonnen und entsprechend in ein Modell überführt. Das Lagerlayout wurde maßstabgetreu mit Hilfe der Lagerbausteine der Simulationssoftware modelliert.

Dabei wurden die Regale unter Betrachtung der individuellen Regalebene und -höhen, und deren Eignung für die Lagerung der einfachen und doppelstöckigen Paletten abgebildet. Die Pufferflächen für den Wareneingang, den Warenausgang sowie für die Kommissionierbereiche dienen als Systemgrenzen und somit als Quellen und Senken für die umgeschlagenen Paletten. Jede Palette wird dabei durch ein einzelnes Objekt modelliert. Sie können einfach oder doppelstöckig gehandhabt werden und haben zusätzlich Artikeltyp, Größe, Gewicht und Mindesthaltbarkeitsdatum der Waren als Attribute. Die Modellierung der entsprechenden Systemlastdaten erfolgte auf Basis der realen Auftragsdaten aus dem betrachteten Lager für eine typische Woche. Dazu ist sowohl die Abbildung des Lagerbestands zu Beginn der betrachteten Woche als auch die Berücksichtigung der abgewickelten Menge eingehender und ausgehender Paletten im Zeitverlauf vorgenommen worden, da beide Faktoren das Fahrverhalten und die Leistung des Systems bestimmen. Die Implementierung der Strategien zur Auswahl eines Lagerplatzes für eingehende Paletten sowie die Auslagerstrategie zur Auswahl einer ausgehenden Palette erfolgte auf Basis der Logik der Lagerverwaltungssoftware (Zonung, ABC-Klassifizierung) des realen Systems. Abbildung 3 zeigt einen Ausschnitt des Simulationsmodells als 3D-Screenshot.

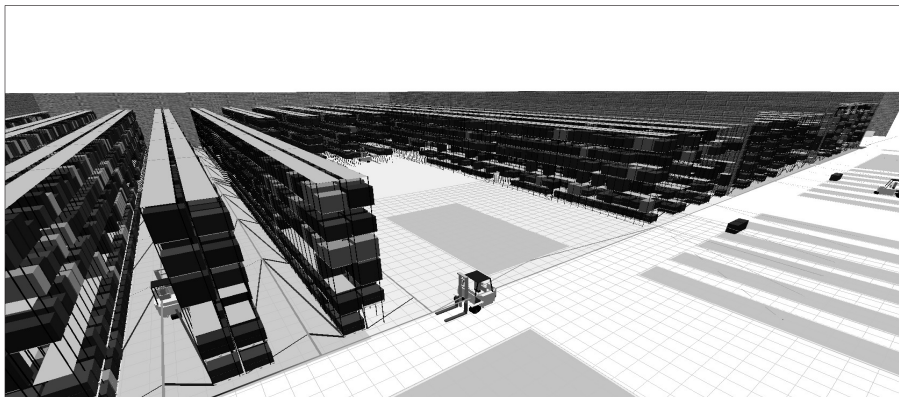


Abbildung 3: 3D-Screenshot Simulationsmodell

Für die entsprechend notwendigen Bewegungen der Gabelstapler werden die Transportwege mit Hilfe eines bidirektionalen Netzwerks auf Grundlage der tatsächlichen Wegstrecken abgebildet. Jeder Stapler hat eine Kapazität von einer einfachen oder einer doppelstöckigen Palette, die Wegfindung im Netzwerk erfolgt über einen Dijkstra Algorithmus, der die kürzeste Wegstrecke berechnet. Die relevanten Prozesszeiten für die Bearbeitung der Transportaufträge werden auf der Grundlage einer umfangreichen Studie des Unternehmens selbst bestimmt. Dabei wurde zwischen den Hub- und Senkzeiten sowie den Be- und Entladezeiten unterschieden. Es ist eine spezielle Netzwerkkonfiguration gewählt worden, um das Problem der Blockade der Gabelstapler untereinander in einem Gang während einer Ein- oder Auslagerung berücksichtigen zu können. Die Regalgassen sind dazu in gleichgroße Abschnitte unterteilt worden, welche mit der Größe der Lagermodule übereinstimmen. Über die Ereignisse der Ein- und Auslagervorgänge werden die

Sperrung und Freigabe des betroffenen Streckenabschnitts vorgenommen. Somit es ist möglich, die spezifischen Abschnitte in einem Gang beim Ein- oder Auslagern einer Palette in/aus einem Lagermodul zu realisieren. Im Modell wurde zwischen zwei verschiedenen Streckenabschnitten unterschieden. Die Streckenabschnitte in den Hauptgängen und bei den Warenein- und -ausgangsflächen sind aufgrund der ausreichenden Gangbreite immer offen, da diese von mehreren Gabelstaplern nebeneinander befahren werden können. Die Gassen zwischen den Regalen werden aufgrund der schmaleren Gangbreite abschnittsweise wie beschrieben gesperrt. Zur angemessenen Abbildung der Umschlagkapazität ist der reale Schichtplan der Gabelstaplerflotte in das Modell integriert worden. Die Gabelstapler werden dabei einem der drei Teams zugewiesen: Dem Wareneingangsteam für die Einlagerung der eingehende Ware ins Lager, dem Warenausgangsteam zur Auslagerung der ausgehenden Ware in die Ziel-Pufferbereiche und den Kommissionierbereich sowie das Value-Added-Service-Team zur Ver- und Entsorgung des Value-Added-Service-Bereichs.

Basierend auf den theoretischen Überlegungen aus Kapitel 2 wurde eine multikriterielle Prioritätskennzahl entwickelt, die für die zentrale Einsatzsteuerung von Staplern mehrerer Teams geeignet ist. Diese dynamische Kennzahl basiert auf vier unterschiedlichen Levels, welche in Abbildung 4 visualisiert sind und im Folgenden näher erläutert werden:

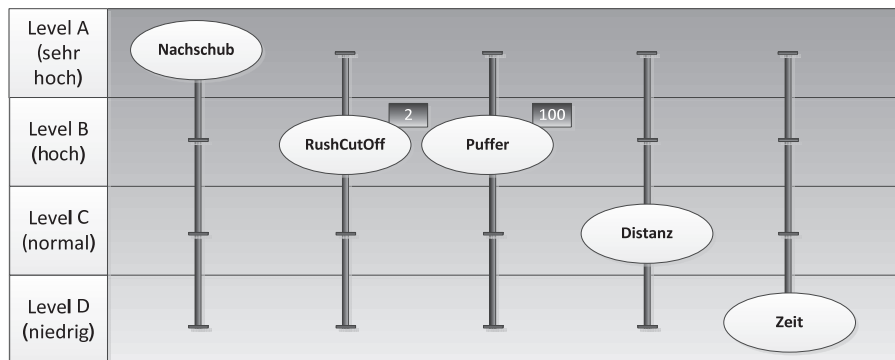


Abbildung 4: Level der multikriteriellen Einsatzsteuerung

Level A: Zu dem höchsten Level gehören alle Transportaufträge, die als Nachschubaufträge auf Kommissionierplätze gefahren werden. Um die Kommissionierung nicht zu beeinträchtigen, besitzen diese Aufträge immer die höchste Priorität. Bei mehreren Nachschubaufträgen im System entscheiden die Kriterien der Level B, C bzw. D, welcher Auftrag als nächstes gefahren wird.

Level B: Hierzu gehören Transportaufträge, die entweder aufgrund von zeit- oder auslastungsbasierten Kriterien priorisiert abgefahren werden müssen. Da alle Warenausgangsaufträge fest vorgegebene CutOffs für die Abfertigung besitzen, müssen diese priorisiert abgefertigt werden, sobald die rechtzeitige Bereitstellung der Paletten auf den Warenausgangsflächen gefährdet ist. Durch Abgleich der Systemlast und der Prozessparameter wurden 2 Stunden vor CutOff als Grenze definiert. Unterschreitet ein Auftrag während des Simulationslaufs diese Grenze

wird er als Level B eingestuft. Dies gilt auch für Aufträge der Wareneingangsfläche, sobald eine Kapazität von 100 Paletten erreicht ist, da sonst die Abfertigung von eingehenden Fahrzeugen behindert wird. Sind mehrere Aufträge zur gleichen Simulationslaufzeit auf dem Level B, werden die Aufträge höher priorisiert, die bereits länger das Level B erreicht haben bzw. stärker die definierte Kapazitätsgrenzen der Puffer überschreiten.

Level C: Befinden sich keine Aufträge vom Level A oder B im System wird zuerst der Auftrag mit der kürzesten Entfernung (Short-Travel-Distance-First) abgefahren um Leerfahrten zu reduzieren.

Level D: Bei Aufträgen, die identische Entfernungen zur Position des freiwerdenden Staplers aufweisen, definiert die FCFS (First-Come-First-Serve) Regel den nächsten Auftrag. Dies geschieht beispielsweise wenn mehrere Paletten in der Wareneingangsfläche abzufertigen sind.

5 Simulationsexperimente und Ergebnisse

Für den detaillierten Vergleich verschiedener Szenarien in der Simulationsstudie ist eine entsprechend differenzierte Auswertemöglichkeit der Transportleistung geschaffen worden. Die Messung der Systemleistung erfolgt dabei nach den Prozesszeitanteilen eines Auftragsdurchlaufes. Nach der Zuordnung eines Staplers zu einem Auftrag muss dieser zunächst eine *Leerfahrt* zum Auftragsquellort durchführen. Während dieser Zeit kann er durch andere Stapler blockiert sein, diese Zeit wird entsprechend separat ausgewiesen (*Blockingzeit*). Bei Auslageraufträgen muss dann eine *Hubzeit* erfolgen, bevor eine Palette aufgenommen werden kann. Im Anschluss an diese *Lastaufnahmezeit* muss dann auch die *Senkzeit* berücksichtigt werden. Im Falle von Einlageraufträgen entfällt die Hub- und Senkzeit bei der Lastaufnahme, da die Paletten vom Boden aufgenommen werden. Anschließend erfolgt die *Lastfahrt* des Staplers zum Zielort des Auftrags, während der ebenfalls eine *Blockingzeit* entstehen kann. Je nach Höhe des zugewiesenen Lagerplatzes muss bei Einlageraufträgen dann eine *Hubzeit* und nach Durchführung der Lastabgabe eine *Senkzeit* berücksichtigt werden. Nach abgeschlossenem Prozesszyklus bekommt der Stapler über mobile Terminals einen neuen Auftrag zugewiesen. Befinden sich keine wartenden Aufträge im System entsteht eine *Wartezeit*, bis neue Aufträge eingelastet werden.

Das entwickelte Modell ist zunächst auf Grundlage der Studie, die das Unternehmen zur Untersuchung der Prozesszeiten durchgeführt hat, erfolgreich validiert worden. Die aus der Studie bekannten durchschnittlichen Prozesszeiten für die verschiedenen Prozessabschnitte einer Auftragsdurchführung sind dabei den Ergebnissen der Simulation differenziert nach den verschiedenen Teams gegenübergestellt worden. Zusätzlich wurden die in der Prozessuntersuchung des Unternehmens genutzten Referenzstrecken für die Beurteilung der Last- und Leerfahrtanteile mit den entsprechenden Transportzeiten im Modell verglichen. Die Ergebnisse belegten, dass das entwickelte Simulationsmodell alle Teams des realen Systems richtig repräsentiert und für weitere Studien zur Verbesserung der Systemleistung genutzt werden kann.

Für das anschließend durchgeführte Szenario zur Untersuchung der neuen Einsatzsteuerung wurde die in Kapitel 4 dargestellte, multikriterielle

Einsatzsteuerung implementiert. Die neue Steuerung fasst alle Stapler des vorherigen Wareneingangs- und Warenausgangsteams zu einem neuen Team zusammen und ermöglicht eine Zuweisung aller Ein-, Aus- sowie Nachschubaufträge zu allen Staplern. Ausgenommen von dieser teamübergreifenden Vergabe ist die Ver- und Entsorgung des Value-Added-Service-Bereichs. Da dieser durch ein Drittunternehmen betrieben wird, waren zum Projektzeitpunkt noch nicht die prozessmäßigen und datenseitigen Schnittstellen einer Integration gegeben.

Um eine Vergleichbarkeit der Ergebnisse zu gewährleisten, erfolgte die Gegenüberstellung der Ergebnisse der neuen Einsatzsteuerung mit den Ergebnissen des Validierungsszenarios. Die Anzahl und Schichtplanung der eingesetzten Stapler blieb dabei in beiden Szenarien gleich. Abbildung 5 zeigt den Vergleich der durchschnittlichen Prozesszeitanteile je Auftragszyklus.

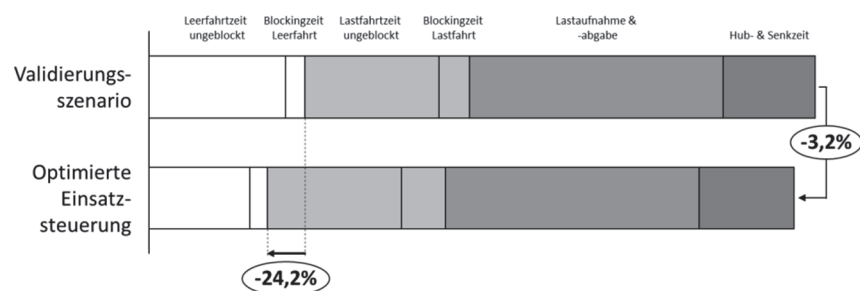


Abbildung 5: Vergleich der durchschnittlichen Ausführungszeit eines Transportauftrags für das Validierungsszenario und die optimierte Einsatzsteuerung

Es zeigt sich, dass die Nutzung der neuen Einsatzsteuerung eine deutliche Einsparung der Leerfahrtzeit von 24,2% bewirkt, da kürzere Anschlussstrecken zwischen den Auftragsquellorten ermöglicht werden. Jedoch erfolgt eine leichte Erhöhung des durchschnittlichen Zeitanteils der geblockten Lastfahrt. Diese entsteht aufgrund der insgesamt größeren Staplerflotte, welche dann vor allem bei der Einlastung einer großen Menge an Einlageraufträgen von Paletten mit ähnlichen Eigenschaften die Wahrscheinlichkeit von Stauwirkungen in den betroffenen Lagergassen erhöht. Alle weiteren Zeitanteile der Auftragsdurchführung werden durch die angepasste Einsatzsteuerung nicht beeinflusst und bleiben daher gleich. Insgesamt ergibt sich in diesem Szenario somit ein direktes Einsparpotential von 3,2% der durchschnittlichen Auftragsausführungszeit.

Indirekt ergeben sich jedoch zusätzliche Potentiale zur Effizienzsteigerung des Betriebs. Ersichtlich wird dies bei der Betrachtung des Bestands an wartenden Transportaufträgen im Zeitverlauf, wie er jeweils für die beiden Szenarien in Abbildung 6 dargestellt ist.

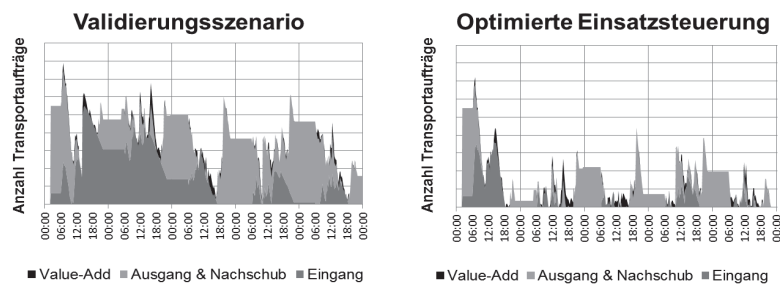


Abbildung 6: Entwicklung des Auftragsbestands über die Zeit für das Validierungsszenario und das Szenario mit optimierter Einsatzsteuerung im Vergleich

Aufgrund der deutlich erhöhten Flexibilität in der Steuerung, die sich durch die Konsolidierung der Staplerteams für Warenein- und -ausgang ergibt, werden die verfügbaren Aufträge schneller bearbeitet. So ist es im Rahmen der operativen Betriebssteuerung möglich, die Staplerkapazität besser dem tatsächlichen Auftragsbestand anzupassen.

Ferner zeigte sich bei der Auswertung der RushCutOffs, dass das gewählte Intervall von zwei Stunden erfolgreich zur Einhaltung der geforderten Servicekriterien beiträgt. Etwa 2% der Aufträge wurden zum Zeitpunkt der Vergabe als Level B mit einem RushCutOff bewertet. Von diesen Aufträgen erhielten jedoch nur ca. 25% den RushCutOff auf Basis der nachteiligen Position des Auftragsquellorts im Layout. In allen anderen Fällen war die Vergabe der Priorisierung durch den Zeitpunkt der Auftragseinlastung begründet, welcher sehr nah oder bereits nach der definierten CutOff-Zeit des Warenausgangsauftrags lag. Die Auswertung der Überprüfung der Wareneingangsf lächen zeigte, dass sich über die Woche kurzfristige Spitzenlasten ergeben. Diese lassen sich durch die dynamische Integration der kritischen Flächenauslastungen in die Einsatzsteuerung erfolgreich für den praktischen Anwendungsfall integrieren.

6 Fazit

Der vorliegende Beitrag zeigt die erfolgreiche Entwicklung und Implementierung einer multikriteriellen Einsatzsteuerung in der Simulation eines manuell bedienten Distributionslagers. Durch die überwiegend wegoptimierte Vergabe der Transportaufträge konnten Leerfahrten um circa 25% reduziert werden, was bezogen auf die gesamte Staplerflotte eine Verbesserung der durchschnittlichen Auftragsausführungszeit von 3,2% bedeutete. Ferner ermöglicht die teamübergreifende Vergabe der Transportaufträge eine flexiblere Nutzung der Staplerkapazitäten, was die operative Anpassung an die dynamischen Sendungslasten erleichtert. Durch die Berücksichtigung zusätzlicher praktischer Anforderung in der Steuerungslogik mit Hilfe verschiedener Prioritätslevel konnte die Anwendbarkeit der Einsatzsteuerung im realen System gewährleistet werden.

Wesentlich war dabei die intelligente Integration der CutOff-Zeiten im Warenausgang sowie der Kapazitätsgrenzen von Pufferflächen.

Literatur

- Arnold, D. (Hrsg.); Isermann, H. (Hrsg.); Kuhn, A. (Hrsg.); Tempelmeier, H. (Hrsg.); Furmans, K. (Hrsg.); Handbuch Logistik. 3. Auflage. Berlin: Springer, 2008.
- Clausen, U.; Kaffka, J.; Diekmann, D., Mest, L.: Impact of different Unloading Zone Locations in Transshipment Terminals under various Forklift Dispatching Rules. In: Jain, S. et al. (Hrsg.): Proceedings of the 2011 Winter Simulation Conference for a Sustainable World, S. 1663-1672, Phoenix, 2011.
- De Koster, R.; Le-Anh, T.; Van der Meer, R.: Testing and classifying vehicle dispatching rules in three real-world settings. *Journal of Operations Management* 22 (2004), S. 369-386.
- Egbelu, P.; Tanchoco, J.: Characterization of automated guided vehicle dispatching rules. In: *International Journal of Production Research* 22 (1984), Nr.3, S. 359 - 374.
- Fay, A.; Jerenz, S.; Seitz, N.: Dezentrale Steuerung von Transportsystemen in Analogie zum Routing in Datennetzen. In: *Automatisierungstechnik* 56 (2008), S. 284-295.
- Gudehus, T.: *Dynamische Disposition – Strategien, Algorithmen und Werkzeuge zur optimalen Auftrags-, Bestands- und Fertigungsdisposition*. 3.Auflage. Berlin: Springer, 2012.
- Günther, H.-O.; Lehmann, M.; Raffel, W.-U.; Wagner, G.: *Modellierung und Simulation Fahrerloser Transportsysteme als Multiagentensysteme*. 4. DFG-Kolloquium SPP Agenten, Bonn: 2001.
- Helle, F.: Software statt Stapler. In: *LT-Manager* 3 (2011), S. 70-73.
- Klein, C.; Kim, J.: AGV dispatching. In: *International Journal of Production Research* 34 (1996), Nr. 1, S. 95-110.
- Koo, P.-H.; Jang, J.: Vehicle Travel Time Models for AGV Systems under Various Dispatching Rules. In: *The International Journal of Flexible Manufacturing Systems* 14 (2002), Nr. 3, S.249-261.
- Lampe, H.: *Untersuchung von Dispositionsentscheidungen in Umschlagterminals des Kombinierten Verkehrs Schiene/Straße*. Dortmund. Praxiswissen, 2006.
- Le-Anh, T.; De Koster, M.B.M.: A review of design and control of automated guided vehicle systems. In: *European Journal of Operational Research* 171 (2006), S. 1-23.
- Scheid, W.-M.: Optimierung manueller Transporte: Theoretische Überlegungen zu Stapler-Leitsystemen. In: *Fördertechnik: Zeitschrift für Logistik, Materialfluss, Transport- und Lagertechnik* 70 (2001), Nr. 9, S. 22-24.
- Scholl, K.-U.; Klein, M.; Gaßmann, B.: Zentrale Aufgabenverteilung in einem fahrerlosen Transportsystem. In: *19. Fachgespräch Autonome Mobile Systeme* (2005), S. 253-259.
- VDI-Richtlinie 3633 Blatt 1: *Simulation von Logistik-, Materialfluss- und Produktionssystemen*. Düsseldorf: VDI 2010.