

„Ulrich Jumar, Christian Diedrich (Hrsg.):  
EKA 2024 - Entwurf komplexer Automatisierungssysteme, 18. Fachtagung“

## Analyse dezentraler Fahrzeugsteuerungsarchitekturen mittels variierender Autonomiegrade an kritischen Punkten von Intralogistiksystemen

Felix Gehlhoff<sup>1</sup>, Bjarne Huth<sup>1</sup>, Alexander Wenzel<sup>2</sup>

**Abstract:** Produktions- und Logistikunternehmen sind gezwungen, ihre Strategien aufgrund zunehmender Produktvielfalt, kürzerer Produktlebenszyklen und eines Mangels an Fachkräften zu überdenken. Herkömmliche Systemstrukturen mit zentralen Steuerungsinstanzen sind zu unflexibel, um schnell und effizient auf dynamische Einflüsse wie kurzfristige Anpassungen von Prozessabläufen oder individuelle Prozessbedingungen zu reagieren. Um diesen Einflüssen entgegenzuwirken, werden zunehmend intelligente und koordinierte Systeme mit spezifischen Kompetenzbereichen und Funktionalitäten in Produktions- und Logistikprozesse integriert. Auf der Grundlage der Analyse von Herausforderungen in der Intralogistik präsentiert diese Arbeit ein Konzept zur Steuerung sogenannter Koordinationsbedarfspunkte. An diesen Punkten werden die Interaktionen zwischen Systemobjekten im internen Materialtransport koordiniert, was beispielhaft in einer Simulationsumgebung implementiert wird. Durch die Variation von Komplexitätseigenschaften wird die Erreichung logistischer Ziele bei verschiedenen Graden der Steuerungsautonomie analysiert. Dabei wurde ein positiver Einfluss der zunehmenden Autonomie und der Einbeziehung auftragsrelevanter Informationen festgestellt.

**Keywords:** Dezentrale Steuerung, Autonomiegrade, Intralogistik, Simulation

### 1 Einleitung

Der Logistiksektor und Logistiksysteme haben in den letzten Jahrzehnten erhebliche Veränderungen erfahren. Märkte und Kundenanforderungen sind zunehmend volatil geworden, was alle Formen des Bestandsmanagements kompliziert. Dies, zusammen mit den hohen Kapitalanforderungen für Bestände und Fortschritten in schlanken Methoden (Reduzierung von Beständen und Vermeidung von Verschwendung), hat dazu geführt, dass die Branche auf ein sehr präzises und schlankes Logistiksystem umsteigen musste, das Materialien Just in Sequence liefert. Eine solche komplexe Lieferkette ist anfällig für Ausfälle, wenn Störungen in einzelnen Untersystemen auftreten. Dies hat zu einem Bedarf an dezentraler, agiler und autonomer Materialhandhabung in diesen Untersystemen

<sup>1</sup> Helmut-Schmidt-Universität Hamburg, Institut für Automatisierungstechnik, Holstenhofweg 85, 22043 Hamburg, [felix.gehlhoff@hsu-hh.de](mailto:felix.gehlhoff@hsu-hh.de), <https://orcid.org/0000-0002-8383-5323>

<sup>2</sup> Leibniz Universität Hannover, Institut für Fabrikanlagen und Logistik, An der Universität 2, 30823 Garbsen, [wenzel@ifa.uni-hannover.de](mailto:wenzel@ifa.uni-hannover.de), <https://orcid.org/0009-0008-7658-6956>

geführt, um eine insgesamt zuverlässige Intralogistik zu ermöglichen [Sc20]. Die Intralogistik, die Funktionen wie Steuerung, Ausführung und Optimierung interner Material- und Informationsflüsse umfasst [FO21], verzeichnet einen zunehmenden Trend zu höheren Automatisierungsgraden und zur Anwendung moderner Technologien. Mit dem Ziel, die Effizienz interner Prozesse zu verbessern und Kosten zu reduzieren, investieren Unternehmen in automatisierte Lager, intelligente Roboter und andere fortschrittliche Technologien wie AGVs und AMRs, um die wachsenden Dynamiken und Turbulenzen der Marktanforderungen zu bewältigen und eine digitale Transformation der Prozesse zu erreichen [FO21]. Diese Fahrzeuge sind mit den notwendigen Sensoren, Kommunikationsgeräten und Technologien zur Wissensverarbeitung ausgestattet, um komplexe Transportanforderungen sowohl automatisiert als auch möglicherweise autonom zu erfüllen, einschließlich der Koordination mit anderen Fahrzeugen, [RVD20]. Solche intelligenten Subsysteme können lokal operieren und Entscheidungen treffen, wodurch die Gesamtkomplexität des Intralogistiksystems durch die Verteilung von Steuerungskompetenzen auf spezifische Funktionsbereiche reduziert wird [BE16]. Durch die Kombination von Material- und Informationsflüssen ermöglichen sogenannte "aware objects" eine dezentrale Steuerung durch Informationsetiketten, Softwareagenten, verteiltes Wissen und die Fähigkeit, mit anderen Objekten in einem Netzwerk zu kommunizieren. Die intelligenten Systemobjekte sind nicht nur auf Transportobjekte beschränkt, sondern beziehen sich auch auf Umschlagpunkte, Güter und Lastenträger sowie auf Transportwege und Interaktionsbereiche [HO06]. Solche bewussten oder intelligenten Objekte und Entitäten in solchen Systemen können allgemein durch Softwareagenten dargestellt werden, die autonomes und intelligentes Entscheiden sowie flexible Interaktionen mit anderen Agenten und Entitäten im System ermöglichen [RE23].

Die notwendige Koordination umfasst das Aushandeln von Bestellungen und Vorfahrtsrechten, das Bestimmen optimaler Routen durch das System und das Identifizieren von Abhol- und Lieferorten. Die AGVs operieren auf diesen Routen im Transportnetzwerk. Allerdings führt der Einfluss der AGVs aufeinander am Shopfloor zu Situationen, die Interaktion erfordern. Diese Situationen können zu suboptimalem Verhalten und potenziell sogar zu Blockaden führen [HE22].

Traditionell wird die Kollisionsvermeidung durch zentrale Direktiven eines Steuerungssystems verwaltet [HE22]. Eine zentrale Kollisionsvermeidungssteuerung erfasst Informationen über die aktuellen Positionen, Ziele und geplanten Routen aller Fahrzeuge innerhalb eines Systems, um Kollisionspotenziale kreuzender Verkehrswege zu identifizieren [LK12]. Wenn Kollisionspotenziale auftreten, wird entweder die gesamte Route der AGVs neu definiert, der Fahrweg eines Fahrzeugs geändert oder die Fahreigenschaften der Fahrzeuge, wie ihre Geschwindigkeit, angepasst. Dieser Optimierungsprozess wird so lange wiederholt, bis keine Kollisionspotenziale mehr auftreten. Aufgrund der dynamischen Positionsdaten der Fahrzeuge ist ein regelmäßiger Steuerungsprozess erforderlich und entsprechend zeitaufwändig. Herausforderungen bei der zentralen Kollisionsvermeidung treten auf, wenn eine große Anzahl von Fahrzeugen beteiligt ist, was die zu verarbeitende Informationsmenge und damit die Berechnungszeit

---

erhöht [HE22]. Zusätzlich werden nur statische und dynamische Objekte sowie Hindernisse berücksichtigt, die bereits in der virtuellen Umgebung erfasst wurden [RVD20].

Eine autonome Kollisionsvermeidung durch die Fahrzeuge, gängig für AMRs, ist ebenfalls möglich. Dies beinhaltet eine situationspezifische Reaktion der Fahrzeuge auf die lokale Situation [SC20]. Mögliche Reaktionen der Fahrzeuge umfassen entweder eine Geschwindigkeitsreduktion mit einem endgültigen Stopp in definierter Entfernung zum nächsten Fahrzeug oder Ausweichmanöver und Routenanpassungen. Obwohl diese Methode im Vergleich zur zentralen Kollisionsvermeidung deutlich schnellere Reaktionszeiten aufweist [RVD20], ist sie hinsichtlich der gewünschten Priorisierung bestimmter Auftragsarten oder Fahrzeuge unflexibel und garantiert nicht frei von Deadlocks.

Daher besteht der Bedarf für einen Ansatz zur situativen und dezentralen Koordination von Stellen im Transportnetzwerk mit erhöhtem Koordinationsbedarf, im Folgenden als Koordinationsbedarfsstellen (KBS) bezeichnet. Die Steuerung von KBS, ähnlich den Zonensteuerungsansätzen [RVD20], kann in der Struktur variieren und hängt vom Umfang der Entscheidungskompetenzen der Steuerungsinstanzen ab, wobei unterschiedliche Autonomiegrade gezeigt werden. In diesem Papier bezieht sich die Struktur der Steuerung auf den Unterschied in der Entscheidungsfindungslotation und dem Autonomiegrad, während eine Steuerungsstrategie das angewendete Regelwerk zur Ausübung der Kontrolle in einer gegebenen Struktur beschreibt. Somit ist eine autonome, fahrzeuginterne Kollisionsvermeidung per Definition autonomer als ein dezentraler, zonenbasierter Ansatz, da sie nicht erfordert, dass sich die Fahrzeuge einer Hierarchie unterordnen. Allerdings kann selbst eine gegebene Struktur (z.B. dezentral) je nach den Entscheidungen, die noch von den Fahrzeugen getroffen werden, einen unterschiedlichen Grad an Fahrzeugautonomie aufweisen. Die Gestaltung der KBS und die Steuerung von KBS beeinflussen die Komplexität innerhalb des Systems und den notwendigen Informationsaustausch.

Basierend auf einer Analyse der Herausforderungen der modernen Intralogistik mit Fokus auf interne Transportsysteme in den Abschnitten 1 und 2, präsentiert diese Arbeit Eigenschaften der dezentralen KBS-Koordinationssteuerung (Abschnitt 3) und ein Simulationskonzept, das KBS unter verschiedenen Komplexitätseigenschaften berücksichtigt sowie die Ergebnisse der durchgeführten Experimente (Abschnitt 4). Der Beitrag schließt mit einem Fazit und Ausblick in Abschnitt 5.

## **2 Stand der Wissenschaft**

Leitao et al. setzen variable Autonomie im Falle von Störungen ein, indem sie den beteiligten Entitäten eine höhere Autonomie gewähren, wenn Störungen auftreten [LR05]. Dies ermöglicht es den verschiedenen Entitäten, lokal zu operieren, ohne strikt zentralen Direktiven zu folgen, wodurch sie die Möglichkeit erhalten, Ressourcenzuweisungen neu

zu verhandeln oder dynamische Layoutänderungen vorzunehmen. Sobald die Störungen behoben sind, wird das Autonomielevel wieder reduziert [BA15]. Die Autoren zeigen, dass variable Autonomie im Vergleich zu strikt zentralisierten oder dezentralisierten Ansätzen die Durchlaufzeit, die Zykluszeit und die Stabilität verbessert, wenn Systemstörungen auftreten [LR05].

Gronau et al. führen einen Index ein, um den Grad der Autonomie in einem Wertstromproduktionssystem zu messen, indem sie den Anteil autonomer Interaktionen an den Gesamtinteraktionen vergleichen [GT16]. Dieses Konzept basiert auf dem Lean-Index aus der Wertstromanalyse, der die Wertschöpfung eines Prozesses durch den Anteil der nützlichen Zeit an der Gesamtprozesszeit misst. Je näher dieser Wert bei 1 liegt, desto effizienter ist die Zeitnutzung, wodurch unproduktive Zeit durch Verzögerungen minimiert wird.

Windt et al. postulieren, dass die Problemkomplexität mit dem angemessenen Grad der Selbstregulierung oder Dezentralisierung korreliert [W10]. Die Autoren legen dar, dass geringe Problemkomplexität bei hoher Autonomie oder Dezentralisierung zu schlechten Ergebnissen führt. Steigen jedoch Autonomie und Problemkomplexität, verbessert sich die Leistung zunächst, erreicht einen Höhepunkt und fällt dann wieder ab. Diese Annahmen werden durch verschiedene Simulationsstudien getestet, die auch die Rechenzeiten untersuchen und zeigen, dass die Anzahl der erforderlichen Berechnungen in zentralisierten Systemen exponentiell ansteigt, während sie in dezentralisierten Systemen nur linear zunimmt. Das Kommunikationsverhalten und die Rechenkapazitäten zentraler und dezentraler Einheiten werden in diesen Befunden nicht berücksichtigt.

Obwohl diese Ansätze erste Einblicke in das optimale Niveau der Autonomie bieten, ist der Vergleich verschiedener Autonomiegrade aufgrund des unterschiedlichen Designs und der Ergebnisse der Ansätze etwas eingeschränkt. Keine dieser Studien hat die vergleichende Systemleistung für dezentrale, aber hierarchische Systeme im Vergleich zum autonomen Verhalten der Fahrzeuge analysiert. Um eine solche Analyse zu ermöglichen, bietet der folgende Abschnitt eine detaillierte Analyse der Eigenschaften von KBS. Dieser Rahmen kann in Zukunft von beliebigen Algorithmen genutzt werden, um die Implementierung und den Vergleich verschiedener Algorithmen mit unterschiedlichen Graden der Dezentralisierung und Autonomie zu ermöglichen.

### **3 Eigenschaften von Koordinationsbedarfsstellen**

KBS in modernen Intralogistiksystemen, die AGVs und AMRs verwenden, erfordern aufgrund geteilter Transportwege einen erhöhten Koordinationsaufwand. Diese KBS treten auf, wo Fahrzeuginteraktionen und Interaktionen mit anderen Systemobjekten stattfinden. Jede KBS erfordert spezifische Entscheidungen, um Sicherheit zu gewährleisten und den Verteilungsprozess effizient zu gestalten. Besonders kritisch sind Kreuzungen, wo mehrere Transportwege zusammentreffen, und eine erhöhte

Kommunikations- und Steuerungsanforderung besteht. Der Erfolg der lokalen Koordination zeigt sich in kollisionsfreien Durchgängen, termintreuer Lieferung, also des Abschluss des Auftrags vor Ende des avisierten Liefertermins, und minimalen Wartezeiten. Wartezeiten beeinflussen nicht nur die Termintreue der Transportaufträge, sondern auch die Energieeffizienz der Fahrzeuge negativ.

Die detaillierte Analyse der oben genannten KBS, fokussiert auf Kreuzungen in Intralogistiksystemen, erfordert eine umfassende Untersuchung der Eigenschaften solcher Punkte. Der Bereich, in dem Materialflüsse zusammentreffen, kann als eine Art Ressource mit begrenzter physischer Kapazität interpretiert werden. Um den Interaktionsbereich und den Zugriff auf einer KBS effektiv zu gestalten, wird ein Rahmen zur Erfassung von Konfliktstellen innerhalb der Interaktionsfläche eines Kreuzungsbereichs bereitgestellt. Anschließend wird eine Auswahl an Steuerungsmöglichkeiten zur Bestimmung der Reihenfolge der Durchgänge vorgestellt. Zusätzlich wird die Auswirkung der Koordinationsentscheidungen auf das individuelle Fahrverhalten dargestellt und die Unterschiede in der Steuerungsstruktur werden präsentiert.

Die Koordination einer KBS kann durch einen iterativen Prozess implementiert werden:

- Identifizierung von Konflikten zwischen den AGVs
- Entscheidung der Reihenfolge basierend auf einer Steuerungsstrategie
- Anpassung des Fahrverhaltens des untergeordneten AGVs
- Neubewertung der Routenkonflikte

Dieser Koordinationsprozess wird wiederholt, bis keine zeitlichen Konflikte in der Nutzung der Kreuzung mehr bestehen. Abhängig vom Design der KBS und der Anzahl der aktiven Eingänge entstehen Konflikte der Transportwege. Fahrtwegkonflikte oder Zielkonflikte bezeichnen die lokalen kritischen Interaktionen der Fahrtwege innerhalb von KBS. Sie werden in drei Arten eingeteilt und bringen das Verhalten von zwei befahrenen Wegen in Verhältnis:

- Divergierende Wege: Die Ausgänge an einer KBS stehen in keinem Konflikt; die Fahrtwege kreuzen sich nicht.
- Kreuzende Wege: Die Ausgänge an einer KBS stehen in keinem Konflikt; die Fahrtwege kreuzen sich.
- Identische Wege: Die Ausgänge an einer KBS stehen in einem Konflikt (identisch); die Fahrtwege kreuzen sich nicht.

Die Häufigkeit und Konfiguration von Zielwegkonflikten variieren je nach Ziel des Fahrzeugs innerhalb des Interaktionsbereichs, der Anzahl an Interaktionspartnern und der Auslegung der KBS. Wie in Abbildung 1 dargestellt, gibt es im Fall einer

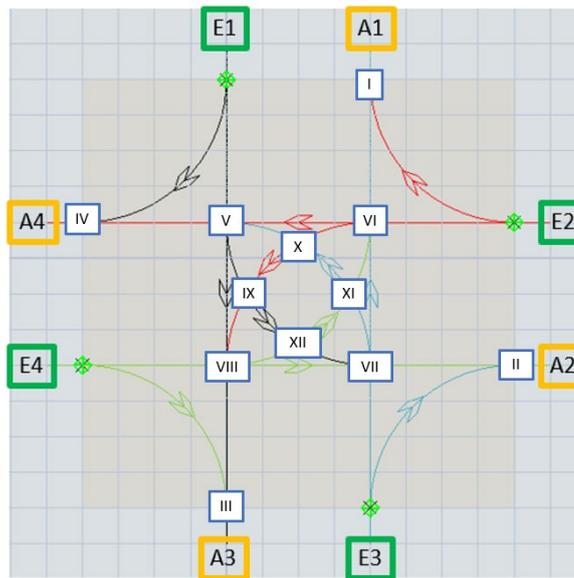


Abb. 1: Interaktionsbereich mit Entscheidungspunkten I bis XIII an einer omnidirektionalen Kreuzung.

omnidirektionalen Kreuzung jeweils vier Eingänge (E) und Ausgänge (A). Dies führt zu vielen potenziellen Teilnehmern, Entscheidungspunkten (EP) I bis XII und Zielwegkonflikten.

Aufgrund der zwölf EP innerhalb des Interaktionsbereichs ergeben sich folgende allgemeine Zeitbeziehungen zum Erreichen der jeweiligen EP je Fahrtweg. Diese Zusammenhänge erfolgen unter der Annahme eines quadratischen Interaktionsbereichs mit der Seitenlänge  $d$  und der Fahrtgeschwindigkeit  $v_i$  pro Fahrzeug  $i$ . Ein Abbiegevorgang nach links (LT) beansprucht fünf EP mit folgenden Zeiten. Diese sind in den Gleichungen (EQ) in Tab. 1 in der Reihenfolge der Durchfahrt des Fahrzeugs dargestellt und am Beispiel des Abbiegemanövers von E1 nach A2 und unter der Annahme eines Viertelkreisbogens für den Fahrtwegwechsel exemplarisch dargestellt. Ein Beibehalten des Fahrtweges auf einer geraden Durchfahrt von E1 nach A3 erfordert das Beanspruchen von drei EP auf dem Fahrtweg (siehe auch Tab. 1).

Gleichung	Entscheidungspunkt	Manöver	Zeitbeziehung [s]
1	V	LT	$t_{i,V} = \frac{1}{v_i} \cdot \left(\frac{d}{3}\right)$
2	IX	LT	$t_{i,IX} = \frac{1}{v_i} \cdot \left(\frac{d}{3} + \frac{1}{18} \cdot d \cdot \pi\right)$
3	XII	LT	$t_{i,XII} = \frac{1}{v_i} \cdot \left(\frac{d}{3} + \frac{1}{9} \cdot d \cdot \pi\right)$

4	VII	LT	$t_{i,VII} = \frac{1}{v_i} \cdot \left( \frac{d}{3} + \frac{1}{6} \cdot d \cdot \pi \right)$
5	II	LT	$t_{i,II} = \frac{1}{v_i} \cdot \left( \frac{2 \cdot d}{3} + \frac{1}{6} \cdot d \cdot \pi \right)$
6	V	SP	$t_{i,V} = \frac{1}{v_i} \cdot \left( \frac{d}{3} \right)$
7	VIII	SP	$t_{i,VIII} = \frac{1}{v_i} \cdot \left( \frac{2 \cdot d}{3} \right)$
8	III	SP	$t_{i,III} = \frac{d}{v_i}$

Tab. 1: Beziehungen der Zeit innerhalb des Kreuzungsbereichs

Für alle Fahrzeuge, die den Interaktionsbereich befahren möchten, müssen mehrere Vergleiche durchgeführt werden. Dies erfolgt anhand der Beziehungen aus der Distanz und der Anzahl an potenziellen Zielkonflikten auf dem Weg.

Um Koordinationsbedürfnisse anzusprechen und eine Sequenz in der Nutzung von EP zu erreichen, ist die Kontrolle der Reihenfolge, in der die EP passiert werden, notwendig. Dieser Unterabschnitt präsentiert eine Auswahl an Koordinationssteuerungsstrategien und diskutiert die damit verbundenen Anforderungen an Informationsdaten.

- Die "Fahrzeugintegrierte Kollisionsvermeidung" nutzt Sensoren zur Umgebungserkennung und ermöglicht dem Fahrzeug, autonom auf mögliche Konflikte zu reagieren, wobei auch eine Routenneuberechnung zur Reduzierung von Stop-Zeiten in Betracht gezogen wird.
- Die "First-in-First-out (FiFo)"-Strategie setzt auf zeitbasierte Kriterien, um die Vorfahrtsreihenfolge zu bestimmen, und erfordert Echtzeitinformationen zu den Fahrzeugen, wobei Schwankungen in der Geschwindigkeit berücksichtigt werden müssen.
- Die "Priorisierung auf Grundlage von Auftragsinformationen" integriert individuelle Transportauftragsdetails, um Dringlichkeiten zu berücksichtigen und Lieferzeiten zu optimieren, wobei eine kontinuierliche Bewertung des Fortschritts erforderlich ist.

Diese Steuerungsmethoden bieten eine Reihe von potenziellen Ansätzen, um eine effektive Kollisionsvermeidung zu gewährleisten und sichere sowie termintreue Transportprozesse zu gewährleisten. Zudem kann das Fahrverhalten der Fahrzeuge angepasst werden. Um eine kollisionsfreie Anpassung der Fahrwege zu gewährleisten, bedarf diese Anpassung der Berücksichtigung der Fahrzeuglänge, der Geschwindigkeit sowie eines einzuhaltenen Sicherheitsabstandes.

## 4 Simulation von Koordinationsbedarfsstellen

Die in den vorherigen Abschnitten beschriebene KBS der omnidirektionalen Kreuzung wurde in eine Simulationsumgebung implementiert. Das Simulationsmodell konzentriert sich auf die Koordinationsbedürfnisse an den Schnittstellen des Materialflusses, die Teil eines intralogistischen Transportnetzwerks sind. Ziel ist es, dezentrale und autonome Steuerungsstrukturen in das Simulationsmodell zu integrieren. Dadurch ermöglicht die Simulation die Analyse verschiedener Grade der Fahrzeugautonomie auf die Gesamtleistung der Logistik. Zu beachten ist, dass eine umfassende Analyse möglicher Steuerungsstrategien (d.h. weitere Regelwerke der dezentralen Steuerung) nicht im Rahmen dieses Beitrags liegt.

**Simulationskomplexitätsparameter:** Die Simulation sollte unterschiedliche Komplexitätsgrade ermöglichen, basierend auf der Anzahl der Fahrzeuge sowie der Anzahl möglicher Startpunkte und Ziele. Das Modell liefert Daten zu logistischen Kennzahlen innerhalb eines festgelegten Zeitrahmens mit festgelegten Start- und Endzeitpunkten, die einen quantitativen Vergleich ermöglichen. Kennzahlen für den quantitativen Vergleich der Leistung der Steuerungsstrategie unter verschiedenen Komplexitätsszenarien umfassen die Wartezeit vor dem Interaktionsbereich, die Abweichung von der Termintreue der Transportaufträge, die Durchlaufzeit des Interaktionsbereichs und die Auslastung des Transportsystems, d.h. die Anzahl der Fahrzeuge im System. Der Prioritätsindex gibt den Anteil hoch priorisierter Aufträge an. Die folgende Tabelle gibt einen Überblick über die simulierten Szenarien..

Szenario	Anzahl der Transportziele	Anzahl der Lager (Start)	Flottengröße	Anzahl der Aufträge	Prioritätsindex [%]
1	Niedrig	Niedrig	Niedrig	80	58,8
2	Hoch	Niedrig	Niedrig	80	58,8
3	Niedrig	Hoch	Niedrig	160	56,9
4	Niedrig	Niedrig	Hoch	80	58,8
5	Niedrig	Hoch	Hoch	160	56,9
6	Hoch	Hoch	Niedrig	160	56,9
7	Hoch	Niedrig	Hoch	80	56,9
8	Hoch	Hoch	Hoch	160	56,9

Tab. 2: Szenarienbeschreibung

Die Simulationsergebnisse sind in Abb. 2 zusammengefasst. Die Ergebnisse zeigen, dass im implementierten Simulationsmodell für die Szenarien eins bis vier und sechs bis sieben mit den Steuerungsmethoden der Auftragspriorität und der autonomen Kollisionsvermeidung eine hohe Termintreue erreicht wird. In den Szenarien fünf und acht führt jedoch der Einfluss der erhöhten Flottengröße und der aktiven Transportaufträge, die an allen Eingangspunkten eintreffen, zu einer deutlichen Reduzierung der Termintreue bei

den dezentralen FiFo- und prioritätsbasierten Steuerungsmethoden. Die hohen Wartezeiten aufgrund der Kapazitätsbeschränkung des Interaktionsbereichs führen zu einer Verschlechterung der Termintreue, da Aufträge mit hoher Priorität hinter Aufträgen mit niedriger Priorität warten müssen, bis diese eine Freigabe erhalten. Fahrzeuge mit aktiven Aufträgen können den Interaktionsbereich nicht befahren, was zu Lieferverzögerungen führt und die Einhaltung von Zeitplänen verhindert. Darüber hinaus wirken sich zusätzliche auftragsspezifische Daten positiv auf den Koordinationsprozess aus. Unter identischen Kapazitätsbeschränkungen kann die prioritätsbasierte Steuerung in den Szenarien vier und sieben für beide Auftragsarten eine Termintreue von über 90 % erreichen. Ohne zusätzliche auftragsspezifische Daten fällt die Termintreue bei einer rein auf der Ankunftszeit basierenden Steuerung auf unter 70 % bzw. sogar unter 50 %.

Auf der einfachsten Komplexitätsebene (Szenario 1) gibt es nur geringe Unterschiede in den Ergebnissen zwischen den Steuerungsmethoden aufgrund weniger Kollisionspotenziale und Konflikten. In Szenario 3 werden viele hochpriorisierte Aufträge bereitgestellt, was dazu führt, dass die prioritätsbasierte Methode häufig Vorfahrtsentscheidungen nach dem FiFo-Prinzip in Konfliktsituationen trifft, was die reduzierte Termintreue von unter 90 % für hochpriorisierte Transportaufträge erklärt. Mit der autonomen Kollisionsvermeidung passen die Fahrzeuge ihr Verhalten an, verhindern Kollisionen bei nachfolgenden Transporten, optimieren den Fluss zwischen den Stationen und eliminieren den Koordinationsbedarf, was zu einer hohen Termintreue führt. Eine erhöhte Komplexität verschlechtert die Termintreue über alle Steuerungsmethoden hinweg. Ein erhöhtes Verkehrsaufkommen im Interaktionsbereich führt zu häufigen Entscheidungsfindungen und anschließenden Verhaltensanpassungen. Bei autonomer Kollisionsvermeidung führt dies dazu, dass Fahrzeuge anhalten, um Kollisionen zu verhindern, was zu individuellen Brems- und Beschleunigungsvorgängen innerhalb des Interaktionsbereichs führt und somit die Lieferzeiten verlängert. Hohe Auftragsvolumen führen oft zu FiFo-basierten Entscheidungen in den Szenarien 3, 5, 6 und 8, wodurch hochpriorisierte Aufträge mehrere Durchfahrten auf eine Freigabe warten müssen und sich die Termintreue der Aufträge verschlechtert. Mit zunehmender Anzahl potenzieller Zielorte in den Szenarien 2 sowie 6 bis 8 verschlechtert sich die Transportleistung bei einer autonomen Kollisionsvermeidungsstrategie aufgrund des erhöhten Verkehrsaufkommens. Je nach Abbiegemanöver werden vermehrt gemeinsame Entscheidungsstellen unterschiedlicher Fahrwege beansprucht, wodurch der Koordinationsbedarf innerhalb der Interaktionszone während der Durchquerung steigt.

Der Vergleich von Aufträgen mit hoher Priorität mit Aufträgen niedriger Priorität (dargestellt in Abb. 2 links gegenüber rechts) zeigt, dass die Ergebnisse für FiFo und autonome Steuerung sehr ähnlich sind. Nur die prioritätsbasierte Strategie in einer dezentralen Struktur erreicht eine höhere Termintreue bei Aufträgen mit hoher Priorität (z.B. sichtbar in den Szenarien 5 und 8).

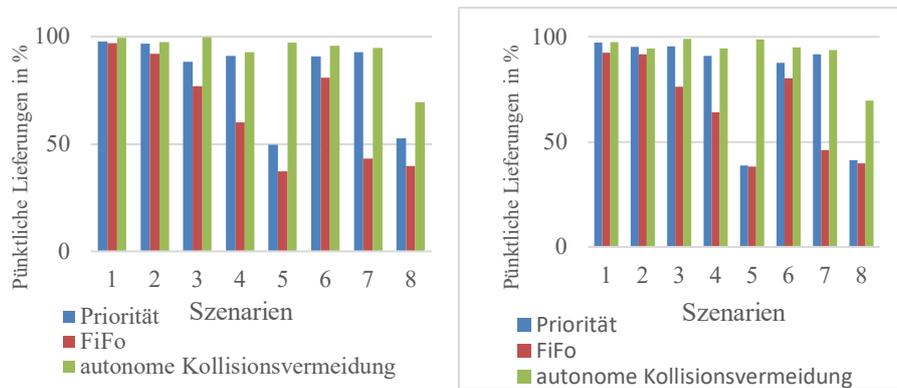


Abb. 2: Ergebnisse der Simulation, Eilaufträge (links) und Standardaufträge (rechts)

## 5 Zusammenfassung und Ausblick

Die Gestaltung von Steuerungsstrukturen an Materialflusskreuzungen oder von KBS als dezentrale hierarchische Systeme oder durch autonome Steuerung durch die Fahrzeuge selbst bietet vielversprechende Methoden zur Bewältigung von Konfliktsituationen in komplexen Transportumgebungen. Anpassungen des individuellen Fahrverhaltens beeinflussen nur die unmittelbar beteiligten Interaktionspartner, wodurch der Aufwand der KBS-Steuerung auf lokale Konfliktsituationen reduziert wird. Erste Simulationsergebnisse verdeutlichen, dass steigende Autonomie die Leistungsfähigkeit des Systems erhöht und auftragsspezifische Daten sich positiv auf den Koordinationsprozess in Bezug auf die erreichte Termintreue auswirken. Ein umfassend vernetztes Transportsystem aus dezentralen KBS und frei navigierenden Fahrzeugen, integriert mit auftragsspezifischen Informationen, kann einen zeiteffizienten, dezentral koordinierten Materialfluss ermöglichen. Basierend auf den Ergebnissen dieser Studie sollten weitere Untersuchungen zu dezentralen und autonomen AGVs durchgeführt werden, die sich nicht nur auf Anwendungen in der Intralogistik beschränken. Beispielsweise wurden in den Experimenten nur einfache regelbasierte Mechanismen für die dezentralen Steuerungsstrategien implementiert. Zukünftige Arbeiten werden elaboriertere Strategien implementieren, die die Leistungsfähigkeit intelligenter Softwareagenten nutzen.

## Literatur

- [LK12] C. Liu, A. Kroll: *A Centralized Multi-Robot Task Allocation for Industrial Plant Inspection by Using A\* and Genetic Algorithms*. In: Hutchison, Kanade et al. (Hrsg.): *Artificial Intelligence and Soft Computing*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg (Lecture Notes in Computer Science), Vol. 7268, S. 466–474, 2012.

- 
- [BE16] T. Beyer, P. Gohner, R. Yousefifar, K.-H. Wehking: *Agent-based dimensioning to support the planning of Intra-Logistics systems*. In: *2016 IEEE 21st International Conference on Emerging Technologies and Factory Automation (ETFA)*: IEEE, S. 1–4, 2016.
- [W110] K. Windt, T. Philipp, F. Böse, T. Becker: *Application of a three-component evaluation system for autonomous control in logistics*. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture, Vol. 224 (8), 2010, S. 1267–1276.
- [RVD20] M. de Ryck, M. Versteyhe, F. Debrouwere: *Automated guided vehicle systems, state-of-the-art control algorithms and techniques*. Journal of Manufacturing Systems, Vol. 54, 2020, S. 152–173.
- [Fo21] J. Fottner, D. Clauer, F. Hormes, M. Freitag, T. Beinke, L. Overmeyer, S.N. Gottwald, R. Elbert, T. Sarnow, T. Schmidt, K.-B. Reith, H. Zadek, F. Thomas: *Autonomous Systems in Intralogistics: State of the Art and Future Research Challenges*. Logistics Research, Vol. 14 (2), 2021.
- [Ho06] M. ten Hompel: *Das Internet der Dinge – Potenziale autonomer Objekte und selbstorganisierender Systeme in der Intralogistik*. In: Arnold (Hrsg.): *Intralogistik: Potentiale, Perspektiven, Prognosen*. 1. Auflage. Dordrecht: Springer Netherland (VDI-Buch), 2006.
- [GT16] N. Gronau, H. Theuer: *Determination of the Optimal Degree of Autonomy in a Cyber-Physical Production System*. Procedia CIRP, Vol. 57, 2016, S. 110–115.
- [BA15] J. Barbosa, P. Leitão, E. Adam, D. Trentesaux: *Dynamic self-organization in holonic multi-agent manufacturing systems: The ADACOR evolution*. Computers in Industry, Vol. 66, 2015, S. 99–111.
- [LR05] P. Leitão, F. Restivo: *Experimental Validation of ADACOR Holonic Control System*. In: Mařík, Brennan (Hrsg.): *Proceedings of HoloMAS*. Berlin, Deutschland: Springer (Lecture notes in computer science Lecture notes in artificial intelligence, 3593), Vol. 3593, S. 121–132, 2005.
- [Sc20] T. Schmidt, K.-B. Reith, N. Klein, M. Däumler: *Research on Decentralized Control Strategies for Automated Vehicle-based In-house Transport Systems – a Survey*. Logistics Research, Vol. 13, 2020.
- [RE23] L.M. Reinpold, L.P. Wagner, F. Gehlhoff, M. Ramonat, M. Kiltbau, M.S. Gill, J.T. Reif, V. Henkel, L. Scholz, A. Fay: *Systematic Comparison of Software Agents and Digital Twins: Differences, Similarities, and Synergies in Industrial Production*, 2023.
- [HE22] B. Hein, M. Wesselhoft, A. Kirchheim, 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)*: IEEE, S. 1–4, 2022.

