

# Planungstool zur Entwicklung geeigneter Betriebsstrategien von mobilen Kommissionierrobotern

Planning tool for the development of suitable operating strategies of mobile-pick-robots

**Dirk Kauke**  
**Johannes Fottner**

*Lehrstuhl für Fördertechnik Materialfluss Logistik  
Fakultät für Maschinenwesen  
Technische Universität München*

**E**in Großteil der heutigen Kommissioniersysteme wird nach wie vor manuell oder nur teilautomatisiert betrieben. Der zunehmende Personalmangel führt jedoch dazu, dass Unternehmen vermehrt mobile Kommissionierroboter einsetzen, die gemeinsam mit dem Mensch kommissionieren. Diese Arbeit zeigt auf, dass sich die bisherigen Untersuchungen nur auf ein Teilgebiet der mobilen Kommissionierroboter beschränken. Insbesondere die Leistungsentwicklung bei einer gemeinsamen Arbeitsumgebung sowie die Auswirkung auf bekannte Steuerungsstrategien wurden bisher nicht näher untersucht. Im Rahmen dieser Arbeit wird ein erstes Konzept für ein solches Planungstool vorgestellt. Darüber hinaus zeigen erste Ergebnisse, dass eine getrennte Zonierung durchaus Leistungszuwächse generieren kann, jedoch zur Auswahl der optimalen Kombination beider Agenten (Mensch und Roboter) wirtschaftliche Aspekte herangezogen werden müssen.

*[Kommissioniersysteme, mobile Kommissionierroboter, Planungstool, Mensch-Roboter-Interaktion, Simulation]*

**T**he majority of today's order picking systems are still operated manually or only partially automated. However, the increasing lack of personnel is forcing companies to use more mobile picking robots that pick together with humans. This work shows that the research conducted so far is limited to only a part of the field of mobile picking robots. In particular, the performance development in a common working environment and the effect on existing control strategies have not been investigated in detail so far. Within the scope of this work, a first concept for such a planning tool is presented. In addition, first results show that a separate zoning can generate performance increases, but that economic aspects have to be considered

**when selecting the optimal combination of both agents (human & robot).**

*[order picking systems, mobile picking robots, planning tool, human-robot interaction, simulation]*

## 1 EINLEITUNG

Der erwirtschaftete Umsatz mit Waren im Onlinehandel hat sich in den vergangenen 10 Jahren beinahe sechsfach [BEV18]. Dabei ist davon auszugehen, dass der Handel zukünftig zumindest das aktuelle Niveau beibehalten wird, gegebenenfalls noch weiter steigen wird. Einen unmittelbaren Einfluss auf die Entwicklung des Onlinehandels haben die agierenden Logistikprozesse. Einerseits nehmen die Transporte stetig zu, wobei die Abwicklung „der letzten Meile“ ein eigenständiges Forschungsgebiet darstellt. Andererseits sind abgestimmte intralogistische Prozesse erforderlich, um eine hohe Lieferfähigkeit und kurze Lieferzeiten zu gewährleisten. Allerdings fällt es den Unternehmen immer schwerer, geeignetes Personal für ihre eigene Logistik zu finden. Die BVL führte 2017 eine Umfrage durch, in der sie feststellte, dass 90 Prozent der befragten Unternehmen einen Fachkräftemangel in der Transport- und Logistikindustrie bemerken [KP19]. Auf Grund des vorherrschenden demografischen Wandels ist davon auszugehen, dass zukünftig keine Verbesserung zu erwarten ist. Daher wird seit einigen Jahren an Automatisierungslösungen für die manuelle Kommissionierung geforscht, sodass ein zukünftiges Wachstum nicht zwingend durch einen Zuwachs an Personal gedeckt werden muss. Eine Möglichkeit bietet der Einsatz von unterschiedlichen Robotersystemen.

Die relevanten Ansätze lassen sich dabei unter anderem hinsichtlich der Beweglichkeit der Regale unterscheiden. Sind diese beweglich, so werden beispielsweise Automated Guided Vehicles (AGVs) eingesetzt, die die Regale zu definierten Pickplätzen transportieren, an denen Menschen die Artikel entnehmen. Hierbei übernehmen die

AGVs lediglich eine Transportfunktion. Häufig werden diese Systeme unter „Robotic Mobile Fulfillment Systems (RMFS)“ zusammengefasst. Handelt es sich um starre Regale, kann zwischen Mobile-Pick-Robots (MPRs) und Pick-Support-Robots (PSR) unterschieden werden. Die MPRs können eigenständig Artikel kommissionieren, wohingegen die PSRs lediglich den Menschen durch die Bereitstellung von Behältern unterstützen.

Wesentliche Meilenstein im Bereich der MPRs stellen die Lösungen des Unternehmens Magazino aus München dar. Der Roboter „Toru“ ist in der Lage, mittels eines speziell entwickelten Greifers jegliche Art von quaderförmigen Gegenständen zu greifen. Ähnliche Systeme betreiben die Unternehmen IAM Robotics und Fetch Robotics. Diese setzen jedoch auf einen standardisierten Saug-Greifer, der es ihnen ermöglicht, auch biegeschlaffe und unförmige Güter picken zu können. Magazino hat ihre Roboter bereits in vielen Lagerhäusern im Einsatz. Ob die anderen genannten Lösungen bereits über einen Laborbetrieb hinaus einsetzbar sind, ist unklar.

Unabhängig der Marktreife eines Systems, bedarf es einer umfassenden Planung und Auslegung des Systems, um gegenüber dem Kunden eine definierte Systemleistung zu gewährleisten [Mag18]. Welche Ansätze zur Planung von Kommissioniersystemen in der Wissenschaft genutzt werden sowie eine Darstellung weiterer Arbeiten, die den Bereich Robotik in der Kommissionierung untersucht haben, erfolgt im nachfolgenden Kapitel.

## 2 STAND DER TECHNIK

Erste Untersuchungen zum Einsatz von mobiler Robotik in Kommissioniersystemen liegen bereits mehr als zehn Jahre zurück. Andrea und Wurman untersuchten dabei den Einsatz von AGVs zur Bereitstellung von Regalen in Form einer flexiblen Ware-zur-Person Kommissionierung [AW08]. Durch die Übernahme des Unternehmens Kiva durch Amazon vier Jahre später, wurde seit dem sowohl industriell als auch forschungsseitig die Entwicklung von RMFS vorangetrieben. Inzwischen gibt es eine Vielzahl an Anbietern dieser Systeme. Im deutschsprachigen Umfeld sind u.a. Swisslog und Grenzbach Vorreiter in diesem Bereich. In der Forschung können ebenfalls vermehrt Veröffentlichungen verzeichnet werden. Azadeh et al. haben eine umfassende Literaturrecherche zur Entwicklung der Robotik innerhalb der Intralogistik durchgeführt [AKR19]. Gleiches gilt für die Arbeit von Boysen et al., die sich intensiv mit Fragestellungen zur Auslegung eines Mobile Fulfillment Centers beschäftigt haben und dazu ebenfalls die vorhandene Literatur aufzeigen [BKW19]. Darüber hinaus gibt es weitere Arbeiten, die sich entweder mit einzelnen Teilaspekten [LSL<sup>+</sup>18]; [LSF19] oder mit einer ganzheitlichen Auslegung von Robotiksystemen zur Kommissionierung in Form von Ware-zur-Person beschäftigen [LRK20]; [WWZ<sup>+</sup>20]. In allen Arbeiten wird der Arbeitsbereich von

Mensch und Roboter eindeutig getrennt, sodass gemeinsame Interaktionen höchstens am Übergabepplatz der Regale stattfinden.

Eine Interaktion zwischen Mensch und Roboter tritt beim Einsatz von PSR ein. Hier unterstützt der Roboter bzw. das AGV den Kommissionierer durch den Transport der Kommissionierbehälter. Auch in diesem Zusammenhang gibt es bereits eine Vielzahl an industriellen Anwendungen. Exemplarisch zu nennen sind hier die Unternehmen Still, SSI Schäfer oder Fetch Robotics. Aus Sicht der Wissenschaft wurden diese Systeme bisher nur oberflächlich behandelt. Im Rahmen von Konzeptvorstellungen gehen einige Arbeiten auf diese Art der Kommissionierung ein. Nähere Untersuchungen haben jedoch bisher nur Löffler et al. vorgenommen [LBS19]. Sie entwickelten ein neues Routingverfahren, wobei der Fokus jedoch auf die Optimierung der Wege des Menschen lag. Des Weiteren lag die Zielgröße in der Reduzierung der Wegstrecke. Es erfolgte keine Berücksichtigung von Interaktionen zwischen Mensch und AGV. Es wurden zudem keine weiteren leistungsrelevanten Parameter der AGVs berücksichtigt. Letztlich wurde das Routingproblem analytisch gelöst, sodass entsprechende System-Dynamiken durch den Einsatz von Simulation nicht erkennbar sind.

Zieht man nun einen Einsatz von MPR hinzu, wird schnell deutlich, dass es zum heutigen Stand keine Arbeiten gibt, die dieses Themenfeld betrachten. Azadeh et al. greifen den TORU in ihrer Arbeit kurz auf, adressieren aber ebenfalls weiteren Forschungsbedarf.

## 3 ZIELSETZUNG

Im Wesentlichen soll der Frage nachgegangen werden, inwieweit mobile Kommissionierroboter leistungsgerecht in der manuellen Person-zur-Ware Kommissionierung eingesetzt werden können. Dazu gilt es zunächst ein für eine Simulation hinreichendes Verhalten von Mensch und Roboter zu entwickeln und zu implementieren. Darauf aufbauend bedarf es einer Untersuchung inwieweit die Roboter auf die Steuerungsstrategien der manuellen Kommissionierung Einfluss nehmen. Die daraus erlangten Erkenntnisse ermöglichen eine Ableitung geeigneter Betriebsstrategien von hybriden Kommissioniersystemen.

## 4 STEUERUNGSSTRATEGIEN HYBRIDER KOMMISSIONIERSYSTEME

### 4.1 EINGRENZUNG RELEVANTER STEUERUNGSSTRATEGIEN

Kommissioniersysteme sind in der deutschen Literatur umfassend beschrieben. Hervorzuheben sind hier die VDI 3590 sowie die Arbeiten von Ten Hompel et al. und Gudehus [Gud12]; [HSB11]; [VDI3590]. In allen Quellen findet

sich ein Bezug zu relevanten Strategien wie ein System entsprechend gestaltet und gesteuert werden sollte. Insbesondere die VDI 3590 sowie Ten Hompel beschreiben mit ihrer Einteilung in Materialfluss-, Organisations- und Informationssystem sehr detailliert den Aufbau und Ablauf. Allerdings bedarf es im Kontext dieser Forschung keiner zu detaillierten Betrachtungsweise, sondern einer übergeordneten Untersuchung relevanter Parameter. Daher soll hier auf eine Einteilung nach Van Gils et al. zurückgegriffen werden, die Strategien zunächst zusammenfasst und in ein zeitliches Verhältnis setzt (vgl. Abbildung 1). Die Autoren definieren dabei strategische, taktische und operative Strategien, die verschieden häufig überprüft und angepasst werden [GRC<sup>+</sup>18].

Strategische Parameter sind beispielsweise der Automatisierungsgrad, die konkrete Auswahl der Kommissioniertechnik und das Layout des Kommissioniersystems. Diese Strategien werden meist im Rahmen einer Neuplanung festgelegt und eher selten bzw. nur bei stark variierenden Rahmenbedingungen angepasst [GRC<sup>+</sup>18].

Taktische Strategien umfassen u.a. die Dimensionierung und Zonierung des Systems sowie die Lagerbelegung. Diese können sich durchaus regelmäßig ändern – beispielsweise durch den Wechsel von Saisonartikel bzw. auf Grund von „Peak-Season“ wie dem Weihnachtsgeschäft [GRC<sup>+</sup>18].

Operative Planungsprobleme sind beispielsweise das Batching, das Routing sowie die Auftragszuweisung. Im Zuge des Batching kann u.a. die Auslastung der jeweiligen Kommissioniertour variiert werden. Das Routing ist unmittelbar mit dem Batching verknüpft und kann daher je Tour variieren. Die Auftragszuweisung ist ebenfalls von einer Vielzahl an operativen Einflüssen, wie beispielsweise der aktuellen Auslastung des Gesamtsystems, der Priorität der Aufträge oder der Verfügbarkeit an Ressourcen, abhängig [GRC<sup>+</sup>18].

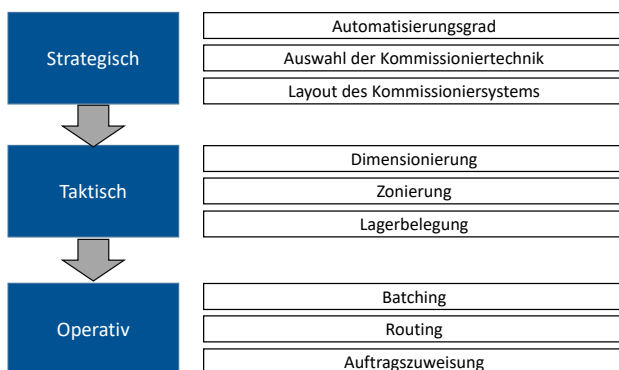


Abbildung 1. Steuerungsstrategien von Kommissioniersystemen in Anlehnung an [GRC<sup>+</sup>18]

Die vorgestellten Strategien beruhen auf der Annahme eines homogenen Systems, welches ausschließlich mit Menschen betrieben wird. In Bezug auf ein hybrides Sys-

tem, in dem Mensch und Roboter gemeinsam tätig sind, bedarf es einiger Anpassungen, welche in den nachfolgenden Kapiteln näher vorgestellt werden.

## 4.2 STRATEGISCHE STEUERUNGSSTRATEGIEN IN HYBRIDEN KOMMISSIONIERSYSTEMEN

Die Auswahl des Automatisierungsgrades und der Kommissioniertechnik ist durch die Wahl eines hybriden Kommissioniersystems weitestgehend entschieden. Die Notwendigkeit zur Gestaltung des Layouts bleibt allerdings weiterhin bestehen. Dabei geht es weniger darum festzustellen, wie viele Gassen oder welche Gassenlänge die optimale Konfiguration darstellt, sondern vor allem um die Gassenbreite und die Anordnung der Basis. Die Gassenlänge und die Anzahl der Gassen sind in der Regel von der Anzahl an zu lagernden Artikeln und der Größe der zur Verfügung stehenden Lagerfläche abhängig. Zwar werden die Gassenbreite und die Anordnung der Basis im gleichen Maße durch die Lagerfläche beeinflusst, allerdings wirken sich diese stärker auf die Interaktionen zwischen Mensch und Roboter aus.

Bei der Untersuchung eines Systems sollte daher zwischen ein-, zwei- und dreispurigen Gassen unterschieden werden. Ein einspuriges System würde zur Folge haben, dass die Kommissioniergassen nur in eine Richtung befahrbar wären. Eine flexible Anpassung der Fahrtrichtung wäre zwar im operativen Betrieb denkbar, würde jedoch einen hohen Steuerungsaufwand bedeuten. Im Gegenzug wird mit einem einspurigen System der höchste Flächennutzungsgrad erreicht.

Beim zwei- und dreispurigen System ist die Bewegung in beide Richtungen möglich. In einem zweispurigen System würde die Begegnung zwischen Mensch und Roboter in der Gasse zu einem Stopp des Roboters führen, da ein notwendiger Sicherheitsabstand nicht gewährleistet werden kann. In einer dreispurigen Gasse hingegen kann der Roboter ohne Stillstand einen Menschen passieren.

Die Lage der Basis, an der Aufträge aufgenommen und abgegeben werden, könnte ebenfalls einen Einfluss auf die Interaktionen zwischen Mensch und Roboter haben. Die zwei üblichen Positionen einer Basis können am Ende der Gassen (unten) oder auf Höhe einer Quergasse (mittig) liegen. Der Vorteil der mittig liegenden Quergasse ist vor allem, dass nicht die gesamte Länge der Kommissioniergasse durchfahren werden muss, wodurch in der Theorie die Anzahl der Interaktionen minimiert werden kann.

## 4.3 TAKTISCHE STEUERUNGSSTRATEGIEN IN HYBRIDEN KOMMISSIONIERSYSTEMEN

Im Zuge der taktischen Strategien gilt es eine optimale Lagerbelegung und Zonierung zu finden. Wie auch in klas-

sischen Kommissioniersystemen beeinflussen sich die Lagerbelegung und Zonierung ebenso in hybriden Systemen. Neben einer Zonierung nach Artikelart (oder Umschlagshäufigkeit), ist in hybriden Systemen ebenfalls eine Zonierung zwischen Mensch und Roboter möglich. Diese Art der Zonierung resultiert letztlich wieder in eine Unterteilung nach bestimmten Artikeln, da in der Roboter-Zone nur Artikel liegen können, die eben von diesem gepickt werden können. In diesem Kontext stellt sich zudem die Frage, inwieweit eine doppelte Anstellung (Zone-Mensch & Zone-Roboter) bestimmter „Roboter-Artikel“ sinnvoll ist, um so flexibel auf Ausfälle oder technische Störungen reagieren zu können. Darüber hinaus gilt es zu klären, inwieweit eine umschlagsorientierte Artikelbelegung innerhalb hybrider Systeme sinnvoll ist.

Die Dimensionierung der Ressourcen (Agenten) ist in hybriden Systemen auf Grund der zweiten Variablen (Roboter) deutlich komplexer. Das Planungstool sollte die optimale Kombination aus Mensch und Roboter festlegen können. Wobei hier neben der erforderlichen Leistung ebenfalls die Kosten berücksichtigt werden müssen. Dabei spielen vor allem die Einsatzzeiten beider Akteure eine wesentliche Rolle. Der Vorteil der Roboter ist, dass sie an jedem Tag der Woche und zu jeder Uhrzeit autonom arbeiten und dabei stets die gleichen Kosten verursachen. Daher muss zur Dimensionierung vor allem überprüft werden, inwieweit Roboter zu üblichen Stillstandszeiten (Wochenende & nachts) eingesetzt werden können.

#### 4.4 OPERATIVE STEUERUNGSSTRATEGIEN IN HYBRIDEN KOMMISSIONIERSYSTEMEN

Sowohl in klassischen Systemen als auch innerhalb der hybriden Umwelt, spielt im operativen Kontext das Batching und Routing eine entscheidende Rolle. Dabei unterscheidet sich das Batching von Aufträgen in beiden Systemen nicht, da unter Berücksichtigung diverser Heuristiken versucht wird, eine möglichst hohe Bündelung an gleichen Aufträgen zu erzielen und so die Wegstrecke des Agenten zu minimieren.

Das Routing in hybriden Systemen kann deutlich komplexeren Anforderungen unterliegen. Auf Grund dessen, dass Menschen gemeinsam mit Robotern auf engem Raum zusammenarbeiten, müssen Sicherheitsmaßnahmen wie verfügbare Fluchtwege gewährleistet werden. Darüber hinaus kann es sinnvoll sein, dass die Einfahrt in einzelne Bereiche (Gassen oder Zonen) systemseitig beschränkt wird, um die Anzahl an Interaktionen oder sogar Deadlocks zu vermeiden bzw. zu minimieren.

Eine auslastungsorientierte Freigabe von Aufträgen bietet ebenfalls eine Möglichkeit, auf die o.g. Herausforderungen zu reagieren. Zudem stellt sich im Rahmen der Auftragszuweisung die Frage, ob den Menschen lediglich die Aufträge mit Artikeln übergeben werden sollen, die der Roboter nicht greifen kann oder ob weiterhin Kriterien wie die Auftragspriorität eine Rolle spielen müssen.

## 5 MODELL

### 5.1 GRUNDKONZEPT

Das Planungstool wurde in der Simulationssoftware Tecnomatix Plant Simulation umgesetzt. Plant Simulation ist eine ereignisdiskrete Simulationsumgebung, die vornehmlich für die Untersuchung von Materialflüssen in Logistik- und Produktionsumgebungen konzipiert wurde.

Die Wahl einer Simulationssoftware als Umgebung liegt darin begründet, dass die dynamischen Einflüsse eines Kommissioniersystems (Batching, Routing, Auftragsvergabe etc.) sowie die spezifischen Charakteristika des hybriden Systems durch die gemeinsame Interaktion zwischen Mensch und Roboter nur simulativ umfassend untersucht werden können. Analytische Ansätze lassen zwar Rückschlüsse auf die zu erwartende Kommissionierleistung zu, jedoch wären die zuvor beschriebenen Steuerungsstrategien, die die Leistung reduzieren können, nicht messbar.

### 5.2 LAYOUT

Das Layout bildet das zentrale Element des Kommissioniersystems (vgl. Abbildung 2).

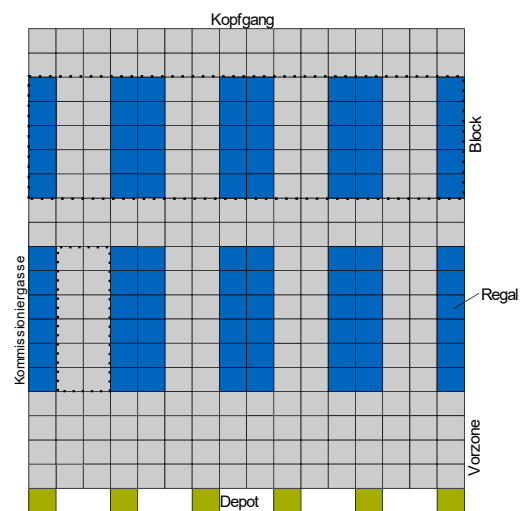


Abbildung 2. Beispielhaftes Layout

Dort finden die physischen Prozesse und Bewegungen der Menschen und Roboter statt. Die Konfiguration des Layouts orientiert sich sehr stark an der typischen Blockanordnung, die auch in der Literatur verwendet wird. Jede graue Kachel bildet einen Knoten. Um eine möglichst genaue Nachbildung des realen Systems zu erreichen, lassen sich die folgenden Parameter variieren:

- Anzahl der Lagerblöcke
- Anzahl der Kommissioniergassen je Lagerblock

- Länge der Kommissioniergasse
- Breite der Kommissioniergasse
- Abmessung der Vorzone
- Anzahl der Depot-Plätzen
- Position der Depot-Plätze
- Verfügbarkeit eines Kopfgangs

Die Variation dieser Parameter ermöglicht es daher, eine Vielzahl an Layoutvarianten im Simulationsmodell zu untersuchen.

### 5.3 AUFTRAGSBATCHING

Bevor der eigentliche Kommissionierprozess erfolgen kann, erfolgt zunächst die Zusammenfassung (Batching) von relevanten Aufträgen. Bevor dieser Ablauf näher beschrieben wird, wird auf die Generierung der Rohaufträge näher eingegangen.

#### 5.3.1 AUFTRAGSPOOL

Die Aufträge bilden den „Input“ eines Kommissioniersystems. Im Zuge des vorgestellten Planungstools werden vornehmlich Kommissioniersysteme aus dem Bereich Warehousing & e-Commerce betrachtet. Daher handelt es sich bei den nachfolgend beschriebenen Aufträgen um Endkundenaufträge. Die Anwendbarkeit von hybriden Systemen im Bereich B2B bzw. innerhalb von Produktionssystemen ist ebenfalls denkbar, soll jedoch nicht im Fokus dieser Betrachtung stehen.

Wie auch zuvor beim Layout lassen sich die Aufträge auf Grundlage verschiedener Parameter variieren. An erster Stelle steht die zeitliche Verteilung der Auftragseingänge. Diese können sowohl dynamisch über die Simulationslaufzeit eingehen oder statisch bereits zu Beginn der Simulation feststehen. Die statische Variante bietet sich vor allem für eine theoretische Leistungsbetrachtung einzelner Konfigurationen an, bei denen die Auftragserfüllungszeit von beispielsweise 1.000 Aufträgen verglichen werden soll. Die dynamischen Auftragseingänge entsprechen dabei eher der Realität bei der über den gesamten Tag Aufträge eingehen. Die nachfolgend beschriebenen Parameter beziehen sich auf beide Varianten, der Fokus soll auf Grund der höheren Komplexität allerdings auf den dynamischen Auftragseingängen liegen.

Die Grundlage zur Entwicklung der dynamischen Aufträge ist eine Wochenprognose von Kundenaufträgen. Im zweiten Schritt werden dann eine Tages- und Schichtverteilung vorgenommen. Diese legen fest, an welchem Wochentag welcher prozentuale Anteil an Aufträgen zu erwarten ist. Gleiches gilt für die jeweilige Schicht bzw. den Tageszeitpunkt. Dabei besteht die Möglichkeit, eigene Verteilungen anzunehmen oder auf bestehende Studien zu-

rückzugreifen. Der Online-Zahlungsdienst Klarna hat beispielsweise eine umfassende Analyse seiner eigenen Kunden in Schweden durchgeführt. Dabei konnte festgestellt werden, dass die meisten Bestellungen an Sonn- und Montagen zwischen 21:00 Uhr und 22:00 Uhr getätigt werden und, dass am 25. eines jeden Monats („Payday“) die meisten Schweden im Internet ihre Einkäufe erledigen [Kla19]. Eine ähnlich umfassende Studie über den deutschen Online-Handel gibt es aktuell noch nicht, allerdings haben einzelne Studien bereits Teilaspekte (Tageszeitpunkt, Wochentag oder Monat) betrachtet, die sich mit den Kernergebnissen der Klarna-Studie decken [BEV17].

Neben dem Zeitpunkt des Auftragseingangs spielt die Zusammensetzung der Aufträge eine entscheidende Rolle. Zwar betrachtet das Planungstool die Aufträge positionsweise, allerdings kann die Anzahl an Artikeln je Position noch variieren. Dazu verfügt das Modell über verschiedene statistische Verteilungsfunktionen, um die Anzahl an Artikeln festzulegen. Neben der Anzahl ist die Art ebenfalls ausschlaggebend. Dabei wird zwischen einer Häufigkeitsverteilung (ABC) sowie der Greifbarkeit durch den Roboter unterschieden. Auch hier können verschiedene statistische Verteilungen angenommen werden.

Nachdem eine Auftragsposition mit definierter Ausprägung in den Auftragspool eingegangen ist, erfolgt im nächsten Schritt das Batching.

#### 5.3.2 AUFTRAGSBATCHING

Der Prozess des Batchings wird durch den jeweiligen Agenten (Mensch oder Roboter) am Depot ausgelöst. Auf Basis der jeweiligen Kapazität werden anschließend die verfügbaren Aufträge zusammengefasst, die Route entwickelt und optimiert und an den Agenten übergeben. Die Tourenbildung unterliegt dem bekannten Vehicle-Routing-Problem (VRP) mit Kapazitätsbeschränkungen [CW64]; [TV14]. Um das VRP zu lösen wird folgender Ablauf vorgenommen (vgl. Abbildung 3). Der Ablauf kann dabei in drei Bereiche unterteilt werden:

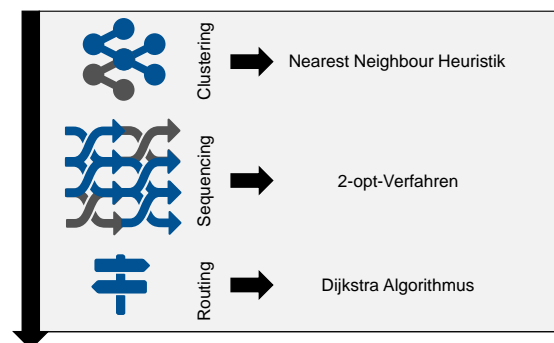


Abbildung 3. Ablauf des Auftragsbatchings

Die Grundlage zur Lösung des VRPs wird bereits vor dem Simulationsbeginn gelegt. Für jede neue Layoutvariation werden zunächst außerhalb des Simulationsmodells in

einem eigens konstruierten C#-Tool die kürzesten Wege zu allen Knoten untereinander berechnet. Die zu erwartende Bewegungszeit zwischen zwei Knoten im System wird anschließend getrennt für Mensch und Roboter an das Simulationsmodell übergeben.

Diese Daten-Tabelle mit allen hinterlegten Zeiten wird anschließend herangezogen, um die Nearest Neighbour Heuristik (NNH) anzuwenden [AEO<sup>+</sup>02]. Zunächst wird ein Startauftrag ermittelt, auf Basis dessen wird unter Berücksichtigung der Kapazität stetig der Auftrag hinzugefügt, der den nächstgelegenen Artikel zum aktuellen Auftrag beinhaltet. Mit Erreichen der verfügbaren Kapazität des Agenten ist das Clustering abgeschlossen.

Im nächsten Schritt gilt es die optimale Reihenfolge der Aufträge festzulegen. Zwar liefert die NNH bereits akzeptable Ergebnisse, allerdings bleiben gerade bei größeren Systemen und einer stark heterogenen Auftragsstruktur Potentiale bei der Wegstreckenreduzierung unberücksichtigt. Dazu wird im Sequencing das 2-opt Verfahren angewendet [Cro58]; [Lin65]. Der 2-opt ist ein heuristisches Verfahren, das die Reihenfolge der Haltepunkte auf einer Tour vertauscht, um eine Reduzierung der Wegstrecke bzw. Wegzeit zu erreichen. Dabei wird die Tour in Knoten und Kanten unterteilt. Die Knoten sind die Haltepunkte, die Kanten die Wegstrecken zwischen zwei Haltepunkten. Je Iteration vertauscht der 2-opt jeweils zwei Kanten und versucht dabei die Gesamtwegstrecke zu minimieren.

Zuletzt benötigt der jeweilige Agent die genaue Route mit allen zu befahrenden Knoten. Dazu wird der Dijkstra-Algorithmus verwendet [Dij59]. Dieser bestimmt jeweils den kürzesten Weg von einem Knoten zu allen anderen Knoten im System. Zur Laufzeitoptimierung werden für jedes Layout die kürzesten Wege nur einmal bestimmt und gespeichert. Sobald eine Route ein zweites Mal abgefragt wird, bedarf es keiner neuen Anwendung des Dijkstra-Algorithmus.

Mit Übergabe der Route und der Kommissioniertour ist das VRP für den spezifischen Anwendungsfall hinreichend gelöst.

## 5.4 ROUTING

Nachdem die Route und die Tour dem Agenten übergeben wurde, erfolgt im Anschluss der eigentliche Kommissionierprozess. Die entsprechende Route entspricht dabei keinem vorgeschriebenen Muster, wie es in der Literatur u.a. mit der Stichgangs- oder Schleifenstrategie beschrieben wird [Gud12]; [HSB11]. Vielmehr verläuft die Route entsprechend dem entwickelten Batching und daher einem optimalen Verlauf [KLR07].

Trotz alledem interagieren die Agenten auf ihrer Kommissioniertour miteinander. Um dies zu optimieren, wurde ein Makro- und Mikro-Routing entwickelt. Das Makrorouting betrachtet das System ganzheitlich und versucht durch

verschiedene Strategien, das Auftreten von Interaktionen zu minimieren. Das Mikro-Routing fokussiert hingegen die direkte Interaktion zwischen zwei oder mehr Agenten.

### 5.4.1 MAKRO-ROUTING

Erste entwickelte Ansätze des Makro-Routings sind ein „Rechtsfahrgebot“ innerhalb der Kommissioniergassen oder die Zonierung von Bereichen, in denen ausschließlich Menschen oder Roboter einfahren dürfen.

Das „Rechtsfahrgebot“ ermöglicht die Vermeidung von frontalen Interaktionen, in denen ein Ausweichvorgang notwendig würde. Bei einer Interaktion zwischen zwei Agenten, die sich in die gleiche Fahrtrichtung bewegen, besteht stets die Möglichkeit, dass der hintere Agent wartet bis der vordere beispielsweise seinen Pickvorgang abgeschlossen hat. Insbesondere für Roboter, deren Ausweichvorgänge deutlich mehr Zeit benötigen als die von Menschen, bietet das Rechtsfahrgebot ein hohes Optimierungspotential.

Die Zonierung unterstellt, dass Agenten des gleichen Typs harmonischer zusammenarbeiten können. Davon soll auch vor allem der Roboter profitieren, der in einem hybriden Umfeld durch den dynamischeren Menschen häufiger reagieren und ggf. warten bzw. stoppen muss. Arbeiten jedoch nur Roboter in einer Gasse, sind die Arbeitsschritte und Geschwindigkeiten aufeinander abgestimmt, sodass ein besseres Zusammenspiel der Agenten (Roboter) erfolgen kann.

### 5.4.2 MIKRO-ROUTING

Das Mikro-Routing bestimmt das Verhalten im Falle einer bevorstehenden Interaktion. Dabei können letztlich drei Fälle unterschieden werden:

- Fall 1: Mensch – Mensch
- Fall 2: Mensch – Roboter
- Fall 3: Roboter – Roboter

Im ersten Fall wird angenommen, dass ein Mensch zuerst einen Ausweichvorgang beginnt und der andere entsprechend wartet und nicht von seiner Route abweichen muss. Üblicherweise ist ein Roboter mit entsprechender Sicherheitstechnik ausgestattet, die ihn dazu zwingt, stehen zu bleiben bzw. in ein Not-Aus-Zustand zu übergehen, sobald er einen Mindestabstand (< 200 mm) zu einem Hindernis nicht mehr einhält. Dieser Umstand wird im Fall 2 und Fall 3 berücksichtigt. Im Fall 2 würde der Mensch daher, wenn er sich selbst in Bewegung befindet, ausweichen. Kommissioniert der Mensch in diesem Moment, erfolgt das Ausweichen des Roboters. Das gleiche Vorgehen tritt bei Fall 3 ein. Hierbei wird jedoch unterstellt, dass die Roboter untereinander oder mit einer übergeordneten Leitstelle kommunizieren, und somit entschieden wird, welcher Roboter zuerst ausweicht.



## 6 ERGEBNISBETRACHTUNG

Es konnten bereits erste Anwendungen simuliert und untersucht werden. Im nachfolgenden Beispiel wurde ein Layout mit vier Gassen betrachtet, bei dem zwischen 1 und 20 Agenten in zwei Schichten (á 8h) kommissionieren. Die primäre Zielgröße war hier die Anzahl an Aufträgen, die insgesamt in zwei Schichten kommissioniert werden können. Im weiteren Verlauf wird zunächst die Leistungsentwicklung bei variierender Anzahl an Agenten dargestellt. Anschließend soll gezeigt werden, welchen Einfluss die Zonierung auf die jeweilige Leistung hat.

### 6.1 LEISTUNGSENTWICKLUNG BEI VARIIERENDER AGENTENANZAHL

Bei der Betrachtung eines hybriden Kommissioniersystems stellt sich zunächst die Frage nach der notwendigen Anzahl an Agenten im System. Dabei könnten grundsätzlich die Anzahl der Menschen oder der Roboter bereits feststehen. Abbildung 4 zeigt die Leistungsentwicklung bei verschiedener Anzahl an Agenten im System.

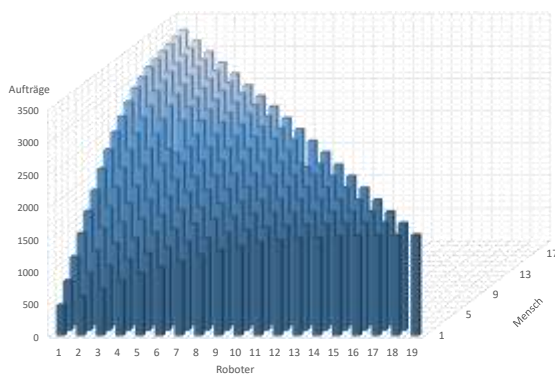


Abbildung 4. Leistungsentwicklung bei variierender Agentenanzahl

Die beiden äußeren Linien an Balken zeigen den Leistungsverlauf eines homogenen Systems (ausschließlich Menschen oder Roboter). Alle inneren Balken bilden die Leistungen der Kombinationsmöglichkeiten. Grundsätzlich wird deutlich, dass der Mensch in dieser Konfiguration deutlich leistungsstärker ist. Insbesondere der Zuwachs an Menschen in einem homogenen System führt stetig zu höheren Leistungen, wo hingegen die Erweiterung um einen Roboter zu deutlich geringeren Leistungszuwächsen führt. Dies hängt u.a. mit dem beschriebenen Mikro-Routing zusammen, welches beim Roboter durch längere Wartezeiten geprägt ist.

### 6.2 EINFLUSS DER ZONIERUNG AUF DIE LEISTUNG

Die Zonierung als ein Teil der taktischen Steuerungsstrategien wird im Planungstool als ein Bestandteil des Makro-Routing untersucht. Wie bereits in Kapitel 5.4.1 näher beschrieben, soll durch die beiden getrennten Bereiche

(Mensch und Roboter) die auftretenden Interaktionen minimiert und der Arbeitsablauf harmonisiert werden. Die Abbildung 5 zeigt, ob die Leistung bei getrennter Zonierung im Vergleich zur freien Zonierung gestiegen, gesunken oder nahezu gleichgeblieben ist. Die Grundlage bildet die dargestellte Leistung aus Abbildung 4

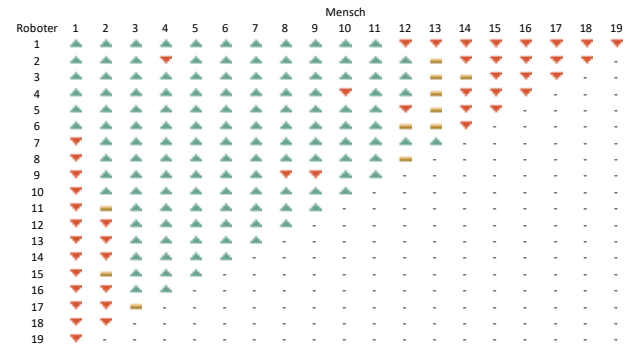


Abbildung 5. Qualitativer Leistungsverlauf bei getrennter Zonierung

Bei näherer Betrachtung wird deutlich, dass die Fälle mit einer hohen homogenen Anzahl an Agenten deutliche Leistungseinbußen verzeichnen. Dies liegt vor allem daran, dass die hohe Anzahl an Agenten auf die zwei zur Verfügung stehenden Kommissioniergassen verteilt werden. Dies führt dann zu einer hohen Anzahl an Interaktionen und schließlich zu einer Minderung der Gesamtleistung.

Ist die Anzahl je Agent ausgeglichen, kann jedoch meist eine Leistungssteigerung festgestellt werden. Dies liegt zum einen an der bereits erläuterten Harmonisierung der Arbeitsabläufe. Zum anderen erfolgt durch die Zonierung auch eine indirekte Beschränkung der maximal zulässigen Teilnehmer innerhalb einer Gasse.

Damit wird deutlich, dass in den allermeisten Fällen eine Zonierung des Systems vorteilhaft ist. Allerdings kann mit den vorliegenden Erkenntnissen noch keine Auswahl der wirtschaftlich-optimalen Kombination beider Agenten gewählt werden.

## 7 ZUSAMMENFASSUNG UND WEITERER FORSCHUNGSBEDARF

Im Zuge dieser Ausarbeitung konnte der Bedarf an einem Tool zur Planung und Auslegung von hybriden Kommissioniersystemen gezeigt werden. Der Stand der Technik bestätigt, dass insbesondere die hybriden Person-zur-Ware-Systeme unzureichend untersucht wurden. Dazu wurde ein Konzept vorgestellt, welches ein Simulationsmodell zur Planung und Auslegung vorsieht. Dabei wurde vor allem auf das Auftragsbatching und das Routing eingegangen. Letztlich konnten erste Ergebnisse die Validität des Simulationsmodells bestätigen sowie die Notwendigkeit eines abgestimmten hybriden Systems, am Beispiel der Zonie-

rung, untermauern. Allerdings bedarf es noch einiger Funktionserweiterungen, um funktionsfähige Betriebsstrategien aus dem Planungstool ableiten zu können.

Abbildung 4 zeigt anschaulich, welche Leistung bei welcher Kombination aus Agenten zu erwarten ist. Liegt die zu erreichende Tagesleistung bspw. bei 2.000 Aufträgen, kommen verschiedene Kombinationsmöglichkeiten in Frage. Daher müssen neben einer reinen Leistungsbetrachtung ebenfalls wirtschaftliche Aspekte wie die laufenden Kosten (bspw. Cost per Pick) für beide Agenten berücksichtigt werden, um so die wirtschaftlichste Alternative wählen zu können.

Darüber hinaus bedarf es einer detaillierten Untersuchung der erforderlichen Auftrags- und Sortimentsstruktur. Wie in Kapitel 5.3.1 beschrieben, werden Aufträge für eine gesamte Woche herangezogen. Vorteilhaft wäre hier vermutlich, wenn eine hohe Anzahl über Nacht bzw. während der Stillstandszeiten eingeht, sodass die Flotte an Robotern die Aufträge bearbeiten kann. Diese erste Vermutung soll durch das Simulationsmodell untersucht werden. Des Weiteren beeinflusst die Sortimentsstruktur den wirtschaftlichen Betrieb von Robotern. Umso höher die Quote an pickbaren Artikeln ist, desto effizienter ist der Einsatz.

Durch eine steigende Marktdurchdringung von mobilen Kommissionierrobotern wird das Interesse und der Bedarf an einer ganzheitlichen Untersuchung der relevanten Steuerungsstrategien zunehmen. Das vorgestellte Modell liefert dazu erste wichtige Erkenntnisse.

#### LITERATUR

- [AEO\*02] Ahuja, Ravindra K.; Ergun, Özlem; Orlin, James B.; Punnen, Abraham P.: *A survey of very large-scale neighborhood search techniques*. In: *Discrete Applied Mathematics* 123 (2002), 1-3, S. 75–102. – DOI 10.1016/S0166-218X(01)00338-9
- [AW08] Andrea, Raffaello D'; Wurman, Peter: *Future challenges of coordinating hundreds of autonomous vehicles in distribution facilities*. In: *2008 IEEE International Conference on Technologies for Practical Robot Applications* (2008), S. 80–83. – DOI 10.1109/TEPRA.2008.4686677
- [AKR19] Azadeh, Kaveh; Koster, René de; Roy, Debjit: *Robotized and Automated Warehouse Systems: Review and Recent Developments*. In: *Transportation Science* 53 (2019), Nr. 4, S. 917–945. – DOI 10.1287/trsc.2018.0873
- [BEV17] BEVH: *Bevorzugte Tageszeiten und Wochentage für Online-Einkäufe* [https://www.boniversum.de/wp-content/uploads/2017/05/Boniversum\\_bevh-Bevorzugte-Tageszeiten-und-Wochentage-fuer-Online-Einkaeufe\\_2017.pdf](https://www.boniversum.de/wp-content/uploads/2017/05/Boniversum_bevh-Bevorzugte-Tageszeiten-und-Wochentage-fuer-Online-Einkaeufe_2017.pdf) – Überprüfungsdatum 2020-07-20
- [BEV18] BEVH: *E-Commerce-Umsatz mit Waren in Deutschland in den Jahren 2000 bis 2017*, 2018
- [BKW19] Boysen, Nils; Koster, René de; Weidinger, Felix: *Warehousing in the e-commerce era: A survey*. In: *European Journal of Operational Research* 277 (2019), Nr. 2, S. 396–411. – DOI 10.1016/j.ejor.2018.08.023
- [CW64] Clarke, G.; Wright, J. W.: *Scheduling of Vehicles from a Central Depot to a Number of Delivery Points*. In: *Operations Research* 12 (1964), Nr. 4, S. 568–581.
- [Cro58] Croes, G. A.: *A Method for Solving Traveling-Salesman Problems*. In: *Operations Research* 6 (1958), Nr. 6, S. 791–812.
- [Dij59] Dijkstra, E. W.: *A note on two problems in connexion with graphs*. In: *Numerische Mathematik* 1 (1959), Nr. 1, S. 269–271. – DOI 10.1007/BF01386390
- [GRC<sup>+</sup>18] Gils, Teun van; Ramaekers, Katrien; Caris, An; Koster, René B.M. de: *Designing efficient order picking systems by combining planning problems: State-of-the-art classification and review*. In: *European Journal of Operational Research* 267 (2018), Nr. 1, S. 1–15. – DOI 10.1016/j.ejor.2017.09.002
- [Gud12] Gudehus, Timm: *Logistik 2*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2012. – ISBN 978-3-642-29375-7
- [HSB11] Hompel, Michael ten; Sadowsky, Volker; Beck, Maria: *Kommissionierung*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2011. – ISBN 978-3-540-29622-5
- [Kla19] Klarna: *Swedes' online shopping habits*. <https://shoppingreport.klarna.com/se-en/> – Überprüfungsdatum 2020-07-20
- [KP19] Kohl, Ann-Kathrin; Pfretzschner, Frederik: *Logistikmonitor 2018: Der Wirtschaftszweig in Zahlen*, 2019
- [KLR07] Koster, René de; Le-Duc, Tho; Roodbergen, Kees Jan: *Design and control of warehouse order picking: A literature review*. In: *European Journal of Operational Research* 182 (2007), Nr. 2, S. 481–501. – DOI 10.1016/j.ejor.2006.07.009
- [LRK20] Lamballais Tessensohn, Tim; Roy, Debjit; Koster, René B.M. de: *Inventory allocation in robotic mobile fulfillment systems*. In: *IIEE Transactions* 52 (2020), Nr. 1, S. 1–17. – DOI 10.1080/24725854.2018.1560517
- [LSL<sup>+</sup>18] Lienert, Thomas; Staab, Tobias; Ludwig, Christopher; Fottner, Johannes: *Simulation-based*



*Performance Analysis in Robotic Mobile Fulfillment Systems - Analyzing the Throughput of Different Layout Configurations*. In: *8th International Conference on Simulation and Modeling Methodologies, Technologies and Applications* (2018), S. 383–390. – DOI 10.5220/0006827103830390

- [LSF19] Lienert, Thomas; Stigler, Ludwig; Fottner, Johannes: *Failure-Handling Strategies For Mobile Robots In Automated Warehouses*. In: *33rd International ECMS Conference on Modelling and Simulation* (2019), S. 199–205. – DOI 10.7148/2019-0199
- [Lin65] Lin, Shen: *Computer Solutions of the Traveling Salesman Problem*. In: *Bell System Technical Journal* 44 (1965), Nr. 10, S. 2245–2269. – DOI 10.1002/j.1538-7305.1965.tb04146.x
- [LBS19] Löffler, M.; Boysen, Nils; Schneider, Michael.: *Picker routing in AGV-assisted order picking systems*, 2019
- [Mag18] Magazino GmbH: *Whitepaper: Selbstlernende Roboter erobern die E-Commerce-Logistik – Wie sieht Fulfillment im Jahr 2025 aus?*, 2018
- [TV14] *Vehicle Routing*. Philadelphia, PA: Society for Industrial and Applied Mathematics, 2014. – ISBN 978-1-61197-358-7
- [VDI3590] Verein Deutscher Ingenieure: *Kommissionierungssysteme Grundlagen*. Düsseldorf
- [WWZ+20] Wang, Wei; Wu, Yaohua; Zheng, Jun; Chi, Cheng: *A Comprehensive Framework for the Design of Modular Robotic Mobile Fulfillment Systems*. In: *IEEE Access* 8 (2020), S. 13259–13269. – DOI 10.1109/ACCESS.2020.2966403

---

**Dirk Kauke, M.Sc.**, Research Assistant at the Chair of Materials Handling, Material Flow, Logistics at the Technical University of Munich.

**Prof. Dr.-Ing. Johannes Fottner**, Professor at the Chair of Materials Handling, Material Flow, Logistics at the Technical University of Munich.

**Address:** Technical University of Munich.  
Department of Mechanical Engineering.  
Chair of Materials Handling, Material Flow, Logistics  
Boltzmannstr. 15  
85748 Garching  
Germany  
Phone: +49 89 289 15930  
Mail: dirk.kauke@tum.de