

# Bewertung von Multi-Agent Path Finding Verfahren für deren Einsatz in robotisierten Logistiksystemen

## Evaluation of Multi-Agent Path Finding Methods for their Application in Robotized Logistics Systems.

Benedikt Hein<sup>1</sup>, Mike Wesselhoeft<sup>2</sup>, Moein Azizpour<sup>1</sup>, Alice Kirchheim<sup>1</sup>, Johannes Hinckeldeyn<sup>2</sup>

Professur für Technologie von Logistiksystemen, Helmut-Schmidt-Universität <sup>1</sup>  
Institut für Technische Logistik, Technische Universität Hamburg <sup>2</sup>

**S**eit einigen Jahren existieren Logistiksysteme, in denen hunderte Autonome Mobile Roboter für die Kommissionierung oder Sortierung eingesetzt werden. Die Pfadplanung für die in diesen Systemen navigierenden Roboter ist ein aktuelles Problem, für dessen Lösung seit geraumer Zeit Multi-Agent Path Finding (MAPF) Verfahren verwendet werden. Bisher besteht jedoch kein Konsens darüber, welche Bewertungskriterien es erlauben, die Eignung einer MAPF-Methode für eine bestimmte Anwendung abzuschätzen. In dieser Arbeit leiten wir daher qualitative Bewertungskriterien her (Skalierbarkeit, Konfliktmanagement und Lösungsqualität), die eine solche Eignungsbeurteilung ermöglichen. Unter Verwendung dieser Kriterien stellen wir fest, dass für Robotic Mobile Fulfillment Systeme die Priority Based Search geeignet ist, während in robotisierten Sortiersystemen die Explicit Estimation Conflict Based Search zweckmäßig ist. Für roboter-basierte Produktionsversorgung wiederum, empfehlen wir die Conflict Based Search.

*[Robotisierte Logistiksysteme, Multi-Agent Path Finding, Pfadfindung, Autonome Mobile Roboter]*

**I**n recent time, logistics systems have been in place in which hundreds of autonomous mobile robots are used for tasks such as picking or sorting. Path planning for the robots navigating in these systems is still a relevant problem, for which Multi-Agent Path Finding (MAPF) methods have been considered for some time. However, there has been no consensus on which evaluation criteria allow for estimating the suitability of a MAPF method for a particular application. In this work, we therefore derive qualitative evaluation criteria (scalability, conflict management, and solution quality), that enable such a suitability assessment. We use these criteria to find that Priority Based Search is suitable for Robotic Mobile Fulfillment systems, while Explicit Estimation Conflict Based Search is appropriate in robotic sorting systems. For robotic-based production logistics, we recommend the Conflict Based Search algorithm.

*[Robotized Logistic Systems, Multi-Agent Path Finding, Path-planning, Autonomous Mobile Robots]*

### 1 EINLEITUNG

In heutigen Logistiksystemen mit automatisierten Flurförderzeugen erfolgt die Navigation zumeist anhand vorgegebener Pfade, beispielsweise realisiert durch Lasernavigation oder induktive Leitspuren. Diese Art der Navigation ist zweckmäßig, wenn Flurförderzeuge auf den immer gleichen Routen verfahren und die Anzahl der Flurförderzeuge einen stetigen Materialfluss auf diesen Routen erlaubt. Anders verhält es sich in robotisierten Logistiksystemen in denen hunderte Autonome Mobile Roboter (AMR) eingesetzt werden [1], die zwischen dynamisch zugewiesenen Start- und Zielpunkten verfahren. Hierbei wird für jeden AMR ein Pfad berechnet, welcher Informationen aus einer Karte der zu durchquerenden Umgebung berücksichtigt. Bei der Berechnung dieser Pfade kann es vor allem bei steigender Zahl von gleichzeitig navigierenden Robotern zu unvorhergesehenen Überschneidungen zwischen den geplanten Pfaden kommen.

Der Einsatz von AMR in Logistiksystemen hat erst in den letzten Jahren stark zugenommen. Aus diesem Grund gibt es immer noch einen Bedarf die Pfadplanung zu verbessern [2]. Eine heute in der Forschung aktiv diskutierte Möglichkeit die Pfadplanung durchzuführen, ist der Einsatz von MAPF Verfahren [3]. Übertragen auf Logistiksysteme wird bei MAPF-Verfahren jeder AMR, von einem mobilen Agenten repräsentiert. Das Ziel der MAPF-Verfahren ist eine Pfadplanung für mehrere Agenten unter der Bedingung, dass jeder Agent sein Ziel erreicht und die Agenten nicht kollidieren.

Der Nutzen von MAPF-Verfahren wird bereits für den Einsatz in der Logistik diskutiert [4][5]. Da die dort gewählten Anwendungsfälle reale Logistiksysteme nur unzureichend abbilden, ist bisher eine Bewertung der Eignung von MAPF-Verfahren in diesen Systemen nicht möglich. Aus diesem Grund liegt der Fokus dieser Arbeit auf der Herleitung und Anwendung qualitativer Bewertungskriterien für den Einsatz von MAPF-Verfahren in robotisierten Logistiksystemen.

In den nachfolgenden Abschnitten wird zunächst in Abschnitt 2 auf die Grundlagen von robotisierten

Logistiksystemen und Multi-Agent Path Finding eingegangen. Darauf folgt in Abschnitt 3 die Herleitung der Bewertungskriterien, welche in Abschnitt 4 auf die betrachteten MAPF-Algorithmen angewendet werden. In Abschnitt 5 finden die Kriterien dann Anwendung in einer Anforderungsanalyse für MAPF in den Anwendungsfällen: Robotic Mobile Fulfillment Systeme (RMFS), robotisierte Sortiersysteme (RSS) und robotisierte Produktionsversorgung (hier als RPV abgekürzt). Als Ergebnis wird in Kapitel 6 die Bewertung der MAPF-Algorithmen mit der Anforderungsanalyse der Anwendungsfälle synthetisiert, und somit eine Eignungseinschätzung ermittelt. Abschließend identifizieren wir in Abschnitt 7 weiteres Forschungspotenzial im Bereich von MAPF-Verfahren, und deren Anwendung in robotisierten Logistiksystemen.

## 2 GRUNDLAGEN

Als Ausgangspunkt unserer Überlegungen werden in diesem Abschnitt zuerst robotisierte Logistiksysteme im Allgemeinen, und nachfolgend drei konkrete Beispiele vorgestellt. Anschließend wird die Pfadplanung für einen einzelnen mobilen Agenten, und darauf aufbauend, Multi-Agent Path Finding beschrieben. Abschließend werden drei MAPF-Lösungsverfahren vorgestellt, die bereits im Kontext von Logistiksystemen analysiert wurden.

### 2.1 ROBOTISIERTE LOGISTIKSYSTEME

Die technologischen Entwicklungen der letzten Jahre bieten zukünftig die Möglichkeit, Logistikprozesse, wie das Kommissionieren, Sortieren und Verteilen, durch den Einsatz von AMR neu zu gestalten. In diesem Beitrag bezeichnen wir ein Logistiksystem als „robotisiert“, wenn dessen Funktion maßgeblich durch die Anwendung Autonomer Mobiler Roboter bestimmt ist. Hierbei werden ausschließlich industriell genutzte Umsetzungen betrachtet. Im kommenden Abschnitt sind drei der bekanntesten dieser Systeme zusammengefasst.

#### Robotic Mobile Fulfillment Systeme

In den letzten Jahren hat sich das Robotic Mobile Fulfillment System (RMFS), siehe Abbildung 1, als neues Ware-zur-Person-Lagersystem Anwendung etabliert, welches insbesondere auf die Bedürfnisse des E-Commerce zugeschnitten ist. In diesen Systemen transportiert eine Flotte mobiler Roboter Warenbehälter (mobile Regale) zwischen Kommissionierstationen und Lagerorten. Hierfür ist eine effiziente Pfadplanung erforderlich. In den Anfängen des Robotic Mobile Fulfillment wurde die Pfadplanung für jeden mobilen Roboter isoliert betrachtet, und mit einem klassischen A\*-Algorithmus gelöst [1]. Seit geraumer Zeit wird jedoch auch der Einsatz von MAPF-Algorithmen in RMFS diskutiert [2][5][6].

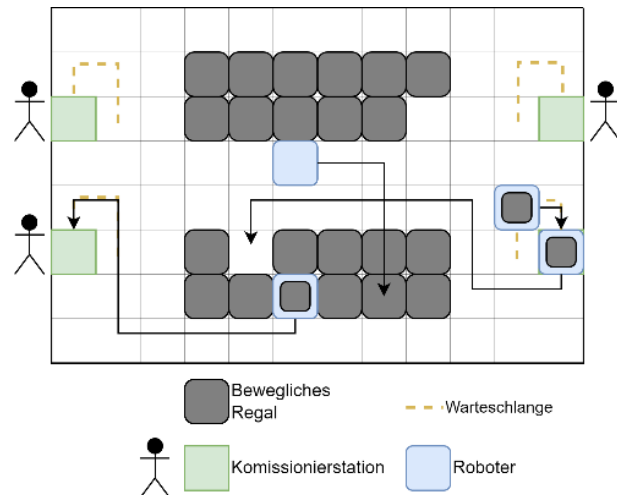


Abbildung 1: Vereinfachte Darstellung eines Robotic Mobile Fulfillment Systems. Die in schwarz eingezeichneten Pfeile visualisieren die für die Roboter geplanten Pfade.

#### Robotisierte Sortiersysteme

In robotisierten Sortiersystemen ist die Aufgabe der AMR, wiederholt Transportaufgaben zwischen bestimmten Abholpositionen und Lieferpositionen auszuführen [7] [8]. Da in diesen Systemen mehrere hundert Roboter simultan navigieren, wird auch hier der Nutzen von MAPF-Verfahren analysiert [6] [9]. Eine vereinfachte Darstellung dieses Systemtyps ist in Abbildung 2 abgebildet.

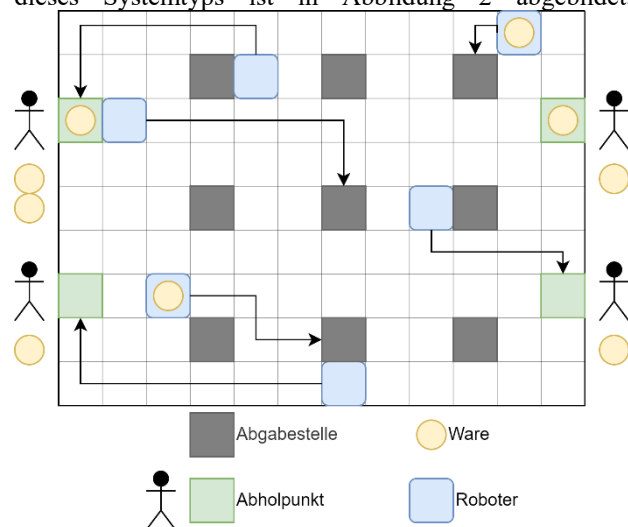


Abbildung 2: Vereinfachte Darstellung eines robotisierten Sortiersystems

#### Robotisierte Produktionsversorgung

Bei der Produktionsversorgung wurden in der Vergangenheit häufig Stetigförderer oder Routenzüge verwendet. Während diese Form der Versorgung in den meisten Fällen zielführend ist, bietet sie allerdings kaum Flexibilität und erfordert im Falle von Änderungen des Produktionslayouts auch einen Umbau der Förderstrecke. Um diesen Einschränkungen zu entgegenzuwirken, werden in der

robotisierten Produktionsversorgung AMR verwendet. Hierbei ist das Ziel der AMR einzelne Arbeitsstationen eines Produktionsprozesses mit Materialien zu versorgen [10]. Anwendung findet die robotisierte Produktionsversorgung bereits in Montage- und Produktionswerken von Automobilherstellern [11]. In Abbildung 3 ist ein vereinfachtes Beispiel der robotisierten Produktionsversorgung dargestellt. Die Kombination mit bewährten Systemen wie z.B. Routenzügen ist ebenfalls möglich [12]. Der Nutzen von MAPF wird auch hier bereits untersucht [13].

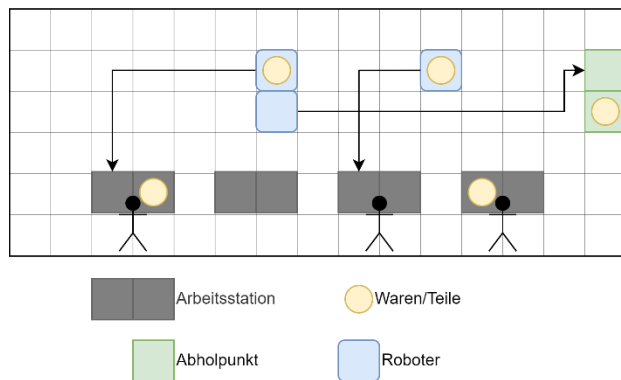


Abbildung 3: Schematische Darstellung einer einzelnen Produktionslinie innerhalb einer robotisierten Produktionsversorgung.

## 2.2 PFADFINDUNG

Das Ziel der Pfadfindung für mobile Agenten besteht darin eine Aktionsfolge für einen Agenten zu finden, welche diesen von seiner aktuellen Position zu einer gewünschten Zielposition leitet. Daraus resultiert ein Pfad, welcher durch eine Karte der zu durchquerenden Umgebung (beispielsweise eine befahrbare Fläche innerhalb eines Logistiksystems) führt. Diese Karten werden im Allgemeinen mittels eines Rasters diskretisiert, und durch einen ungerichteten Graphen  $G = (V, E)$  repräsentiert. Hier steht  $V$  für eine Menge von Knoten und  $E$  für eine Menge von Kanten. Ein Knoten wird als Position im Raum interpretiert, welche entweder frei, oder von einem Agenten oder einem statischen Hindernis belegt ist. Kanten repräsentieren die Verknüpfungen zwischen den Positionen.

Angesichts des freien Raums, in dem sich der Agent bewegt, existieren zahlreiche mögliche Pfade durch den Graphen, die in ihrer Länge und Güte variieren. Das Ziel von Pfadplanungsalgorithmen ist es nun den optimalen Pfad, aus der Menge der möglichen Pfade zwischen einem Startpunkt  $s \in V$  und einem Zielpunkt  $z \in V$ , zu finden. Optimal ist ein Pfad, wenn dieser aus der Minimierung einer oder mehrerer Zielfunktionen resultiert, beispielsweise aus der Minimierung der Pfadlänge oder der geschätzten Dauer bis zum Erreichen des Ziels.

## 2.3 MULTI-AGENT PATH FINDING

In Anlehnung an [14] definieren wir ein MAPF Problem wie folgt: Gegeben ist ein Tupel  $\langle G, S, Z \rangle$ , wobei  $G = (V, E)$  einen ungerichteten Graphen repräsentiert, auf dem sich eine Zahl von  $m \in \mathbb{N}$  Agenten bewegen.  $S$  und  $Z$  repräsentieren Mengen, welche jedem der  $m$  Agenten einen Startpunkt  $s \in V$  und einem Zielpunkt  $z \in V$  zuweisen. Ziel des Multi-Agent Path Finding ist es für jeden Agenten einen kollisionsfreien und zielführenden Pfad zu berechnen.

Zur Lösungsfindung wird im ersten Schritt für jeden Agenten ein isoliertes Pfadfindungsproblem gelöst - wie in Abschnitt 2.2 beschrieben. Da jedoch mehrere Agenten betrachtet werden, sind Konflikte zwischen den geplanten Pfaden der Agenten zu erwarten, beispielsweise wenn zwei Agenten zur selben Zeit am selben Ort eingeplant sind. Im zweiten Schritt erfolgt daher die Auflösung dieser Konflikte, die für die erfolgreiche Lösung des MAPF-Problems elementar ist.

Um die beschriebene Definition eines MAPF-Problems zu lösen, existieren heute viele MAPF-Verfahren, im Allgemeinen auch MAPF-Löser (engl. MAPF-Solver) genannt. Im ersten Schritt ähneln sich diese zumeist, doch bei der Art und Weise wie Konflikte aufgelöst werden gibt es Unterschiede.

In den folgenden Abschnitten werden drei MAPF-Verfahren vorgestellt, die bereits mehrfach in Veröffentlichungen im Kontext der Logistik eingesetzt wurden.

## 2.4 CONFLICT BASED SEARCH

Conflict-Based Search (CBS) [15] ist ein MAPF-Löser, der vollständig und optimal ist. Hier wird zuerst der kürzeste Pfad für jeden Agenten berechnet (andere Agenten werden vorerst ignoriert). Existieren Konflikte zwischen den geplanten Pfaden zweier Agenten, so löst CBS diese auf indem zwei alternative Pfade berechnet werden. In diesen alternativen Pfaden ist es jeweils einem der an der Kollision beteiligten Agenten verboten sich zum Zeitpunkt des Konfliktes an der konfliktauslösenden Position aufzuhalten. CBS wiederholt dieses Verfahren so lange bis es für jeden Konflikt die optimale Lösung gefunden hat. Wichtig ist hier zu verstehen, dass jeder der alternativen Pfade ebenfalls auf weitere Konflikte geprüft wird. CBS garantiert Vollständigkeit, indem immer beide Möglichkeiten zur Lösung jedes Konflikts untersucht werden, und garantiert Optimalität, indem beim Planen der Pfade immer eine Best-First-Suche durchgeführt wird.

## 2.5 EXPLICIT ESTIMATION CONFLICT BASED SEARCH

Explicit Estimation Conflict Based Search (EECBS) [16] ist eine beschränkt-suboptimale Version von CBS, welche die Best-First Suche des CBS durch eine explizit schätzende Suche [17] ersetzt. Das Auflösen von

Konflikten wird in diesem Fall nicht mehr wie beim CBS Algorithmus durch aufwändige Untersuchung aller möglichen alternativen Pfade umgesetzt. Stattdessen wird eine erlernte Schätzung durchgeführt, die bestimmt, für welchen der am Konflikt beteiligten Agenten ein alternativer Pfad berechnet wird. So wird effektiv die Komplexität der Konfliktauflösung reduziert.

## 2.6 PRIORITY BASED SEARCH

Priority Based Search (PBS) [18] ähnelt dem CBS Algorithmus. Allerdings weist der PBS Algorithmus beim Lösen eines Konfliktes einem der an dem Konflikt beteiligten Agenten eine höhere Priorität als dem anderen zu. Neu geplant wird lediglich für den Agenten mit der niedrigeren Priorität, eine effiziente Methode zur Lösung der Konflikte.

## 3 BEWERTUNGSKRITERIEN FÜR MAPF IN ROBOTISIERTEN LOGISTIKSYSTEMEN

Im Rahmen dieses Kapitels werden die qualitativen Bewertungskriterien zur Anwendbarkeit von MAPF-Lösern in robotisierten Logistiksystemen vorgestellt.

### 3.1 SKALIERBARKEIT

Skalierbarkeit ist ein zentrales Bewertungskriterium für MAPF-Löser, da die Komplexität eines MAPF-Problems exponentiell mit der Anzahl der AMR ansteigt [3]. Maßgeblich zurückzuführen ist der Anstieg der Komplexität auf die Neuberechnung von Pfaden im Konfliktfall, dessen Wahrscheinlichkeit mit steigender Zahl von Agenten zunimmt. In diesem Zusammenhang beschreibt Skalierbarkeit die Abhängigkeit zwischen der Anzahl der AMR im System und der zur Pfadfindung benötigten Anzahl an Rechenoperationen. Insbesondere im Bereich der robotisierten Logistiksysteme ist dies von Relevanz, da eine Vielzahl von AMR in einer dynamischen Umgebung zu steuern ist.

### 3.2 KONFLIKTMANAGEMENT

Das Konfliktmanagement ist abhängig von der Strategie zur Lösung der Konflikte zwischen den geplanten Pfaden der AMR. Dabei ist sowohl die Effizienz als auch die Effektivität des Konfliktmanagements von Belang. Dies gilt insbesondere in engen Umgebungen mit vielen Fahrzeugen. In diesem Fall steht Effizienz für die Anzahl an Berechnungsschritten (bedingt durch die Suche nach der Lösung für Konflikte vgl. Abschnitt 2.4). Die Effektivität der Konfliktauflösung beschreibt, wie nahe die gefundene Auflösung an der optimalen liegt.

### 3.3 LÖSUNGSQUALITÄT

Die Lösungsqualität beschreibt, wie nahe die Lösung eines MAPF-Lösers an der optimalen Lösung ist. Die

Qualität einer Lösung nimmt beispielsweise ab, wenn Umwege, Blockierungen oder Stillstände eingeplant werden. Da dies vom Konfliktmanagement des MAPF-Lösers abhängt, besteht zwischen diesen beiden Kriterien ein Zusammenhang.

## 4 BEWERTUNG DER MULTI-AGENT PATH FINDING VERFAHREN

In diesem Kapitel werden die in Abschnitt 3 vorgestellten Bewertungskriterien auf die in Abschnitt 4 vorgestellten MAPF-Verfahren angewendet. Dabei ordnen wir den Algorithmen jeweils deren Erfüllungsgrad der Bewertungskriterien zu. Hier unterteilen wir in **niedrig bis mittel**, **mittel bis hoch** und **hoch**.

### Bewertung von Conflict Based Search

Der CBS Algorithmus löst Konflikte vollständig auf, woraus optimale Pfade entstehen. Die Lösungsgüte wird aus diesem Grund als **hoch** bewertet. Im Umkehrschluss wirkt sich die Suche nach optimalen Pfaden negativ auf die Skalierbarkeit aus, die daher mit **niedrig** bewertet wird. Für auftretende Konflikte wird die optimale Lösung gefunden, doch dessen aufwändige Berechnung vermindert die Erfüllung des Kriteriums des Konfliktmanagement, sodass hier eine **niedrige bis mittlere** Bewertung erfolgt.

### Bewertung von Explicit Estimation Conflict Based Search

Durch die Anwendung der explizit schätzenden Suche zur Beschleunigung der Auflösung von Konflikten erreicht der EECBS erhöhtes Skalierungspotenzial [19], welches daher als **hoch** bewertet wird. Im Vergleich mit dem PBS Algorithmus wird die Auflösung der Konflikte mit erhöhter Güte vollzogen. Wir schätzen daher das Konfliktmanagement von EECBS als **mittel bis hoch** ein. Aus [16] geht hervor, dass die von EECBS gefundenen Lösungen selbst für große MAPF-Instanzen mit bis zu 1000 Agenten teils nur geringfügig von der optimalen Lösung abweichen. Daraus resultierend bewerten wir die Lösungsqualität des EECBS als **mittel bis hoch**.

### Bewertung von Priority Based Search

Der PBS Algorithmus wurde bereits erfolgreich in Anwendungsfällen mit bis zu 600 gleichzeitig navigierenden Agenten angewendet [18]. Wir bewerten die Skalierbarkeit in diesem Fall daher als **hoch**. Konflikte löst PBS, indem einem der zwei im Konflikt stehenden Agenten eine höhere Priorität zugewiesen wird. Diese Methode ist effizient, aber nicht notwendigerweise effektiv, wir bewerten das Konfliktmanagement des PBS daher als **niedrig bis mittel**. Aus dem gleichen Grund sind die von PBS gefundenen Pfade suboptimal, daher wird die Lösungsqualität ebenfalls als **niedrig bis mittel** bewertet.

#### 4.1 ZUSAMMENFASSUNG DER BEWERTUNG

Tabelle 1 fasst die Bewertung der MAPF-Verfahren in Bezug auf die hergeleiteten Kriterien für deren Einsatz in robotisierten Logistiksystemen zusammen. Dabei wird auf die zu Beginn von Abschnitt 4 beschriebenen Unterteilungen zurückgegriffen. Die Bewertung des jeweiligen Algorithmus in Bezug auf die Bewertungskriterien wird dabei durch schwarz ausgefüllte Kästen visualisiert.

Tabelle 1: Zusammenfassung der bewerteten MAPF-Verfahren. Die Anzahl der schwarz ausgefüllten Kästchen stellt den Erfüllungsgrad des jeweiligen Bewertungskriteriums dar.

	Skalierbarkeit	Konfliktmanagement	Lösungsqualität
CBS	■□□□	■●□□	■●●■
EECBS	■●●■	■●●□	■●●□
PBS	■●●■	■●□□	■●□□

### 5 ANFORDERUNGSANALYSE FÜR MAPF IN ROBOTISIERTEN LOGISTIKSYSTEMEN

In diesem Abschnitt werden die zugrunde liegenden MAPF-Probleme der in Abschnitt 2.1 vorgestellten Systeme hinsichtlich der hergeleiteten Bewertungskriterien analysiert.

#### Anforderungsanalyse für Robotic Mobile Fulfillment Systeme

In Robotik Mobile Fulfillment Systemen sind bereits heute hunderte von AMR gleichzeitig im Einsatz. Daraus resultieren **mittlere bis hohe** Anforderungen an die Skalierbarkeit des verwendeten MAPF Algorithmus. In RMFS ist an den zu beliefernden Kommissionierstationen erhöhtes Konfliktpotenzial zu erwarten [5]. Dieses wird im Allgemeinen jedoch durch Warteschlangen vor den zu beliefernden Kommissionierstationen entschärft, weshalb wir die Anforderungen an das Konfliktmanagement als **niedrig bis mittel** einstufen. Die Warteschlangen vor den Kommissionierstationen entstehen da im Regelfall der Vorgang des Kommissionierens aus den Regalen zeitlich der limitierende Faktor ist. Aus dem gleichen Grund kann ein RMFS nicht vollständig von optimal geplanten Pfaden profitieren. Die benötigte Lösungsqualität wird daher als **niedrig bis mittel** eingestuft.

#### Anforderungsanalyse für Robotisierte Sortiersysteme

Die höchste Anzahl an gleichzeitig agierenden AMR ist in diesem Vergleich in RSS zu erwarten. Daraus resultieren **hohe** Anforderungen an die Skalierbarkeit des verwendeten MAPF Algorithmus. Verglichen mit RMFS sind in RSS in der Regel mehr Zielstationen vorgesehen, für die keine Warteschlangen vorgesehen sind. Die Kombination

dieser beiden Gegebenheiten führt zu **mittleren bis hohen** Anforderungen an das Konfliktmanagement. In RSS ist die Sortiergeschwindigkeit des Systems abhängig von der Güte der geplanten Pfade, weshalb wir die benötigte Lösungsqualität als **mittel bis hoch** einstufen.

#### Anforderungsanalyse für Robotisierte Produktionsversorgung

Die Versorgung von Arbeitsstationen ist stark von der Art der Produktion abhängig. In den meisten Fällen werden dabei allerdings zweistellige Anzahlen von AMR verwendet [20] [21]. Entsprechend ist die Anforderung an die Skalierbarkeit im Vergleich zu den anderen beiden Szenarien **niedrig**. Aufgrund des geregelten Materialflusses innerhalb einer Produktion und der geringeren Anzahl von AMR, sind Konflikte vermeidbar und daher die Anforderungen an das Konfliktmanagement als **niedrig** einzuschätzen. Für eine reibungslose Produktion ist eine hohe Auftragsdurchlaufzeit und damit eine **hohe** Lösungsqualität des MAPF-Problems notwendig.

### 5.1 ÜBERSICHT DER MAPF-ANFORDERUNGEN FÜR DIE ANWENDUNGSFÄLLE

Zusammenfassend werden die identifizierten Anforderungen für den Einsatz von MAPF-Lösern in robotisierten Logistiksystemen von Tabelle 2 dargestellt. Besonders hervorzuheben sind hier die unterschiedlichen Anforderungen in Bezug auf die geforderte Lösungsgüte und die benötigte Skalierbarkeit.

Tabelle 2: Zusammenfassung der Anforderungsanalyse der Logistiksysteme. Die Anzahl der schwarz ausgefüllten Kästchen stellt den benötigten Erfüllungsgrad der Anforderung dar.

	Skalierbarkeit	Konfliktmanagement	Lösungsqualität
RMFS	■●●□	■●□□	■●□□
RSS	■●●■	■●●□	■●●□
RPV	■□□□	■□□□	■●●■

### 6 EMPFEHLUNG FÜR MAPF-VERFAHREN IN DEN ANWENDUNGSFÄLLEN

Nachdem sowohl die MAPF-Verfahren als auch die Anwendungsfälle behandelt wurden, wird in diesem Kapitel die Bewertung der MAPF-Algorithmen mit der Anforderungseinschätzung der Anwendungsfälle synthetisiert. Für jeden der Anwendungsfälle wird, anhand eines Vergleiches von Anforderung und Bewertung, ein MAPF-Algorithmus für den Einsatz im jeweiligen System empfohlen.

## 6.1 HERLEITUNG DER EMPFEHLUNGEN

Für den Einsatz in RMFS eignen sich in Bezug auf die drei untersuchten Algorithmen sowohl der PBS als auch der EECBS Algorithmus, da diese die Anforderungen an die Skalierbarkeit erfüllen (siehe Tabelle 3).

Tabelle 3: Vergleich von Anforderungen und Anforderungserfüllung für MAPF in RMFS. Das für den Anwendungsfall empfohlene MAPF-Verfahren ist in grün hervorgehoben

	Skalierbarkeit	Konfliktmanagement	Lösungsqualität
RMFS	■ ■ ■ □	■ ■ □ □	■ ■ □ □
CBS	■ □ □ □	■ ■ □ □	■ ■ ■ ■
EECBS	■ ■ ■ ■	■ ■ ■ □	■ ■ ■ □
PBS	■ ■ ■ ■	■ ■ □ □	■ ■ □ □

In RSS sind ist in diesem Vergleich die höchste Anzahl an gleichzeitig navigierenden Fahrzeugen zu erwarten. Aus diesem Grund stellt die Skalierbarkeit des verwendeten MAPF-Verfahrens für RSS das wichtigste Kriterium dar. Zusätzlich ist jedoch die Lösungsqualität von entscheidender Bedeutung für die Performanz des Gesamtsystems. Wie aus Tabelle 4 hervorgeht, erfüllt in unserer Betrachtung lediglich der EECBS alle nötigen Anforderungen.

Tabelle 4: Vergleich von Anforderungen und Anforderungserfüllung für MAPF in RSS

	Skalierbarkeit	Konfliktmanagement	Lösungsqualität
RSS	■ ■ ■ ■	■ ■ ■ □	■ ■ ■ □
CBS	■ □ □ □	■ ■ □ □	■ ■ ■ ■
EECBS	■ ■ ■ ■	■ ■ ■ □	■ ■ ■ □
PBS	■ ■ ■ ■	■ ■ □ □	■ ■ □ □

Bei der robotisierten Produktionsversorgung steht die Lösungsqualität des verwendeten MAPF-Verfahrens im Zentrum der Anforderungsanalyse. Im aufgeführten Vergleich erfüllt lediglich der CBS Algorithmus diese Anforderung (vgl. Tabelle 5). Da Skalierbarkeit und Konfliktmanagement ebenfalls erfüllt sind, ist der vollständige und optimale MAPF-Löser, CBS, hier die Empfehlung.

Tabelle 5: Vergleich von Anforderungen und Anforderungserfüllung für MAPF in RPV

	Skalierbarkeit	Konfliktmanagement	Lösungsqualität
RPV	■ □ □ □	■ □ □ □	■ ■ ■ ■
CBS	■ □ □ □	■ ■ □ □	■ ■ ■ ■
EECBS	■ ■ ■ ■	■ ■ ■ □	■ ■ ■ □
PBS	■ ■ ■ ■	■ ■ □ □	■ ■ □ □

## 6.2 DISKUSSION DER ERGEBNISSE

Aus dem Vergleich von Anforderungen und Bewertungen konnten wir Algorithmen für die jeweiligen Anwendungsfälle empfehlen. Bemerkenswert ist, dass der EECBS Algorithmus in unserem Vergleich die meisten Anforderungen erfüllen konnte. Hierbei möchten wir jedoch anmerken, dass der EECBS in diesem Vergleich das neuste Verfahren ist. Zusammenfassen lässt sich feststellen, dass die Eignung von MAPF-Verfahren für ein bestimmtes Szenario in erster Linie von den Kriterien Skalierbarkeit und Lösungsqualität abzuhängen scheint.

## 7 AUSBLICK

Aufbauend auf der qualitativen Eignungsanalyse, die in dieser Studie präsentiert wurde, stellt die empirische Analyse über die Eignung von MAPF für robotisierte Logistiksysteme ein interessantes Terrain für weitere Forschungsansätze dar. Künftige Beiträge könnten die hier vorgestellten MAPF-Verfahren auf verschiedene Anwendungsfälle aus der Logistik anwenden, um so eine erste quantifizierbare Grundlage für MAPF in der Logistik zu schaffen. Hierbei erachten wir die realitätsnahe Abbildung des zu untersuchenden Systems als zentrale Bedingung für die erfolgreiche Empfehlung eines MAPF-Verfahrens. Ein weiteres aktuelles Forschungsgebiet betrachtet die Lösung des MAPF-Problems durch Anwendung von Deep Reinforcement Learning (DRL) Verfahren [22][4]. Hier werden neuronale Netze für die Lösung von MAPF-Problemen verwendet. Diese Herangehensweise bietet einen bedeutsamen Vorteil in Bezug auf die Skalierbarkeit. Zukünftige Arbeiten sollten einen genauen Vergleich zwischen Graphen-basierten und DRL-basierten Verfahren herstellen. Eine weitere Forschungsperspektive besteht aus der Verknüpfung von DRL und Graph-basierten Methoden zur Lösung von MAPF bestehen.

## LITERATUR

- [1] Peter R. Wurman, Raffaello D'Andrea und Mick Mountz, „Coordinating Hundreds of Cooperative, Autonomous Vehicles in Warehouses“. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.aaai.org/Papers/AAAI/2007/AAAI07-282.pdf>
- [2] Í. R. Da Costa Barros und T. P. Nascimento, „Robotic Mobile Fulfillment Systems: A survey on recent developments and research opportunities“, *Robotics and Autonomous Systems*, Jg. 137, S. 103729, 2021, doi: 10.1016/j.robot.2021.103729.
- [3] Roni Stern *et al.*, „Multi-Agent Pathfinding: Definitions, Variants, and Benchmarks“ in *Twelfth Annual Symposium on Combinatorial Search*.
- [4] M. Damani, Z. Luo, E. Wenzel und G. Sartoretti, „PRIMAL\$ 2\$: Pathfinding Via Reinforcement and Imitation Multi-Agent Learning - Lifelong“, *IEEE Robotics and Automation Letters*, Jg. 6, Nr. 2, S. 2666–2673, 2021, doi: 10.1109/LRA.2021.3062803.
- [5] L. Xie, N. Thieme und H. Li, *From Simulation to Real-World Robotic Mobile Fulfillment Systems*, 9. Aufl. Bundesvereinigung Logistik (BVL) e.V, 2019.
- [6] J. Li, A. Tinka, S. Kiesel, J. W. Durham, T. K. S. Kumar und S. Koenig, „Lifelong Multi-Agent Path Finding in Large-Scale Warehouses“, 15. Mai 2020. Zugriff am: 6. Mai 2022.
- [7] Zhejiang Libiao Robot Co.,Ltd, *Huangzhou Distribution Center*. [Online]. Verfügbar unter: <http://libiaorobot.com/en/application/detail?id=25> (Zugriff am: 7. August 2022).
- [8] M. Coyle, „New robots, new jobs“, *US About Amazon*, 5. Juni 2019, 2019. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.aboutamazon.com/news/operations/new-robots-new-jobs>. Zugriff am: 9. August 2022.
- [9] N. M. Kou, C. Peng, H. Ma, T. K. S. Kumar und S. Koenig, „Idle Time Optimization for Target Assignment and Path Finding in Sortation Centers“ (en), *AAAI*, Jg. 34, Nr. 06, S. 9925–9932, 2020, doi: 10.1609/aaai.v34i06.6547.
- [10] D. R. Sule, *Manufacturing Facilities: Location, Planning, and Design, Third Edition*, 3. Aufl. Hoboken: CRC Press, 2008.
- [11] R. Schmöl, „Digitalisierung in der BMW-Versorgungslogistik“, *CIO*, 3. März 2016, 2016. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.cio.de/a/digitalisierung-in-der-bmw-versorgungslogistik,3106175>. Zugriff am: 18. August 2022.
- [12] Simplexity, *AMRs: Wie sehen die Anwendungsszenarien von heute und morgen aus?* [Online]. Verfügbar unter: <https://simplexity.news/autonomous-mobile-robots-amrs-wie-sehen-die-anwendungsszenarien-von-heute-und-morgen-aus/> (Zugriff am: 18. August 2022).
- [13] *Towards Autonomous Intralogistics: A Testbed Environment for the Coordination of a Robotic Fleet*, 2020. [Online]. Verfügbar unter: [https://icaps20subpages.icaps-conference.org/wp-content/uploads/2020/10/01-planrob\\_2020\\_paper\\_4.pdf](https://icaps20subpages.icaps-conference.org/wp-content/uploads/2020/10/01-planrob_2020_paper_4.pdf)
- [14] Roni Stern und Nathan R. Sturtevant, „Multi-Agent Pathfinding: Definitions, Variants, and Benchmarks“.
- [15] G. Sharon, R. Stern, A. Felner und N. R. Sturtevant, „Conflict-based search for optimal multi-agent pathfinding“, *Artificial Intelligence*, Jg. 219, S. 40–66, 2015.
- [16] Jiaoyang Li, Wheeler Ruml und Sven Koenig, „EECBS: A Bounded-Suboptimal Search for Multi-Agent Path Finding“ (en), *AAAI*, Jg. 35, Nr. 14, S. 12353–12362, 2021. [Online]. Verfügbar unter: <https://ojs.aaai.org/index.php/aaai/article/view/17466>
- [17] *Bounded suboptimal search: A direct approach using inadmissible estimates*, 2011. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.aaai.org/ocs/index.php/ijcai/ijcai11/paper/viewpaper/3366>
- [18] H. Ma, D. Harabor, P. J. Stuckey, J. Li und S. Koenig, „Searching with Consistent Prioritization for Multi-Agent Path Finding“ (en), *AAAI*, Jg. 33, Nr. 01, S. 7643–7650, 2019.
- [19] J. Li, Z. Chen, D. Harabor, P. J. Stuckey und S. Koenig, „Anytime Multi-Agent Path Finding via Large Neighborhood Search“ in *Proceedings of the Thirtieth International Joint Conference on Artificial Intelligence*, California, 2021, doi: 10.24963/ijcai.2021/568.
- [20] C. Lieb, E. Klenk, S. Galka und C. Keuntje, *Einsatz von Routenzugsystemen zur Produktionsversorgung: Studie zu Planung, Steuerung und Betrieb*. Garching b. München: fml - Lehrstuhl für Fördertechnik Materialfluss Logistik, 2017. [Online]. Verfügbar unter: [https://www.researchgate.net/profile/christian-lieb/publication/329443449\\_einsatz\\_von\\_routenzugsystemen\\_zur\\_produnktionsversorgung\\_-\\_studie\\_zu\\_planung\\_steuerung\\_und\\_betrieb](https://www.researchgate.net/profile/christian-lieb/publication/329443449_einsatz_von_routenzugsystemen_zur_produnktionsversorgung_-_studie_zu_planung_steuerung_und_betrieb)
- [21] *An intelligent fleet for the Audi A8*. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.grenzebach.com/en/company/news-press/detail/an-intelligent-fleet-for-the-audi-a8/> (Zugriff am: 18. August 2022).
- [22] G. Sartoretti *et al.*, „PRIMAL: Pathfinding via Reinforcement and Imitation Multi-Agent Learning“ 3, 2018. [Online]. Verfügbar unter: <https://arxiv.org/pdf/1809.03531>.

---

**Benedikt Hein, M.Sc.**, Benedikt Hein schloss 2021 sein Masterstudium im Bereich "Robotik und autonome Systeme" an der Universität zu Lübeck ab und führte dann seine akademische Laufbahn als Wissenschaftlicher

Mitarbeiter an der Helmut-Schmidt-Universität fort. Dort beschäftigt er sich mit dem Einsatz von autonomen mobilen Robotern in der Intralogistik.

Adresse: Professur für Technologie von Logistiksystemen, Helmut-Schmidt-Universität / Universität der Bundeswehr Hamburg, Holstenhofweg 85, 22043 Hamburg

**Mike Wesselhöft, M.Sc.**, Wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Technische Logistik der Technischen Universität Hamburg. Mike Wesselhöft studierte von 2013 bis 2019 Mathematik an der Universität Hamburg. Nach seinem Masterstudium mit dem Schwerpunkt Künstliche Intelligenz, beschäftigt er sich seit Beginn des Jahres 2020 mit der Steuerung von autonomen Fahrzeugen in Lagern mit Hilfe von Reinforcement Learning.

Adresse: Institut für Technische Logistik der Technischen Universität Hamburg, Theodor-Yorck-Straße 8, 21079 Hamburg.

**Moein Azizpour, M.Sc.**, Moein Azizpour schloss 2020 sein Masterstudium "Nutzfahrzeugtechnik" an der Universität Kaiserslautern ab und setzte anschließend seine akademische Laufbahn als wissenschaftlicher Mitarbeiter an der Helmut-Schmidt-Universität fort. Dort beschäftigt er sich mit der Automatisierung von Pick-and-Place-Robotern in der Lebensmittellogistik.

Adresse: Professur für Technologie von Logistiksystemen, Helmut-Schmidt-Universität / Universität der Bundeswehr Hamburg, Holstenhofweg 85, 22043 Hamburg

**Alice Kirchheim, Prof. Dr.-Ing.**, Professorin für Technologie von Logistiksystemen an der Helmut-Schmidt-Universität in Hamburg. Alice Kirchheim studierte Informatikingenieurwesen an der TU Hamburg und wurde an der Universität Bremen zu einem Thema der Automatisierung logistischer Prozesse promoviert. Nach einer mehrjährigen Tätigkeit in der in der Industrie ist sie seit 2021 Professorin an der Helmut-Schmidt-Universität in Hamburg.

Adresse: Professur für Technologie von Logistiksystemen, Helmut-Schmidt-Universität / Universität der Bundeswehr Hamburg, Holstenhofweg 85, 22043 Hamburg

**Dr. Johannes Hinckeldeyn**, Oberingenieur am Institut für Technische Logistik, Technische Universität Hamburg. Nach seiner Promotion in Großbritannien arbeitete Johannes Hinckeldeyn als Chief Operating Officer bei einem Hersteller von Mess- und Labortechnik für die Batterieforschung. Johannes Hinckeldeyn studierte Wirtschaftsingenieurwesen, Produktionstechnik und Management in Hamburg und Münster. Aktuelle Forschungsschwerpunkte sind insbesondere die Optimierung von Logistikprozessen durch digitale Technologien.

Adresse: Institut für Technische Logistik der Technischen Universität Hamburg, Theodor-Yorck-Straße 8, 21079 Hamburg.

#### **Förderhinweis:**

Diese Arbeit wurde teilweise gefördert durch das Projekt AuLoKomp im Rahmen von dtec.bw - Forschungszentrum Digitalisierung und Technik der Bundeswehr.