

Greif and Drive – Konzept für ein neuartiges roboterbasiertes Kommissionierprinzip

Greif and Drive – Concept for an innovative robot-based order picking principle

Lara Nehrke (ORCID 0000-0002-1581-2410)
Stephan Ulrich (ORCID 0000-0002-6194-6962)
Alice Kirchheim (ORCID 0000-0002-8529-425X)

Professur Technologie von Logistiksystemen
Fakultät Maschinenbau und Bauingenieurwesen
Helmut-Schmidt-Universität / Universität der Bundeswehr Hamburg

Der Beitrag dieser Veröffentlichung besteht in der Darstellung eines neuartigen Konzepts für ein Kommissionierprinzip mit dem Namen „Greif and Drive“. Es handelt sich dabei um ein automatisiertes, roboterbasiertes Kommissionierprinzip, das sich zum einen durch bewegliche Materialflusselemente (autonome mobile Roboter) und zum anderen durch Treffen an dynamischen Greiforten auszeichnet. Beides unterscheidet sich von existierenden Kommissionierprinzipien, weil dort mindestens ein zentrales Materialflusselement ortsfest ist. Hinsichtlich der Leistung, Flexibilität und Systemverfügbarkeit werden für das Konzept von Greif and Drive Hypothesen formuliert, woraus künftiger Forschungs- und Entwicklungsbedarf in den Bereichen Bewegungsplanung und Koordination, Anwendungsszenarien und Materialflusssimulation sowie Greifen und Handhaben identifiziert wird.

[Schlüsselwörter: Automatisierung, Autonome Mobile Roboter, Intralogistik, Kommissionierung, Onlinehandel]

The aim of this publication is to present a novel concept for a picking principle called „Greif and Drive“. It is an automated, robot-based picking principle which is characterized by moveable material flow elements (autonomous mobile robots) on the one hand and meetings at dynamic gripping locations on the other hand. Both differ from existing picking principles which feature at least one stationary material flow element. In terms of performance, flexibility and system availability, hypotheses are formulated for the concept of Greif and Drive, from which further research is identified in the areas of path planning and coordination, application scenarios and material flow simulation, as well as gripping and handling.

[Keywords: automation, autonomous mobile robots, intralogistics, order picking, e-commerce]

1 EINLEITUNG

Die Bedeutung der effizienten Gestaltung von Prozessen innerhalb von Distributionszentren zur Abwicklung der Kundenaufträge für die Endkundenbelieferung (B2C) hat in den letzten Jahrzehnten erheblich zugenommen. Die Ursache hierfür ist der wachsende Onlinehandel. Auch wenn es im Jahr 2022 einen Einbruch von 7,9 % gab, befindet sich das Niveau der Paketsendungen 14 % über dem Vorcorona Jahr und die Prognose ist steigend [1].

Die Auftragsstruktur im B2C-Onlinehandel zeichnet sich durch kleine Bestellmengen, ein breites, sich häufig änderndes Sortiment und schwankende Auftragseingänge aus. Außerdem fordern die Endkunden kurze Lieferzeiten [2], [3]. Es sind in diesen Distributionszentren daher eine hohe Anzahl verschiedener, sich unregelmäßig wiederholender Prozesse in kurzer Zeit effizient bei einem wechselnden Artikelspektrum zu realisieren. Die Prozesse im B2C-Onlinehandel sind gemäß dieser Anforderung zu gestalten. Da die Kommissionierung einer der zeit- und kostenintensivsten Prozesse innerhalb der Distributionszentren ist [4], wurden in den letzten Jahren vielfältige neuartige Kommissionierprinzipien vorgeschlagen [2], [5], [6], [7], wobei ein deutlicher Trend zur Automatisierung erkennbar ist.

Die Automatisierung des Kommissionierprozesses im B2C-Onlinehandel wird vermehrt mithilfe von Robotern realisiert, wie in Robotic Mobile Fulfillment Systemen (RMFS). RMFS gehören zur Roboter-zur-Person-Kommissionierung und funktionieren nach dem Kommissionierprinzip Ware-zur-Person. Die Kommissionierer und Sammelablagen sind stationär und die Bereitstelleneinheiten werden durch autonome mobile Roboter (AMR) zu den Kommissionierern transportiert [5].

Bei dem Kommissionierprinzip Person-zur-Ware sind die Bereitstellereinheiten stationär und der Kommissionierer bewegt sich mit einer Sammelablage dorthin, um die Entnahme durchzuführen [4]. In neueren Publikationen wird bei dem Einsatz eines mobilen Kommissionierroboters das Prinzip auch als Roboter-zur-Ware bezeichnet [7]. Beispiele hierfür sind Kommissioniersysteme von Magazin [8] und Brightpick [9]. Eine Erweiterung stellen Lee und Murray [10] vor, bei dem der Kommissionierroboter gemeinsam mit einem Transportroboter eingesetzt wird, der als Sammelablage fungiert.

Bei den bekannten Kommissionierprinzipien ist mindestens eines der zentralen Materialflusselemente (Bereitstellereinheit, Kommissionierer, Sammelablage) ortsfest [11]. Erfolgt die Bereitstellung stationär ist eine höhere Anzahl an Kommissionierern erforderlich, um einen vergleichbaren Durchsatz wie bei einer dynamischen Bereitstellung zu erzielen. Die Kommissionierer legen längere Wege zurück, wodurch unproduktive Zeiten entstehen [12]. Bei der dynamischen Bereitstellung für einen ortsfesten Kommissionierer sind hohe Investitionen für das automatische Lager- und Bereitstellensystem zu tätigen. Außerdem unterliegt dieses Kommissionierprinzip bei stark schwankenden Leistungsanforderungen einer eingeschränkten Flexibilität [11].

Nach Kenntnis der Autorinnen und Autoren, gibt es weder in der wissenschaftlichen Literatur noch in heutigen Kommissioniersystemen ein Kommissionierprinzip, in dem alle drei zentralen Materialflusselemente (Bereitstellereinheit, Kommissionierer, Sammelablage) sowohl beweglich als auch automatisiert sind. Einer der Gründe hierfür liegt in der Herausforderung des automatisierten Greifens eines hinreichend breiten Artikelspektrums. Mittelfristig ist jedoch von wirtschaftlich einsetzbaren Greifsystemen für diesen Einsatzzweck auszugehen. Basierend auf dieser Annahme besteht der Beitrag dieser Veröffentlichung in der Darstellung eines neuartigen Konzepts für ein Kommissionierprinzip mit dem Namen „Greif and Drive“, Hypothesen zu dessen Eigenschaften und der Darstellung von künftigen Forschungs- und Entwicklungsbedarf.

Der Beitrag gliedert sich wie folgt: Zuerst wird in Kapitel 2 die Methodik beschrieben, die auf der Design Science Research Methodologie nach Wieringa [13] und dem objektorientierten Modellierungsprozesses nach Kahlbrandt [14] beruht. Dann wird in Kapitel 3 das Konzept von Greif and Drive vorgestellt mit Fokus auf wesentliche Aspekte, die Greif and Drive auszeichnen. Kapitel 4 beinhaltet Hypothesen über das Konzept und den künftigen Forschungsbedarf.

2 METHODIK

Die angewandte wissenschaftliche Methode basiert auf dem Designzyklus der Design Science Research Methodologie nach Wieringa [13]. Das Ziel dieser Methode besteht darin praktische Probleme zu analysieren und Lösungen zu entwickeln. Der Designzyklus umfasst drei aufeinanderfolgende Schritte: Problemuntersuchung, Design und Validierung. In Kapitel 3 wird das Resultat der Designphase präsentiert. Dazu wird das Konzept für Greif and Drive anhand des objektorientierten Modellierungsprozesses gemäß Kahlbrandt [14] entwickelt. Die Vorgehensweise stammt aus dem Bereich des Software Engineering und zeichnet sich durch ihre Anwendbarkeit bei der Entwicklung von Systemen mit kooperierenden Hard- und Softwareobjekten aus [15]. Sie findet ebenfalls Verwendung im logistischen Umfeld und gilt zur Modellierung realer Systeme als etabliert [16]. In diesem Beitrag wird die Analysephase nach Kahlbrandt durchlaufen und das entworfene Konzept mittels der Unified Modeling Language (UML) visualisiert.

3 KONZEPT FÜR GREIF AND DRIVE

Greif and Drive ist ein Konzept für ein automatisiertes Kommissionierprinzip. Es zeichnet sich durch zwei wesentliche Aspekte aus:

1. Automatisierte, bewegliche Materialflusselemente (Bereitstellereinheit, Kommissionierer, Sammelablage): Die Bereitstellereinheit befindet sich auf einem Bereitstell-AMR und die Sammelablage befindet sich auf einem Kommissionier-AMR, der zusätzlich mit einem geeigneten Greifsystem ausgestattet ist. Es sind also im Gegensatz zu bekannten Kommissionierprinzipien alle Materialflusselemente beweglich.
2. Treffen am dynamischen Greifort: Der Greifort wird dynamisch zur Laufzeit berechnet und ggf. bei Ereignissen neu berechnet. An dem Greifort, der an einem beliebigen Punkt auf einer Kommissionierfläche liegt, treffen sich zu einem definierten Zeitpunkt Bereitstell- und Kommissionier-AMR. Diese flexible Bestimmung eines Greiforts gibt es in bekannten Kommissionierprinzipien nicht.

Im Folgenden werden diese beiden Aspekte im Detail dargestellt. In Abbildung 1 gibt das Anwendungsfalldiagramm einen Überblick über die beteiligten zentralen Materialflusselemente mit den zugehörigen Prozessen.

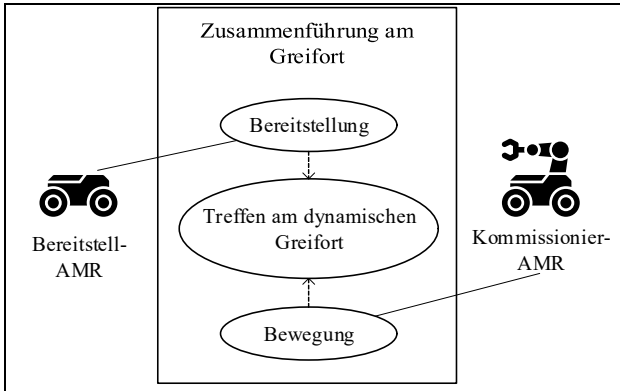


Abbildung 1. Anwendungsfalldiagramm zentraler Materialflusselemente mit zugehörigen Prozessen von Greif and Drive.

Automatisierte, bewegliche Materialflusselemente: Die zentralen Materialflusselemente von Greif and Drive sind Bereitstell-AMR (B-AMR) mit Bereitstelleinheit und Kommissionier-AMR (K-AMR) mit Sammelablage. Diese treffen sich auf einer Kommissionierfläche zum Zweck der Durchführung von Greifvorgängen. Der K-AMR greift dabei die Entnahmeeinheit aus der Bereitstelleinheit und legt sie in die Sammelablage. Die wesentlichen Prozesse sind hierbei die Bereitstellung durch B-AMR und die Bewegung von K-AMR. Der B-AMR transportiert eine Bereitstelleinheit aus dem Lager zu einer Kommissionierfläche. Die Übergabe der Bereitstelleinheit auf den B-AMR ist außerhalb der Systemgrenze des Konzepts Greif and Drive. Anschließend fährt der B-AMR für die Durchführung der Entnahme zum Greifort. Nach der Entnahme fährt der B-AMR entweder wieder in das Lager oder zu einem weiteren Greifort (Abbildung 2, links). Der K-AMR fährt mit der Sammelablage auf der Kommissionierfläche und ist mit einem geeigneten Greifsystem ausgestattet. Die Aufnahme und Abgabe der Sammelablage durch den K-AMR ist außerhalb der Systemgrenze des Konzepts Greif and Drive. Mit dem Greifsystem wird die Entnahmeeinheit aus der Bereitstelleinheit in die Sammelablage gelegt. Nach Abschluss des Kommissionierauftrags wird die Sammelablage an einen nachfolgenden Prozess übergeben (Abbildung 2, rechts). Zusammenfassend bearbeitet der K-AMR Kommissionieraufträge und verbleibt auf der Kommissionierfläche, während der B-AMR über die Systemgrenzen hinweg aus dem Lager Bereitstelleinheiten holt.

Treffen am dynamischen Greifort: Für die Entnahme ist ein Treffen von B-AMR und K-AMR am Greifort erforderlich. Ein Treffen ist durch Treffpunktkoordinaten auf der Kommissionierfläche und einen Treffzeitpunkt definiert. Das optimale Treffen wird nach vorgegebenen logistischen Zielgrößen berechnet. In die Berechnung des Treffens fließen die erwarteten Ankunfts- bzw. Bearbeitungszeiten des B-AMR und K-AMR ein. Der B-AMR hat eine erwartete Ankunftszeit bzw. Bearbeitungszeit. Die erwartete Ankunftszeit setzt sich beispielsweise aus der Übernahmezeit der Bereitstelleinheit

am Lager, Fahrzeit aus dem Lager, Wartezeit etc. zusammen. Die erwartete Bearbeitungszeit eines B-AMR entsteht, falls der B-AMR sich bereits für die Bearbeitung anderer Kommissionieraufträge auf der Kommissionierfläche befindet. Der K-AMR hat eine erwartete Bearbeitungszeit, die sich aus der Summe aller davorliegenden Zeitanteile wie Entnahme vorheriger Positionen, der Fahrzeit, Übergabe einer Sammelanlage an nachfolgende Prozessschritte etc. ergibt. Die erwarteten Ankunfts- bzw. Bearbeitungszeiten unterliegen Unsicherheiten durch unerwartete Ereignisse oder aufgrund von Wechselwirkungen übergeordneter, vorgelagerter, systeminhardt oder nachgelagerter Prozesse. Das optimale Treffen kann aufgrund dieser Unsicherheiten über die Zeit zu einem suboptimalen Treffen werden. Es ist dann erforderlich ein neues optimales Treffen unter den veränderten Bedingungen zu berechnen.

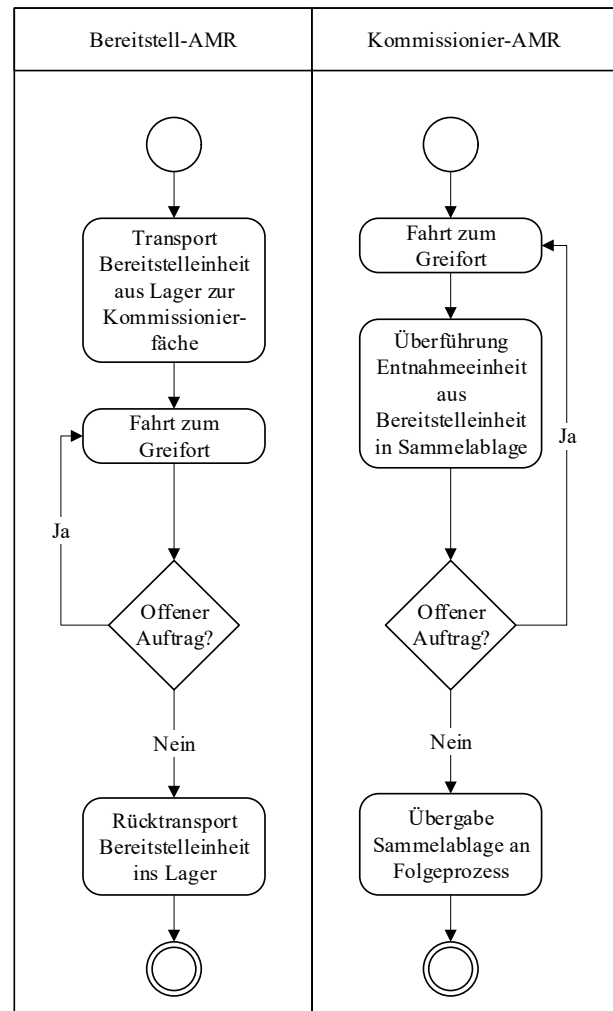


Abbildung 2. Aktivitätsdiagramm für Prozessbeschreibung der Bereitstellung durch Bereitstell-AMR (links) und Bewegung von Kommissionier-AMR (rechts).

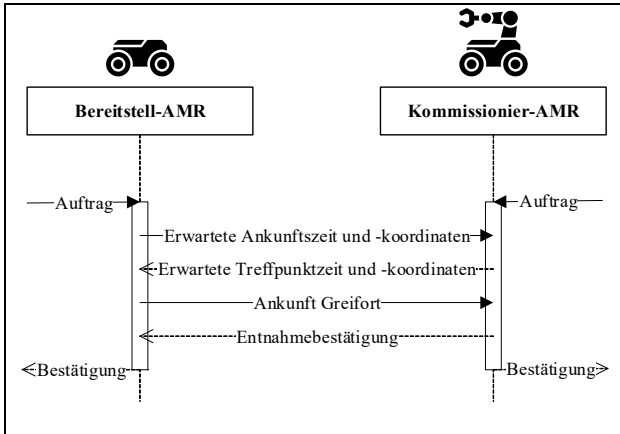


Abbildung 3. Sequenzdiagramm für den Prozess Treffen am Greifort und die Verarbeitung einer Position eines Kundenauftrags mit Greif and Drive.

Abbildung 3 zeigt das Sequenzdiagramm für ein Treffen zwischen B-AMR und K-AMR unter der Annahme einer dezentralen Steuerung. Alternativ ist auch eine zentrale Steuerung möglich. Zunächst erhalten beide AMR den Kommissionierauftrag. Der B-AMR beginnt mit der Bereitstellung und sendet seine erwartete Ankunftszeit und -koordinaten an den K-AMR. Der K-AMR berechnet auf Grundlage seiner erwarteten Bearbeitungszeit das optimale Treffen für den Greifort und schickt die erwartete Treffpunktzeit und -koordinaten zurück an den B-AMR. Für beide AMR werden die Routen geplant und sie fahren zum Greifort. Sobald sich beide AMR am Greifort befinden und der K-AMR eine Nachricht des B-AMR über die Ankunft erhalten hat, beginnt er mit der Entnahme. Diese schließt er mit einer Entnahmebestätigung ab.

In Abbildung 4 wird ein Beispiel für eine Umplanung des optimalen Treffens aufgrund eines unerwarteten Ereignisses abgebildet. Zur besseren Verständlichkeit sind nur die an dieser Umplanung beteiligten AMR visualisiert. Der obere Bereich veranschaulicht die Kommissionierfläche in der Draufsicht zu zwei Zeitpunkten, auf der sich sowohl ein B-AMR als auch ein K-AMR befindet. Die schwarzen Kreise zeigen die zum jeweiligen Zeitpunkt aktuellen Standorte der AMR und die grauen Kreise und Pfeile die geplanten Routen. Die Treffpunkte sind grau hinterlegt. Im unteren Bereich wird die zugehörige Zeitplanung gezeigt. Die Rechtecke symbolisieren, wie lange sich die AMR an den verschiedenen Standorten voraussichtlich aufhalten und die Pfeile die Fahrten. Die schwarzen Rechtecke zeigen die tatsächlichen und die grauen Rechtecke die geplanten Zeiten.

Zum Zeitpunkt t_0 (links) befindet sich der B-AMR bei 1. Für ihn ist eine vorherige Bereitstellung an 2 und anschließend die Bereitstellung für den K-AMR bei 3 zum Treffzeitpunkt T geplant. Der K-AMR steht bei 4, von wo eine direkte Fahrt zum Treffpunkt 5 geplant ist. Zum Zeitpunkt t_E (rechts) kommt es zu einem unerwarteten Ereignis bei a . Damit verzögert sich der B-AMR und hält sich an dem Standort länger auf als ursprünglich geplant. Der K-AMR befindet sich zu diesem Zeitpunkt bei c . Das führt zu einer Umplanung der Routen, da das geplante Treffen nicht mehr optimal ist. Das neue optimale Treffen zum Zeitpunkt T ist nun bei b bzw. e . Der K-AMR kann in der Zeit, in der er auf den B-AMR warten würde, die Kommissionierung einer anderen Position bei d vorziehen.

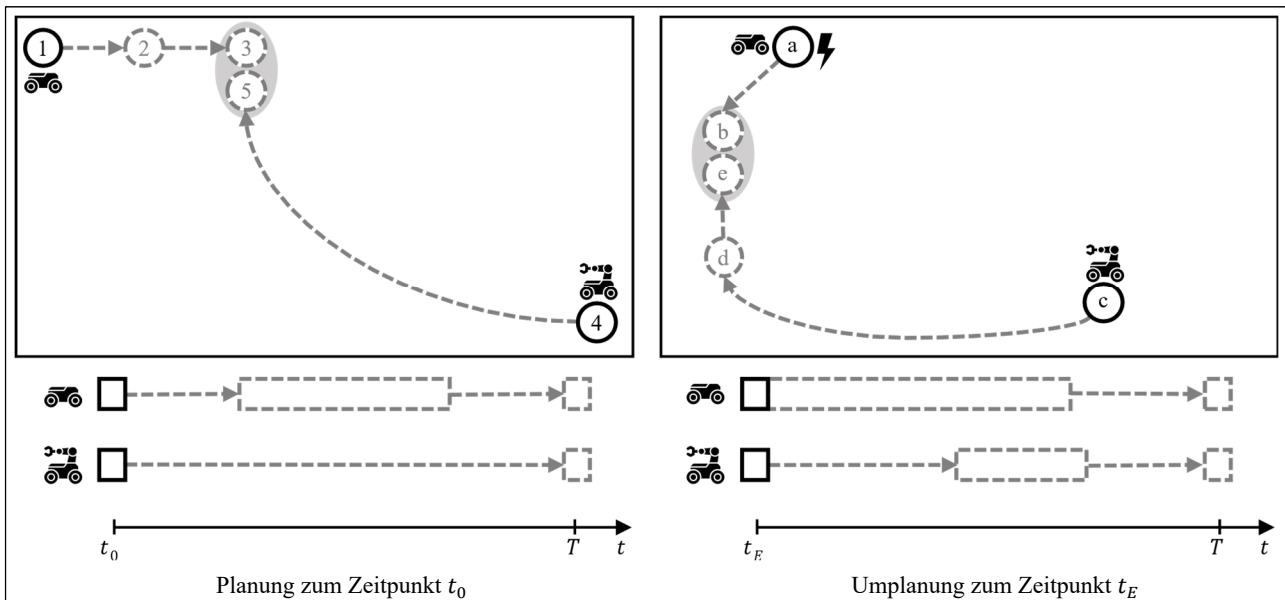


Abbildung 4. Aktuelle Standorte der Bereitstell-AMR und Kommissionier-AMR (schwarze Kreise) und Planung zum Zeitpunkt t_0 (links) bzw. Umplanung nach unerwartetem Ereignis (Blitz) zum Zeitpunkt t_E (rechts) der Routen (Pfeile) und optimalen Treffen (graue Kreise) auf der Kommissionierfläche mit zugehörigen Zeitanteilen (Rechtecke).

4 HYPOTHESEN UND AUSBLICK

Das Konzept ist die Grundlage für die Hypothesen über wesentliche Eigenschaften von Greif and Drive. Diese werden genutzt, um hieraus künftigen Forschungs- und Entwicklungsbedarf abzuleiten.

H1: Es gibt eine Wirtschaftlichkeit von Greif and Drive in einem bestimmten Leistungsbereich. Greif and Drive ermöglicht eine effiziente Abwicklung einer hohen Anzahl sich unregelmäßig wiederholender Kommissionierprozesse, weil parallel, unabhängig und an dynamischen Orten der Entnahmeprozess durchgeführt wird und somit Staus und Engpässe vermieden werden. Für die Validierung dieser Hypothese ist eine technische Machbarkeit und eine Materialflusssimulation erforderlich. Für die technische Machbarkeit wird ein Verfahren zu Koordination und Bewegungsplanung der AMR benötigt und es sind Anwendungsszenarien zu definieren, in denen mittelfristig ein automatisiertes Greifen möglich ist.

H2: Greif and Drive hat eine hohe Flexibilität und Skalierbarkeit. Greif and Drive ist an wechselnde Anforderungen anpassbar. Ändert sich beispielsweise die Auftragsstruktur z. B. die Anzahl der ankommenden Kommissionieraufträge je Zeiteinheit oder das Artikelspektrum, ist es möglich die Anzahl der AMR bzw. die Art des Greifsystems anzupassen. Darüber hinaus ist Greif and Drive skalierbar. Bei Bedarf werden zusätzliche Roboter integriert ohne lange und aufwändige Implementierungszeiten und -kosten. Für die Validierung dieser Hypothese ist Forschung für geeignete Greifsysteme erforderlich.

H3: Greif and Drive zeichnet sich durch eine hohe Systemverfügbarkeit aus. Greif and Drive gewährleistet eine hohe Zuverlässigkeit durch Redundanz, denn ausfallende AMR können ersetzt werden. Die Validierung erfolgt ebenfalls mit einer Materialflusssimulation.

Aus den Hypothesen ergeben sich damit drei wesentliche Forschungsthemenfelder, bevor eine prototypische Umsetzung möglich ist:

Bewegungsplanung und Koordination: Für den Erfolg des Konzepts Greif and Drive ist es erforderlich, kollisionsfreie Bewegungen für die Teilnahme der AMR an den Treffen zu planen. Hierfür sind zuerst eine Analyse und Bewertung der Eignung existierender zentraler und dezentraler Ansätze notwendig. Während vorherige Arbeiten bereits Verfahren für die Bewegungsplanung von AMR-Flotten in der Logistik bewertet haben [17], [18], bleibt eine Einordnung für Greif and Drive aus. Weiterhin ist eine Erweiterung von Verfahren der Bewegungsplanung um die Berücksichtigung optimaler Treffen erforderlich. Diese Erweiterung zeigt Parallelen zum Pick-Up and Delivery Problem with Time Windows [19] und erfordert eine Untersuchung bezüglich

dessen Kombination mit einem Verfahren zur Bewegungsplanung.

Anwendungsszenarien und Materialflusssimulation: Zur Durchführung der Simulationsstudien ist die Entwicklung des Simulationsmodells von Greif and Drive erforderlich sowie die Definition von Testdatensätzen und Anwendungsszenarien. Derzeit wird hierzu eine empirische Studie mit Experteninterviews vorbereitet, um potentielle Leistungsbereiche für Greif and Drive zu analysieren, zu identifizieren und daraus Anwendungsfälle abzuleiten. Die Simulationsstudien werden nach VDI 3633 [20] durchgeführt, um ein besseres Systemverständnis zu erhalten. Zudem werden technische und organisatorische Alternativen sowie Leistungsgrenzen von Greif and Drive anhand von Simulations-Experimenten analysiert. Mittels einer Sensitivitätsanalyse wird der Einfluss von Parametern wie die Anzahl der Roboter, Quellen und Senken sowie die Größe der Kommissionierfläche auf das Systemverhalten untersucht.

Greifen und Handhaben: Für Greif and Drive sind verschiedene Artikel mit Hilfe eines Manipulators automatisch aus einem Kleinladungsträger zu greifen und in die Sammelablage abzulegen. Durch die Beweglichkeit beider AMR ist beim Greifvorgang die Positionierung der Bereitstell- und Kommissionier-AMR zueinander zu berücksichtigen. Vergangene Forschungsergebnisse haben die grundsätzliche Eignung von Softgrippern in vereinfachten Szenarien mit einem eingeschränkten Artikelspektrum gezeigt [21]. Für die Handhabung unterschiedlichster Artikel, wie es für Greif and Drive erforderlich ist, wird ein modulares flexibles Greifsystem entwickelt. Neben der Handhabung werden zudem geeignete Greifstrategien benötigt, um auch in eng gepackten Bereitstellereinheiten Artikel zu greifen. Hier wird beispielsweise an Algorithmen geforscht, die es ermöglichen auch in schwierigen Greifsituationen Objekte nach einem Umsortieren sicher zu handhaben.

ACKNOWLEDGMENT

Diese Forschungsarbeit ist Teil des Forschungsprojekts AuLoKomp (Autonomes, flexibles IntraLogistik-Kompaktlager) und wird durch dtcc.bw – Zentrum für Digitalisierungs- und Technologieforschung der Bundeswehr gefördert.

LITERATUR

- [1] Bundesverband Paket und Expresslogistik e. V. (BIEK), KE-CONSULT Kurte&Esser GbR, „Perspektiven eröffnen, Gemeinschaft gestalten, KEP-Studie 2023 – Analyse des Marktes in Deutschland, Berlin, Köln“, 2023.
- [2] N. Boysen, R. de Koster und F. Weidinger, „Warehousing in the e-commerce era: A survey“, *European Journal of Operational Research*, Jg. 277, Nr. 2, S. 396–411, 2019, <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2018.08.023>.

- [3] Y. Li, R. Zhang und D. Jiang, „Order-Picking Efficiency in E-Commerce Warehouses: A Literature Review“, *Journal of Theoretical and Applied Electronic Commerce Research*, Jg. 17, Nr. 4, S. 1812–1830, 2022, <https://doi.org/10.3390/jtaer17040091>.
- [4] M. ten Hompel, V. Sadowsky und M. Beck, *Kommissionierung: Materialflusssysteme 2-Planung und Berechnung der Kommissionierung in der Logistik*. Springer, 2011.
- [5] K. Azadeh, R. de Koster und D. Roy, „Robotized and Automated Warehouse Systems: Review and Recent Developments“, *Transportation Science*, Jg. 53, Nr. 4, S. 917–945, 2019, <https://doi.org/10.1287/trsc.2018.0873>.
- [6] L. Custodio und R. Machado, „Flexible automated warehouse: a literature review and an innovative framework“, *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Jg. 106, 1-2, S. 533–558, 2020, <https://doi.org/10.1007/s00170-019-04588-z>.
- [7] Y. Jaghbeer, R. Hanson und M. I. Johansson, „Automated order picking systems and the links between design and performance: a systematic literature review“, *International Journal of Production Research*, Jg. 58, Nr. 15, S. 4489–4505, 2020, <https://doi.org/10.1080/00207543.2020.1788734>.
- [8] Magazino GmbH, *Intelligente Robotik und Lagerlogistik*. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.magazino.eu/> (Zugriff am: 30. August 2023).
- [9] Brightpick, *Order Fulfillment Reimagined*. [Online]. Verfügbar unter: <https://brightpick.ai/> (Zugriff am: 30. August 2023).
- [10] H.-Y. Lee und C. C. Murray, „Robotics in order picking: evaluating warehouse layouts for pick, place, and transport vehicle routing systems“, *International Journal of Production Research*, Jg. 57, Nr. 18, S. 5821–5841, 2019, <https://doi.org/10.1080/00207543.2018.1552031>.
- [11] T. Gudehus, *Logistik 2: Netzwerke, Systeme und Lieferketten*, 4. Aufl. Springer, 2012.
- [12] N. Boysen, D. Briskorn und S. Emde, „Parts-to-picker based order processing in a rack-moving mobile robots environment“, *European Journal of Operational Research*, Jg. 262, Nr. 2, S. 550–562, 2017, <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2017.03.053>.
- [13] R. J. Wieringa, *Design Science Methodology for Information Systems and Software Engineering*. Springer, 2014.
- [14] B. Kahlbrandt, *Software Engineering: Objektorientierte Software-Entwicklung mit der Unified Modeling Language*. Springer, 1998.
- [15] M. Haun, *Handbuch Robotik: Programmieren und Einsatz intelligenter Roboter*. Springer, 2007.
- [16] K. Gutenschwager, M. Rabe, S. Spieckermann und S. Wenzel, *Simulation in Produktion und Logistik: Grundlagen und Anwendungen*. Springer, 2017.
- [17] B. Hein, M. Wesselhoeft, M. Azizpour, A. Kirchheim und J. Hinckeldeyn, „Bewertung von Multi-Agent Path Finding Verfahren für deren Einsatz in robotisierten Logistiksystemen“, *Logistics Journal: Proceedings*, Jg. 2022, 2022, <https://doi.org/10.15480/882.4818>.
- [18] B. Hein, M. Wesselhoeft, A. Kirchheim und J. Hinckeldeyn, „Towards Industry-Inspired Use-Cases for Path Finding in Robotic Mobile Fulfillment Systems“ in *2022 IEEE 27th International Conference on Emerging Technologies and Factory Automation (ETFA)*, 2022, S. 1–4, <https://doi.org/10.1109/ETFA52439.2022.9921501>.
- [19] Y. Dumas, J. Desrosiers und F. Soumis, „The pickup and delivery problem with time windows“, *European Journal of Operational Research*, Jg. 54, Nr. 1, S. 7–22, 1991, [https://doi.org/10.1016/0377-2217\(91\)90319-Q](https://doi.org/10.1016/0377-2217(91)90319-Q).
- [20] *VDI 3633 Blatt 01: Simulation von Logistik-, Materialfluss- und Produktionssystemen Grundlagen*, Verein Deutscher Ingenieure, 2014.
- [21] J. Isermann, S. Ulrich und R. Bruns, „Konstruktive Gestaltung eines bioinspirierten Kommissioniergreifers für intralogistische Handhabungsaufgaben“, *Logistics Journal: Proceedings*, Jg. 2014, 2014, https://doi.org/10.2195/lj_Proc_iser-mann_de_201411_01.

Lara Nehrke, M.Sc.: Wissenschaftliche Mitarbeiterin der Professur Technologie von Logistiksystemen an der Helmut Schmidt-Schmidt-Universität / Universität der Bundeswehr Hamburg.

Adresse: Professur Technologie von Logistiksystemen, Helmut-Schmidt-Universität / Universität der Bundeswehr Hamburg, Holstenhofweg 85, 22043 Hamburg, Deutschland,
E-Mail: lara.nehrke@hsu-hh.de

Stephan Ulrich, Dr.-Ing.: Oberingenieur der Professur Technologie von Logistiksystemen an der Helmut Schmidt-Schmidt-Universität / Universität der Bundeswehr Hamburg.

Alice Kirchheim, Prof. Dr.-Ing.: Professorin der Professur Technologie von Logistiksystemen an der Helmut Schmidt-Schmidt-Universität / Universität der Bundeswehr Hamburg