

Schlussbericht vom **15.08.2022**

zu IGF-Vorhaben Nr. 20918 N

Thema

Entwicklung und Potentialanalyse eines Systemkoordinators für den typübergreifenden Einsatz von Flurförderzeugen

Berichtszeitraum

1. November 2019 bis 31. Mai 2022

Forschungsvereinigung

Bundesvereinigung Logistik (BVL) e.V.

Forschungseinrichtung(en)

1: Technische Universität München, Lehrstuhl für Fördertechnik Materialfluss Logistik (fml)
Boltzmannstraße 15, 85748 Garching

Gefördert durch:

Inhalt

1.	Einleitung	4
1.1.	Wissenschaftliche, technische und wirtschaftliche Problemstellung.....	4
	Wirtschaftliche Problemstellung	4
	Technische Problemstellung	4
	Wissenschaftliche Problemstellung.....	7
1.2.	Forschungsziel des Projekts	8
	Forschungsfrage	9
1.3.	Vorgehensweise und Lösungsweg	9
2.1.	Manuell und automatisch gesteuerte Transportfahrzeuge.....	12
2.2.	Zentrale und dezentrale Strukturen	12
3.	Vision einer neuartigen kaskadierten Steuerungsstruktur.....	14
3.1.	Architektur des Flottenverbunds mit Systemkoordinator	14
3.2.	Vergleich mit bestehenden Ansätzen	15
4.	Modellierung des Systemkoordinators	17
4.1.	Grundfunktionalität.....	17
	Schritt 1: Auftrag überführen.....	17
	Schritt 2: Fähigkeiten abgleichen	18
	Schritt 3: Fahrzeugtyp auswählen.....	18
	Schritt 4: Rückmeldung verarbeiten	18
4.2.	Optimierungsziele und zugeordnete Kennzahlen	18
4.3.	Varianz der Ausprägungen anhand der bereitstehenden Informationen	19
4.4.	Ausprägung 1: Nur Übermittlung von Transportaufträgen und Transportauftragsrückmeldungen.....	21
4.5.	Ausprägung 2: Zusätzlich Übermittlung von Fahrzeugpositionen.....	23
4.6.	Ausprägung 3: Zusätzlich Übermittlung von Auftrag-Fahrzeug-Zuordnungen.....	24
4.7.	Ausprägung 4: Zusätzlich Übermittlung von Routen.....	24
5.	Versuchsaufbau zur vergleichenden Analyse der Ausprägungen des Systemkoordinators.....	27
5.1.	Architektur und Kommunikationswege.....	27
5.2.	Umsetzung des Koordinators.....	29
5.3.	Umsetzung der Leitsteuerungen.....	30
5.4.	Umsetzung des Materialflusssystem.....	34
5.5.	Einspeisung von Transportauftragsserien für Versuchsläufe	36
6.	Evaluierung des Koordinators mit ausgewählten Schnittstellenkonfigurationen	37
6.1.	Randbedingungen und Parameterwahl	37

Layout:	37
Randbedingungen der Simulation:.....	38
6.2. Verwendete Konfigurationen des Systemkoordinators	38
Referenzkonfiguration	38
Ausprägung 3 (Zuordnung Auftrag-Fahrzeug) mit niedriger zeitlicher Auflösung	39
Ausprägung 3 (Zuordnung Auftrag-Fahrzeug) mit hoher zeitlicher Auflösung	39
6.3. Ablauf der Versuche	39
6.4. Ergebnisse	40
Entwicklung der Wartezeiten.....	40
Verteilung der Bearbeitungszeiten	42
Summe der Bearbeitungszeiten.....	43
6.5. Abgeleitete Handlungsempfehlungen für FFZ-Hersteller/-Anwender	44
Empfehlungen bzgl. Schnittstellen von Leitsteuerungen	44
Empfehlungen bzgl. Algorithmen in einem Systemkoordinator.....	45
7. Zusammenfassung der Forschungsergebnisse und Ausblick.....	46
7.1. Zusammenfassung und Bewertung der Forschungsergebnisse.....	46
7.2. Ausblick.....	48
7.3. Verwendung der zugewendeten Mittel.....	49
Wissenschaftlich-technisches Personal und studentische Hilfskräfte (Einzelansatz A.1 des Finanzierungsplans):	49
Geräte (Einzelansatz B des Finanzierungsplans):	49
Leistungen Dritter (Einzelansatz C des Finanzierungsplans):	49
7.4. Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit.....	49
7.5. Ergebnistransfer in die Wirtschaft	50
Durchgeführte Transfermaßnahmen während der Projektlaufzeit im Berichtszeitraum.....	50
Aktualisierte Übersicht der Maßnahmen zum Ergebnistransfer während des Projekts	51
Aktualisierte Übersicht der Maßnahmen zum Ergebnistransfer nach der Projektlaufzeit ...	52
8. Verzeichnis der Veröffentlichungen	53
9. Verzeichnis der studentischen Arbeiten.....	54
10. Literaturverzeichnis	55
11. Abbildungsverzeichnis.....	56
12. Tabellenverzeichnis.....	58

1. Einleitung

1.1. Wissenschaftliche, technische und wirtschaftliche Problemstellung

Dem Forschungsprojekt EPoSysto liegt eine Fragestellung zugrunde, die auf die Bedürfnisse kleiner und mittlerer Unternehmen (KMU) im produzierenden Sektor hinsichtlich einer kosteneffizienten, robusten Intralogistik aufbaut. Im Folgenden wird die Fragestellung aus drei verschiedenen Aspekten beleuchtet.

Wirtschaftliche Problemstellung

Der allgemeine Fachkräftemangel im deutschsprachigen Raum macht sich auch in der Logistik bemerkbar. Hier mangelt es vor allem an niedrigqualifizierten Kräften, die die Steuerung von Transportfahrzeugen der Intralogistik übernehmen könnten. In der Folge steigen die Personalkosten, während die Fluktuation der Arbeitskräfte steigt und mangels Routine zu einer schlechteren Bedienung der Fahrzeuge führt. Letztendlich wird der Einsatz manuell bedienter Flurförderzeuge also teurer und weniger zuverlässig.

Werden für solche Flurförderzeuge Ersatzinvestitionen getätigt, fällt daher heute die Wahl häufig auf automatisierte Fördermittel, sogenannte fahrerlose Transportsysteme (FTS). Mit ihnen lassen sich die genannten, durch menschliche Arbeitskräfte hervorgerufenen Risiken nahezu vollständig eliminieren. Meist werden nicht alle Fördermittel eines Materialflusssystems gleichzeitig ausgetauscht: Zum einen müssen gerade in kleinen und mittleren Unternehmen bestehende Produktionsstätten sukzessive erneuert werden, zum anderen sind automatisierte FTS stärker spezialisiert als manuell bediente FFZ, sodass für Sonderaufgaben meist eine kleine Anzahl solcher Fahrzeuge, beispielsweise Gabelstapler, erhalten bleiben.

Die resultierende Heterogenität der Flurförderzeuge beziehungsweise FFZ-Flotten in einem Materialflusssystem führt aus Sicht der KMU zu einem bedeutenden wirtschaftlichen Dilemma: Sollen neue Fahrzeuge eingeführt werden, müssen sie entweder von einem Hersteller bezogen werden, dessen Fahrzeuge bisher schon im Einsatz sind, um Kompatibilität der Fahrzeuge mit der Steuerung zu erreichen, oder es muss ein Komplettsystem aus Steuerung und Fahrzeugflotte von einem anderen Hersteller bezogen werden. Erstere Lösung führt zu einer eingeschränkten Auswahl an Fähigkeiten der Fahrzeuge und zu einem erhöhten Preis durch knappes Angebot. Die zweite Alternative hingegen bedeutet, dass mehrere Flottensteuerungen nebeneinander eingesetzt werden müssen, da die Kompatibilität Fahrzeug-Leitsteuerung heute noch stark eingeschränkt ist. Hierbei steht der FTS-Anwender vor der Wahl, die Leitsteuerungen mit großem informationstechnischem Aufwand individuell aneinander anzupassen, sodass sie die Fahrzeuge der jeweils anderen Flotten kennen und berücksichtigen, oder die Flotten ohne jeden Informationsaustausch parallel zu betreiben. Erstere Variante bedeutet hohe Integrationskosten, zweitere eine deutlich verschlechterte Transporteffizienz des Gesamtsystems und damit wiederum finanzielle Einbußen.

Technische Problemstellung

Das geschilderte wirtschaftliche Dilemma ließe sich mithilfe neuartiger technischer Lösungen auflösen. Solche Lösungen sind allerdings noch nicht standardisiert verfügbar, sodass jedes Unternehmen die aufgrund der Komplexität des Sachverhalts enormen Implementierungskosten selbst tragen muss.

Wie oben bereits geschildert, muss eine Möglichkeit geschaffen werden, neue Fahrzeuge in ein Materialflusssystem mit bestehenden, manuell oder automatisch gesteuerten Fahrzeugflotten zu integrieren. Die triviale Variante, Fahrzeuge eines bisher bereits eingesetzten Herstellers zuzukaufen und der bestehenden Steuerung unterzuordnen, wird in diesem Projekt aus den oben genannten Gründen außer Acht gelassen. Eine andere Möglichkeit bietet sich durch die noch sehr junge Richtlinie VDA 5050 [VDA-5050]. Sie standardisiert die Kommunikation zwischen einer Leitsteuerung und einem (automatisierten) Transportfahrzeug. Somit können an kompatible Leitsteuerungen alle Fahrzeuge direkt angeschlossen werden, deren Hersteller die Kommunikationsschnittstelle VDA-5050-konform umgesetzt haben. Für KMU ist diese Struktur jedoch nur in den seltenen Fällen interessant, in denen ein Materialflusssystem komplett ersetzt wird. Häufiger werden sukzessive einzelne Steuerungen oder Flotten ersetzt und erweitert, sodass die schlagartige Umstellung auf die VDA 5050 nicht möglich ist. Weiterhin sind noch keine universellen Leitsteuerungen bekannt, die die Eigenheiten der verschiedenen Fahrzeugtypen in ihren Steuerungsbefehlen in gleichem Maße berücksichtigen können wie jeweils darauf spezialisierte Leitsteuerungen. Daher werden die VDA 5050 und analoge Richtlinien im Projekt EpoSysKo nicht betrachtet.

Der zentrale technische Untersuchungsgegenstand des Projekts ist die effektive Verbindung mehrerer Flurförderzeug-Flotten mit ihren jeweiligen Leitsteuerungen. Aus den verschiedenen genannten Gründen werden die Flotten mit ihren Leitsteuerungen jeweils als eine Einheit betrachtet. Das bedeutet, ein Fahrzeugtyp wird von einer auf ihn zugeschnittenen Leitsteuerung verwaltet. Eine Leitsteuerung kann umgekehrt mehrere Fahrzeugtypen beziehungsweise Fahrzeuge mit unterschiedlichen Transportfähigkeiten steuern.

Bei der Kombination mehrerer Fahrzeugsysteme ergeben sich folgende Anforderungen an das Gesamtkonstrukt:

- Transportaufträge, die von einem übergeordneten System erstellt werden, müssen an genau eines der beteiligten Transportsysteme gelangen, um von diesem durchgeführt zu werden.
- Sind im Materialflusssystem Fahrzeuge beziehungsweise Flotten mit unterschiedlichen Fähigkeiten vorhanden, müssen die Aufträge entsprechend vorgefiltert werden. Zu den relevanten Fähigkeiten zählen lastbezogene Fähigkeiten wie Art der Ladungsträger oder Kapazität sowie fortbewegungsbezogene Fähigkeiten wie Kurvenradius oder Lichtraumprofil.
- Wie eine einzelne Leitsteuerung durch Scheduling und Disposition der eingehenden Transportaufträge ordnenden Einfluss auf den Verkehrsfluss nimmt, sollte im vorliegenden System mehrerer Flotten versucht werden, die Aufträge so zu verteilen, dass möglichst wenige Staus oder Blockaden entstehen.

Aus den genannten Rahmenbedingungen und Anforderungen ergeben sich zwei potentielle Lösungsansätze für die Integration mehrerer Transportsysteme in einem Materialflusssystem. Der wesentliche Unterschied liegt dabei in der Frage, ob eine weitere Steuerungsinstanz eingeführt wird, die alle anderen Leitsteuerungen sternförmig verbindet und die Vorsteuerung der Transportaufträge zentral vornimmt. Die Alternativlösung besteht darin, alle beteiligten Leitsteuerungen in einem vollvermaschten Kommunikationsnetz miteinander zu verbinden. So könnten durch dezentrale Verhandlungen Transportaufträge zwischen den Systemen aufgeteilt werden. In Abbildung 1 sind die beiden Varianten mit jeweils 3 beispielhaften Transportsystemen dargestellt.

Zu erkennen ist, dass in der dezentralen Variante bereits bei 3 Transportsystemen mehr Kommunikationswege nötig sind als in der zentral gesteuerten Alternative. Dieses Phänomen

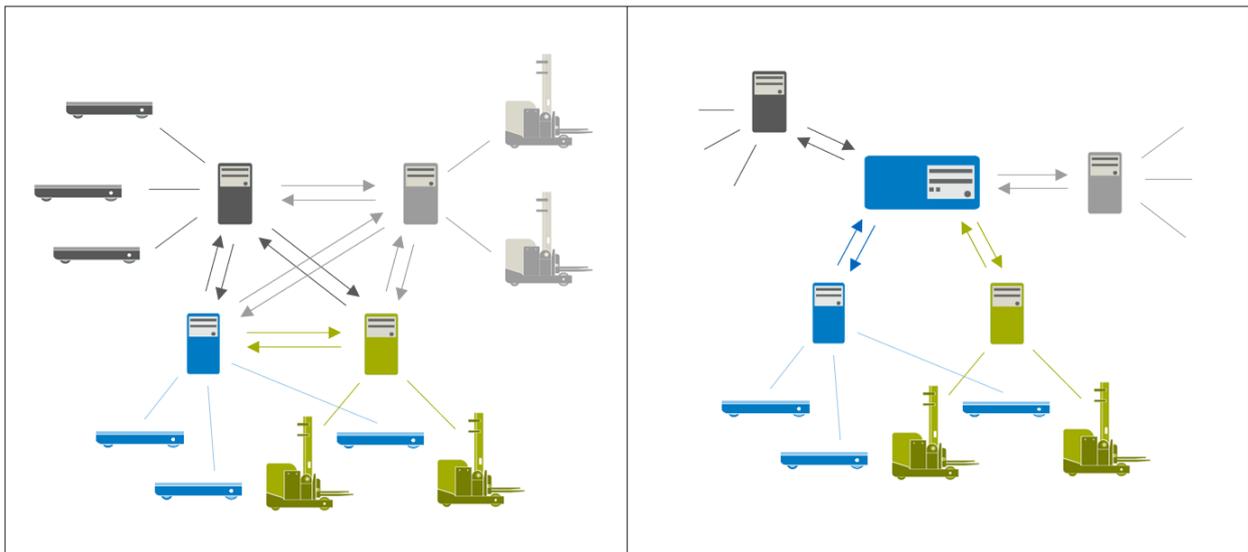


Abbildung 1: Varianten der Vernetzung mehrerer Transportsysteme über die Leitsteuerungen. Links direkte, dezentrale Kommunikation, rechts zentrale Kommunikation über einen Koordinator.

verstärkt sich mit steigender Anzahl an Transportsystemen. Für jeden einzelnen Kommunikationspfad muss an beiden Enden eine Schnittstelle zu einer Steuerung geschaffen werden. Der Anpassungsaufwand für die Integration eines Transportsystems in das heterogene Gesamtsystem ist also bei der dezentralen Variante deutlich höher als bei der zentral verwalteten. Hier muss nur die bereits vorhandene Schnittstelle zu übergeordneten Systemen leicht erweitert werden, zum Beispiel um Informationen über die Fahrzeugpositionen. Bezüglich der Transportaufträge kann die Kommunikation von der Zwischeninstanz transparent gestaltet werden, sodass die Leitsteuerung keinen Unterschied zum alleinigen Betrieb bemerkt.

Somit wird klar, dass die zentral verwaltete Vielfalt an Transportsystemen in einem Materialflusssystem deutliche Vorteile gegenüber der dezentralen Variante aufweist. Im Projekt EpoSysKo wurde daher dieser zentrale Ansatz verfolgt. Die Zwischeninstanz wird dabei als „Systemkoordinator“ oder „Koordinator“ bezeichnet. Dadurch soll verdeutlicht werden, dass Leitsteuerungen der einzelnen Flotten nicht bevormundet werden, sondern in ihrem beschränkten Wirkungsbereich weiterhin uneingeschränkte Autorität besitzen. „Koordination“ bedeutet also eine gewinnbringende Orchestrierung ohne vollständigen Steuerungseingriff zu den einzelnen Fahrzeugen. Die resultierende kaskadierte Steuerungsarchitektur mit übergeordnetem Lager-beziehungsweise Fertigungssteuerungssystem, Systemkoordinator sowie zwei beispielhaften

untergeordneten Transportsystemen wird in Abbildung 2 gezeigt. Die ebenfalls abgebildeten Einzelfahrzeuge werden jeweils wie ein Transportsystem mit der Fahrzeuganzahl eins betrachtet.

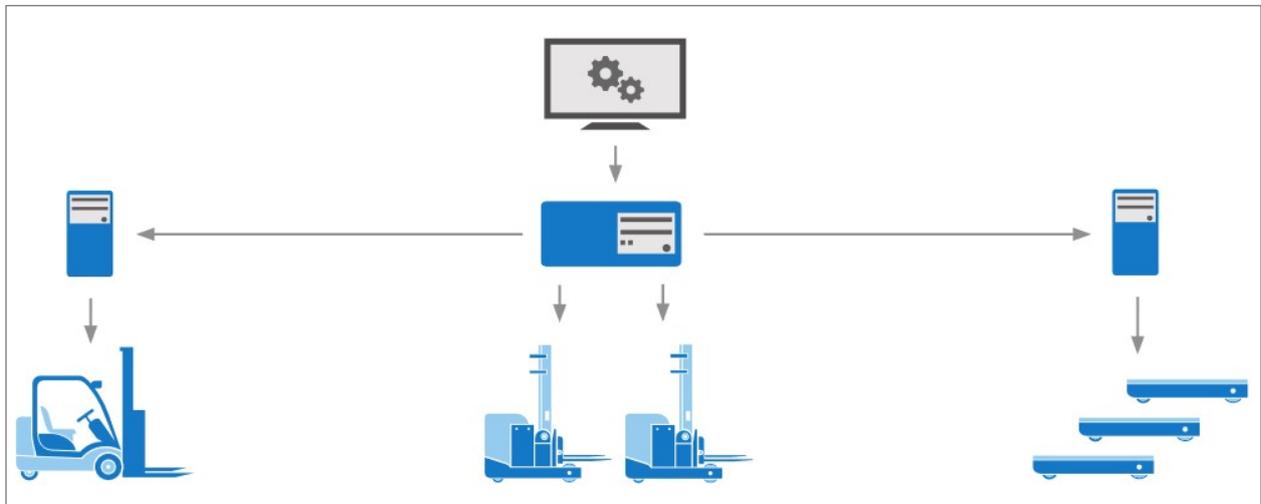


Abbildung 2: Systemarchitektur eines Materialflusssystems mit mehreren mobilen Transportsystemen (links, rechts) und Einzelfahrzeugen (unten mittig), die von einem Koordinator (mittig) vorgesteuert werden.

Wissenschaftliche Problemstellung

Wie oben beschrieben, muss beim koordinativen Steuerungsansatz lediglich die Schnittstelle von den Leitsteuerungen zu übergeordneten Systemen angepasst werden. Um mit dieser Anpassung die größtmögliche Transporteffizienz des gesamten Materialflusssystems zu erreichen, muss der Gestaltung dieser Schnittstelle vertiefte Beachtung geschenkt werden. Eine umfangreiche Schnittstelle würde dem Systemkoordinator ermöglichen, mit breiter Informationsbasis fundierte Entscheidungen über die Transportauftragsverteilung zu treffen und somit eine hohe Transporteffizienz des Gesamtsystems erreichen. Gleichzeitig bedeutet eine umfangreiche Schnittstelle, viele verschiedene Daten aus der Leitsteuerung in hohem Detailgrad und hoher zeitlicher Auflösung für die Übertragung zum Koordinator aufbereiten zu müssen. Folglich steigt mit der Menge an Informationen über die Transportsysteme im Systemkoordinator der IT-seitige Änderungsaufwand in deren Leitsteuerungen, wie auch die notwendige Bandbreite für die Datenübertragung.

Aus Sicht des FTS-Anwenders ist daher die Gestaltung der Schnittstellen zwischen Leitsteuerungen und Systemkoordinator ein wirtschaftliches Optimierungsproblem: Viele Informationen bedeuten große Transporteffizienzsteigerung, aber auch große Implementierungskosten. Die Hersteller von Leitsteuerungen führen zusätzlich zu den Kosten auch den Schutz ihres geistigen Eigentums als Argument gegen umfangreiche externe Schnittstellen ins Feld.

Folglich stellt sich die Frage, wie die Schnittstellen zwischen Leitsteuerungen manuell bedienter oder fahrerloser Transportfahrzeuge und einem übergeordneten Koordinator beschaffen sein sollten, um einen Ausgleich zwischen Implementierungsaufwand und Effizienzgewinn zu schaffen. Eng verbunden mit dieser Frage ist die Auswahl passender Optimierungsalgorithmen, die die Entscheidungen über die Transportauftragsweiterleitung treffen. Sie sind einerseits

abhängig von der Informationsbasis im Koordinator, die wiederum durch die Schnittstellengestaltung bestimmt wird, und entscheiden andererseits durch die Qualität ihrer Entscheidungen über die Transporteffizienz des Gesamtsystems.

1.2. Forschungsziel des Projekts

Aufgrund der oben erläuterten Problemstellungen wurde im Forschungsprojekt EPoSystKo die Hypothese aufgestellt, dass ein sogenannter Systemkoordinator die Effizienz eines heterogenen innerbetrieblichen Transportsystems gegenüber einem unkoordinierten Parallelbetrieb mehrerer FFZ-Flotten erhöhen kann, dabei allerdings ein Mittelweg bei der Schnittstellengestaltung zwischen Koordinator und Leitsteuerungen gefunden werden muss. Die vermutete erreichbare Transporteffizienzsteigerung in Abhängigkeit der Schnittstellen ist in Abbildung 3 schematisch

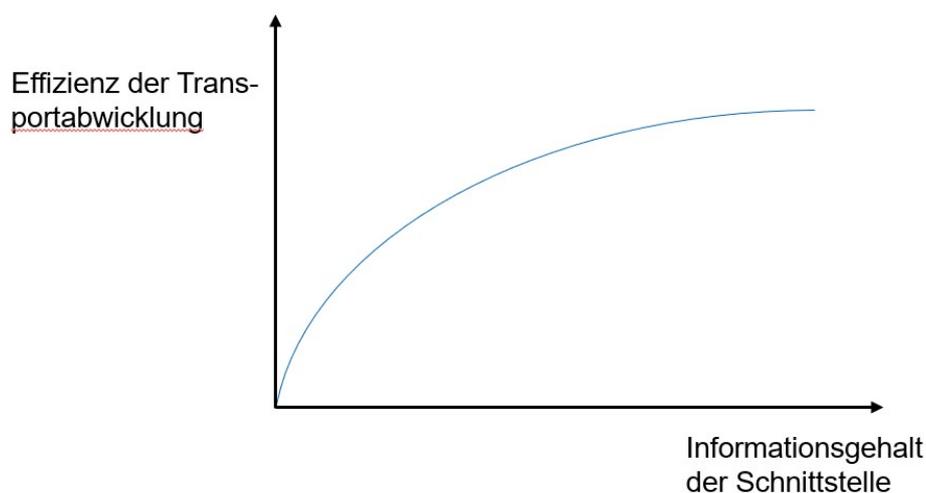


Abbildung 3: Qualitative Darstellung des Verhältnisses zwischen Schnittstellenausprägung und Potential zur Effizienzsteigerung im Systemkoordinator.

dargestellt. Die abflachende Kurve verdeutlicht, dass mehr Informationen im Koordinator nur eine endliche Steigerung der Transporteffizienz erreichen. Da der Aufwand jedoch mindestens linear mit der Ausprägung der Schnittstellen steigt, ergibt sich ein wirtschaftliches Optimum vermutlich bei mittlerer Schnittstellenausprägung.

Die Transporteffizienz des Gesamtsystems wird durch die Betrachtung mehrerer Parameter beurteilt:

- Durchschnittliche Wartezeit der Aufträge von Einspeisung in den Koordinator bis Start der Bearbeitung durch ein untergeordnetes Fahrzeug
- Durchschnittliche Bearbeitungszeit, also die Zeitdifferenz zwischen Bearbeitungsstart und Fertigstellung des Transports durch ein Fahrzeug
- Summe der Bearbeitungszeiten, aus der sich die Auslastung der Systeme ableiten lässt

Forschungsfrage

Um die Hypothese zu testen, wurde folgende zentrale Forschungsfrage aufgestellt:

“Wie muss eine schlanke Kommunikationsschnittstelle zwischen Leitsteuerungen beschaffen sein, um eine möglichst hohe Transporteffizienzsteigerung gegenüber dem unkoordinierten Parallelbetrieb zu erreichen?”

Zur umfänglichen Beantwortung der Frage müssen dabei insbesondere folgende drei Aspekte betrachtet und die sich daraus ergebenden Unterfragen beantwortet werden:

- A) Die Leitsteuerungen verschiedener Transportsysteme verfügen über individuell verschiedene Informationsbestände zu den von ihnen verwalteten Fahrzeugen. Von diesen Informationsbeständen hängt ab, in welchem Umfang Daten an den Koordinator weitergegeben werden könnten. Daher muss die Auswahl der Optimierungsmethoden im Koordinator auf die beteiligten Leitsteuerungen abgestimmt werden. Es stellt sich daher die Frage, wie Leitsteuerungen nach dem Umfang der ihnen zur Verfügung stehenden Informationen klassifiziert werden können.
- B) Die Koexistenz mehrerer Leitsteuerungen in einem Materialflusssystem bedeutet, dass an mehreren Stellen Entscheidungen über Transportbewegungen getroffen werden. Dies erfüllt ein Charakteristikum einer dezentralen Steuerung. Da allerdings die Transportaufträge zentral durch den Koordinator vorverteilt werden, sind auch Merkmale einer zentralen Steuerung beziehungsweise zentralen Kommunikation erfüllt. Die beiden gegensätzlichen Ansätze bieten jeweils eigene Vorteile. Folglich stellt sich die Frage, auf welche Weise eine koordinierende Instanz die Vorteile zentraler und dezentraler Steuerungen vereinen könnte.
- C) Mit den Informationen, die dem Koordinator zur Verfügung stehen, müssen Entscheidungen über die Vorsortierung der Transportaufträge zu den untergeordneten Leitsteuerungen getroffen werden. Für die Optimierung dieser Entscheidungen müssen Algorithmen ausgewählt beziehungsweise adaptiert werden, wobei die verschiedenen Informationsgehalte aus Punkt A zugrunde gelegt werden müssen. Es stellt sich also die Frage, welche Optimierungsmethoden eingesetzt werden können, um mit den verfügbaren Informationen eine möglichst hohe Transporteffizienz des Gesamtsystems zu erreichen.

1.3. Vorgehensweise und Lösungsweg

Zum Erreichen des Forschungsziels wurden fünf aufeinander aufbauende Meilensteine definiert. Sie orientieren sich an den oben formulierten Forschungsfragen, sind aber gleichzeitig so ausgerichtet, dass die Ergebnisse über das Projekt hinaus einfach und sinnvoll weiterverwendet werden können. Im Einzelnen lauten die Meilensteine:

1) Ausarbeitung Gesamtsystemarchitektur:

Hier wird die grundlegende Zusammenstellung der einzelnen Systemkomponenten entworfen. Dazu zählen die bestehenden oder neu einzuführenden Transportsysteme bestehend aus Leitsteuerung und Flotte manuell bedienter beziehungsweise fahrerloser Fahrzeuge, die Einzelfahrzeuge ohne vorgeschaltete Leitsteuerung sowie der Systemkoordinator. Zusätzlich werden Schnittstellen zwischen den Komponenten sowie über die Systemgrenzen hinaus zu Auftraggebern sowie zur physischen Welt des Materialflusses definiert.

2) Definition repräsentativer Informationsgehalte in Leitsteuerungen:

Die Anwendung von Optimierungsmethoden im Systemkoordinator ist nur unter Verwendung von Informationen aus den beteiligten Leitsteuerungen möglich, die einen identischem Detailgrad aufweisen. Dies bedeutet, dass bei unterschiedlich aufgelösten Informationsbeständen aus den Leitsteuerungen ein kleinster gemeinsamer Nenner bezüglich des Detailgrads gefunden werden muss, der dann vom Koordinator für die Auftragsortierung herangezogen wird.

Für jeden diskreten Detailgrad an Informationen müssen eigene Optimierungsalgorithmen entwickelt beziehungsweise angepasst werden. Aus Gründen des Implementierungsaufwands ist es daher erstrebenswert, die Leitsteuerungen auf möglichst wenige Klassen von Informations-Detailgraden zu reduzieren. Gleichzeitig bedeutet eine grobmaschige Diskretisierung, dass die Wahrscheinlichkeit der Nichtnutzung vorhandener Informationen hoch ist. Aus diesem Gesichtspunkt ist wiederum eine möglichst feinmaschige Klassifizierung wünschenswert.

Um einen sinnvollen Mittelweg zu finden, muss zunächst bestimmt werden, welche Informationsgehalte Leitsteuerungen üblicherweise besitzen. Die entstehende Klassifizierung dient als Grundlage für die folgenden Punkte 3 und 6.

3) Auswahl/Ausarbeitung Algorithmen für Koordinator

Für die Fahrzeugdisposition in intralogistischen Transportsystemen gibt es eine Vielzahl an Algorithmen. Sie sind jedoch zumeist auf die Anwendung in einer Leitsteuerung mit voller Kontroll- und Beobachtungsfähigkeit über die verwaltete Flotte zugeschnitten. Für den Einsatz in einem Systemkoordinator können diese Algorithmen teilweise adaptiert werden. Sie werden anschließend der jeweils nötigen Informationsklasse aus Punkt 2 zugeschrieben. Für Informationsklassen, denen kein bestehender Verteilalgorithmus zugeordnet werden kann, muss gegebenenfalls ein neuer Algorithmus entworfen werden. Weiterhin kann es notwendig sein, die Informationsklassen aufzubohren, um zusätzlich benötigte Informationen für bestimmte Algorithmen bereitzustellen. Diese Änderungen werden schlussendlich in den Handlungsempfehlungen unter Punkt 6 aufgegriffen.

4) Implementierung Koordinator

Um die Eignung des Konzepts des Systemkoordinators als Vermittler in einem Materialflusssystem mit mehreren separaten Transportsystemen zu prüfen, muss er in einem solchen Materialflusssystem mit realistischen Parametern zur Anwendung gebracht werden. Daher wird im vierten Schritt des Projekts eine prototypische Software erstellt, die die genannten Funktionen des Koordinators umsetzt und die entworfenen Schnittstellen zu anderen Systemen aufweist.

5) Aufbau SiL-Umgebung mit Leitsteuerungen und Materialflusssimulation

Da der Koordinator in einer Vielzahl verschiedener Konfigurationen mit variierenden angeschlossenen Transportsystemen getestet werden muss, ist eine Studie in Simulation einer solchen in realen Umfeldern aus Aufwandsgründen vorzuziehen. Folglich wird eine Simulationsumgebung aufgebaut, die den Koordinator einbettet und möglichst realistische Werte an die Schnittstellen des Koordinators sendet. Dazu benötigt werden folgende Komponenten:

- Eine Instanz, die Transportaufträge an den Koordinator sendet
- Mehrere Leitsteuerungen, die Transportaufträge vom Koordinator empfangen und Rückmeldungen über den Zustand ihrer Flotte geben

- Eine Materialflusssimulation, die die Auswirkungen der Aktionen der einzelnen Transportfahrzeuge auf die physische Welt berechnet und entsprechende Effekte auf die Fahrzeuge und das Materialflusssystem als Ganzes generiert

Insgesamt kann man bei der Simulation von einem Software-in-the-Loop-System (SiL-System) sprechen, da die Koordinatorsoftware in einen Prüfstand eingebettet wird, der eine reale Anwendungssituation vortäuscht.

6) Extraktion von Handlungsempfehlungen aus qualitativen Versuchen

Mithilfe der SiL-Umgebung und des Koordinator-Prototyps werden Experimente durchgeführt, bei denen zwischen den verschiedenen Schnittstellenklassen und den dazugehörigen Optimierungsalgorithmen variiert wird. Durch die Analyse der oben genannten Werte kann ermittelt werden, wie effizient der Materialfluss im Gesamtsystem durch die gewählten Schnittstellenklassen gestaltet werden kann. Diese Erfahrungen werden schließlich in einfach verständliche und konkret umsetzbare Handlungsempfehlungen kondensiert, welche für Anwender und Hersteller von intralogistischen Transportfahrzeugen bereitgestellt werden sollen.

2. Grundlagen zu innerbetrieblichen mobilen Transportsystemen

Innerbetriebliche Transporte, die nicht über stationäre Fördertechnik abgewickelt werden, werden zumeist von sogenannten Flurförderzeugen durchgeführt. Unter den Flurförderzeugen finden sich manuell, also durch Menschen, betriebene Fahrzeuge wie auch solche, die sich mittels eines Lokalisierungssystems und einer Computersteuerung selbsttätig bewegen können. Letztere können außerdem meist durch ihre Sensorik und Aktorik am Lastaufnahmemittel selbsttätig Ladung aufnehmen und absetzen. Alternativ werden sie von Menschen oder stationärer Fördertechnik be- und entladen.

Flotten von Flurförderzeugen sind heute meist homogen aufgebaut, sie bestehen also aus einer Anzahl identischer Fahrzeuge, die insbesondere die gleichen Fähigkeiten zum Transport von Ladungsträgern besitzen.

2.1. Manuell und automatisch gesteuerte Transportfahrzeuge

Allen Flurförderzeugen ist gemein, dass sie Fahraufträge ausführen, die im einfachsten Fall aus einem Start und einem Ziel bestehen. Die Fahraufträge werden von einer Steuerung digital an die Fahrzeuge gesendet, die entweder dezentral (direkt auf dem jeweiligen Fahrzeug) oder als zentrale Instanz agiert. Bei manuell bedienten FFZ kann die Steuerung auch durch eine menschliche Person übernommen werden, wobei die Kommunikation der Fahraufträge dann üblicherweise papiergebunden oder durch Zuruf erfolgt.

Im Projekt EPoS SysKo werden alle FFZ-Systeme berücksichtigt, in denen Transport- und Fahraufträge digital kommuniziert werden. Die Fahrzeuge müssen sich also nicht zwingend fahrerlos bewegen.

2.2. Zentrale und dezentrale Strukturen

Ein intralogistisches Transportsystem mit Flurförderzeugen stellt ein verteiltes System dar. Dabei sind die beteiligten Komponenten die Leitsteuerung und die Transportfahrzeuge. In verteilten Systemen lassen sich in mehrererlei Hinsicht zentrale oder dezentrale Strukturen erkennen. Da diese Strukturen sich teilweise im sogenannten Systemkoordinator widerspiegeln, der in EPoS SysKo entwickelt wird, werden die Unterschiede dieser zentralen und dezentralen Strukturen im Folgenden beleuchtet.

A) Zentrale und dezentrale Steuerungsstruktur

Die Steuerungsstruktur bezeichnet die Beziehungen einzelner Komponenten des verteilten Systems zueinander unter dem Aspekt der Steuerung. Es wird unterschieden zwischen zentraler Steuerung, wobei die Beziehungen vertikal beziehungsweise unterordnend sind, und dezentraler Steuerung, wo die Beziehungen horizontal beziehungsweise nebenordnend sind.

In **zentralen** Steuerungsstrukturen hat die übergeordnete Instanz die Autorität, den untergeordneten Komponenten ihr Verhalten vorzuschreiben. Aus Sicht der einer untergeordneten Komponente ist klar, dass alle ihr gleichgestellten Komponenten von der selben Autorität gesteuert werden.

In **dezentralen** Steuerungsstrukturen sind alle Komponenten des verteilten Systems gleichberechtigt. Daher gibt es keine weisungsbefugte Autorität. Soll zwischen den Komponenten eine Entscheidung getroffen werden, wer eine bestimmte Aufgabe erledigt, muss dies also durch Verhandlungen auf Augenhöhe ermittelt werden. Alternativ kann

eine Komponente die Entscheidung alleine treffen und die anderen darüber nachträglich in Kenntnis setzen.

Der bedeutendste Vorteil zentraler Steuerungsstrukturen liegt im größeren Optimierungspotential. Da eine zentrale Steuerung ihre Domäne vollständig beobachten kann, also alle relevanten Informationen erhält, kann sie theoretisch optimale Entscheidungen über mögliche Eingriffe treffen. Diese Eingriffe kann sie wiederum aufgrund der vollständigen Steuerbarkeit ohne Einschränkungen in das System einprägen. Die dezentrale Steuerung ist in beiden genannten Aspekten naturgemäß benachteiligt: Der dezentrale Ansatz besagt, dass eine Steuerung nur lokalen Einblick und lokale Steuerungsmacht hat. Dies ist allerdings in der Praxis oftmals von Vorteil: Die optimale Lösung von Steuerungsproblemen ist sehr rechenaufwändig, sollte aber gleichzeitig schnell passieren. Durch die Beschränkung des Problem- und Lösungsraums auf ein kleines Feld lässt sich der Rechenaufwand erheblich verringern. Die Nachteile der Beschränkung sind dabei unerheblich, da die Wichtigkeit der Beobacht- und Steuerbarkeit für eine gute Lösung mit dem Abstand vom Problem abnimmt.

B) Zentrale und dezentrale Kommunikationsstruktur

Neben der Steuerungsstruktur kann auch die Kommunikation in einem verteilten System zentral oder dezentral ausgeprägt sein. Im Falle der **zentralen Kommunikation** spricht man von einem sternförmigen Kommunikationsnetz. Diese Form findet sich in klassischen, zentral gesteuerten Transportsystemen: Fahrzeuge kommunizieren ihren Status zu genau einem Gegenüber, nämlich der Leitsteuerung. Diese wiederum kommuniziert Fahraufträge direkt an das jeweils betroffene Fahrzeug. Eine Kommunikation der Fahrzeuge untereinander ohne den Umweg über die Leitsteuerung ist nicht möglich. Ein Vorteil dieser Struktur ist die geringe Zahl an Kommunikationspfaden und damit die geringe Komplexität der Schnittstellen.

Im Gegensatz zum sternförmigen Netz wird beim **vollvermaschten Netz** keine zentrale Instanz für die Kommunikation zwischen zwei beliebigen Komponenten benötigt. Sie können sich direkt austauschen, da von jedem Teilnehmer zu jedem anderen ein direkter Kommunikationspfad existiert. Diese Struktur bietet den Vorteil, unmittelbarer, also schneller und unkomplizierter mit benachbarten Komponenten in Austausch treten zu können. In selbstorganisierten, also dezentral gesteuerten FTS bietet sich so die Möglichkeit, ad hoc und im relevanten lokalen Umfeld auszuhandeln, welches Fahrzeug einen nahe gelegenen Transportauftrag sinnvollerweise ausführen sollte.

Problematisch bei dezentraler Kommunikation ist die Komplexität der Schnittstellen, die mit jeder zusätzlichen Komponente ansteigt. Weiterhin ist der Datenverkehr gegenüber der Bündelung in einer zentralen Vermittlungsinstanz deutlich erhöht, was gerade bei drahtloser Kommunikation zu Problemen führen kann.

3. Vision einer neuartigen kaskadierten Steuerungsstruktur

3.1. Architektur des Flottenverbunds mit Systemkoordinator

Die in Abschnitt 2.2 erläuterten Strukturalternativen der Steuerung und Kommunikation in verteilten Systemen besitzen jeweils eigene Vorteile, die sich in den bestehenden Lösungen zentral und dezentral und dezentral organisierter Transportsysteme widerspiegeln. Das Ziel dieses Forschungsprojekts bringt gegenüber diesen etablierten Transportsystem-Arten eine zusätzliche Schwierigkeit ins Spiel: Um die bestehenden und neu hinzuzufügenden Transportsysteme möglichst wenig ändern zu müssen, wird eine zusätzliche Komponente eingeführt. Sie wird als „Systemkoordinator“ bezeichnet und fungiert als Vermittler zwischen übergeordneten Systemen der Produktions- oder Lagersteuerung (z. B. Enterprise-Resource-Planning-System, Warehouse-Management-System, Manufacturing Execution System, Lagerverwaltungssystem) und mehreren gleichberechtigten Transportsystemen. Die Konstellation ist in Abbildung 2 visualisiert.

Die Kombination erfüllt gleichzeitig mehrere Charakteristika zentraler und dezentraler verteilter Systeme:

- Hinsichtlich der Steuerung liegt ein dezentrales System vor. Die Transportsysteme besitzen jeweils eine Leitsteuerung, deren Wirkungsbereich die eigene Flotte umfasst. Die Leitsteuerung erhält Transportaufträge vom Systemkoordinator, in denen keine Informationen über das Fahrzeug enthalten sind, welches den Auftrag ausführen sollte. Daher generiert sie Fahraufträge und verteilt diese selbstständig innerhalb der Flotte.
- Als weitere Instanz neben den Leitsteuerungen existiert der Systemkoordinator als Vorsteuerung. Er hat einen streng abgegrenzten Wirkungsbereich und nimmt lediglich eine Zuordnung und gegebenenfalls eine Änderung der Reihenfolge der Transportaufträge vor. Da der Koordinator keinen Eingriff in die Kompetenzen der Leitsteuerungen vornimmt und ihnen gegenüber transparent bleibt, kann nicht von einer hierarchischen Steuerung oder von einer „Bevormundung“ gesprochen werden. In Abbildung 4 sind die klassischen zentralen und dezentralen Steuerungsansätze dem koordinativen Ansatz anhand von schematischen Beispielen gegenübergestellt.
- Hinsichtlich der Kommunikation liegt ein mehrstufiges zentrales System vor. Die Transportsysteme sind in sich zentral organisiert und besitzen als Schnittstelle nach außen nur die Leitsteuerung. Auf nächsthöherer Ebene ist der Systemkoordinator die zentrale Vermittlungsinstanz. Er empfängt Zustandsaktualisierungen der Transportsysteme von den Leitsteuerungen und gibt diese gegebenenfalls weiter an andere Leitsteuerungen, verwendet sie selbst oder kommuniziert sie an übergeordnete

Systeme. Es gibt keine direkte Kommunikation zwischen Leitsteuerungen, sodass der dortige Implementierungsaufwand für zusätzliche Schnittstellen gering bleibt.

3.2. Vergleich mit bestehenden Ansätzen

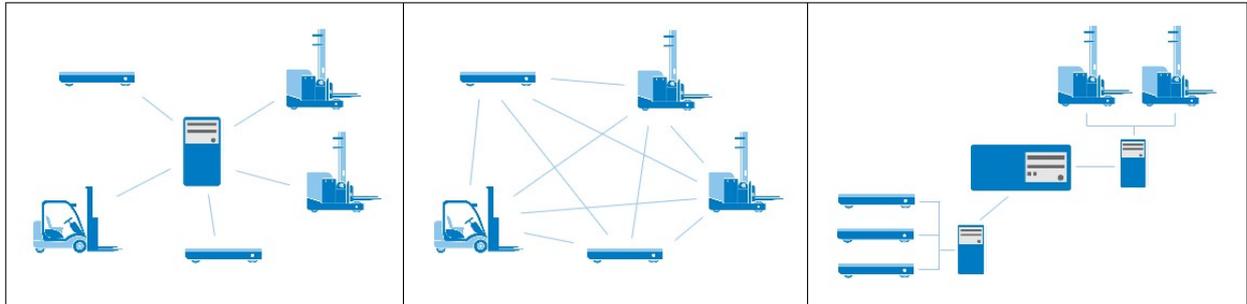


Abbildung 4: Verschiedene Steuerungsarchitekturen in Transportsystemen. Links ein klassisches, zentral gesteuertes Transportsystem, mittig ein dezentral gesteuertes Transportsystem, rechts der koordinative Steuerungsansatz.

Im Rahmen der Recherche zu Beginn des Forschungsprojekts wurden zahlreiche Normen und Richtlinien analysiert. Dabei konnten folgende Feststellungen zu Schnittstellen und Kommunikation in FTS gewonnen werden:

- Die Vorgaben sind stark auf klassische Transportsysteme mit eng definierten Prozessen ausgelegt und somit wenig innovationsfreundlich. Beispielsweise gibt es keine Möglichkeiten, mit künstlicher Intelligenz gewonnene Wahrnehmungen von Robotern in einer Leitsteuerung zu berücksichtigen.
- Für dezentral organisierte Fahrerlose Transportsysteme gibt es keine Richtlinien hinsichtlich des Systemaufbaus oder der Kommunikation. Die Vorgaben sind rein auf zentrale Steuerungen ausgerichtet.
- Kommunikationsinhalte zwischen Fahrzeugen und Steuerung sind nur in der neuen Richtlinie VDA 5050 detailliert und umfassend beschrieben. Hier sind Nachrichten über Transportaufträge, Freigaben von Wegstrecken, Umgebungs-/Karteninformationen und den Fahrzeugzustand inkludiert [VDA-5050].
- Die Kommunikation zwischen Leitsteuerung und übergeordneten Systemen (z. B. ERP-, Warenwirtschaftssystem) ist zwar durch die Richtlinie VDI 4451 Blatt 5 abgedeckt, dort aber nur sehr oberflächlich beschrieben [VDI-4451].
- Die Kommunikation zwischen Leitsteuerungen und ortsfesten Anlagen wie Toren, Brandschutzeinrichtungen etc. ist in weiteren VDI-Richtlinien geregelt.

Die wissenschaftlichen Vorarbeiten in den relevanten Bereichen lassen sich mit folgenden Kernaussagen zusammenfassen:

- Die Forschung im Bereich Leitsteuerungen beschränkt sich heute auf Optimierungsmethoden, umfassendere beziehungsweise grundlegende Ansätze zu Leitsteuerungen finden sich in der Forschung der letzten 10 Jahre kaum.

- Bei Optimierungsmethoden zur Zuordnung von Transportaufträgen zu Fahrzeugen sind v.a. exakte, heuristische, meta-/hyperheuristische und auktionsbasierte Algorithmen relevant. Letztere finden sich insbesondere bei dezentral organisierten Fahrerlosen Transportsystemen [Ryc-2020].

4. Modellierung des Systemkoordinators

Wie in Kapitel 3 erläutert wurde, empfängt der Systemkoordinator Transportaufträge, trifft eine fundierte Entscheidung dazu, welches Transportsystem für die Bearbeitung geeignet ist, und leitet den Transportauftrag an die entsprechende Leitsteuerung weiter. In diesem Kapitel wird nun die Entscheidungsfindung genauer betrachtet. Zunächst werden die grundlegenden Schritte der Entscheidungsfindung beleuchtet. Anschließend werden für den zentralen Schritt, die Auswahl eines Transportsystems aus mehreren geeigneten, zwei Gestaltungsvarianten vorgestellt.

4.1. Grundfunktionalität

Empfängt der Systemkoordinator einen Transportauftrag, werden 4 Schritte durchlaufen. Sie sind in Abbildung 5 veranschaulicht.

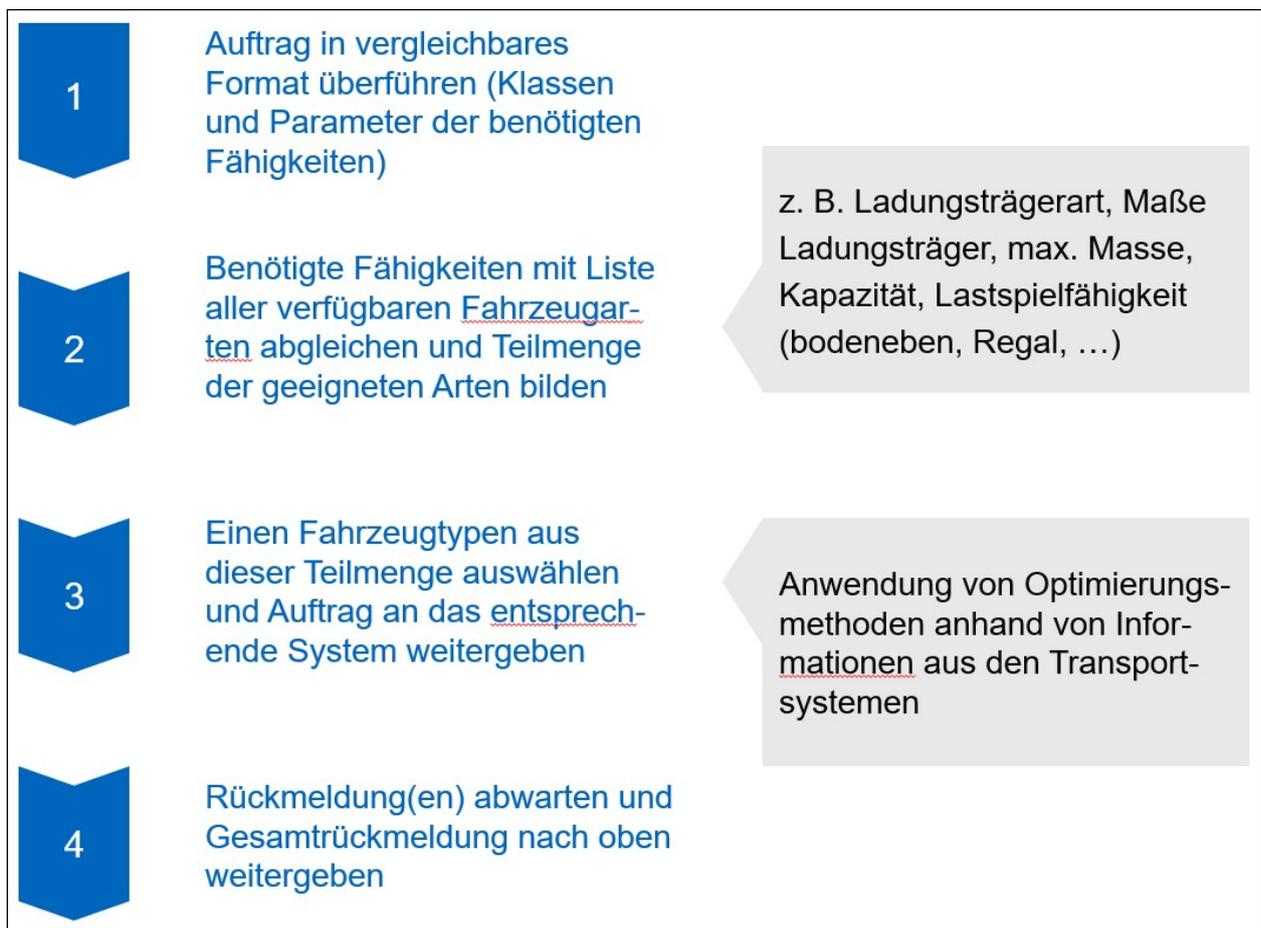


Abbildung 5: Vier durchzuführende Schritte beim Eingang eines Transportauftrags im Koordinator.

Schritt 1: Auftrag überführen

In Schritt 1 werden die Transportaufträge, die von verschiedenen Stellen eingehen können, in ein einheitliches Format überführt. Dabei ist von Bedeutung, dass die Parameter der Transporte (z. B. die Abmessungen des Ladungsträgers oder die Masse der Ladung) in den gleichen Einheiten vorliegen sowie auf den gleichen Bezugsgrößen beziehungsweise Koordinatensystemen

basieren. Dies ermöglicht die Vergleichbarkeit der Aufträge untereinander sowie den Abgleich der benötigten Transportfähigkeiten mit den bereitgestellten Fähigkeiten der an den Koordinator angeschlossenen Transportsysteme (siehe Schritt 2). Dieser Schritt wird als trivial angesehen und daher im vorliegenden Dokument nicht weiter behandelt.

Schritt 2: Fähigkeiten abgleichen

Dieser Vorgang beinhaltet die Filterung der Menge aller vorhandenen Transportsysteme zu einer Teilmenge, die den vorliegenden Transportauftrag durchführen kann. Dazu werden die formalisierten Transportaufträge mit den vorab eingespeicherten Merkmalen der Transportsysteme abgeglichen. Dabei werden sowohl Boolesche Werte (z. B. „Ladungsträgerart des Auftrags ist Palette“ IST wahr UND „Fähigkeit zum Transport einer Palette“ IST wahr) als auch zahlenmäßige Werte (z. B. „benötigte Traglast“ \leq „bereitgestellte Traglast“) verglichen.

Die Liste zu vergleichender Parameter hängt vom Anwendungsfall sowie von den konkreten Eigenschaften der beteiligten Transportsysteme ab und kann daher nicht allgemeingültig aufgestellt werden. Hierbei wird auf die entsprechenden VDI-Richtlinien für die Eigenschaften gängiger Ladungsträger sowie auf die Produktspezifikationen der FFZ-Hersteller verwiesen.

Schritt 3: Fahrzeugtyp auswählen

Dieser Teil des Koordinationsvorgangs ist der bedeutendste, da der Koordinator abwägen muss, welches der technisch geeigneten Transportsysteme den Transportauftrag erhalten soll. Vordergründiges Optimierungsziel dabei ist die Transporteffizienz, die durch die in Abschnitt 1.2 genannten Parameter gemessen werden soll. Über die unmittelbare Auswirkung in der Zeiteffizienz kann die Koordinationsentscheidung jedoch auch in vielen anderen Bereichen Einfluss nehmen und somit langfristig dem Unternehmenserfolg zutragen. Aus diesem Grund wurde eine Voruntersuchung durchgeführt, welche Parameter ein Koordinator bei der Entscheidungsfindung berücksichtigen sollte, um die verschiedenen betroffenen Interessensgruppen zufriedenzustellen. In Abschnitt 4.2 wird dieser Aspekt der Transportauftragsverteilung näher beleuchtet.

Aufgrund der Rückmeldung der am Projekt beratend teilnehmenden Firmen wurde der Fokus jedoch von den mittelbaren Faktoren auf die direkt messbaren Ausführungszeiten als ausschlaggebende Kennzahlen gelegt. Die Optimierung nach diesen Größen kann mit Informationen, die direkt aus den Leitsteuerungen empfangen werden, möglich. Die verschiedenen Varianten der Entscheidungsfindung aufgrund charakteristischer Informationsspektren werden in Abschnitt 4.3 vorgestellt.

Schritt 4: Rückmeldung verarbeiten

Der Transportauftrag wird aufgrund der Entscheidung aus Schritt 3 an eines der untergeordneten Transportsysteme gesendet. Anschließend werden auf die Rückmeldungen des Transportsystems erwartet und an das übergeordnete, auftraggebende System weitergeleitet. Dieser Schritt wird ebenfalls als trivial angesehen und daher in diesem Bericht nicht näher beleuchtet.

4.2. Optimierungsziele und zugeordnete Kennzahlen

Zur Bewertung der Güte einer Transportauftragszuordnung wurde ein Kennzahlensystem entworfen. Hierfür wurde der Betrachtungsgegenstand, ein Materialflusssystem, hinsichtlich der

Parteien analysiert, die von seiner Ausgestaltung betroffen sind. Folgende sogenannte Stakeholder wurden identifiziert:

- Der Betreiber des Materialflusssystems
- Die Belegschaft des Betriebs
- Die Hersteller der Transportsysteme

Für jeden Stakeholder wurden Interessen benannt, die zur Erfüllung der jeweils eigenen Ziele beitragen und implizite Forderungen an die Transportsysteme stellen. Diese Implikationen wurden ebenfalls benannt und jeweils mit einer messbaren Größe hinterlegt. Diese Kennzahlen – teilweise statische Werte aus den Datenblättern der Fahrzeuge, teils in der Operative messbare Werte, teils Schätzungen über die nahe Zukunft – wurden anschließend für die multikriterielle Bewertung eines Transportvorgangs kombiniert und gegeneinander gewichtet.

Für die Festlegung einer Gewichtung der verschiedenen Interessen wurde eine qualitative Expertenbefragung durchgeführt. Sie ergab, dass in der Praxis die Faktoren, die sich direkt auf die Zeit und damit auf die Wirtschaftlichkeit auswirken, von überragender Bedeutung sind. Daher wurde die Gestaltung des ausführlichen Kennzahlensystem nicht weitergeführt. Stattdessen wurde mit den in Abschnitt 1.2 bereits genannten Parametern gearbeitet, um die Güte der Transportauftragsverteilung zu messen.

4.3. Varianz der Ausprägungen anhand der bereitstehenden Informationen

Der Koordinator kann eine Optimierungsmethode für die Transportauftragsvergabe nur anwenden, wenn er die dafür nötigen Informationen aus allen angeschlossenen Transportsystemen zumindest im geforderten Detailgrad erhält. Die möglichen Kombinationen aus Optimierungsmethoden und Informationsgehalten sind beschränkt. Um die zentrale Frage des Forschungsprojekts nach der Gestaltung der Schnittstellen zwischen Leitsteuerungen und Koordinator beantworten zu können, müssen verschiedene solche Ausbaustufen mit jeweils passenden Optimierungsmethoden getestet werden. Der Implementierungsaufwand soll dabei gering gehalten werden, daher ist es notwendig, wenige repräsentative Konfigurationen auszuwählen, die den Gegebenheiten in heutigen Transportsystemen Rechnung tragen.

Zu diesem Zweck wurde eine qualitative Umfrage unter Experten für FFZ-Systeme durchgeführt. Darin wurde abgefragt, welche Informationen die Transportsysteme heute vorhalten oder sogar an übergeordnete Systeme weitersenden. Im Einzelnen wurden Fragen zu den folgenden Aspekten gestellt:

- Kommunikation zwischen Leitsteuerung und Fahrzeugen
 - Transportbezogene Kommunikation
 - Statusbezogene Kommunikation
 - Kommunikation über Fehler
 - Kommunikation über die Umgebung
 - Technische Aspekte
- Kommunikation zwischen Leitsteuerung und übergeordneten Systemen
 - Auftragsbezogene Kommunikation
 - Kommunikation über Fehler
 - Kommunikation über Hindernisse und flottenfremde Fahrzeuge
- Interna der Leitsteuerung
 - Verhalten der Leitsteuerungslogik in bestimmten Situationen
 - Sicherheitsaspekte

- Technische Aspekte
- Interna der Fahrzeuge
 - Verhalten der fahrzeuginternen Logik in bestimmten Situationen
 - Technische Aspekte

Die qualitative Experten-Umfrage mit Stichprobengröße vier ergab ein konsistentes Bild von vier Arten von Transportsystemen beziehungsweise Leitsteuerungen. Die tatsächlich weitergegebenen Informationen heutiger Leitsteuerungen ergaben sich als sehr heterogen und abhängig vom konkreten übergeordneten System. Die Klassifizierung richtet sich daher nach den Informationen, die in Leitsteuerungen durch Übertragung von den Fahrzeugen oder durch Berechnung vorhanden sind und somit potentiell aufwandsarm an den Koordinator weitergegeben werden könnten:

- „Verteilte Anlage“: Hier wird mit echtzeitfähigen Funkprotokollen gearbeitet, um auch sicherheitsrelevante Funktionen der Fahrzeuge aus der Ferne zu steuern. Die Anbindung an andere Maschinen oder Anlagenteile (insbesondere im Produktionskontext) ist eng. Die Breite und Tiefe der Kommunikation und ihre zeitliche Auflösung ist sehr hoch. Beispielsweise werden Raddrehzahlen oder interne Temperaturen der Fahrzeuge mitgeteilt.
- „Stark zentralisierte Steuerung“: Die Kommunikation zwischen Leitsteuerung und Fahrzeug während der Auftragsausführung ist intensiv (Nachrichtenfrequenz deutlich über 1 Hz). Dabei werden insbesondere über den Fahrtweg detaillierte Informationen ausgetauscht. (beispielsweise Freigabe des jeweils nächsten Blockabschnitts, der von einem Fahrzeug befahren werden darf).
- „Schwach zentralisierte Steuerung“: Die Nachrichtenfrequenz ist bei dieser Klasse geringer (ca. 1 Hz). Insbesondere ist die Kommunikation von über den Fahrtweg im Vergleich zur stark zentralisierten Steuerung verringert, indem Ketten von freigegebenen Wegpunkten übertragen werden („Base“ und „Horizon“ nach VDA 5050), die ein Fahrzeug abfahren darf. Die Fahrzeuge senden Statusmeldungen und optional Kartenupdates anlassbezogen zurück an die Leitsteuerung.
- „Autonomes Fahrzeug“: In diesem Extremfall werden nur zugewiesene Transportaufträge an die Fahrzeuge kommuniziert. Die Fahrzeuge führen die Aufträge selbstständig aus und melden ihren Status zurück (Position, Ladezustand etc.).

Auf Basis dieser vier Klassen wurden mehrere Ausprägungen des Koordinators entwickelt, die auf die jeweils verfügbaren Informationen zurückgreifen. Ihr Zusammenhang ist in Abbildung 6 dargestellt. Sie werden in den folgenden Abschnitten vorgestellt.

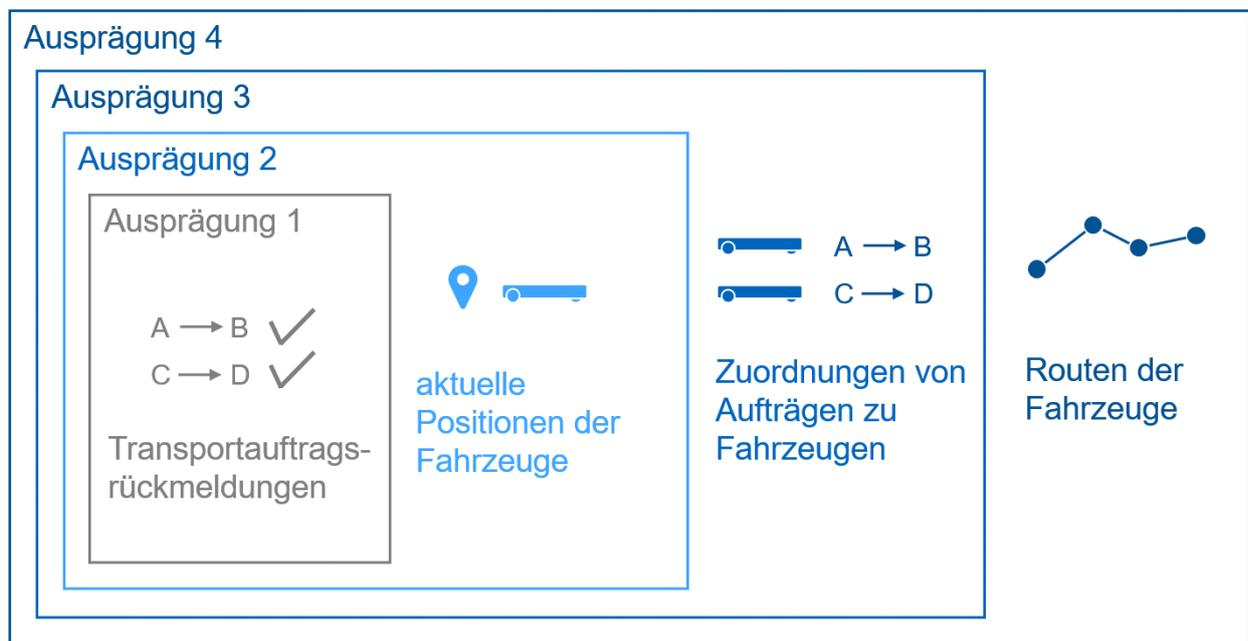


Abbildung 6: Zusammenhang der aufeinander aufbauenden Ausprägungen des Koordinators.

4.4. Ausprägung 1: Nur Übermittlung von Transportaufträgen und Transportauftragsrückmeldungen

Wird die Leitsteuerung gegenüber dem direkten Anschluss an ein ERP- oder ähnliches System nicht verändert. Das bedeutet, dass der Systemkoordinator einen Transportauftrag in der für Leitsteuerungen üblichen Form schickt. Genauso sind die Rückmeldungen der Fahrzeuge rein auf den Status der Ausführung des Transportauftrags bezogen.

Mit diesen Informationen kann der Koordinator bereits die Auslastung jedes untergeordneten Transportsystems bestimmen: Er weiß, welche Aufträge er an welches System vergeben hat, und er wird unterrichtet über jene dieser Aufträge, die fertiggestellt wurden. Alle bereits versendeten, aber noch nicht fertiggestellten Aufträge sind also in Bearbeitung durch das untergeordnete Transportsystem und ergeben somit in Summe die Auslastung.

Weiterhin kann der Koordinator in dieser Konfiguration eine grobe Abschätzung darüber treffen, an welchen Stellen des Layouts sich in naher Zukunft Fahrzeuge eines Transportsystems befinden werden. Hierzu zieht er die Ziel- beziehungsweise Abgabepunkte der im System aktiven Transportaufträge heran. Da er allerdings keinen Einblick in die Reihenfolge der Ausführung der Aufträge hat, ist die Abschätzung sehr vage. Mit zunehmender Streuung der aktiven Ziele über das Layout wird die Nutzbarkeit für die Koordinationsentscheidung schlechter nutzbar.

Der Fokus bei der Entscheidung über die Transportauftragsweitergabe liegt in dieser Ausprägung folglich auf den Auslastungen der Transportsysteme. Die Aufträge werden stets an das System vergeben, das die geringste Auslastung aufweist. In Abbildung 7 wird das Vorgehen des

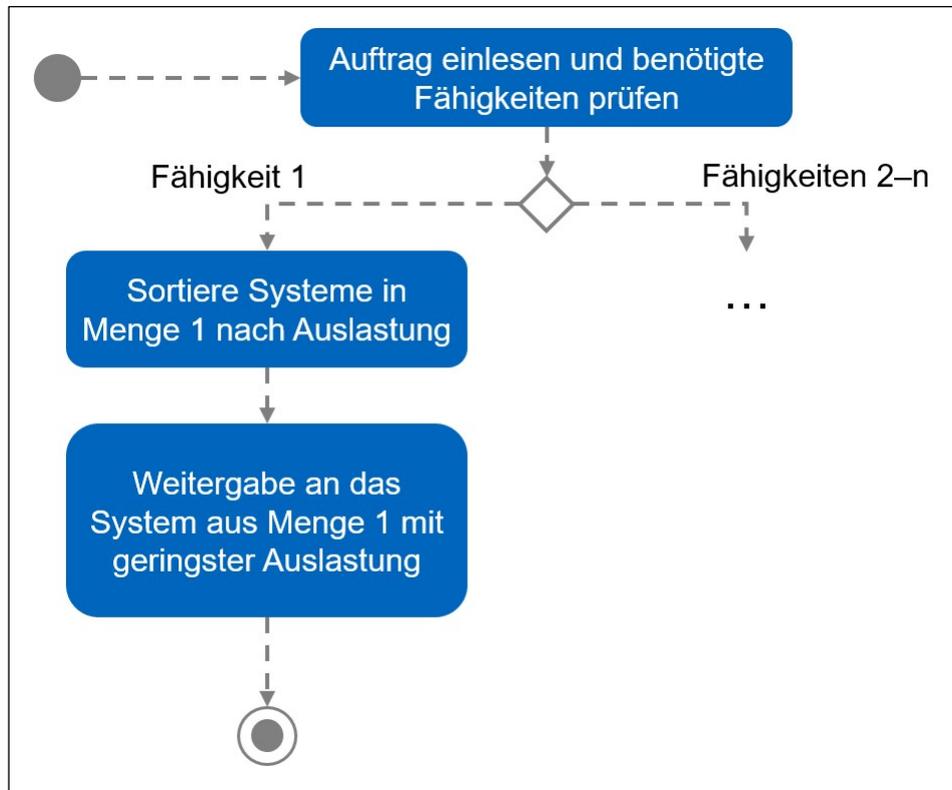


Abbildung 7: Vorgehen des Koordinators zur Transportauftragsverteilung bei kleiner Informationsbasis.

Koordinators veranschaulicht. Nach dem Fähigkeitenabgleich wird die gefilterte Menge der Subsysteme aufsteigend nach Auslastung sortiert und das oberste System für die Bearbeitung des Auftrags ausgewählt.

4.5. Ausprägung 2: Zusätzlich Übermittlung von Fahrzeugpositionen

In der nächstumfangreicheren Ausprägung der Schnittstellen sind dem Systemkoordinator zusätzlich zu den oben genannten Informationen über die Status der Transportaufträge auch die Positionen der einzelnen Fahrzeuge bekannt. Diese werden in einem bestimmten zeitlichen Abstand und einer bestimmten Auflösung von der jeweiligen Leitsteuerung an den Koordinator übertragen. Anstatt der von den Subsystemen initiierten Übertragung der Positionsinformationen

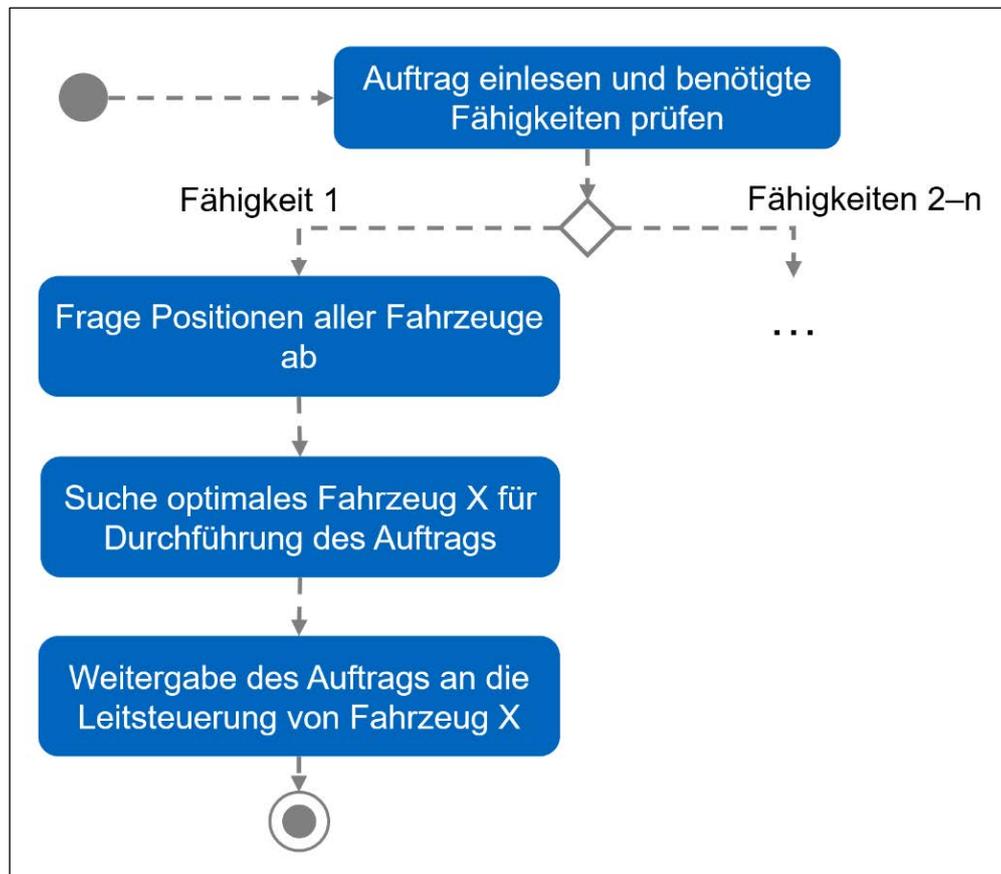


Abbildung 8: Vorgehen des Systemkoordinators zur Transportauftragsverteilung bei Verfügbarkeit der Fahrzeugpositionen. Der Schritt der Positionsabfrage ist optional, sofern die Subsysteme die Positionen automatisch übertragen.

kann die Übertragung auch vom Koordinator im Bedarfsfall initiiert werden. Diese Variante ist in Abbildung 8 dargestellt. Hier werden die 3 grundlegenden Schritte der Koordination, wie sie auch in den folgenden Ausprägungen durchlaufen werden, veranschaulicht: Informationssammlung, Entscheidungsfindung durch einen passenden Optimierungsalgorithmus und Weitergabe ans ausgewählte Subsystem.

Mithilfe der Fahrzeugpositionen kann der Koordinator versuchen, Rückschlüsse auf die Zuordnung der übermittelten Transportaufträge zu den Fahrzeugen eines Transportsystems zu ziehen. Dies wiederum ermöglicht Vermutungen über die Ankunftszeiten von Fahrzeugen an bestimmten Punkten sowie über die Routen auf dem Weg dorthin. Erstere Information erlaubt es dem Koordinator, nahe an dem zu erreichenden Zielpunkt gelegene Transportaufträge zum richtigen Zeitpunkt an das Transportsystem weiterzuleiten und so kurze Leerfahrten vom

Abgabepunkt des vorherigen Auftrags zum Aufnahmepunkt des neuen Auftrags zu ermöglichen. Die zweite generierte Information erlaubt dem Koordinator, eine Routenplanung vorzunehmen. Hierbei plant er für den neu zu vergebenden Auftrag eine Route durch das Layout und prüft, ob diese Route die derzeit vermuteten Routen der Fahrzeuge der verschiedenen Transportsysteme tangiert. Ist dies der Fall, wird der neue Transportauftrag entweder im Koordinator zurückgehalten oder sofort an eine Leitsteuerung vergeben, die ihn nach Kenntnis des Koordinators später ausführen wird.

Insgesamt sind die Schlüsse, die der Koordinator in dieser Konfiguration aus den erhaltenen Informationen ziehen kann, als sehr vage einzustufen. Die Wahrscheinlichkeit für eine gute Zuordnung der Fahrzeuge zu Aufträgen sowie zu Routen ist so gering, dass der Mehrwert des Implementierungsaufwands gegenüber der Ausprägung 1 fraglich ist. Daher wird diese Konfiguration des Systemkoordinators im Projekt nicht weiterverfolgt.

4.6. Ausprägung 3: Zusätzlich Übermittlung von Auftrag-Fahrzeug-Zuordnungen

In dieser Ausprägung senden die Leitsteuerungen zusätzlich zu den Daten aus den vorherigen beiden Ausprägungen auch die Zuordnungen der Transportaufträge zu ihren Fahrzeugen. Damit können wie in der vorherigen Ausprägung Vermutungen über die Routen der Fahrzeuge angestellt werden, allerdings mit höherer Sicherheit, da die aktuelle Position und der aktuelle Auftrag eines Fahrzeugs eindeutig bekannt sind. Somit können folgende Informationen für die Entscheidung über die Verteilung der Transportaufträge herangezogen werden:

- Auslastungen der Transportsysteme
- Aktuelle Positionen der Fahrzeuge
- Zielpositionen der Fahrzeuge
- Mutmaßliche Routen (können durch die Leitsteuerung geschätzt werden)

Diese Ausprägung wurde im Projekt am tiefsten analysiert, da sie einen Mittelweg bildet zwischen einer schlanken Schnittstelle und detaillierten, wertvollen Informationen. Gleichzeitig wird geistiges Eigentum der Leitsteuerungshersteller, auf das über die Routen geschlossen werden könnte, geschützt.

Für Scheduling und Disposition der Aufträge zu Fahrzeugen wurden für diese Ausprägung mehrere existierende Algorithmen untersucht. Dabei wurden in einer engeren Auswahl die Algorithmen SIT-MASR, SET-MASR, Ant Colony Optimization und Prim Sort miteinander verglichen [Vig-2007, Li-2017, Lag-2004]. Die Wahl für die Implementierung im Koordinator fiel auf Prim Sort. Dieser Algorithmus ist einfach zu implementieren und bietet eine gute Leistung.

4.7. Ausprägung 4: Zusätzlich Übermittlung von Routen

In dieser Ausprägung werden folgende Informationen zwischen Systemkoordinator und Leitsteuerungen ausgetauscht, zusammengesetzt aus den Informationen der vorherigen Ausprägung und einer Ergänzung:

- Transportaufträge werden vom Systemkoordinator an die Leitsteuerungen geschickt und Rückmeldungen darüber empfangen.
- Die aktuellen Positionen der Fahrzeuge werden von den Leitsteuerungen an den Koordinator gesendet.
- Die Leitsteuerungen informieren den Koordinator über die Zuordnungen von Transportaufträgen zu Fahrzeugen.

- Zusätzlich werden nun auch die geplanten Routen der einzelnen Fahrzeuge beim Systemkoordinator bekannt gemacht. Dies setzt voraus, dass die jeweilige Leitsteuerung die Route kennt., was nicht in jedem heutigen Transportsystem gegeben ist. Insbesondere fahrerlose Transportsysteme mit hohem Autonomiegrad der Fahrzeuge wissen häufig – wenn überhaupt – nur die grobe Route der Fahrzeuge, da diese ad hoc planen.

In Abbildung 9 ist der grundlegende Ablauf des Verteilalgorithmus dieser Koordinator-Ausprägung dargestellt. Es wird deutlich, dass der Koordinator nun eine eigene Repräsentation

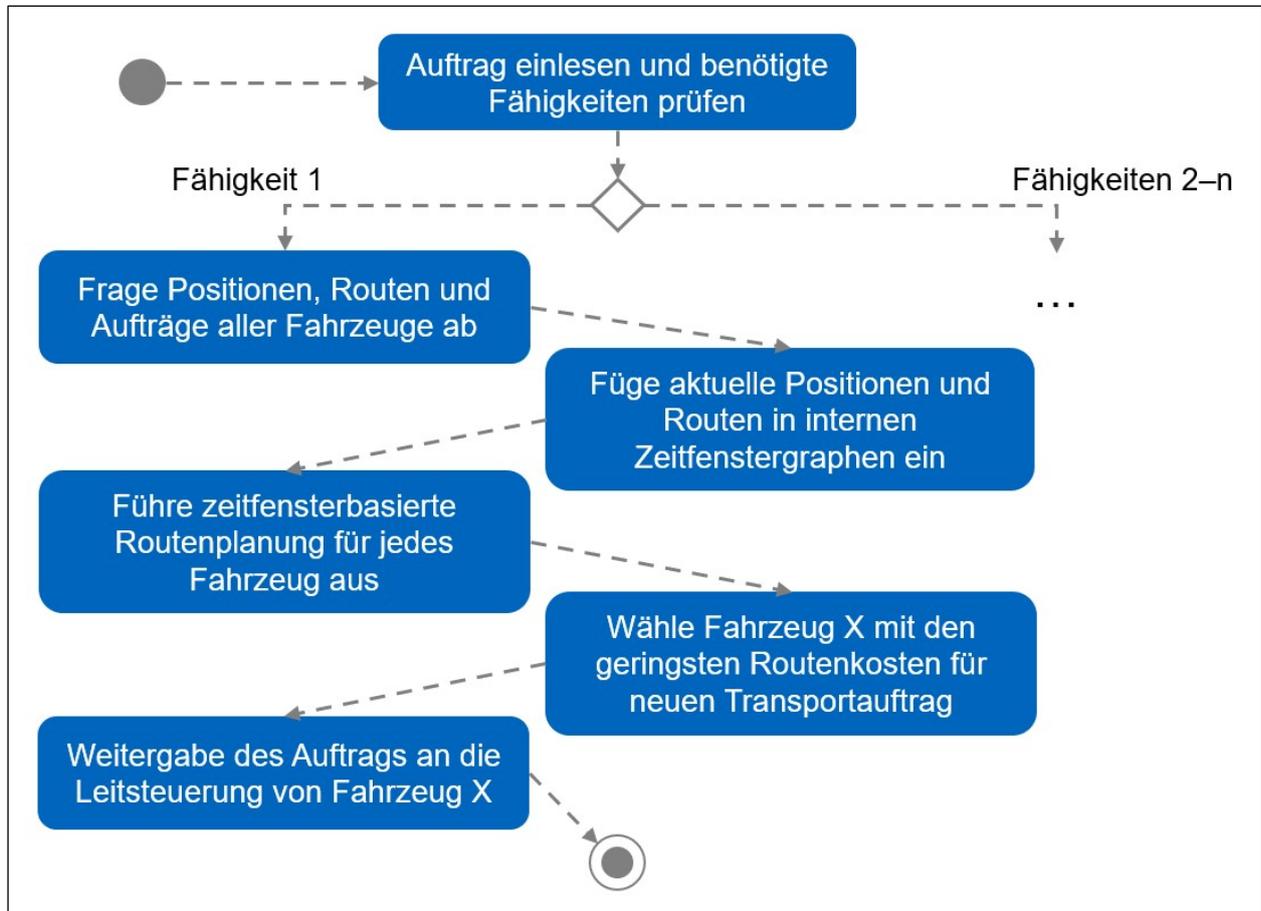


Abbildung 9: Vorgehen des Systemkoordinators zur Transportauftragsverteilung bei Verfügbarkeit der Routen der Fahrzeuge. Neue Routen werden zwischen den bestehenden hindurchgeplant.

des Transportnetzes vorhalten muss. In diesem Graphen werden die aktuellen Positionen und Routen der Fahrzeuge eingetragen. Um nun eine möglichst kollisionsfreie Route für den neu zu vergebenden Transportauftrag zu finden, wird vorgeschlagen, das zeitenfensterbasierte Routing nach Lienert anzuwenden. Dabei wird jeder Knoten des Transportnetzes zu jenen Zeitfenstern, in denen er voraussichtlich von einem Fahrzeug durchfahren wird, reserviert. Anschließend wird für jedes Fahrzeug ein Suchalgorithmus nach dem kürzesten Weg von seinem derzeitigen Aufenthaltsort (wenn Leerlauf) beziehungsweise Ziel (wenn ein Auftrag ausgeführt wird) zum Ausgangspunkt des neuen Transportauftrags ausgeführt. Der Suchalgorithmus (z. B. Dijkstra oder A*) wird dabei um die Messung der Durchfahrtszeiten der Knoten und Kanten erweitert. Ist ein Knoten zum prognostizierten Ankunftszeitfenster belegt, so wird er für die Pfadsuche nicht

berücksichtigt [Lie-2021]. Die gleiche Prozedur wird für jedes Fahrzeug vom Aufnahmepunkt zum Abgabepunkt wiederholt.

Somit wird für jedes Fahrzeug eine Route gefunden, die die Ausführung des neuen Transportauftrags erlaubt und währenddessen keine Kollisionen beziehungsweise Behinderung der anderen Fahrzeuge hervorruft. Nun müssen noch die kalkulierten Ausführungszeiten der Fahrzeuge aufsteigend sortiert werden, sodass der Auftrag schließlich an die Leitsteuerung des Fahrzeugs mit der besten Zeitprognose weitergegeben wird.

5. Versuchsaufbau zur vergleichenden Analyse der Ausprägungen des Systemkoordinators

Um die Funktionsweise des Koordinators in verschiedenen Schnittstellenausprägungen mit jeweils mehreren angeschlossenen Transportsystemen testen zu können, wurde ein Prüfstand entwickelt, der neben der Koordinatorsoftware selbst auch die Leitsteuerungen sowie in einer ereignisdiskreten Materialflusssimulation die einzelnen Fahrzeuge umfasst. Somit kann ohne Rückgriff auf ein physisches Materialflusssystem realistisch eingeschätzt werden, welche Auswirkungen der Einsatz eines Systemkoordinators auf solch ein Umfeld hat. Im Folgenden werden die Gesamtarchitektur des Prüfstands sowie die einzelnen Komponenten näher vorgestellt.

5.1. Architektur und Kommunikationswege

In Abbildung 10 ist die Zusammensetzung der genannten Komponenten zum gesamten Versuchsaufbau dargestellt. Auf der linken Seite ist der initiale Informationsfluss durch die verschiedenen Komponenten bei Einspeisung eines Transportauftrags gezeigt. Auf die technischen Umsetzungen der Komponenten selbst, abgebildet auf der rechten Seite, wird in den folgenden Abschnitten eingegangen.

Der grundlegende Ablauf der Koordinatorsimulation gestaltet sich wie folgt: Es wird zunächst ein Transportauftrag in den Koordinator eingespeist. Dieser Vorgang ist in Abschnitt 5.5 näher

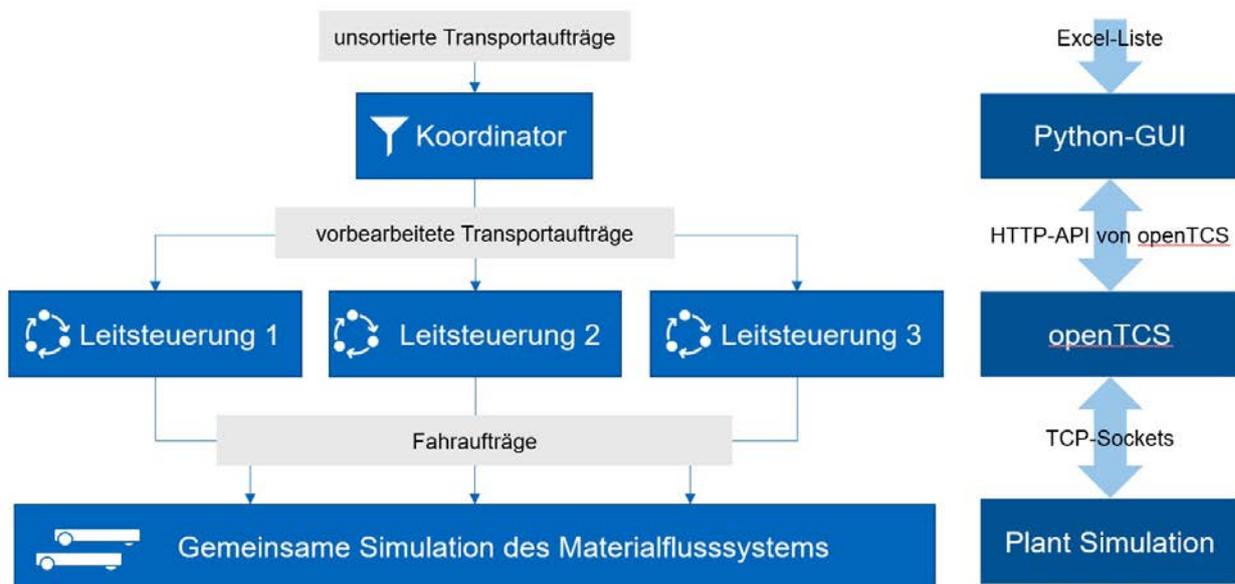


Abbildung 10: Schema des Versuchsaufbaus zur Durchführung von Simulationen. Links die Softwarekomponenten und Kommunikationsinhalte, rechts die technische Umsetzung.

beschrieben. Anschließend wird im Koordinator basierend auf dem aktuell verfügbaren Informationsstand und der eingestellten Optimierungsausprägung eine Entscheidung über die Weitergabe des Auftrags herbeigeführt. Daraufhin wird der Transportauftrag über eine Netzwerkschnittstelle an die entsprechende Leitsteuerung gesendet. Die Wahl einer

Netzwerkschnittstelle ermöglicht es, die Leitsteuerungen optional auf anderen Computern zu betreiben als den Koordinator. Weiterhin lassen sich in der Zukunft die Leitsteuerungen einfach austauschen, um andere Systemzusammensetzungen zu testen. Dies wird ermöglicht durch den Umstand, dass heutige Leitsteuerungen meist über Web-Schnittstellen verfügen.

Die Leitsteuerungen bearbeiten im Anschluss die empfangenen Transportaufträge, indem sie gegebenenfalls ein Scheduling, also eine Reihenfolgen- und Zeitpunktplanung, vornehmen und die Aufträge anschließend auf Fahrzeuge disponieren. Schlussendlich schickt die Leitsteuerung einen Fahrauftrag an eines ihrer Fahrzeuge. Hier wird wieder eine Netzwerkschnittstelle in Form einfacher Strings in TCP¹-Paketen gewählt. Dies ermöglicht den Anschluss der Leitsteuerung an eine gemeinsame Materialflusssimulation, in der die Fahrzeuge aller beteiligten Transportsysteme eingebettet sind. In dieser ereignisdiskreten Simulation werden die Interaktionen von Fahrzeugen verschiedener Transportsysteme künstlich erzeugt. Dies ist für die Aussagekraft der Simulation von herausragender Bedeutung, da Staus, Deadlocks und Kollisionen beziehungsweise Wartezeiten an Kreuzungen die entscheidenden Auslöser einer niedrigen Transporteffizienz sind.

Die Rückmeldungen zum Status eines Transportauftrags sind in Abbildung 10 nicht verzeichnet. Sie werden über die geschilderten Kommunikationskanäle in der Gegenrichtung übertragen. So kann letztendlich im Koordinator eine Zusatzfunktion die Aufzeichnung der Zeitstempel aller relevanten Ereignisse übernehmen. Diese Zeiten sind die Grundlage der Versuchsauswertung, die in Kapitel 6 beschrieben wird.

¹ Transmission Control Protocol, ein Standardprotokoll zur verlustfreien Übertragung von Zeichenketten im Netzwerk

5.2. Umsetzung des Koordinators

Der Systemkoordinator wurde aufgrund der niedrigen Einstiegsschwelle und der vielen verfügbaren Bibliotheken in der Programmiersprache Python entwickelt. Mithilfe der Bibliothek „Tkinter“² wurde eine grafische Oberfläche erzeugt, über die sich alle relevanten Programmfunktionen aufrufen lassen. In Abbildung 11 ist das Hauptfenster des Koordinators sichtbar. Über der zentralen Tabelle mit den Transportaufträgen, die aus einer Excel-Datei geladen werden können, befinden sich die Knöpfe für das Starten der Leitsteuerungen sowie zum Starten und Stoppen der Simulation. Unterhalb des Tabellenfelds befindet sich links ein Dropdown-Menü mit verschiedenen Optimierungsalgorithmen, wie sie in Abschnitt 4.6 vorgestellt wurden. Der eingestellte Optimierungsalgorithmus wird während des Simulationslaufs auf die Aufträge aus der Liste angewendet, die nacheinander mit gestreutem Zeitabstand aktiv werden.

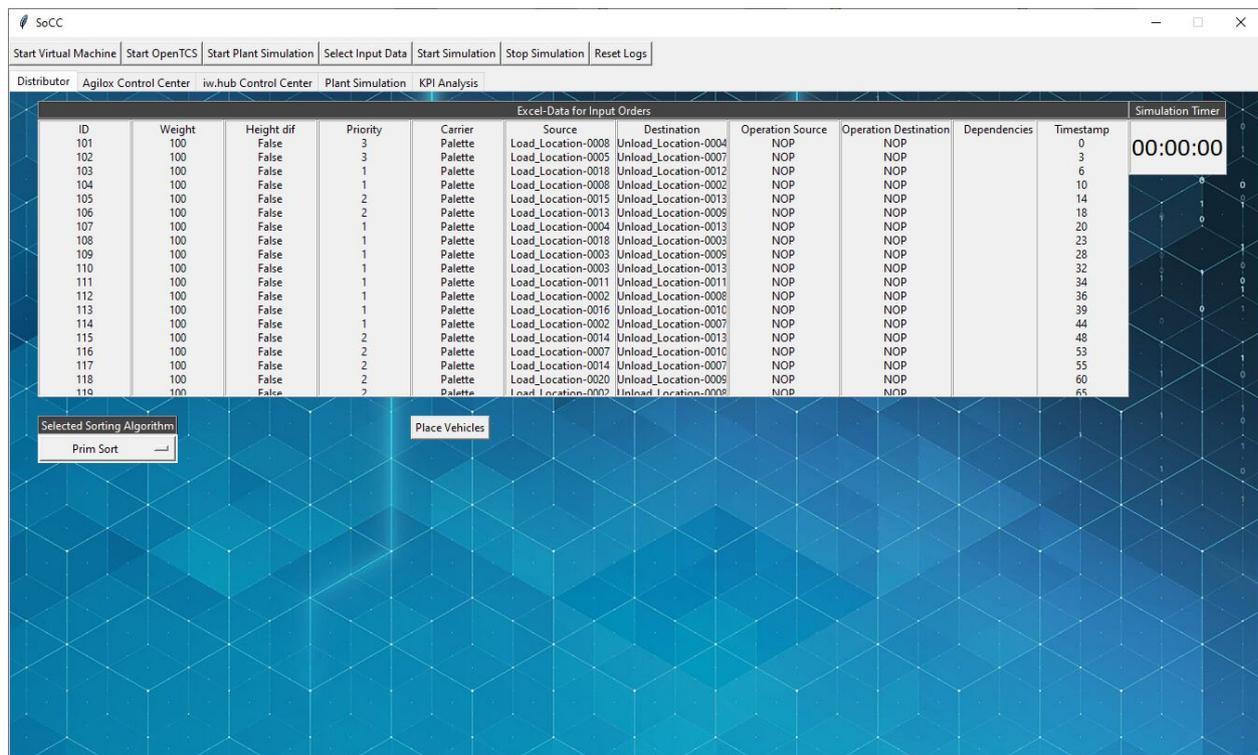


Abbildung 11: Hauptfenster des Koordinators mit Steuerelementen für die Handhabung des Prüfstands sowie der Verteilalgorithmen.

Rechts neben dem Algorithmen-Menü befindet sich ein Knopf zum initialen Platzieren der Fahrzeuge. Dies ist notwendig, da alle Fahrzeuge aller Flotten in der Materialflusssimulation auf den gleichen Punkt gesetzt werden. Durch Aktivieren des Bedienelements werden die Fahrzeuge der verschiedenen Flotten per fingierten Transportaufträgen an zufällige Abgabestationen im Layout geschickt.

Beim Start der Simulation beginnt der Timer rechts oben im Hauptfenster zu laufen. Der Koordinator liest nun den ersten Transportauftrag aus der Tabelle und wartet, bis der Zeitpunkt des notierten Zeitstempels eintritt. Dann kommt der Auftrag offiziell im System an und der Verteilmechanismus wird ausgeführt.

² <https://docs.python.org/3/library/tkinter.html>

Der Koordinator erfüllt zusätzlich die Funktion der Dokumentation der Versuchsläufe. Hierzu speichert er für jeden Auftrag die Empfangszeit, den Zeitpunkt des Beginns der Bearbeitung sowie den Zeitpunkt der Fertigstellung des Auftrags. Letztere beiden Zeiten erhält der Koordinator durch regelmäßige Abfrage der Transportauftragsstatus bei den Leitsteuerungen (sogenanntes „Polling“ der Informationen). Am Ende eines Simulationslaufs werden die drei Zeitstempel jedes durchgeführten Auftrags in eine Excel-Tabelle gespeichert und können anschließend manuell ausgewertet werden.

5.3. Umsetzung der Leitsteuerungen

Für die Umsetzung der Leitsteuerungen wurde die Open-Source-Software openTCS³ gewählt.

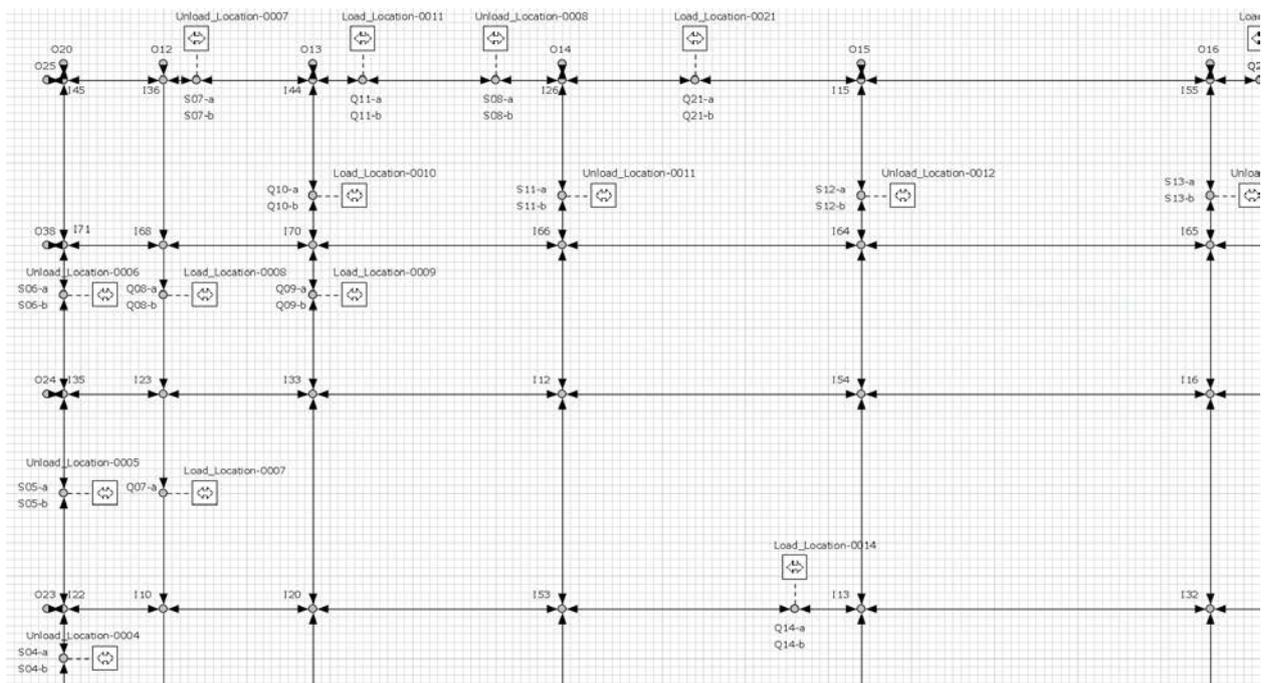


Abbildung 12: Ausschnitt des verwendeten exemplarischen Transportnetzes, modelliert in der Leitsteuerungssoftware openTCS. Sichtbar sind Kreuzungen, Fahrtwege sowie Aufnahme- und Abgabestellen.

Sie bietet aufgrund des offengelegten Quellcodes und der ausführlichen Dokumentation umfangreiche Anpassungs- und Konfigurationsmöglichkeiten. OpenTCS bietet die Standardfunktionen von Leitsteuerungen sowie auch nützliche Verwaltungsroutinen für Fahrzeuge und Layout von Haus aus an. Für die einfache Kontrolle der Leitsteuerung durch externe Systeme gibt es eine sogenannte REST⁴-API⁵. Über sie können unter anderem Transportaufträge eingespeist und Statusdaten abgefragt werden.

In Richtung der eigenen Flotte existiert eine Java-API. Mit ihr können sogenannte Vehicle Driver angeschlossen werden, die die Eigenheiten der zu verwaltenden Fahrzeuge berücksichtigen. In einem Vehicle Driver wird für jedes verbundene Fahrzeug eine Klasseninstanz angelegt, die

³ www.opentcs.org

⁴ REST: Representational State Transfer, Abstraktion von Struktur und Verhalten in verteilten Systemen

⁵ API: Application Programming Interface, Schnittstelle zur Programmierung von Anwendungen

gegenüber der Leitsteuerung den Zustand des Fahrzeugs widerspiegelt und die Kommunikation übernimmt.

Für das vorliegende System wurde eigenes ein Vehicle Driver entwickelt, der Transportaufträge in simple Zeichenketten codiert, die von Plant Simulation interpretiert werden können. Gleichzeitig können solche Zeichenketten von Plant Simulation empfangen werden, die den Status eines Transportauftrags oder die Position des Fahrzeugs enthalten.

Das Layout des Transportnetzes ist in openTCS als gerichteter Graph hinterlegt. Dabei sind Fahrwege als Kanten und Verzweigungen sowie Haltepunkte als Knoten modelliert. Um die Auftretenswahrscheinlichkeit von Kollisionen und Staus zu verringern, ist bei Kreuzungen und Haltepunkten ein Detail zu berücksichtigen, welches in Abbildung 13 veranschaulicht wird: Ein Knoten wird nur aus genau einer Richtung als eingehendes Ende einer Kante verwendet. Dies bedeutet, dass Haltepunkte entlang einer Kante jeweils zwei Knoten besitzen, während Kreuzungen mit vier zusammentreffenden Wegen aus vier Knoten bestehen. Bei Kreuzungen ist ein Knoten also jeweils Ende einer eingehenden Kante und Beginn einer ausgehenden Kante, sofern es sich um bidirektionale Wege handelt. Die vier Knoten einer Kreuzung sind zusätzlich untereinander gegen den Uhrzeigersinn mit unidirektionalen Kanten verbunden, um die Traverse von jedem Eingang zu jedem Ausgang zu erlauben.

OpenTCS enthält Routinen für die Fahrzeugdisposition und die Routenplanung. Dies bedeutet, dass eingegangene Transportaufträge sofort einem Fahrzeug zugewiesen werden, welches den Auftrag durchführen soll. Sobald das Fahrzeug seine vorherigen Aufträge abgearbeitet hat, wird eine Route vom aktuellen Fahrzeugstandort zum Ausgangspunkt des neuen Transportauftrags

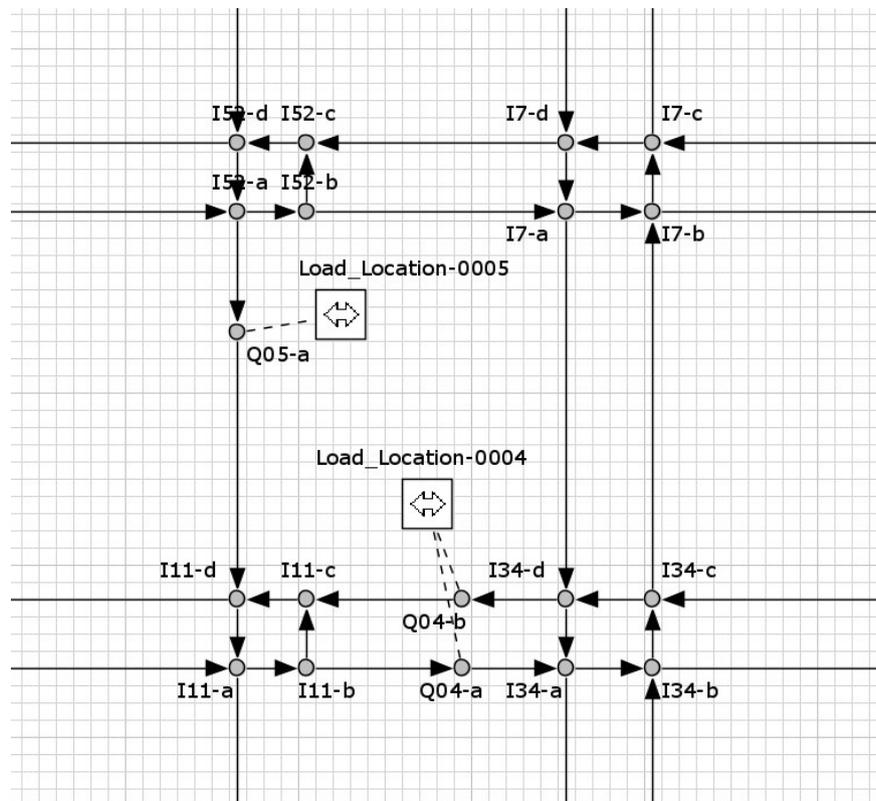


Abbildung 13: Detail der Kreuzungsmodellierung in openTCS. Es gibt 4 Subpunkte, die gegen den Uhrzeigersinn miteinander verbunden sind.

berechnet. Das Fahrzeug erhält dann einen Fahrauftrag, der die Knotenabfolge der berechneten Route enthält. Sobald das Fahrzeug am Ausgangspunkt des Transportauftrags angekommen ist, wird zunächst der Befehl zum Lastspiel gesendet, woraufhin der genannte Routenfindungs- und -sendeprozess mit dem Ziel des Abgabepunkts wiederholt wird. In Abbildung 14 ist ein Layout-Ausschnitt mit mehreren Fahrzeugen und ihren von der Leitsteuerung geplanten Routen dargestellt.

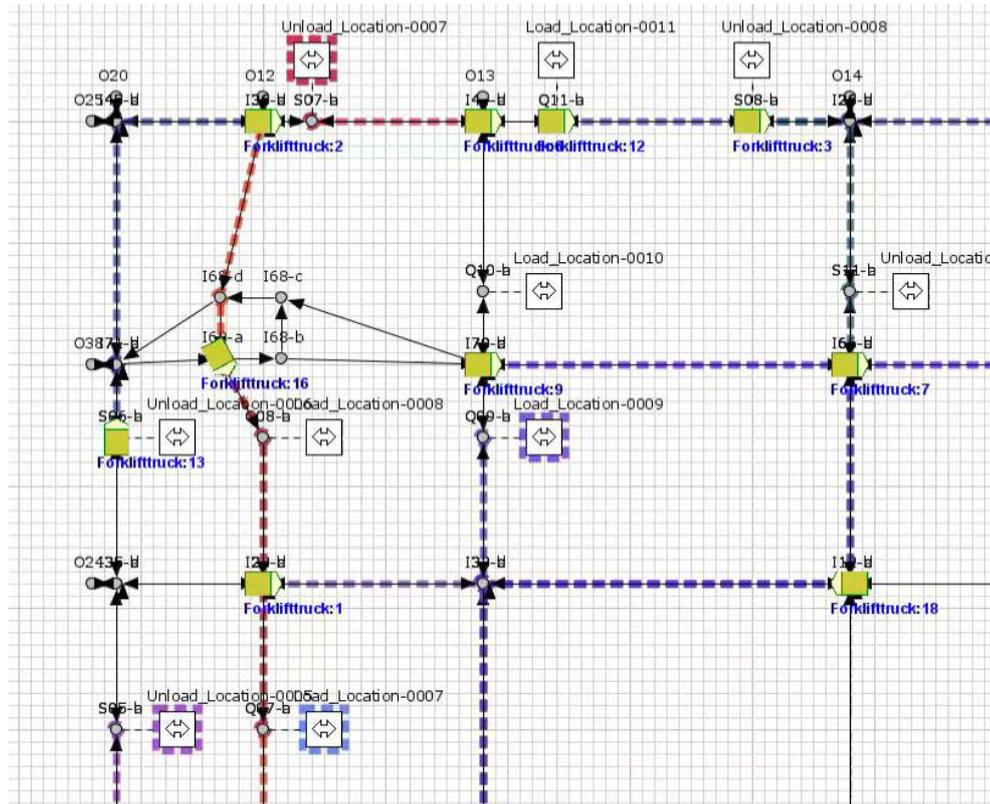


Abbildung 14: Layoutausschnitt aus openTCS mit mehreren Transportfahrzeugen und ihren geplanten Routen (farbig, gestrichelt).

Das korrekte Abfahren der Abfolgen von Knoten wird durch die Leitsteuerung anhand der Positionsrückmeldungen des Fahrzeugs überwacht. Wird eine andere Route gewählt oder ein Knoten nicht als erreicht zurückgemeldet, gilt die Route nicht als erfolgreich abgefahren.

Tabelle 1: Textbasiertes Kommunikationsprotokoll zwischen openTCS und Plant Simulation.

Name	Parameter	Richtung	Zweck	Beispiel
connect	<ul style="list-style-type: none"> Fahrzeugname 	openTCS → Plant Simulation	Initiieren einer Verbindung	connect;Vehicle:1
conn_ack	-	Plant Simulation → openTCS	Bestätigen des erfolgreichen Verbindungsaufbaus	connect
disconnect	<ul style="list-style-type: none"> Fahrzeugname 	openTCS → Plant Simulation	Initiieren des Trennens einer Verbindung	disconnect;Vehicle:1
disconnect	-	Plant Simulation → openTCS	Bestätigen der Verbindungstrennung	disconnect
route	<ul style="list-style-type: none"> Fahrzeugname Route als Array aus Knotennamen 	openTCS → Plant Simulation	Übermitteln einer abzufahrenden Route	route;Vehicle:1:[Q01, I52, I34, Q05, I17, S03]
position	<ul style="list-style-type: none"> Fahrzeugname Knotenname 	Plant Simulation → openTCS	Rückmelden des Erreichens eines Knotens	position;Vehicle:1;I34

Die Weitergabe der Transportaufträge von openTCS an die virtuellen Fahrzeuge in Plant Simulation erfolgt über eine eigens entwickelte Schnittstelle auf Basis von TCP-Sockets und kodierten Zeichenketten. Beim Initialisieren eines Fahrzeugs in openTCS wird eine TCP-Verbindung zu Plant Simulation aufgebaut. Alle weiteren Informationen werden über diese bestehende Verbindung ausgetauscht. Die implementierten Kommunikationsinhalte sind in Tabelle 1 aufgelistet.

5.4. Umsetzung des Materialflusssystems

Das Materialflusssystem, in dem die Fahrzeuge der verschiedenen Transportsysteme arbeiten, wird in der proprietäre Software Siemens Plant Simulation modelliert. Diese Software wurde ausgewählt, da sie in der Planung und Steuerung von intralogistischen Anlagen weit verbreitet ist. Somit gibt es eine Vielzahl von Modellen bestehender oder geplanter Anlagen. Außerdem ist dadurch eine gute Übertragbarkeit und Weiterverwendbarkeit der Projektergebnisse von EPoSysKo gewährleistet: Die prototypische Koordinator-Software kann einfach an beliebige in Plant Simulation modellierten Layouts angeschlossen werden, gleichzeitig kann der vorliegende Versuchsaufbau von Simulationsexperten leicht nachvollzogen werden.

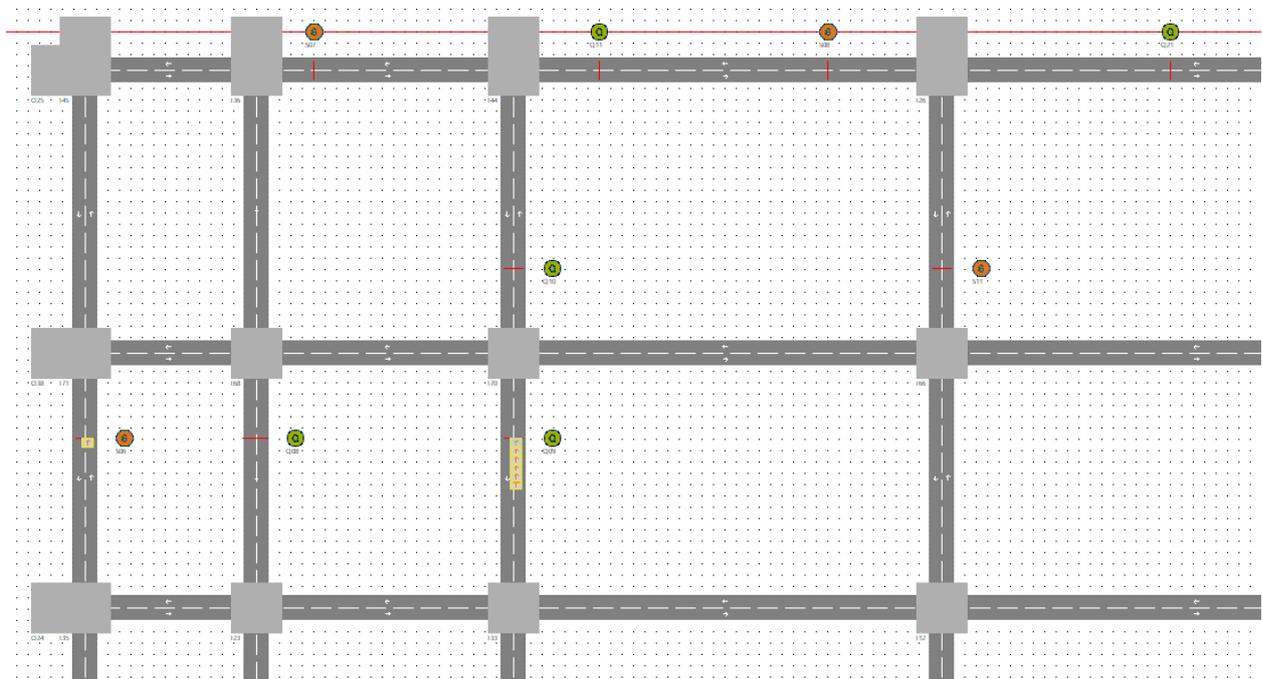


Abbildung 15: Ausschnitt des verwendeten exemplarischen Transportnetzes, modelliert in der Software Siemens Plant Simulation. Sichtbar sind Kreuzungen (hellgrau), Fahrwege (dunkelgrau), Aufnahme- und Abgabepunkte (grün/orange) sowie Fahrzeuge (gelb).

In Plant Simulation wird mit grafischen Blöcken gearbeitet, um Modelle aufzubauen. Geometrie, Topologie, und Funktionen der Komponenten sind eng miteinander verbunden. Die Logik wird dabei größtenteils in Methoden-Blöcken realisiert. Für die Verbindung eines Plant-Simulation-Modells mit openTCS ist besonders der Socket-Block von Bedeutung. Er stellt TCP-Server-Sockets bereit, auf die sich der im Projekt entwickelte Vehicle Adapter von openTCS verbindet. Die Verarbeitung eingehender Nachrichten passiert wiederum in einem Methoden-Block, der als

Callback-Methode im Socket-Block eingebunden ist. Dabei werden die Zeichenketten, wie sie im vorigen Abschnitt beschrieben sind, eingelesen und interpretiert. Anschließend werden die entsprechenden Antworten generiert beziehungsweise die Route zur Ausführung an das vorgesehene Fahrzeug vermittelt.

Die **Fahrzeuge** wiederum bewegen sich auf den Elementen des Layouts und lösen beim Erreichen von Interaktionspunkten die Ausführung von Methoden aus. Diese Methoden verwalten beispielsweise die Be- und Entladung oder das Verhalten von Fahrzeugen an Kreuzungen inklusive Wartezeiten bei Begegnungen mehrerer Fahrzeuge. Die Fahrzeuge selbst sind mit ihren geometrischen Abmessungen modelliert, sodass ihre Länge einen Einfluss auf die Ausdehnung von Staus entlang der Transportwege hat. Fahrzeuge besitzen je nach Typ eigene Geschwindigkeiten und Beschleunigungen. Auch Unterschiede der Beschleunigungen zwischen "beladen" und "unbeladen" sind berücksichtigt. Weiterhin hat jeder Fahrzeugtyp eine individuelle Lastspielzeit.

Das **Transportnetz** ist in Form von uni- wie auch bidirektionalen Straßen modelliert. Kreuzungen verbinden die Straßenelemente. In Abbildung 15 ist ein Ausschnitt des im Projekt verwendeten Layouts mit solchen Elementen dargestellt. Außerdem sind gelbe Fahrzeuge auf den Straßenelementen sichtbar. Die Kreuzungen beinhalten spezielle gebogene Straßensegmente für die Nachbildung von Abbiegevorgängen, wie in Abbildung 16 zu sehen ist.

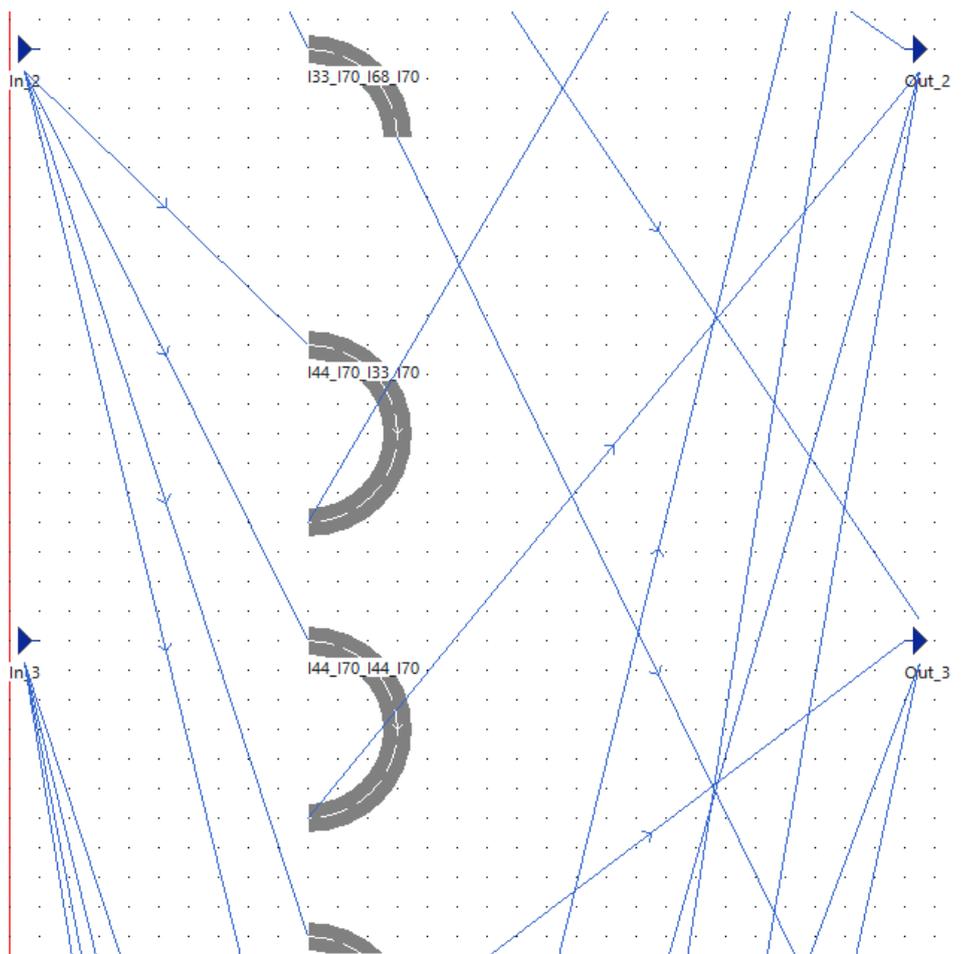


Abbildung 16: Detail der Modellierung einer Kreuzung in Plant Simulation. Jedes Kurvenelement kennzeichnet eine Abbiegerelation.

Ladungsträger sind eigene Objekte, die an den Aufnahmestationen generiert werden, dann dem Fahrzeug zugeordnet werden und an der Abgabestation wieder vernichtet werden.

Damit sind die zeitlichen Faktoren der Transportdurchführung detailliert berücksichtigt. Durch die ereignisdiskrete Simulationstechnik kann trotzdem effizient gerechnet werden. Auch eine Beschleunigung der Simulationszeit ist möglich. Im vorliegenden Fall wird allerdings die Funktion „Echtzeit“ verwendet. Damit wird sichergestellt, dass von außen betrachtet die Simulationszeit linear abläuft. Die Skalierung der Simulationszeit, beispielsweise auf das Vierfache, wurde nicht verwendet. Sie wäre allerdings zulässig, wenn die Leitsteuerungen über die resultierenden höheren Geschwindigkeiten beziehungsweise kürzeren Lastspielzeiten informiert würde.

5.5. Einspeisung von Transportauftragsserien für Versuchsläufe

In Materialflusssimulationen wird für die Generierung von Aufträgen häufig ein materialflussgetriebener Ansatz verwendet, das heißt es werden Aufträge generiert, die einem Schema des realistischen Materialflusses im vorliegenden Produktions-/Lager-Layout folgen. Auslöser ist dabei entweder ein Transportmittel, eine Bearbeitungsstation oder ein zeitlicher Trigger. In allen Varianten kann eine Zufallskomponente eingebaut werden. Somit gibt es eine leichte Streuung der Transportrelationen in Zeit und Ort, die grundsätzlich jedoch an den realen Materialfluss durch Produktion beziehungsweise Lager angelehnt ist.

Im Projekt EPoSystKo liegt der Fokus auf der Steuerung, nicht auf dem Layout, auf das die Steuerung einwirkt. Daher ist die Plausibilität der abzufahrenden Transportrelationen nicht von Bedeutung. Vielmehr soll ein möglichst großer Raum von möglichen Ereignissen und Zuständen des Materialflusssystems berücksichtigt werden. Dadurch lässt sich das Verhalten des Systemkoordinators und seine Auswirkungen auf die Transporteffizienz des Gesamtsystems auch in ungewöhnlichen und unvorhergesehenen Situationen beobachten.

Da die Berücksichtigung realistischer Relationen die Varianz der Transportaufträge einschränkt, ist auch der Zustandsraum des Gesamtsystems betroffen. Im vorliegenden Fall werden daher keine solchen Bedingungen bei der Transportauftragsgenerierung berücksichtigt. Vielmehr werden komplett zufällige Kombinationen von Quellen und Senken gewählt. Diese Kombinationen hängen nicht vom Zustand des Materialfluss-, Produktions- beziehungsweise Lagersystems ab. Folglich müssen keine dynamischen Parameter der Simulation in die Transportauftragsgenerierung einbezogen werden und diese kann offline, vor Start der Simulation erfolgen.

Dies bietet wiederum den Vorteil, die gleiche Liste von Transportaufträgen in mehreren Simulationsläufen zu verwenden. Damit ist kann die Performance der verschiedenen Konfigurationen des Systemkoordinators besser untereinander verglichen werden. Gleichwohl wird in Kauf genommen, dass gewisse Effekte nicht berücksichtigt oder verstärkt werden können, da die Transportauftragsliste endlich viele Einträge hat. Somit ist die absolute Belastbarkeit der Ergebnisse vermindert beziehungsweise muss durch die Wiederholung der Versuche mit verschiedenen Auftragslisten fundiert werden.

6. Evaluierung des Koordinators mit ausgewählten Schnittstellenkonfigurationen

Die Evaluation hat das Ziel, die Funktionsfähigkeit des Koordinators im entwickelten SiL-Prüfstand zu zeigen. Damit wird weiterhin gezeigt, dass der Prüfstand grundsätzlich geeignet ist, die Steuerung von Materialflusssystemen mit mehreren, heterogenen Transportsystemen zu untersuchen. Schließlich soll aufgrund der Versuchsläufe mit mehreren verschiedenen Konfigurationen des Koordinators herausgefunden werden, wie die Schnittstellen zwischen Koordinator und Leitsteuerungen für einen effizienten Betrieb des Gesamtsystems ausgelegt werden sollten.

In den folgenden Abschnitten werden zunächst die Randbedingungen und gewählten Parameter der Versuche aufgelistet, die verwendeten Konfigurationen des Systemkoordinators vorgestellt, anschließend der Ablauf der Versuche geschildert und die Ergebnisse vorgestellt. Abschließend werden aus den Ergebnissen Handlungsempfehlungen für Hersteller und Anwender von FFZ bezüglich der Gestaltung von Leitsteuerungen abgeleitet.

6.1. Randbedingungen und Parameterwahl

In der experimentellen Evaluation kann nicht allgemeingültig gearbeitet werden, daher müssen die frei wählbaren Parameter soweit möglich an gut übertragbare, verbreitete Fälle angeglichen werden. Im Fall des Systemkoordinators betrifft dies das Layout und die Simulationsbedingungen.

Layout:

Als Referenzlayout wird eine große Lagereinrichtung eines Automobilherstellers gewählt. Darin sind mehrere Lagersysteme kombiniert. Teilweise werden die Lagerbereiche manuell mit Gabelstaplern bedient, andererseits automatisch mit Regalbediengeräten. Der für die Simulation relevante Teil des Materialflusssystem sind die Transportwege zwischen den verschiedenen Lagern sowie den Übergängen in die Produktion und den Lkw-Terminals. Das Layout besitzt im Detail folgende Eigenschaften:

- Abmessungen des Layouts ca. 600 mal 200 m.
- Es existieren 22 Quellen und 13 Senken.
- Quellen und Senken liegen auf Kanten, in bestimmten Entfernungen zu Knoten.
- Uni- und bidirektionale Wege sind durch ca. 60 Kreuzungen verbunden.
- Es werden 3 Transportsysteme mit jeweils einer Leitsteuerung eingesetzt, siehe Tabelle 2.
- Ladungsträger nur vom Typ Europalette, können von allen Fahrzeugen aufgenommen werden.

Tabelle 2: Transportsysteme im Referenz-Materialflusssystem und ihre Eckdaten.

Typ	Geschwindigkeit	Anzahl Fahrzeuge
Fahrerloses Transportsystem	1 m/s	12
Gabelstaplerflotte mit zentralem Leitsystem	2 m/s	12
Fahrerloses Transportsystem	1,5 m/s	6

Randbedingungen der Simulation:

Für die Durchführung der Simulation wurden aufgrund von Expertenmeinungen folgende Parameter gewählt:

- Die **Simulationsdauer** wurde auf 8 Stunden festgelegt. Dies entspricht einer Schicht, die sich im Dauerbetrieb dreimal pro Tag wiederholt. Sie deckt daher alle relevanten Effekte ab.
- Der **Abstand der Transportaufträge** wurde so gewählt, dass das Gesamtsystem mindestens voll ausgelastet ist. Dadurch soll eine große Zahl kritischer Entscheidungen und Verkehrssituationen provoziert werden. Laut Experten entspricht eine leichte Überauslastung häufig der Realität.

6.2. Verwendete Konfigurationen des Systemkoordinators

Die folgenden drei Konfiguration des Systemkoordinators wurden für die Evaluierung ausgewählt und implementiert:

Referenzkonfiguration

Wie in Abschnitt 5.5 beschrieben, eignet sich der erarbeitete Prüfstand besser für den relativen Vergleich verschiedener Konfigurationen untereinander als für die absolute Bestimmung von Leistungswerten. Daher muss eine Referenzkonfiguration herangezogen werden, bei der garantiert keine Optimierungen vorgenommen werden. Erreicht wird dies durch das in

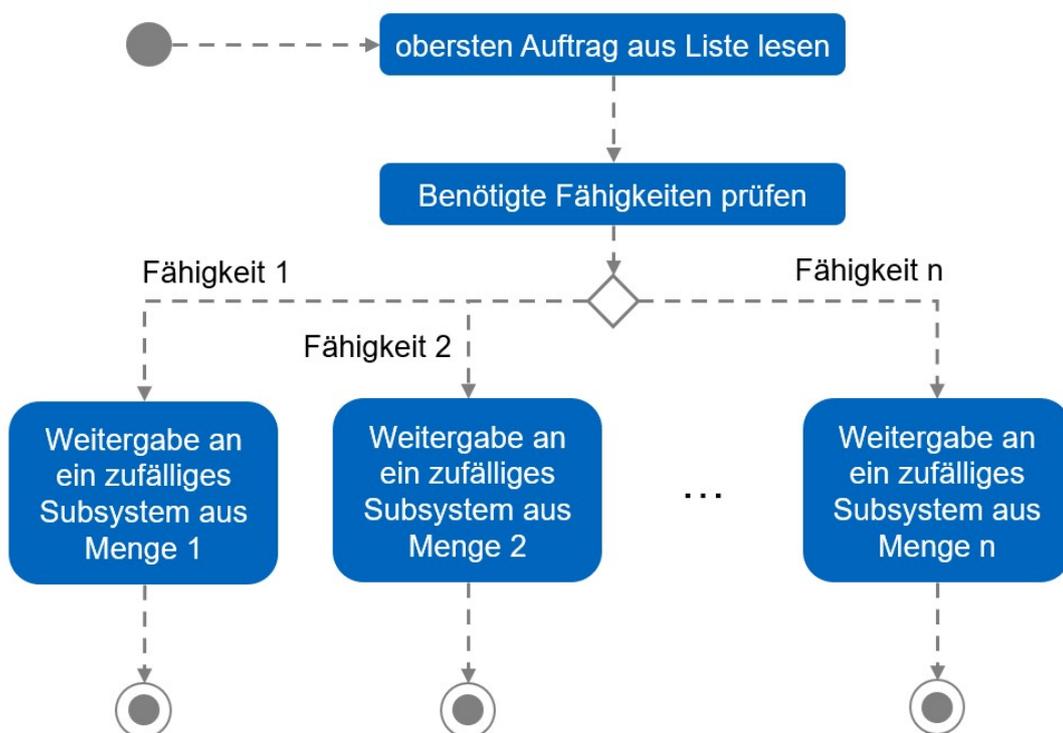


Abbildung 17: Programmablauf des Koordinators in der Referenzkonfiguration. Nach dem Fähigkeitsabgleich wird der Transportauftrag zufällig an ein Subsystem weitergegeben.

Abbildung 17 dargestellte Verhalten: Der Koordinator verteilt jeden eingehenden Transportauftrag nach dem Abgleich der benötigten und der bereitgestellten Fähigkeiten sofort und zufällig an eines der ihm zugeordneten Transportsysteme.

Ausprägung 3 (Zuordnung Auftrag-Fahrzeug) mit niedriger zeitlicher Auflösung

In dieser Variante besitzt der Koordinator die Fähigkeiten der im vorigen Kapitel vorgestellten Ausprägung 3. Es sind folglich die Auslastungen, die Positionen der Fahrzeuge sowie die Zuordnungen von Aufträgen zu Fahrzeugen bekannt.

Die Zuordnung neuer Transportaufträge zu Transportsystemen wird durch einen Prim-Sort-Algorithmus optimiert. Um eine niedrige zeitliche Auflösung der im Koordinator verfügbaren Informationen vorzugeben, werden die oben genannten Daten nur alle zwei Minuten bei den untergeordneten Leitsteuerungen abgefragt. Die im Koordinator eingehenden Transportaufträge werden im gleichen Rhythmus gesammelt und am Stück abgearbeitet, wenn ein neuer Informationsstand aus den Leitsteuerungen eingegangen ist. Somit wird gewährleistet, dass trotz der niedrigen zeitlichen Auflösung der Informationen die Verteilung der Transportaufträge stets mit der bestmöglichen Qualität durchgeführt wird. Gleichzeitig wird durch die Pufferung eine längere Wartezeit der Transportaufträge in Kauf genommen.

Der Prim-Sort-Algorithmus sucht das Fahrzeug mit dem kürzesten Weg von seinem aktuellen Punkt bis zum Aufnahmepunkt eines neuen Auftrags. In der vorliegenden Implementierung sind dabei zwei Besonderheiten umgesetzt:

- Sofern ein Fahrzeug einen Fahrauftrag abarbeitet, wird statt seinem derzeitigen Aufenthaltsort der Abgabepunkt des Auftrags berücksichtigt.
- Als Metrik für die Entfernung zwischen den zwei Punkten wird die euklidische Distanz auf der zweidimensionalen Bodenebene verwendet.

Ausprägung 3 (Zuordnung Auftrag-Fahrzeug) mit hoher zeitlicher Auflösung

Die Implementierung dieser Ausprägung des Koordinators unterscheidet sich von der oben beschriebenen lediglich darin, dass statt im Zwei-Minuten-Abstand unmittelbar bei Eingang eines neuen Transportauftrags ein neuer Informationsstand von den Leitsteuerungen abgefragt wird.

Folglich erzeugt der Koordinationsmechanismus deutlich mehr Datenverkehr und stellt höhere Leistungsanforderungen an die Leitsteuerungen der Transportsysteme. Auf der anderen Seite werden die Transportaufträge weniger gehäuft und mit weniger Wartezeit an die Transportsysteme weitergegeben.

6.3. Ablauf der Versuche

Um ein Experiment mit dem Systemkoordinator in dem entwickelten Softwareprüfstand durchzuführen, müssen folgende Schritte befolgt werden:

1) Drei Leitsteuerungen (gegebenenfalls auf verschiedenen Rechnern) starten.

Es werden drei Instanzen von openTCS benötigt. Aufgrund des Aufbaus von openTCS ist ein Parallelbetrieb mehrerer Instanzen auf einem Rechner nicht möglich. Im Projekt wurden daher mehrere über Ethernet verbundene Rechner verwendet. In den Konfigurationen der openTCS-Instanzen wird jeweils die IP-Adresse des Plant-Simulation-Hosts sowie der Port des in Plant Simulation laufenden Server Sockets eingetragen.

2) Simulation in Plant Simulation starten

In Plant Simulation wird der Server Socket aktiviert und die Simulation im Echtzeit-Modus gestartet. Somit ist das simulierte Materialflusssystem bereit, Nachrichten von den Leitsteuerungen zu empfangen und zu verarbeiten.

3) Fahrzeuge in openTCS aktivieren

- Im sogenannten KernelControlCenter der openTCS-Software müssen nun alle Fahrzeuge aktiviert werden. Dadurch wird die Verbindung zwischen den Kommunikationsadaptern in openTCS und der Materialflusssimulation aufgebaut und somit die Leitsteuerungen mit ihren virtuellen Fahrzeugen verknüpft.

4) Transportauftragsliste einlesen

In der Koordinatorsoftware wird eine Excel-Datei eingelesen, die eine im Voraus erzeugte Liste an Transportaufträgen enthält. Der Zweck und Inhalt dieser Datei wurde in Abschnitt 5.5 näher erläutert.

5) Fahrzeuge initial platzieren

Um die Fahrzeuge der verschiedenen Transportsysteme realistisch zu im Layout zu verteilen, wird die Funktion „Place Vehicles“ der Koordinatorsoftware ausgeführt. Damit erhält jedes Fahrzeug einen Fahrauftrag mit einer zufälligen Abgabestelle als Zielpunkt. Es sollte in der Folge gewartet werden, bis alle Fahrzeuge ihre Initialposition erreicht haben.

6) Simulation starten

Nun kann in der Koordinatorsoftware die eigentliche Simulation gestartet werden. Der Koordinator beginnt, die Transportaufträge aus der Excel-Datei zu empfangen und weiterzugeben. Nach der festgelegten Simulationszeit von 8 Stunden wird die Simulation ebenfalls über die Oberfläche des Koordinators beendet.

6.4. Ergebnisse

Wie in Abschnitt 1.2 erwähnt, werden die folgenden Messgrößen für die Beurteilung der Performance des Koordinators herangezogen:

- Entwicklung der Wartezeit
- Durchschnittliche Bearbeitungszeiten
- Summe der Bearbeitungszeiten

Im Folgenden werden die für jede Koordinatorkonfiguration gemessenen Werte der drei Größen nacheinander vorgestellt.

Entwicklung der Wartezeiten

In Abbildung 18 sind die Entwicklungen der Wartezeiten über die Simulationsdauer hinweg aufgetragen, aus Übersichtlichkeitsgründen auf die Hälfte der Simulationsdauer, also vier Stunden gekappt. Es ist klar erkennbar, dass die Wartezeiten mit fortlaufender Dauer der Simulation größer werden. Dies ist wie vorgesehen durch die leichte Überauslastung des Systems bedingt.

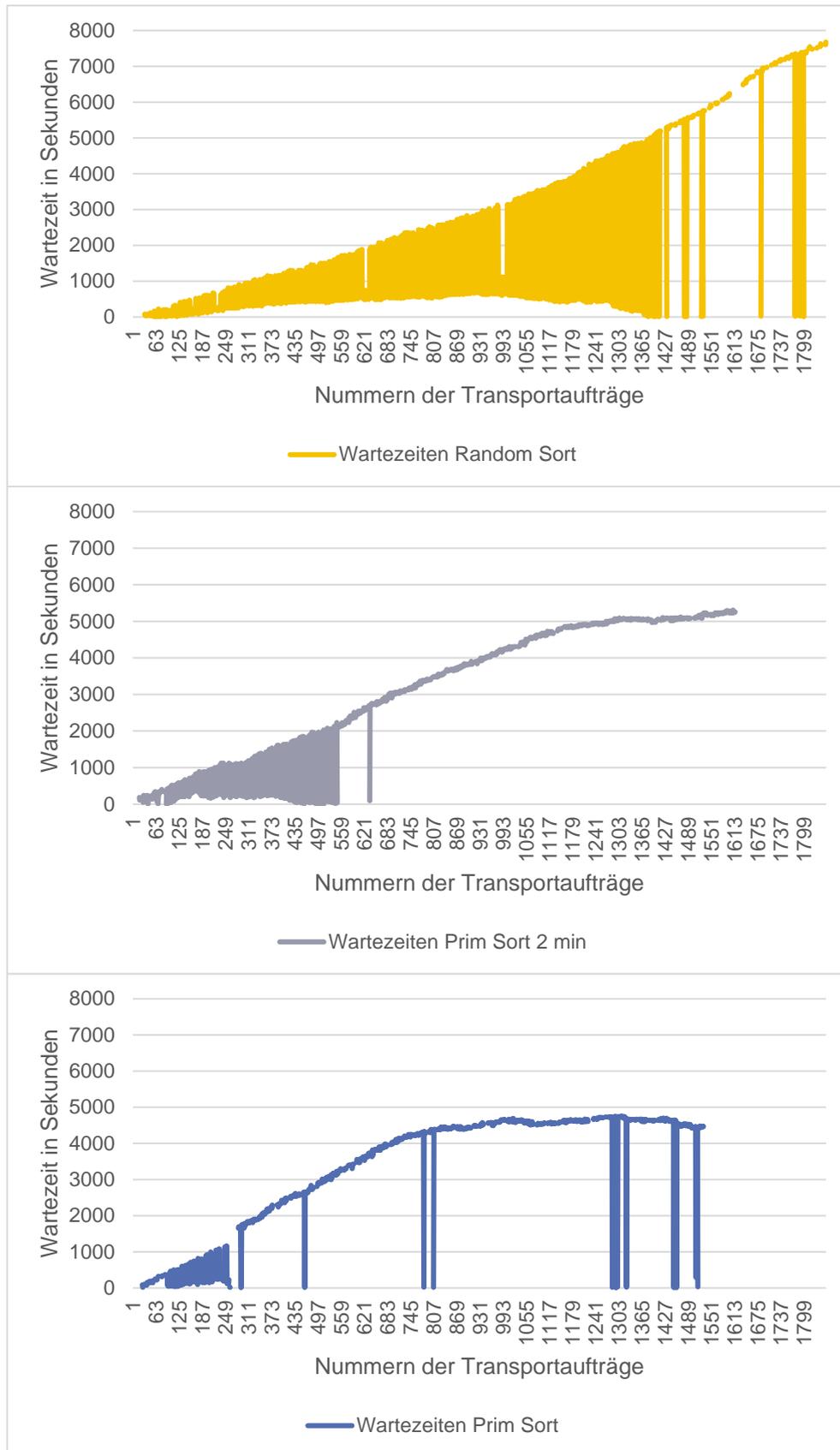


Abbildung 18: Diagramme der Entwicklungen der Wartezeiten nach Koordinatorkonfiguration (oben Referenzkonfiguration, mittig Konfiguration mit niedriger zeitlicher Informationsdichte, unten Konfiguration mit hoher Dichte).

In den oben abgebildeten Wartezeiten der Referenzkonfiguration lässt sich ein ungefähr linearer Anstieg der Wartezeiten erkennen. Allerdings existiert ca. bis zum Auftrag mit der Nummer 1400 eine Reihe von Aufträgen mit deutlich niedrigeren Wartezeiten von unter 1000 Sekunden. Für dieses Phänomen wurde keine Erklärung gefunden, es muss also in tiefergehenden Experimenten weiter beobachtet werden.

Die Wartezeiten der Konfigurationen mit zeitlich niedrig aufgelöster Informationsdichte (mittig) und zeitlich hoch aufgelöster Informationsdichte (unten) weisen etwas stärkere Anstiege in den Wartezeiten über die Transportaufträge hinweg auf. Die Konfiguration mit zeitlich hoch aufgelösten Informationen übertrifft bei den Wartezeiten schlechtere Konfiguration. Diese Anomalie hängt mit der Anzahl der bearbeiteten Aufträge pro Zeit zusammen. Da die Wartezeit eines Auftrags bis zum Bearbeitungsstart gemessen wird, führt eine langsamere Ausführung der vorherigen Aufträge zu einer längeren Wartezeit des Folgeauftrags. Diese Ursache wird bei der Betrachtung der Bearbeitungszeiten und Anzahlen der Aufträge in den folgenden Abschnitten deutlich.

Verteilung der Bearbeitungszeiten

Die Bearbeitungszeit ist als Differenz der Zeitpunkte des Aufnehmens der Last und des Beendens des Transportauftrags, also des Absetzens der Last definiert. In den drei durchgeführten Versuchen ergab sich eine sehr ähnliche Verteilung der Bearbeitungszeiten. In Abbildung 19 sind die Verteilungen grafisch veranschaulicht.

Es zeigt sich, dass die zufällige Auftragweitergabe sowohl bei der durchschnittlichen Bearbeitungszeit als auch bei der Streuung beziehungsweise den Ausreißern den beiden fortgeschrittenen Verteilungsmethoden überlegen ist. Dieser Effekt lässt sich anhand einer Beobachtung der Leitsteuerungen während der Versuchsdurchführung der zweiten und dritten

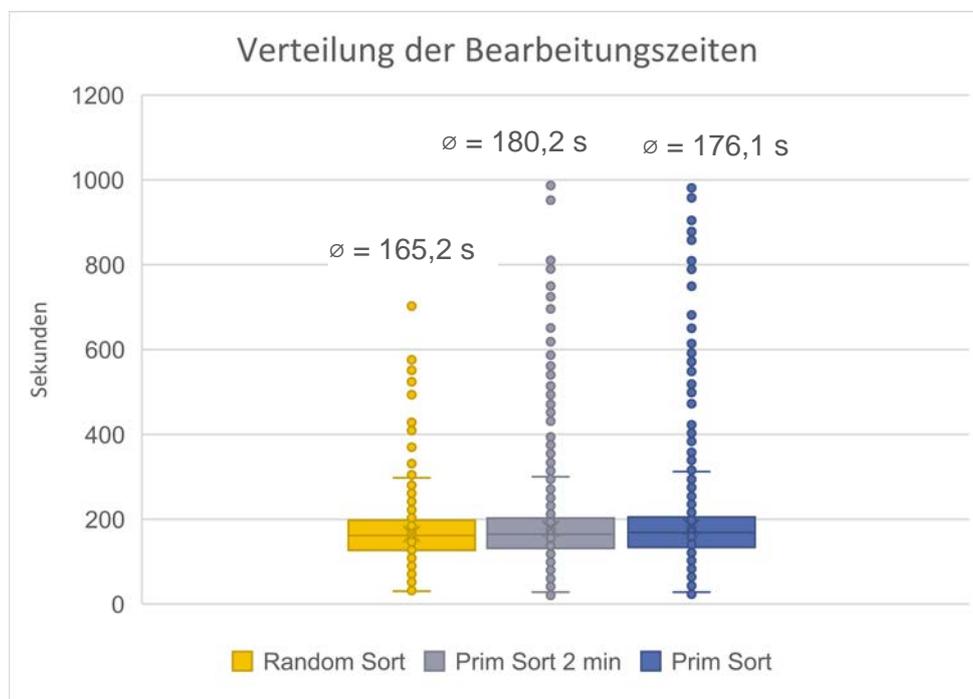


Abbildung 19: Diagramm mit Verteilungen der Bearbeitungszeiten der Transportaufträge, gegliedert nach Koordinatorkonfiguration.

Konfiguration erklären: Der Systemkoordinator vergibt Aufträge immer an das Transportsystem,

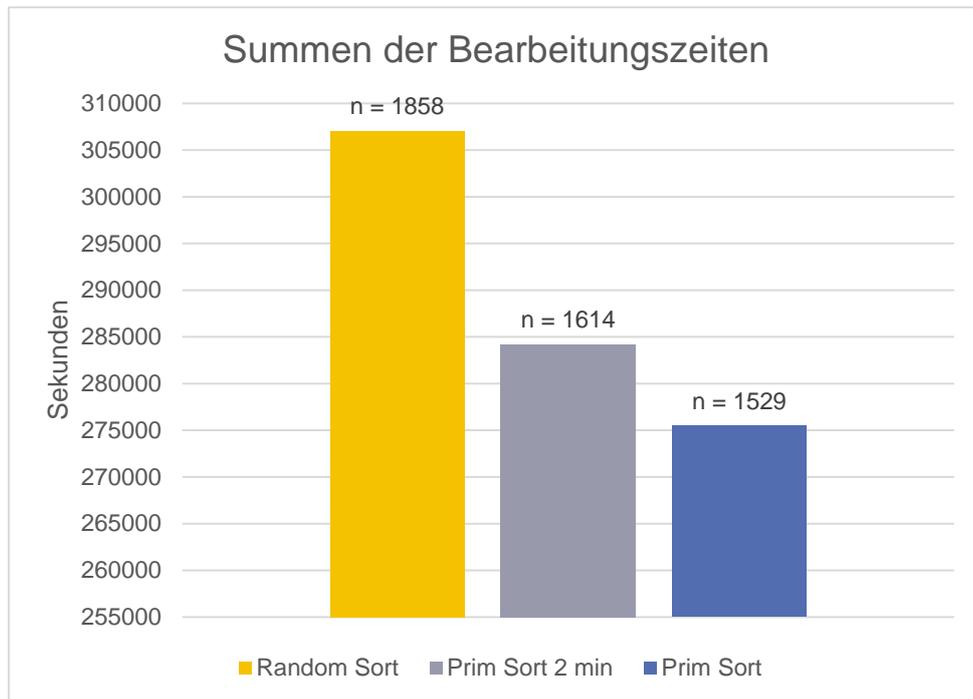


Abbildung 20: Diagramm mit Summen der Bearbeitungszeiten der Transportaufträge, gegliedert nach Koordinatorkonfiguration.

das mindestens ein Fahrzeug am nächsten am Ausgangspunkt des Auftrags platziert hat. Das Transportsystem wiederum vergibt die Aufträge sofort an freie Fahrzeuge. Dies kann dazu führen, dass nicht das nahe am Ausgangspunkt des Auftrags gelegene, belegte Fahrzeug den Auftrag bekommt, sondern ein anderes Fahrzeug des Systems, das gerade frei ist. Folglich fährt ein zweites Fahrzeug in die Nähe des ersten Fahrzeugs. Dies erhöht wiederum die Wahrscheinlichkeit, Aufträge in dieser Region vom Koordinator zugesprochen zu bekommen. Der Effekt ist folglich selbstverstärkend. Die Leitsteuerung des Transportsystems wendet nun ihre interne Verkehrssteuerung an, die sehr konservative Abstände zwischen den Fahrzeugen sicherstellt. Folglich stehen mehrere Fahrzeuge eines Systems auf benachbarten Knoten des Transportnetzes und bekommen aufgrund gegenseitiger Blockade keine Erlaubnis zur Weiterfahrt. So entstanden Wartezeiten, die sich auf die durchschnittliche Bearbeitungszeit auswirken und durch extreme Ausreißer sichtbar sind. Diese Ausreißer wurden in Abbildung 19 oberhalb von 1000 Sekunden abgeschnitten, um die Anschaulichkeit zu wahren.

Zwischen der durchschnittlichen Bearbeitungszeit bei Zwei-Minuten-Pufferung der Aufträge und der direkten Weitergabe ist eine Differenz von ca. 4 Sekunden zu bemerken. Diese unterstützt die Erwartung, dass die häufigere Informationsabfrage des Koordinators bei den Leitsteuerung zu einer höheren Transporteffizienz führt.

Summe der Bearbeitungszeiten

Der im vorigen Abschnitt beschriebene Effekt, der die erwartete höhere Effizienz der optimierten Auftragsweitergabe umkehrt, äußert sich auch in der Betrachtung der Summe der Bearbeitungszeiten. Bei der zufälligen Auftragsweitergabe wurden ca. 15 Prozent mehr Aufträge erfüllt als bei der zweiten Variante und ca. 22 Prozent mehr als bei der dritten Variante. Dies zeigt,

dass die Auftragsvergabe allein anhand der Zielpositionen der Fahrzeuge negative Effekte haben kann. Die Selbstblockaden der Fahrzeuge konnten nicht berücksichtigt werden. Abhilfe hätte die Einbeziehung der Auslastungen der Teilsysteme geschaffen.

Entsprechend der Differenz in der Anzahl ausgeführter Aufträge fällt auch die Summe aller Bearbeitungszeiten bei zufälliger Auftragsvergabe höher aus. Aus den Summen lässt sich die jeweilige durchschnittliche Gesamtauslastung des Systems bestimmen: bei drei Transportsystemen mit den Fahrzeuganzahlen wie in Tabelle 2 ergibt sich mit der Simulationszeit von 4 Stunden, die Abbildung 20 zugrundeliegt, eine Gesamtzeit verfügbarer Fahrzeuge von $T = (12 + 12 + 6) * 4 h * 3600 \frac{s}{h} = 432.000 s$. Mit den Summen aller Bearbeitungszeiten ergeben sich für die drei Konfigurationen folgende durchschnittliche Gesamtauslastungen:

- Konfiguration 1: $\frac{307.007,0279 s}{432.000 s} = 71,1 \%$
- Konfiguration 2: Konfiguration 1: $\frac{284194,6116 s}{432.000 s} = 65,8 \%$
- Konfiguration 1: $\frac{275486,9059 s}{432.000 s} = 63,8 \%$

Trotz der geringeren durchschnittlichen Bearbeitungszeit bei Konfiguration 3 ergibt sich also eine schlechtere Gesamtauslastung. Dies zeigt wiederum, dass für eine Ausnutzung der Potentiale des Optimierungsalgorithmus weitere Informationen in Betracht gezogen werden sollten.

6.5. Abgeleitete Handlungsempfehlungen für FFZ-Hersteller/-Anwender

Aufgrund der Erkenntnisse aus den Versuchen sowie aus den vorhergehenden theoretischen Erkenntnissen können Handlungsempfehlungen abgeleitet werden, die kleine und mittlere Unternehmen bei der effektiven Entwicklung und Anwendung von heterogenen mobilen Transportsystemen unterstützen. Im folgenden werden die Empfehlungen vorgestellt, unterteilt nach den Betrachtungsgegenständen der Schnittstellen von Leitsteuerungen und der im Systemkoordinator anzuwendenden Algorithmen.

Empfehlungen bzgl. Schnittstellen von Leitsteuerungen

Die Empfehlungen hinsichtlich der Schnittstellen von Leitsteuerungen zielen zum einen auf Hersteller von FFZ ab, zum anderen auf Anwender:

- Die vorangegangenen Ergebnisse zur Klassifizierung der Informationsgehalte in Leitsteuerungen sowie der Ausarbeitung der Funktion des Systemkoordinators zeigt, dass Informationen wie die Fahrzeugpositionen, Auftrag-Fahrzeug-Zuordnungen sowie Routen für die Entscheidungsfindung des Koordinators einen Mehrwert bieten können. Gleichzeitig ist der Aufwand aus Sicht des Leitsteuerungsherstellers begrenzt. Daher sollten diese Informationen nach außen verfügbar gemacht werden. Somit erreichen Hersteller, dass ihre Transportsysteme leichter in heterogene Materialflusssysteme eingebettet werden können und sich somit auch in Zukunft am Markt behaupten.
- Aus Sicht von FFZ-Anwendern ist es von Vorteil, bei Neu- oder Ersatzinvestitionen auf Transportsysteme zurückzugreifen, deren Leitsteuerungen bereits über genannte Schnittstellen verfügen. Damit wird sichergestellt, dass zukünftige Erweiterungen der automatischen Fördertechnik mittels Einführung eines Systemkoordinators integriert werden können und so das intelligente Materialflusssystem seine Wirkung auf die Unternehmenseffizienz voll entfaltet.

Empfehlungen bzgl. Algorithmen in einem Systemkoordinator

Aufgrund der Simulationsergebnisse werden folgende Empfehlungen für die Ausgestaltung der Mechanismen in kommerziellen Implementierungen eines Systemkoordinators ausgesprochen:

- Die Verteilungsentscheidung sollte neben aktuellen oder Zielpositionen von Fahrzeugen auch die Auslastungen der Transportsysteme berücksichtigen, um lokale Häufungen von Fahrzeugen eines Systems und die Vernachlässigung kleiner Flotten zu vermeiden.
- Die Fahrzeuganzahl pro untergeordnetem Transportsystem sollte vom Systemkoordinator berücksichtigt werden. Andernfalls kann eine lange Stauung von Aufträgen in den Leitsteuerungen auftreten. Dies würde wiederum die Koordinationsentscheidungen durch den großen Zeitversatz zwischen Entscheidung und Ausführung des Auftrags verschlechtern.

Weitere Hinweise behandeln die Abhängigkeit des Systemkoordinators von den Fähigkeiten der untergeordneten Systeme zur zeitlichen Planung ihrer Transportaufträge (optional unter Berücksichtigung von Prioritäten), dem sogenannten Scheduling:

- Bei Transportsystemen ohne Scheduling und Prioritäten sollten Aufträge möglichst lange zurückgehalten und nach abgelaufenem Zeitfenster gemeinsam vergeben werden. Damit werden negative Effekte der Verteilung vermieden. Weiterhin kann der Koordinator durch das Zeitfenster in gewissem Umfang die Auftragsreihenfolge umdrehen. Hierbei müsste er allerdings selbst Abhängigkeiten von Transportaufträgen untereinander und Prioritäten beachten.
- Bei Transportsystemen mit Scheduling und Prioritäten sollten Aufträge möglichst schnell weitergegeben werden. Dies erfordert mehr Kommunikation mit den Leitsteuerungen. In der Folge führt die Leitsteuerung selbsttätig ein Scheduling aus. Dies kann allerdings dazu führen, dass neu eingetroffene Aufträge immer zuerst ausgeführt werden und ältere Aufträge sehr lange warten.

7. Zusammenfassung der Forschungsergebnisse und Ausblick

Wie in den vorangehenden Kapiteln aufgezeigt, wurden im Forschungsprojekt EPoSysKo vielfältige Ergebnisse erzielt. Diese werden im Folgenden mit den ursprünglich gesteckten Zielen verglichen, bewertet und in den größeren Kontext der Forschung in der mobilen Robotik gebracht. Anschließend wird ein Ausblick gegeben auf anschließende Themen, die in der Zukunft erforscht werden könnten.

7.1. Zusammenfassung und Bewertung der Forschungsergebnisse

Im Projekt wurden mehrere abgegrenzte Ergebnisse erzielt, die weitgehend aufeinander aufbauen, aber auch jeweils einzeln von Interesse sind. Sie werden im Folgenden knapp zusammengefasst und nach ihrer Qualität und Relevanz beurteilt. Abschließend folgt ein Abgleich mit den ursprünglich vorgesehenen Ergebnissen sowie eine Bewertung des Gesamtergebnisses.

Informationsklassen von FTS

Es wurden durch Experteninterviews vier Klassen von Informationsbeständen in Leitsteuerungen abgegrenzt. Darin sind von der „verteilten Anlage“ bis zum „autonomen Fahrzeug“ die häufig vorkommenden Beschaffenheiten von Leitsteuerungen vertreten.

Eine ausreichend präzise Einordnung heutiger Systeme ist durch die Klassifizierung gegeben, während die Granularität nicht zu fein ist, um die Klassen anwenden zu können.

Koordinator-Architektur und -Grundfunktion

Der Systemkoordinator befindet sich in einem Materialflusssystem mit mehreren, heterogenen Flotten als Vermittler zwischen den Leitsteuerungen und übergeordneten Systemen der Lagerbeziehungsweise Produktionssteuerung. Es wurde eine Grundstruktur des Systemkoordinators entworfen, die aus vier Schritten besteht, nämlich der Formalisierung der Transportaufträge, dem Fähigkeitenabgleich, der Selektion eines Transportsystems und der Weitergabe des Transportauftrags.

Für den bedeutendsten dritten Schritt wurde zunächst ein Kennzahlensystem entworfen, das vielfältige Faktoren berücksichtigt, die die Erreichbarkeit der Ziele verschiedener Stakeholder bemessen. Aufgrund der Rückmeldungen aus dem PA wurden diese Kennzahlen reduziert auf die zeitlichen Faktoren, da diese am engsten mit der Wirtschaftlichkeit verknüpft sind.

Anschließend wurden für verschiedene Informationsbestände im Koordinator passende Vorgehensweisen zur Transportauftragsvergabe erarbeitet. Da diese Vorgehensweisen stark an die eingangs ausgearbeiteten Informationsklassen angepasst sind, ist ihr Nutzen als sehr hoch einzuschätzen.

Demonstratorische Umsetzung der Koordinator-Software

Anhand der theoretisch entworfenen Vorgehensweise des Koordinators wurde ein Softwareprototyp erstellt. Dabei wurden zwei repräsentative Konfigurationen der Schnittstellen zwischen Koordinator und Leitsteuerungen ausgewählt, die in der folgenden Evaluation zum Einsatz kommen sollten. Zusätzlich wurde eine Referenzkonfiguration entworfen, in der der Koordinator die Transportaufträge zufällig an die untergeordneten Systeme weitergibt.

In beiden repräsentativen Konfigurationen arbeitet der Koordinator mit einer Optimierungsmethode, die auf das Vorhandensein von Fahrzeugpositionen angewiesen ist. Somit kann der Koordinator effektiv mit den vorhandenen Informationen arbeiten, um Transportaufträge weiterzuverteilen.

Die Software erfüllt damit die Anforderungen an einen realitätsnahen Demonstrator für die Funktionalität der Koordination. Durch die Verwendung von Python-Code ist eine gute Nachvollziehbarkeit und Weiterverwendbarkeit gegeben.

Software-Prüfstand und experimentelle Evaluation

Um den Systemkoordinator mit realistischen Ein- und Ausgangswerten sowie Rückmeldungen testen zu können, wurde ein Prüfstand entwickelt, der alle nötigen Schnittstellen zum Koordinator bereitstellt. Der Prüfstand besteht aus dem Generator für Transportaufträge, mehreren Leitsteuerungen sowie einer Materialflusssimulation, die die Fahrzeuge aller Flotten sowie deren Interaktionen verwaltet.

Durch die Verwendung der Open-Source-Leitsteuerung openTCS sowie der verbreiteten Simulationssoftware Siemens Plant Simulation ist eine leichte Weiterverwendbarkeit in der Industrie gegeben. Einzige Einschränkung der Zugänglichkeit besteht in der Notwendigkeit, Plant Simulation zu lizenzieren. Die Anpassung an zukünftige Versuchsaufbauten mit anderen Zusammenstellungen der Transportsysteme sowie an einen Test einem realen System ist durch die simplen Schnittstellen zwischen Koordinator, Leitsteuerungen und Materialflusssimulation möglich.

Die Ergebnisse der experimentellen Evaluation zeigen, dass der Koordinator und der Prüfstand in Kombination belastbare Ergebnisse zu den Effekten einer koordinativen Steuerung in heterogenen Materialflusssystemen liefern.

Handlungsempfehlungen für KMU-Hersteller und -Anwender

Aufgrund der Erkenntnisse aus der Klassifizierung von Leitsteuerungen nach Informationsgehalten, dem Entwurf der verschiedenen Koordinator-Konfigurationen sowie der experimentellen Evaluation der demonstratorischen Koordinatorsoftware wurden Handlungsempfehlungen für kleine und mittlere Unternehmen, die Flurförderzeuge herstellen, abgeleitet.

Zusammengefasst wird darin geraten, Informationen wie die Fahrzeugpositionen, Auftrag-Fahrzeug-Zuordnungen sowie Routen nach außen verfügbar zu machen, um eine bessere Integration ihrer Produkte in heterogene Transportsysteme zu erreichen. FFZ-Anwendern wird geraten, verstärkt Systeme zu beschaffen, die solche Schnittstellen bereits besitzen, um den (zukünftigen Einsatz) einer koordinativen Steuerung zu erleichtern.

Die Handlungsempfehlungen sind somit geeignet, die Wirtschaftlichkeit von KMU im Bereich der Intralogistik in Zukunft zu sichern und zu verbessern.

Anforderungsabgleich und Bewertung des Gesamtergebnisses

Im Laufe des Projekts zeigte sich, dass die Informationsvielfalt, welche in Leitsteuerungen auftritt, einen multimodalen Charakter besitzt. Daher ist eine stufenlose Varianz des Informationsgehalts im Koordinator nicht umsetzbar. In der Folge konnte die Koordinatorsoftware weniger modular als angedacht umgesetzt werden.

Die experimentelle Evaluation konnte somit nur einen kleinen Teil der Möglichkeiten des Koordinators aufzeigen. Entgegen der Planung konnte aufgrund der begrenzten Zeit und des enormen Aufwands keine umfassende Simulationsstudie durchgeführt werden.

Folglich sind die Handlungsempfehlungen für Unternehmen weniger detailliert als geplant. Weiterhin sind sie kaum mit belastbaren Zahlen belegt.

Dennoch konnte mit der Kombination aus Koordinator-Demonstrator und -Prüfstand ein praktischer Beitrag zur vorwettbewerblichen Erforschung und Erprobung von heterogenen Transportsystemen geleistet werden. Durch die Modularität und Anpassungsfähigkeit der Ergebnisse ist eine große Reichweite des Projekts und somit ein signifikanter Beitrag zur Sicherung der Wettbewerbsfähigkeit der KMU in Deutschland gegeben.

7.2. Ausblick

Im Forschungsprojekt EPoS SysKo wurde ausführlich an der Kommunikation zwischen Fahrzeugen, Leitsteuerungen und Systemkoordinator in heterogenen mobilen Transportsystemen geforscht. Der Fokus bezüglich der Art von Informationen lag dabei auf solchen, die direkte Auswirkungen auf die Transporteffizienz der einzelnen Flotten wie auch des Gesamtsystems haben.

Moderne fahrerlose Transportfahrzeuge bieten jedoch einen Datenpool, der weit über diese Informationen hinausgeht. Wie jeder Roboter müssen FTF ihre Umgebung wahrnehmen, um sich darin zurechtzufinden. Folglich besitzen sie bildgebende Sensoren und nachgelagerte Methoden zur Erkennung von Artefakten oder Situationen in ihrer Umgebung. Diese Informationen könnten auch Aufschluss geben über Sachverhalte, die letztendlich relevant für die Steuerung einer heterogenen Fahrzeugflotte sind.

Beispielsweise kann ein Ladungsträger, der außerplanmäßig auf der Fahrbahn abgestellt wird, zu Staus führen, da er eine Engstelle verursacht und besonders automatische Fahrzeuge verzögert. Ein Fahrzeug, das mit entsprechenden Sensoren dieses Hindernis erkennen kann, könnte diese gewonnene Information an seine Leitsteuerung weitergeben, sodass diese wiederum eine Änderung in ihrer Routenplanung initiiert. Gleichmaßen könnte die Information über die Leitsteuerung an einen Koordinator gesendet werden, der sie in seinen Entscheidungen zur Auftragsweitergabe berücksichtigt.

Umgebungsdaten stellen damit einen weiteren Informationstyp neben den in diesem Projekt betrachteten Informationen dar. Durch sie könnten die Schnittstellen zwischen Leitsteuerungen und Koordinator nochmals erweitert werden, sodass die Entscheidungsfindung noch fundierter und effizienter erfolgt. Gleichzeitig benötigt der Koordinator dann ein umfassendes geometrisches, topologisches und auch semantisches Verständnis des Materialflusssystems.

Als weitere Hürde müssten in einem System heterogener Fahrzeugtypen Umgebungsdaten verschiedener Modalitäten in ein gemeinsames Format gebracht werden. Dies stellt aufgrund der Vielfalt heutiger bildgebender Sensoren und Verarbeitungsmethoden des maschinellen Sehens eine enorme Herausforderung dar. Beispielsweise müssten zweidimensionale und dreidimensionale Wahrnehmungen oder Punktwolken und Dreiecksnetze in eine gemeinsame Darstellung gebracht werden.

Schließlich stellt sich die Frage, welche Stellen im verteilten System die Umgebungsinformationen in welcher Darstellung nutzen können. Neben dem Koordinator, der sie für eine effizientere Transportauftragsverteilung nutzen könnte, wären sie zum Beispiel auch für Fahrzeuge interessant, die in ihrer Wahrnehmung eingeschränkt sind. Sie könnten Hindernissen frühzeitiger ausweichen oder die Qualität ihrer Lokalisierung verbessern.

Die Erweiterung des Gedankens eines Systems verschiedenartiger Transportfahrzeuge um ein übergreifendes Umgebungsinformationssystem ist also in vielerlei Hinsicht interessant. Sie wird daher demnächst im bereits befürworteten IGF-Projekt „KolUmBot – Kollektives Umgebungsinformationssystem für mobile Roboter“ erforscht.

7.3. Verwendung der zugewendeten Mittel

Wissenschaftlich-technisches Personal und studentische Hilfskräfte (Einzelansatz A.1 des Finanzierungsplans):

Zur Projektbearbeitung wurde ein wissenschaftlicher Mitarbeiter im Umfang von 7 Personenmonaten eingesetzt. In Summe wurden damit 28 PM im Projekt eingesetzt. Zudem wurden im Berichtszeitraum studentische beziehungsweise wissenschaftliche Hilfskräfte im Umfang von 1,395 Personenmonaten (mit 20 Stunden pro Woche) eingesetzt (siehe Abbildung 21).

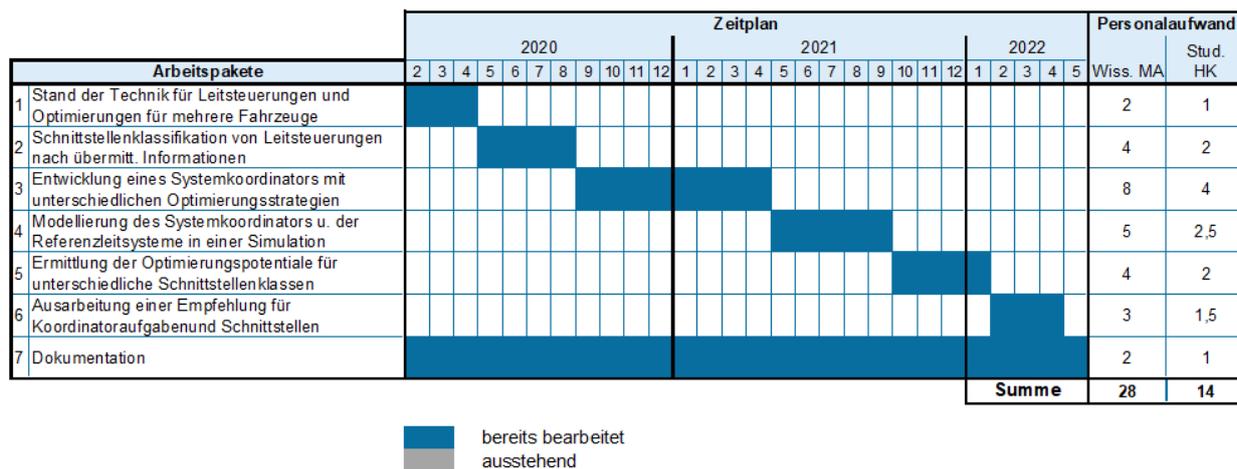


Abbildung 21: Projektplan und eingesetztes Personal.

Geräte (Einzelansatz B des Finanzierungsplans):

Es wurden keine Finanzmittel für Gerätebeschaffungen beantragt.

Leistungen Dritter (Einzelansatz C des Finanzierungsplans):

Es wurden keine Leistungen für die Arbeit Dritter beantragt.

7.4. Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit

Inhalt des Forschungsprojekts EPoSysto war die Untersuchung des neuartigen Konzepts eines Systemkoordinators für die Transportauftragsvorverteilung in Materialflusssystemen mit mehreren Flurförderzeugflotten. Aufgrund der während der Projektlaufzeit gewonnenen Erkenntnisse wurden Handlungsempfehlungen für Hersteller und Anwender von Flurförderzeugen (insbesondere Fahrerlosen Transportsystemen) erarbeitet, die die gewinnbringende Übertragung des Koordinator-Ansatzes in reale Materialflusssysteme ermöglichen.

Die Idee eines Systemkoordinators zur Vorverteilung von Aufträgen auf mehrere Transportsysteme ist in solchem Maße komplex, dass sie nur durch sorgfältiges wissenschaftliches Arbeiten in ein praxisnahes Konzept mit funktionsfähigem Demonstrator umgesetzt werden konnte. Daher wurde die Koordinatorfunktionalität anhand ingenieurwissenschaftlicher Grundprinzipien unter Berücksichtigung veröffentlichter Vorarbeiten

abgeleitet, während kontinuierlicher Austausch darüber mit Experten aus der Wirtschaft aufrechterhalten wurde.

Um die Effektivität des entworfenen Systemkoordinators bei der Steigerung der Transporteffizienz ganzer Materialflusssysteme zu messen, war die Durchführung von Experimenten nötig. Mithilfe dieser Experimente sollte industriellen Herstellern und Anwendern im Bereich der Intralogistik auf anschauliche Weise das Potential eines Systemkoordinators vermittelt werden. Um möglichst realitätsnahe Ergebnisse zu erhalten, wurde ein großes Referenzlayout herangezogen. Ein realer Test eines solchen Layouts wäre mit enormem Aufwand auf Seiten der Projektbearbeiter wie auch bei den Mitgliedern des projektbegleitenden Ausschusses verbunden gewesen. Daher wurde auf Simulationen zurückgegriffen, die bei gleichem Erkenntnisgewinn deutlich weniger Ressourcen binden. Entsprechend war die Implementierung einer prototypischen Koordinatorsoftware wie auch die Erstellung beziehungsweise Aufbereitung von Referenzlayouts und die Schaffung der dazwischenliegenden Schnittstellen zwingend erforderlich, um die Projektziele zu erreichen.

Die Arbeiten wurden gemäß dem Umfang und ihrer Notwendigkeit vom eingesetzten wissenschaftlichen Mitarbeiter mit Unterstützung studentischer und wissenschaftlicher Hilfskräfte sowie den Mitgliedern des projektbegleitenden Ausschusses durchgeführt. Als Grundlage diente dabei stets der genehmigte Arbeitsplan des Forschungsprojekts.

7.5. Ergebnistransfer in die Wirtschaft

Durchgeführte Transfermaßnahmen während der Projektlaufzeit im Berichtszeitraum

Maßnahme A3:

Berichterstattung über die Entwicklung der Koordinatorsoftware und des Softwareprüfstands sowie angeschlossene Diskussion mit den Industriepartnern am 04.04.2022.

Maßnahme A4:

Berichterstattung über die Durchführung der Simulationsläufe mit dem Softwareprüfstand, Vorstellung der abgeleiteten Handlungsempfehlungen sowie angeschlossene Diskussion mit den Industriepartnern am 30.05.2022.

Maßnahme E1:

Unterstützung durch studentischer/wissenschaftlicher Hilfskräfte erfolgte im Berichtszeitraum bei den folgenden projektbezogenen Aufgabenstellungen:

- Programmierung eines Adapters für die Verbindung von Leitsteuerung und Ablaufsimulation
- Erstellung und Aufbereitung von Simulationsmodellen für die Verwendung als Referenzlayout

Maßnahme E2:

Im Rahmen des Projekts wurden 2022 folgende Studienarbeiten betreut:

- Vergleich der Effizienzsteigerung durch verschiedene Schedulingmethoden in einem Koordinator für heterogene Transportrobotersysteme
- Vergleich von Modellierungsmethoden für heterogene fahrerlose Transportsysteme in einer ereignisdiskreten Simulation
- Anwendung und Bewertung der Random Variate Generation Methode zur Modellierung von stochastischen Materialflussszenarien in einer Produktionsumgebung

- Erweiterung eines prototypischen FTS-Koordinators um eine Routenplanung für die Vorsteuerung und Simulation heterogener Transportsysteme

Aktualisierte Übersicht der Maßnahmen zum Ergebnistransfer während des Projekts

Ziel	Rahmen	Zeitraum
Maßnahme A: Projektbegleitender Ausschuss (PA)		
Fortlaufende Diskussion und Abstimmung des Forschungsfortschrittes mit Unternehmen des Projektbegleitenden Ausschusses (PA)	A1 Vorstellung des Projekts und Diskussion der geplanten Arbeiten	Durchgeführt am 05.05.2020
	A2 Vorstellung der ersten Ergebnisse der Schnittstellenklassifikation und des Koordinatorverhaltens; Diskussion des weiteren Vorgehens	Durchgeführt am 11.03.2021
	A3 Vorstellung des Simulationsmodells und inhaltliche Diskussion der teilweise bereits durchgeführten beziehungsweise noch bevorstehenden Fallstudien	Durchgeführt am 04.04.2022
	A4 Vorstellung der Ergebnisse der Optimierungspotentiale und Empfehlungen zur Ausgestaltung der Schnittstellen	Durchgeführt am 30.05.2022
Maßnahme B: Vorträge		
Präsentation von Ergebnissen auf Fachtagungen von Industrie und Wissenschaft.	B1 28. Deutscher Materialflusskongress	Durchgeführt am 18.03.2021
	B2 Bspw. European Conference on Modeling and Simulation (ECMS)	Nach Projektende
	B3 Bspw. Vortrag auf dem WGTL-Fachkolloquium	Nach Projektende
Maßnahme C: Elektronischer Newsletter und Internetauftritt		
Elektronische Verbreitung der Forschungsinhalte und -ergebnisse zur Gewinnung weiterer Unternehmen	C1 Projektvorstellung auf der Webseite des Lehrstuhls fml (siehe https://www.mw.tum.de/fml/forschung/aktuelle-forschungsprojekte/eposysko-entwicklung-und-potentialanalyse-eines-systemkoordinators-fuer-den-typuebergreifenden-einsatz-von-flurfoerderzeugen/)	Durchgeführt
	C2 Projektvorstellung über den Newsletter des Lehrstuhls fml	Veröffentlicht in Ausgabe 2020
	C3 Projektvorstellung in der Online-Zeitschrift FTS-/AGV-Facts, Ausgabe 03/2020 (siehe https://de.calameo.com/read/00597960662101a2f3163)	Veröffentlicht in Ausgabe 03/2020
	C4 Ergebnistransfer über den fml-Newsletter	Bereits durchgeführt im IV. Quartal 2021
Maßnahme D: Veröffentlichungen		
Ergebnistransfer in die Wirtschaft	D1 Publikation in einschlägigen Fachzeitschriften wie „Logistik für Unternehmen“, „Logistik Heute“, „ZWF Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb“ o.ä.	Nach Projektende

Maßnahme E: Übernahme in die Lehre			
Einbringung der erarbeiteten Ergebnisse in den Lehrbetrieb	E1	Mitarbeit studentischer Hilfskräfte	Gesamte Projektlaufzeit
	E2	Anfertigung von Studienarbeiten im Rahmen des Projekts	Gesamte Projektlaufzeit
Maßnahme F: liz – Logistik-Innovations-Zentrum München			
Ergebnistransfer in die Wirtschaft	F1	Mitarbeit studentischer Hilfskräfte	I. Quartal 2022
	F2	Vortrag, Posterpräsentation oder Vorführung im Rahmen des jährlich stattfindenden liz-Logistik-Seminars (TUM)	Entfallen

Aktualisierte Übersicht der Maßnahmen zum Ergebnistransfer nach der Projektlaufzeit

Ziel	Rahmen	Zeitraum	
Maßnahme H: Beratung			
Ergebnistransfer an Unternehmen ohne eigene Forschungsaktivitäten	H1	Transfer der Forschungsergebnisse durch Seminare, in denen die erarbeiteten Inhalte praxisorientiert vermittelt werden.	III. Quartal 2022
	H2	Unterstützung von Unternehmen bei der eigenständigen Anwendung der Ergebnisse durch das Angebot von Inhouse-Seminaren oder Beratungsleistungen	Ab III. Quartal 2022
Maßnahme I: Veröffentlichungen			
Ergebnistransfer in die Wirtschaft	I1	Veröffentlichung des Abschlussberichts auf den Homepages der Bundesvereinigung Logistik (BVL) und des Lehrstuhls fml	III. Quartal 2022
	I2	Publikation in Fachzeitschriften wie bspw. der „ZWF Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb“, „Logistik Heute“, o.ä.	IV. Quartal 2022
	I3	Ergebnisse und Planungskonzept werden bei Lehrstuhlbesichtigungen beziehungsweise öffentlichen Workshops der Wirtschaft vorgeführt.	Bereits seit IV. Quartal 2021
Maßnahme J: Konzepttransfer			
Möglichkeit der Nutzung der Ergebnisse	J1	Das entwickelte Konzept inkl. Demonstrator steht allen Interessierten diskriminierungsfrei zur Begutachtung bereit	II. Quartal 2022
Maßnahme K: Vorträge (übernommen aus Maßnahmen während des Projekts)			
Präsentation von Ergebnissen auf Fachtagungen von Industrie und Wissenschaft.	K1	Bspw. European Conference on Modeling and Simulation (ECMS)	I. Quartal 2023
	K2	Bspw. Vortrag auf dem WGTL-Fachkolloquium	I. Quartal 2023

8. Verzeichnis der Veröffentlichungen

Im Forschungsprojekt EPoSystKo wurden die in Tabelle 3 verzeichneten Veröffentlichungen erstellt. Weitere Veröffentlichungen sind in Arbeit, wie im in den Maßnahmen zum Ergebnistransfer (Abschnitt 7.5) festgelegt.

Tabelle 3: Erstellte Veröffentlichungen im Projekt EPoSystKo.

Titel	Medium	Ausgabe/Datum
Systemkoordinator für den typübergreifenden Einsatz von FFZ/FTS	Zeitschrift „FTS-/AGV-Facts“	03/2020
Posterpräsentation EPoSystKo	Materialflusskongress 2021	18.03.2021

9. Verzeichnis der studentischen Arbeiten

Im Forschungsprojekt EPoSysKo wurden die in Tabelle 4 verzeichneten studentischen Arbeiten betreut.

Tabelle 4: Durchgeführte Studienarbeiten im Projekt EPoSysKo.

Typ	Autor	Titel
Semesterarbeit	Pinaki Sankar Sahoo	Entwicklung einer Systematik für die Einordnung der Kommunikationsinhalte in Fahrerlosen Transportsystemen
Semesterarbeit	Jan Bergner & André Siepmann	Versuchsaufbau zur Simulation einer koordinativen Steuerung für mehrere Fahrerlose Transportsysteme
Semesterarbeit	Zilong Ji	Vergleich der Effizienzsteigerung durch verschiedene Schedulingmethoden in einem Koordinator für heterogene Transportrobotersysteme
Semesterarbeit	Ziyu Li	Vergleich von Modellierungsmethoden für heterogene fahrerlose Transportsysteme in einer ereignisdiskreten Simulation
Bachelorarbeit	Yassine Zahrouni	Anwendung und Bewertung der Random Variate Generation Methode zur Modellierung von stochastischen Materialflussszenarien in einer Produktionsumgebung
Semesterarbeit	Vishal Saini	Erweiterung eines prototypischen FTS-Koordinators um eine Routenplanung für die Vorsteuerung und Simulation heterogener Transportsysteme (vorläufiger Titel)

10. Literaturverzeichnis

- [Lag-2004] Lagoudakis, Michail G. u.a.: Simple auctions with performance guarantees for multi-robot task allocation. 2004 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS). Vol. 1. IEEE, 2004.
- [Li-2017] Li, Xu; Liu, Zhengyan und Tan, Fuxiao: Multi-robot task allocation based on cloud ant colony algorithm. International Conference on Neural Information Processing. Springer, Cham, 2017.
- [Lie-2021] Lienert, Thomas: Methodik zur simulationsbasierten Durchsatzanalyse FTF-basierter Kommissioniersysteme. Technische Universität München, 2021.
- [Ryc-2020] De Ryck, Matthias; Versteyhe, Mark und Frederik Debrouwere: Automated guided vehicle systems, state-of-the-art control algorithms and techniques. Journal of Manufacturing Systems 54, 2020.
- [VDA-5050] Verband der deutschen Automobilindustrie: Schnittstelle zur Kommunikation zwischen Fahrerlosen Transportfahr-zeugen (FTF) und einer Leitsteuerung. VDA 5050, 2022.
- [VDI-4451] Verband deutscher Ingenieure: Kompatibilität von Fahrerlosen Transportsystemen (FTS) - Schnittstelle zwischen Auftraggeber und FTS-Steuerung. VDI 4451 Blatt 5, 2005.
- [Vig-2007] Viguria, Antidio; Ivan Maza und Anibal Ollero: SET: An algorithm for distributed multirobot task allocation with dynamic negotiation based on task subsets. Proceedings 2007 IEEE International Conference on Robotics and Automation. IEEE, 2007.

11. Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Systemarchitektur eines Materialflusssystemes mit mehreren mobilen Transportsystemen (links, rechts) und Einzelfahrzeugen (unten mittig), die von einem Koordinator (mittig) vorgesteuert werden.	7
Abbildung 2: Qualitative Darstellung des Verhältnisses zwischen Schnittstellenausprägung und Potential zur Effizienzsteigerung im Systemkoordinator.	8
Abbildung 3: Verschiedene Steuerungsarchitekturen in Transportsystemen. Links ein klassisches, zentral gesteuertes Transportsystem, mittig ein dezentral gesteuertes Transportsystem, rechts der koordinative Steuerungsansatz.	15
Abbildung 4: Vier durchzuführende Schritte beim Eingang eines Transportauftrags im Koordinator.....	17
Abbildung 5: Vorgehen des Koordinators zur Transportauftragsverteilung bei kleiner Informationsbasis.....	22
Abbildung 6: Vorgehen des Systemkoordinators zur Transportauftragsverteilung bei Verfügbarkeit der Fahrzeugpositionen. Der Schritt der Positionsabfrage ist optional, sofern die Subsysteme die Positionen automatisch übertragen.....	23
Abbildung 7: Vorgehen des Systemkoordinators zur Transportauftragsverteilung bei Verfügbarkeit der Routen der Fahrzeuge. Neue Routen werden zwischen den bestehenden hindurchgeplant.....	25
Abbildung 8: Schema des Versuchsaufbaus zur Durchführung von Simulationen. Links die Softwarekomponenten und Kommunikationsinhalte, rechts die technische Umsetzung.....	27
Abbildung 9: Hauptfenster des Koordinators mit Steuerelementen für die Handhabung des Prüfstands sowie der Verteilalgorithmen.....	29
Abbildung 10: Ausschnitt des verwendeten exemplarischen Transportnetzes, modelliert in der Leitsteuerungssoftware openTCS. Sichtbar sind Kreuzungen, Fahrtwege sowie Aufnahme- und Abgabestellen.....	30
Abbildung 11: Detail der Kreuzungsmodellierung in openTCS. Es gibt 4 Subpunkte, die gegen den Uhrzeigersinn miteinander verbunden sind.....	31
Abbildung 12: Ausschnitt des verwendeten exemplarischen Transportnetzes, modelliert in der Software Siemens Plant Simulation. Sichtbar sind Kreuzungen (hellgrau), Fahrtwege (dunkelgrau), Aufnahme- und Abgabepunkte (grün/orange) sowie Fahrzeuge (gelb).....	34
Abbildung 13: Detail der Modellierung einer Kreuzung in Plant Simulation. Jedes Kurvenelement kennzeichnet eine Abbiegerelation.	35
Abbildung 14: Programmablauf des Koordinators in der Referenzkonfiguration. Nach dem Fähigkeitenabgleich wird der Transportauftrag zufällig an ein Subsystem weitergegeben.....	38

Abbildung 17: Diagramme der Entwicklungen der Wartezeiten nach Koordinatorkonfiguration (oben Referenzkonfiguration, mittig Konfiguration mit niedriger zeitlicher Informationsdichte, unten Konfiguration mit hoher Dichte).	41
Abbildung 15: Diagramm mit Verteilungen der Bearbeitungszeiten der Transportaufträge, gegliedert nach Koordinatorkonfiguration.	42
Abbildung 16: Diagramm mit Summen der Bearbeitungszeiten der Transportaufträge, gegliedert nach Koordinatorkonfiguration.	43

12. Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Textbasiertes Kommunikationsprotokoll zwischen openTCS und Plant Simulation.	33
Tabelle 2: Transportsysteme im Referenz-Materialflusssystem und ihre Eckdaten.....	37
Tabelle 3: Erstellte Veröffentlichungen im Projekt EPoSysKo.	53
Tabelle 4: Durchgeführte Studienarbeiten im Projekt EPoSysKo.	54