

Entwicklung einer dynamischen Routenfindung in hybriden Mensch-Roboter-Kommissioniersystemen

Development of dynamic routing in hybrid human-robot order picking systems

Dirk Kauke, Angelika Rett, Johannes Fottner, Technische Universität München,
Lehrstuhl für Fördertechnik Materialfluss Logistik, Garching (Germany),
dirk.kauke@tum.de, angelika.rett@tum.de, j.fottner@tum.de

Abstract: Over the past years the e-commerce sector has been growing continuously while the shortage of personnel has worsened. Therefore, companies increasingly use mobile picking robots in their order picking systems. These robots are capable of picking articles independently, it is however not yet possible to rely solely on them. When robots and humans work alongside in hybrid order picking systems, they inevitably interact with each other, which can create blockages in the picking aisles and reduces the performance of the whole system. This paper investigates a dynamic approach to routing of the robots within the warehouse to actively avoid interactions with other participants. It is shown that independent of the size of a warehouse this strategy has the potential to increase the performance of a hybrid order picking system.

1 Einleitung

Das anhaltende Wachstum des Onlinehandels sowie ein steigender Fachkräftemangel in der Transport- und Logistikindustrie (Kohl; Pfretzschner, 2019) hat dazu geführt, dass bereits seit einigen Jahren die Einsatzmöglichkeiten von Robotern in der Intralogistik untersucht werden. Besonders durch den Einsatz von autonom kommissionierenden Robotern in Person-zu-Ware Kommissioniersystemen, sogenannten Mobile-Picking-Robots (MPRs), erhofft man sich Erleichterung in dieser Situation. Aktuell stellt jedoch die Greiffunktion der Roboter noch eine große Herausforderung dar. Die Roboter können aufgrund der unterschiedlichen Maße der gelagerten Produkte nicht alle Artikel des Sortiments sicher greifen. Somit ist es zumindest bisher im Allgemeinen noch nicht möglich, komplett auf menschliche Arbeitskräfte zu verzichten. Es bietet sich allerdings an, ein hybrides Kommissioniersystem zu nutzen, in welchem die MPRs parallel zu den Menschen selbständig kommissionieren, um so die Vorteile, die der Einsatz von Robotern bietet, möglichst weit auszunutzen.

Durch die Zusammenarbeit kommt es aber unvermeidbar zu Interaktionen zwischen Menschen und Robotern, was zu Verzögerungen führt. Durch erzeugte Staus oder Blockaden in den Lagergassen wird die Leistung des gesamten Systems gesenkt. Daher soll eine dynamische Routenführung die Interaktionen so weit wie möglich vermeiden.

2 Stand der Forschung

Der Einsatz mobiler Roboter innerhalb der Kommissionierung wird bereits seit vielen Jahren in der Wissenschaft untersucht. Bereits 2008 stellten Wurmman und D'Andrea ihr Konzept zum Einsatz von mobilen Robotern in der Kommissionierung vor (Wurman et al., 2008; Andrea und Wurman, 2008). Das Konzept, welches heute als *Robotic Mobile Fulfillment Center (RMFC)* beschrieben wird, sieht eine Flotte an Fahrerlosen Transportfahrzeugen (FTF) vor, die mobile Regale zu Pickplätzen transportieren, an denen der Mensch die geforderten Produkte entnimmt. Die Besonderheit hier ist die räumliche Trennung der Arbeitsbereiche von Menschen und Robotern.

Einen ähnlichen Einsatz findet man bei den *Pick-Support-AGVs*. In diesem Fall assistieren die FTFs dem Menschen bei der Kommissionierung, indem sie beispielsweise Leer- oder Vollgut transportieren und der Mensch lediglich das Greifen der Artikel übernimmt. Im Gegensatz zu den RMFCs teilen sich Mensch und Roboter einen Arbeitsbereich. Erste Untersuchungen finden sich bei Azadeh et al. (2020), Loffler et al. (2019) und Žulj et al. (2020). In keiner der Arbeiten werden jedoch Interaktionen zwischen Menschen und Robotern und daraus resultierende Leistungsverluste berücksichtigt.

Die dritte Gruppe an mobilen Robotern in der Kommissionierung, die *Mobile-Picking-Robots*, übernehmen neben dem Transport ebenfalls eigene Pickvorgänge. Die MPRs können somit autonom vom Menschen im System agieren. Zwar unterliegt insbesondere das Greifen von heterogenen Artikeln umfassender Forschung, jedoch haben erst vereinzelte Arbeiten eine ganzheitliche Ausgestaltung von solch hybriden Kommissioniersystemen untersucht (Kauke und Fottner, 2020; Kauke et al., 2021).

Vernachlässigt wird bis dato vor allem die dynamische Anpassung von Routen, der in der außerbetrieblichen Logistik in den letzten Jahren hingegen viel Aufmerksamkeit gewidmet wurde. Ein Großteil der Veröffentlichungen betrachtet als Ursache für die Dynamik den Eingang von Kundenaufträgen, nachdem Touren gestartet wurden, was dazu führt, dass Routen nachträglich angepasst werden müssen, um diese Kundenaufträge zu erfüllen (Kucharska, 2019; Lorini et al., 2011; Moretti Branchini et al., 2009). Es lassen sich aber auch Arbeiten finden, die Routen basierend auf der benötigten Gesamtfahrtzeit optimieren und dabei die aktuelle Verkehrslage analysieren (Fleischmann et al., 2004; Güner et al., 2012). Die vermutlich bekannteste Umsetzung in diesem Bereich ist Google Maps.

Unter dem Stichwort *Conflict-Free AGV Routing* lassen sich auch im Bereich der Intralogistik zahlreiche Veröffentlichungen finden, die sich mit der Routenplanung von Automated Guided Vehicles (AGVs) beschäftigen. Jedoch werden die zukünftigen Aufenthaltsorte aller AGVs lediglich basierend auf der ihnen zugewiesenen Tour bestimmt, wobei ungeplante Verzögerungen nicht berücksichtigt werden (Möhring et al., 2005; Solichudin et al., 2020).

Weitaus weniger Arbeiten untersuchen eine dynamische Anpassung der Route basierend auf der aktuellen Auslastung des Systems (Maza und Castagna, 2005; Nguyen Duc et al., 2020; Secchi et al., 2015).

3 Zielsetzung

Sowohl im Bereich der dynamischen Routenfindung als auch im Bereich der hybriden Kommissioniersysteme ist deutlicher Forschungsbedarf zu erkennen. Dieser Beitrag setzt daher gezielt an der Schnittstelle der beiden Bereiche an und untersucht, ob der Einsatz einer dynamischen Routingstrategie die Gesamtleistung eines hybriden Systems positiv beeinflussen kann. Es stellt sich außerdem die Frage, ob sich Unterschiede hinsichtlich des Leistungszuwachses in Abhängigkeit von der Agentenanzahl feststellen lassen.

4 Simulationsmodell

Um die komplexen Interaktionen zwischen Menschen und Robotern sowie die zahlreichen dynamischen Einflüsse auf die Systemleistung eines hybriden Systems untersuchen zu können, wird im Zuge dieser Arbeit ein Simulationsmodell genutzt. So ist es möglich, die entwickelten Strategien in unterschiedlichen Szenarien und unter zufälliger Variation definierter Parameter zu untersuchen, was analytisch nicht sinnvoll umsetzbar wäre.

4.1 Grundkonzept

Im Zuge früherer Arbeiten (Kauke und Fottner, 2020; Kauke et al., 2021) wurde bereits ein Planungstool in Form eines Simulationsmodells erstellt, welches mit der Simulationssoftware Tecnomatix Plant Simulation umgesetzt ist. Dieses Modell ermöglicht es, unterschiedlichste Parameter eines dargestellten Lagers zu variieren, wie beispielsweise das Layout oder die Anzahl der eingesetzten Agenten. Das Tool soll nun um die benötigten Funktionen erweitert werden, sodass der Einfluss von dynamischer Routenführung auf die Leistung des Systems untersucht werden kann.

4.1.1 *Layout*

Das Layout (Abb. 1) stellt die gewählte Konfiguration des Lagers sowie die Bewegungen der Agenten grafisch dar. Hellgraue Kacheln symbolisieren befahrbare Knoten, dunkelgraue Kacheln im oberen Teil der Abbildung die Regale. Die einzelnen dunkelgrauen Kacheln am unteren Rand des Layouts repräsentieren Depots, welche Ausgangs- und Zielort einer Kommissioniertour sind. Befahrbare Kacheln können sowohl vertikal als auch horizontal durchquert werden, das diagonale Wechseln auf ein angrenzendes Feld ist jedoch nicht möglich. Auch kann ein Feld immer nur von einem Agenten gleichzeitig befahren werden.

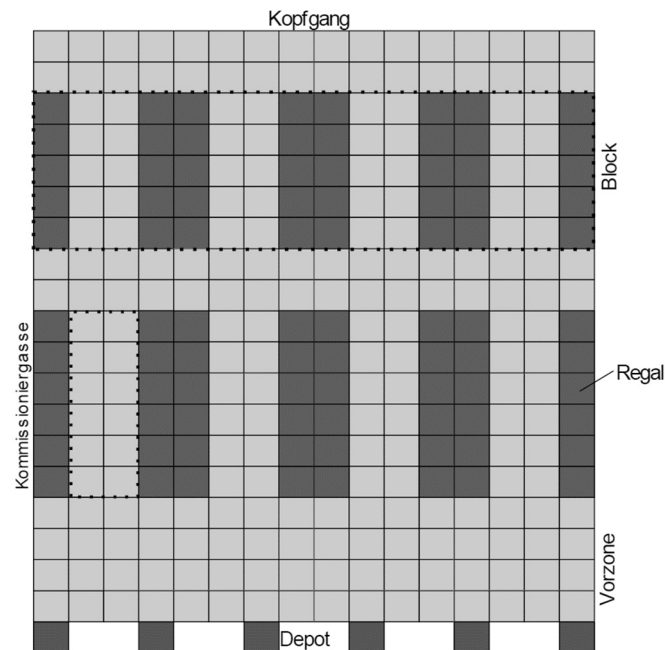


Abbildung 1: Beispielhaftes Lagerlayout

Frei variierbare Parameter sollen es einerseits ermöglichen, ein reales System zu Planungszwecken möglichst genau nachzubilden und andererseits viele verschiedene Layoutvarianten simulativ untersuchen zu können. Zu diesen Parametern zählen:

- Anzahl der Blöcke
- Anzahl der Gassen je Block
- Länge der Gassen
- Anzahl der Depots

4.1.2 Interaktionen

MPRs verfügen üblicherweise über Sicherheitstechnik, die Zusammenstöße mit Hindernissen verhindern soll. Nähert sich der Roboter einem Hindernis, sodass sich dieses im vor ihm liegenden Warnbereich befindet, verringert er seine Geschwindigkeit, bewegt sich aber dennoch weiter. Detektieren die Sensoren jedoch ein Hindernis in der Sicherheitszone des Roboters, so hält dieser sofort an und setzt seinen Weg erst fort, wenn das Hindernis verschwunden ist. Um Zusammenstöße zu verhindern, verhalten sich Menschen intuitiv ähnlich wie die Roboter bei Hindernissen in der Sicherheitszone. Sie beschränken sich dabei allerdings auf die Geschehnisse direkt vor ihnen, weshalb die Sicherheitszone des Menschen im Modell weniger groß ausgeprägt ist. Es wird außerdem davon ausgegangen, dass der Mensch sehr viel flexibler ist als der Roboter und daher besser auf Hindernisse reagieren kann. Aus diesem Grund benötigt der Mensch keinen Warnbereich. In Abbildung 2 sind die Sicherheitszone und der Warnbereich des Roboters sowie die Sicherheitszone des Menschen dargestellt.

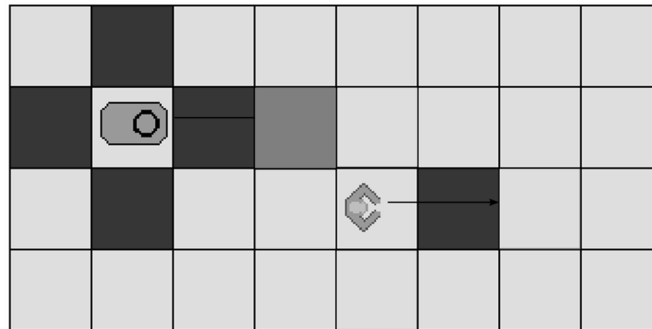


Abbildung 2: Sicherheitszone (dunkelgrau) und Warnbereich (hellgrau) von Roboter und Mensch

Für den Fall, dass zwei Agenten aufeinandertreffen, verfügen diese über Strategien zum Ausweichen. Einer der Agenten bleibt dabei jeweils stehen, während der andere seine Route anpasst. Die Ausweichmanöver werden vorrangig vom Menschen durchgeführt, da dieser flexibler und damit vor allem schneller als der Roboter ist. Jedoch verfügen auch die Roboter über die nötige Steuerung, um Hindernissen ausweichen zu können. Ausweichvorgänge führen allerdings zwangsläufig zu Verzögerungen, die minimiert werden können, wenn durch geschickte Routenplanung die Wahrscheinlichkeit des Aufeinandertreffens von zwei Agenten verringert wird.

4.1.3 Statisches Routing

Bevor Agenten das Depot verlassen, wird ihnen eine optimierte Kommissioniertour zugewiesen. Diese Tour enthält eine feste Anzahl an zu kommissionierenden Aufträgen, die zu einem Batch zusammengefasst sind, sowie die exakte Route zwischen den einzelnen Stopps. Die Reihenfolge der anzufahrenden Stopps und die Route ist bereits hinsichtlich einer minimalen Gesamtdauer der Tour optimiert. Die verwendeten Optimierungsverfahren betrachten jedoch lediglich die absoluten Entfernungen zwischen zwei Punkten und die Geschwindigkeit der Agenten, nicht jedoch die aktuelle Auslastung des Systems.

4.2 Dynamisches Routing

Ziel des dynamischen Routings ist es, während die Agenten im Lager unterwegs sind, flexibel auf aktuelle Hindernisse oder Engstellen in den Gassen reagieren zu können und die Routen der betroffenen Agenten so anzupassen, dass die Anzahl an Interaktionen minimiert wird. Es wird angenommen, dass der Mensch von Natur aus flexibel genug ist, um Hindernisse souverän und schnell zu umgehen, weshalb die vorgestellte Strategie nur bei den Robotern zum Tragen kommt.

Grundlage für die dynamische Route ist die zu Beginn einer Tour statisch ermittelte Route, welche noch nicht die Auslastung des Gesamtsystems berücksichtigt. Immer wenn ein Agent einen der ihm vorgegebenen Stopps erreicht und die geforderten Artikel gepickt hat, soll durch das dynamische Routing die geplante Route zum nächsten Stopp überprüft und gegebenenfalls entsprechend der aktuellen Auslastung optimiert werden. Es sollen zwei Optimierungsvarianten untersucht werden, welche im Folgenden erläutert werden.

4.2.1 *Optimierungsvariante 1: Anpassung der Route*

Einerseits soll die Möglichkeit untersucht werden, die Route zwischen den einzelnen Stopps anzupassen. Hierzu wird an jedem Stopp, nachdem der Agent die erforderlichen Artikel an dieser Position gepickt hat, eine Momentaufnahme der aktuellen Auslastung des Systems betrachtet und mit der vorgegebenen Route zum nächsten Stopp verglichen. Führt das nächste Teilstück über aktuell belegte Felder oder durch die Sicherheitszone anderer Agenten, so wird eine alternative Route zum nächsten Stopp ermittelt. Für die Berechnung wird der A*-Algorithmus verwendet, der die beste Route entsprechend der benötigten Wegzeit ermittelt. Um die momentane Auslastung berücksichtigen zu können, wird der Zeitbedarf für das Befahren eines belegten Feldes oder des Sicherheitsbereiches der anderen Agenten stark erhöht, wodurch diese Felder in der neuen Route meist vermieden werden. Der Roboter folgt der neuen Teilroute zum nächsten Stopp, pickt dort die geforderten Artikel und überprüft dann erneut die aktuelle Auslastung, um gegebenenfalls die nächste Teilroute zu optimieren.

4.2.2 *Optimierungsvariante 2: Anpassung der Reihenfolge der Stopps*

Aufbauend auf der Anpassung der Route soll des Weiteren untersucht werden, ob es mit der veränderten Route lohnenswert ist, die Reihenfolge der noch nicht angefahrenen Stopps zu verändern. Hierfür wird überprüft, ob die veränderte Teilroute bereits an späteren Stopps vorbeiführt. Sollte dies der Fall sein, so werden die betroffenen Stopps vorgezogen und vor dem eigentlich nächsten Stopp abgearbeitet. Dies soll verhindern, dass der Roboter wieder zurückfahren muss und Wegstrecke doppelt zurücklegt, da besonders Wendevorgänge viel Zeit in Anspruch nehmen. Nachdem die Reihenfolge der Stopps angepasst wurde, folgt der Agent der neu ermittelten Teilroute zu dem nun vorgezogenen Stopp, pickt dort die entsprechenden Positionen und prüft dann wieder die Auslastung auf dem Routenabschnitt zum nächsten geplanten Stopp.

5 **Ergebnisbetrachtung**

Als primärer Indikator für die Leistungsfähigkeit des Gesamtsystems wird der Durchsatz an Aufträgen innerhalb von zwei Schichten mit je 8 Stunden betrachtet. Des Weiteren gibt die durchschnittliche Wartezeit während einer Tour Auskunft darüber, ob die Funktionalität der angewandten Steuerung gewährleistet ist.

Es werden zwei Lagerkonfigurationen betrachtet, die ein kleines und ein großes Lager darstellen sollen. Die Konfigurationsparameter exakten Konfigurationen sind in Tabelle 1 zu finden. Sowohl die Gesamtanzahl an Agenten als auch die Verteilung von Menschen und Robotern werden systematisch variiert, um ihren Einfluss auf die Wirksamkeit des dynamischen Routings zu untersuchen.

Tabelle 1: *Untersuchte Layoutkonfigurationen*

	Anzahl Blöcke	Gassen je Block	Länge der Gassen	Anzahl Depots	Maximale Agentenanzahl eines Typs
Layout 1 – klein	1	15	12 m	8	12
Layout 2 – groß	1	11	48 m	8	18

5.1 Allgemeine Erkenntnisse

Es lassen sich basierend auf den Ergebnissen einige allgemeine Aussagen über hybride Kommissioniersysteme treffen, welche teilweise bereits in früheren Arbeiten getroffen wurden (Kauke und Fottner, 2020; Kauke et al., 2021), die der Vollständigkeit halber aber dennoch angeführt werden.

- Alle beschriebenen Effekte sind in beiden untersuchten Layouts zu beobachten.
- Mit steigender Agentenanzahl steigt tendenziell auch der Output. Es wird jedoch ein Leistungsmaximum erreicht, ab welchem die Performance aufgrund der steigenden Interaktionen wieder sinkt. In dem kleinen Layout liegt dieses Maximum bei 15 Agenten, das große Layout weist die maximale Leistungsfähigkeit mit 21 Agenten auf.
- Bei gleichbleibender Agentenzahl und steigendem Anteil der Roboter steigt die durchschnittliche Wartezeit pro Tour der Roboter. Es kommt zu mehr Roboter-Roboter Interaktionen, welche aufgrund der geringeren Geschwindigkeit der MPRs mehr Zeit in Anspruch nehmen als Ausweichvorgänge, an denen ein Mensch beteiligt ist. Der Anstieg der Wartezeit führt zu einem sinkenden Output.

5.2 Anpassung der Route

Um zunächst die grundsätzliche Frage der Funktionalität der dynamischen Routenanpassung zu klären, wird die Wartezeit je Tour betrachtet. Es ist klar zu erkennen, dass die Wartezeit des Roboters stark abnimmt, was bedeutet, dass die Anzahl der Interaktionen mit Beteiligung von Robotern deutlich verringert wurde. Auch die Wartezeit der Menschen sinkt leicht, was ebenfalls mit der Vermeidung von Interaktionen zu begründen ist. Der beschriebene Effekt ist in beiden Layoutvarianten zu erkennen, exemplarisch sind in Abbildung 3 die Ergebnisse aus dem kleinen Layout dargestellt.

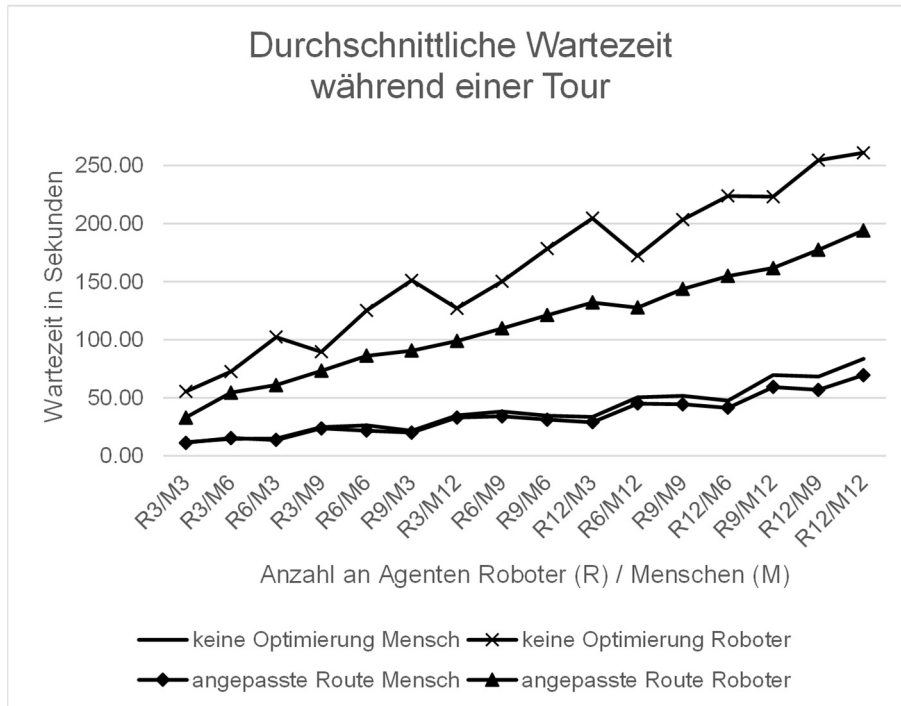


Abbildung 3: Entwicklung der Wartezeit von Mensch und Roboter in Layout 1

Um Zeitverluste durch Hindernisse zu vermeiden, wird beim dynamischen Routing ein längerer Weg in Kauf genommen. Trotz der erhöhten Fahrzeit sollte der Output dennoch nicht sinken, damit eine dynamische Steuerung vorteilhaft ist. Abbildung 4 zeigt den Einfluss, den die Routenanpassung auf den Durchsatz im untersuchten Layout 2 hat. Es wird deutlich, dass der Output durch die angewandte Strategie grundsätzlich gesteigert werden kann. Befinden sich jedoch nur sehr wenige Agenten im Lager, so wirkt sich die längere Route negativ auf die Gesamtleistung aus. Dies ist der Tatsache geschuldet, dass die Neuplanung der Route auch bei nur einem einzelnen Hindernis auf dem nächsten Wegabschnitt durchgeführt wird, was jedoch nicht immer die längere Wegstrecke rechtfertigt.

Mit wachsender Agentenanzahl steigt das Potential des dynamischen Routings und es ist ein positiver Effekt zu erkennen. Jedoch wird auch hier, wie beim Gesamtdurchsatz, ein Maximum erreicht, ab welchem die Verbesserung wieder sinkt. Befinden sich zu viele Agenten im Lager, so kommt es sowohl auf der ursprünglichen als auch auf der neu gewählten Route vermehrt zu Interaktionen, wodurch der positive Effekt des Umwegs weniger stark ausfällt.

Bei genauer Betrachtung des Diagramms 4 ist zu erkennen, dass der Verlauf bei konstanter Agentenanzahl jeweils ein lokales Maximum aufweist. Steigt der Anteil der Roboter, so wird auch der Effekt des dynamischen Routings zunächst größer, da die Strategie grundsätzlich öfter angewendet wird und so die Vorteile besser ausgenutzt werden können. Steigt der Roboteranteil jedoch weiter, so verringert sich

der Effekt wieder, da die Anzahl an zeitintensiven Roboter-Roboter Interaktionen zunimmt und so die Vorteile überschattet werden.

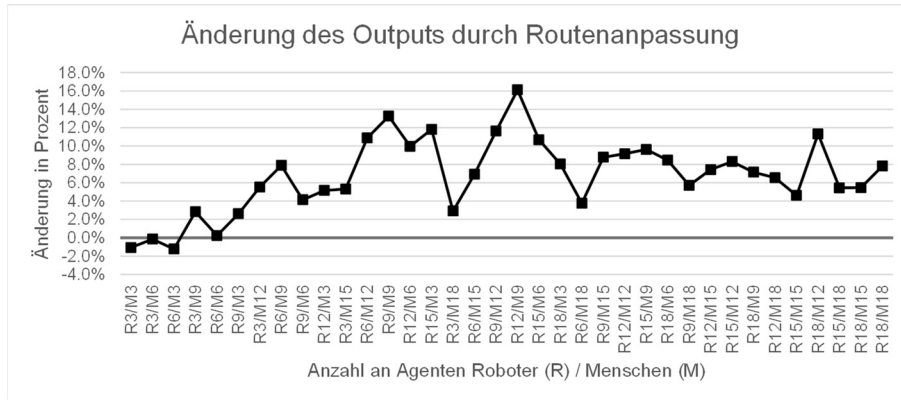


Abbildung 4: Prozentuale Veränderung des Outputs durch die Routenanpassung in Layout 2

5.3 Anpassung der Reihenfolge der Stopps

Nachdem bereits gezeigt werden konnte, dass eine dynamische Anpassung der Route positive Effekte hervorruft, soll der Output durch eine Anpassung der Reihenfolge der Stopps entsprechend der neuen Route noch weiter gesteigert werden. Die Ergebnisse der Untersuchung sind in Abbildung 5 dargestellt.

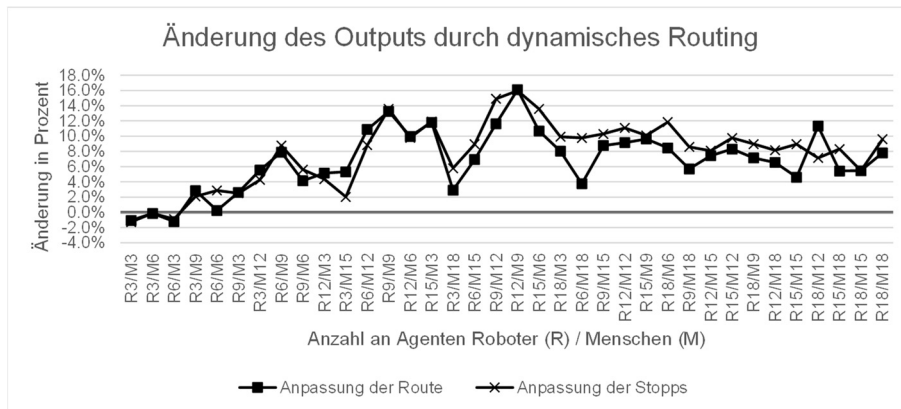


Abbildung 5: Prozentuale Veränderung des Outputs durch die beiden untersuchten Optionen des dynamischen Routings in Layout 2

Es wird schnell ersichtlich, dass der bereits erzielte positive Effekt durch die Anwendung beider vorgestellter Strategien im Allgemeinen noch stärker ausgeprägt ist. Es werden unnötige Wendevorgänge vermieden und Teilstrecken müssen nicht doppelt zurückgelegt werden. So kann die Fahrtzeit der Roboter noch weiter

verringert und der Output zusätzlich gesteigert werden. In seltenen Fällen wird der Output jedoch durch die zweite Optimierungsstufe im Vergleich zur ersten Stufe wieder verschlechtert, was darauf zurückzuführen ist, dass die Route zwar lokal verbessert, aber global verschlechtert wurde. Um dies zu vermeiden, sollte der Rest der Tour nach einer Anpassung der Reihenfolge der Stopps nochmal wie zu Beginn des statischen Routings mittels eines Optimierungsverfahrens global optimiert werden. Aus Gründen der Laufzeit und Rechenzeit wurde im Zuge dieser Untersuchungen allerdings darauf verzichtet.

6 Zusammenfassung und weiterer Forschungsbedarf

Wie der Stand der Forschung bestätigt, besteht im Bereich der hybriden Kommissioniersysteme besonders bei der dynamischen Routenführung großer Forschungsbedarf. Ziel dieser Untersuchung war es daher, den Einfluss von dynamischem Routing auf die Leistungsfähigkeit eines solchen Kommissioniersystems zu untersuchen. Da die Leistung in hybriden Systemen stark davon abhängt, wie harmonisch die Agenten zusammenarbeiten, soll die Zahl an zeitintensiven Interaktionen zwischen den Agenten verringert werden. Dazu wird die Route der MPRs hinsichtlich der aktuellen Auslastung dynamisch angepasst, um das Zusammentreffen mit anderen Agenten aktiv zu vermeiden und auf Hindernisse flexibel reagieren zu können.

Es wurde deutlich, dass eine dynamische Routenführung unabhängig von der Größe des Systems großes Potential bietet. Am Punkt des Leistungsmaximums des Systems ist der Effekt besonders stark ausgeprägt und der Output kann um bis zu 16% gesteigert werden. Ist die Anzahl an Agenten für die jeweilige Lagergröße jedoch sehr gering, so kommt es sogar zu leicht negativen Effekten. An dieser Stelle ist weiterer Forschungsbedarf zu erkennen. Wenn genaue Informationen über den Zeitbedarf der verschiedenen Arten von Interaktionen vorliegen, kann abgewogen werden, ob das aktuelle Hindernis den längeren Umweg tatsächlich rechtfertigt, oder ob die voraussichtliche Interaktion in Kauf genommen werden sollte.

Besonders im Hinblick auf die Anpassung der Reihenfolge der Stopps ist die Batchgröße ein Parameter, der in zukünftigen Untersuchungen betrachtet werden könnte. Je mehr Aufträge ein Agent innerhalb einer Tour zu erledigen hat, desto größer sollte auch die Wahrscheinlichkeit sein, dass einer der nächsten Stopps auf der neu gewählten Route liegt und das Potential der zweiten Optimierungsstufe ausgeschöpft werden kann. Erste Experimente im Zuge dieser Untersuchung haben hierzu noch keine eindeutigen Ergebnisse liefern können.

Die mögliche Leistungssteigerung des Gesamtsystems ist jedoch vor dem Hintergrund der Verlangsamung der Systemlandschaft auch kritisch zu betrachten, da die umfangreiche Steuerung einen hohen Rechenaufwand erfordert. Um reale Systeme in Echtzeit steuern zu können, muss ein solches System zunächst hinsichtlich der Laufzeit optimiert werden, bevor es sinnvoll eingesetzt werden kann.

Literatur

- Andrea, R.D.; Wurman, P.: Future Challenges of Coordinating Hundreds of Autonomous Vehicles in Distribution Facilities (2008), S. 80–83.
- Azadeh, K.; Roy, D.; Koster, M.R. de: Dynamic Human-Robot Collaborative Picking Strategies. SSRN Electronic Journal (2020).
- Fleischmann, B.; Gnutzmann, S.; Sandvoß, E.: Dynamic Vehicle Routing Based on Online Traffic Information. *Transportation Science* 38 (2004) 4, S. 420–433.
- Güner, A.R.; Murat, A.; Chinnam, R.B.: Dynamic routing under recurrent and non-recurrent congestion using real-time ITS information. *Computers & Operations Research* 39 (2012) 2, S. 358–373.
- Kauke, D.; Fottner, J.: Planungstool zur Entwicklung geeigneter Betriebsstrategien von mobilen Kommissionierrobotern. In: Kreuzfeldt, J. (Hrsg.): Tagungsband zum 16. Fachkolloquium der Wissenschaftlichen Gesellschaft für Technische Logistik e.V. (WGTL). Hamburg: Technische Universität Hamburg, Institut für Technische Logistik 2020,
- Kauke, D.; Sailer, F.; Fottner, J.: Mobile Picking Robots. In: Knapcikova, L.; Peraković, D.; Behúnová, A.; Perisa, M. (Hrsg.): 5th EAI International Conference on Management of Manufacturing Systems: A first study of the effects of human-robot-interactions in conventional order picking systems: Springer International Publishing 2021,
- Kohl, A.-K.; Pfretzschner, F., 2019: Logistikmonitor 2018: Der Wirtschaftszweig in Zahlen, BVL, Statista. Online verfügbar unter https://www.bvl.de/files/1951/1988/2128/Logistikmonitor_2018_-_Der_Wirtschaftszweig_in_Zahlen.pdf, zuletzt geprüft am 07.05.2021.
- Kucharska, E.: Dynamic Vehicle Routing Problem—Predictive and Unexpected Customer Availability. *Symmetry* 11 (2019) 4, S. 546.
- Löffler, M.; Boysen, N.; Schneider, M.: Picker routing in AGV-assisted order picking systems (2019), S. 44.
- Lorini, S.; Potvin, J.-Y.; Zufferey, N.: Online vehicle routing and scheduling with dynamic travel times. *Computers & Operations Research* 38 (2011) 7, S. 1086–1090.
- Maza, S.; Castagna, P.: Sequence Based Hierarchical Conflict-Free Routing Strategy of Bo-Directional Automated Guided Vehicles. *IFAC Proceedings Volumes* 38 (2005) 1, S. 168–173.
- Möhring, R.H.; Köhler, E.; Gawrilow, E.; Stenzel, B.: Conflict-free Real-time AGV Routing. In: Fleuren, H.; Hertog, D. den; Kort, P. (Hrsg.): *Operations Research Proceedings 2004*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg 2005, S. 18–24.
- Moretti Branchini, R.; Amaral Armentano, V.; Løkketangen, A.: Adaptive granular local search heuristic for a dynamic vehicle routing problem. *Computers & Operations Research* 36 (2009) 11, S. 2955–2968.
- Nguyen Duc, D.; Tran Huu, T.; Nananukul, N.: A Dynamic Route-Planning System Based on Industry 4.0 Technology. *Algorithms* 13 (2020) 12, S. 308.

- Secchi, C.; Olmi, R.; Rocchi, F.; Fantuzzi, C.: A dynamic routing strategy for the traffic control of AGVs in automatic warehouses. In: Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE) (Hrsg.): 2015 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA), Seattle, WA, USA, 26.05.2015 - 30.05.2015, 2015, S. 3292–3297.
- Solichudin; Triwiyatno, A.; Riyadi, M.A.: Conflict-free dynamic route multi-AGV using dijkstra floyd-warshall hybrid algorithm with time windows. *International Journal of Electrical and Computer Engineering (IJECE)* 10 (2020) 4, S. 3596.
- Wurman, P.; D'Andrea, R.; Mountz, M.: Coordinating Hundreds of Cooperative, Autonomous Vehicles in Warehouses Volume 29 Number 1 (2008), S. 9–19.
- Žulj, I.; Goeke, D.; Scheiner, M.; Salewski, H.: Order batching and batch sequencing in an AGV-assisted picker-to-parts system (2020), S. 1–32.