

J. Fottner · F. Rothmeyer

EPoSystKo – Entwicklung und Potentialanalyse eines Systemkoordinators für den typübergreifenden Einsatz von Flurförderzeugen

Herausgegeben von:

Prof. Dr.-Ing. Johannes Fottner

fml – Lehrstuhl für Fördertechnik Materialfluss Logistik

Technische Universität München

Verfasser: Florian Rothmeyer, M. Sc.

Dieses Werk ist urheberrechtlich geschützt. Die dadurch begründeten Rechte, insbesondere die der Übersetzung, des Nachdrucks, der Entnahme von Abbildungen, der Wiedergabe auf photomechanischem oder ähnlichem Wege und der Speicherung in Datenverarbeitungsanlagen bleiben – auch bei nur auszugsweiser Verwendung – vorbehalten.

Copyright © **fml** – Lehrstuhl für Fördertechnik Materialfluss Logistik,

Printed in Germany 2022

ISBN: 978-3-948514-21-1

fml – Lehrstuhl für

Fördertechnik Materialfluss Logistik

Technische Universität München

Boltzmannstr. 15

85748 Garching

Tel.: + 49.89.289.15921

www.mec.ed.tum.de/fml

Forschungsbericht

zu dem IGF-Vorhaben

EPoSysKo – Entwicklung und Potentialanalyse eines Systemkoordinators für den typübergreifenden Einsatz von Flurförderzeugen

der Forschungsstelle

Lehrstuhl für Fördertechnik Materialfluss Logistik, Technische Universität München

Das IGF-Vorhaben 20918 N der Forschungsvereinigung
Bundesvereinigung Logistik e.V. – BVL wurde über die



im Rahmen des Programms zur Förderung der Industriellen
Gemeinschaftsforschung (IGF) vom

Gefördert durch:



Bundesministerium
für Wirtschaft
und Energie

aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages

aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages gefördert.

Kurzzusammenfassung

Die stetig zunehmenden Varianten von fahrerlosen Transportfahrzeugen (FTF) führen dazu, dass vermehrt verschiedenartige FTF parallel in einem Materialflusssystem eingesetzt werden. Gerade bei kleinen und mittleren Unternehmen (KMU) kann dabei nicht immer auf maßgeschneiderte Gesamtlösungen mit einheitlicher Steuerungssoftware zurückgegriffen werden. Stattdessen müssen FTF verschiedener Hersteller mit jeweils spezifischer Leitsteuerung zusammengebracht werden. Zwischen diesen Steuerungen ist ein Informationsaustausch meist nicht möglich, weshalb ein großes Potential zur Prozessoptimierung brachliegt.

Im Forschungsprojekt EPoSysKo wurde eine koordinative Steuerung entwickelt, die den Austausch von Informationen zwischen mehreren fahrerlosen Transportsystemen (FTS) zum Zwecke der Effizienzsteigerung ermöglicht. Im Gegensatz zu einer zentralen oder dezentralen Steuerungsarchitektur wird so das in den Leitsteuerungen verwirklichte Know-how der FTS-Hersteller berücksichtigt.

Je mehr Informationen aus den Leitsteuerungen dem Systemkoordinator zur Verfügung gestellt werden, desto effizienter lässt sich die Transportabwicklung gestalten. Diese These wurde im Projekt durch die Simulation eines Referenz-Materialflusssystems untermauert. Hierzu wurden Koordinationsmechanismen entwickelt und umgesetzt, die verschiedene Informationsumfänge von den Zielpositionen aktiver Transportaufträge bis hin zu den Routen aller Fahrzeuge berücksichtigen.

Das Ergebnis des Projekts besteht zum einen aus einem Software-in-the-Loop-Prüfstand für den Systemkoordinator, mit dem die Transporteffizienz mit verschiedenen Koordinationsalgorithmen und angeschlossenen, simulierten Fahrzeugsystemen getestet werden kann. Zum anderen wurden Handlungsempfehlungen für Hersteller und (potentielle) Anwender von FTS formuliert.

Abstract

The steadily increasing number of variants of automated guided vehicles (AGVs) is leading to more and more different types of AGVs being used in parallel in material flow systems. Especially for small and medium-sized enterprises (SMEs), it is not always possible to use tailored solutions based on a uniform control software. Instead, AGVs from different manufacturers must be brought together, each with its own specific master controller. In most cases, it is not possible to exchange information between these controllers, which is why a great potential for process optimization remains unused.

In the EPoSystKo research project, a coordinative control system was developed. It enables the exchange of information between several AGV systems (AGVSs) for the purpose of increasing efficiency. In contrast to a centralized or decentralized control architecture, the know-how of the AGVS manufacturers realized in the master controllers is thus taken into account.

The more information from the master controllers is made available to the system coordinator, the more efficient the transport handling can be. This hypothesis was substantiated in the project by simulating a reference material flow system. For this purpose, several coordination mechanisms were developed and implemented. These mechanisms consider different amounts of information, from the target positions of active transport orders up to the routes of all vehicles.

The result of the project consists, on the one hand, of a software-in-the-loop test bench for the system coordinator. This test bench allows the transport efficiency to be tested with different coordination algorithms and attached, simulated vehicle systems. On the other hand, we formulated recommended actions for manufacturers and (potential) users of AGVSs.

Inhaltsverzeichnis

Kurzzusammenfassung	I
Abstract	III
Inhaltsverzeichnis	V
Abkürzungsverzeichnis	IX
1 Einleitung	1
1.1 Wissenschaftliche, technische und wirtschaftliche Problemstellung	2
1.1.1 Wirtschaftliche Problemstellung	3
1.1.2 Technische Problemstellung	3
1.1.3 Wissenschaftliche Problemstellung	6
1.2 Forschungsziel des Projekts	8
1.2.1 Forschungsfrage	9
1.3 Vorgehensweise und Lösungsweg	9
2 Grundlagen zu innerbetrieblichen Transportsystemen	13
2.1 Manuell und automatisch gesteuerte Transportfahrzeuge	13
2.2 Zentrale und dezentrale Strukturen	13
3 Stand der Wissenschaft	17
3.1 Routing von FTF	17
3.1.1 Statische Ansätze	19
3.1.2 Zeitfensterbasierte Ansätze	19
3.2 Simulation heterogener Transportsysteme	20
3.2.1 Simulation mit Plant Simulation	21
3.2.2 Simulation mit openTCS	22
4 Vision einer neuartigen kaskadierten Steuerungsstruktur	27
4.1 Architektur des Flottenverbunds mit Systemkoordinator	27
4.2 Vergleich mit bestehenden Ansätzen	29
5 Modellierung des Systemkoordinators	31
5.1 Grundfunktionalität	31
5.1.1 Schritt 1: Auftrag überführen	31

1.1 Wissenschaftliche, technische und wirtschaftliche Problemstellung

5.1.2	Schritt 2: Fähigkeiten abgleichen	31
5.1.3	Schritt 3: Fahrzeugtyp auswählen	32
5.1.4	Schritt 4: Rückmeldung verarbeiten	33
5.2	Optimierungsziele und zugeordnete Kennzahlen	33
5.3	Varianz der Ausprägungen anhand der bereitstehenden Informationen	34
5.4	Ausprägung 1: Nur Übermittlung von Transportaufträgen und -rückmeldungen	36
5.5	Ausprägung 2: Zusätzlich Übermittlung von Fahrzeugpositionen	38
5.6	Ausprägung 3: Zusätzlich Übermittlung von Auftrag-Fahrzeug-Zuordnungen	39
5.7	Ausprägung 4: Zusätzlich Übermittlung von Routen	40
6	Versuchsaufbau zur vergleichenden Analyse der Koordinator-Ausprägungen	43
6.1	Architektur und Kommunikationswege	43
6.2	Umsetzung des Koordinators	45
6.2.1	Implementierung der Verteilalgorithmen	46
6.2.2	Mechanismus zur Dokumentation der Simulationen	47
6.3	Umsetzung der Leitsteuerungen	48
6.4	Umsetzung des Materialflusssystem	53
6.5	Einspeisung von Transportauftragsserien für Versuchsläufe	56
7	Evaluierung des Koordinators mit ausgewählten Schnittstellenkonfigurationen	57
7.1	Randbedingungen und Parameterwahl	57
7.1.1	Layout:	57
7.1.2	Randbedingungen der Simulation:	58
7.2	Verwendete Konfigurationen des Systemkoordinators	58
7.2.1	Referenzkonfiguration	59
7.2.2	Ausprägung 3 (Zuordnung Auftrag-Fahrzeug) mit niedriger zeitlicher Auflösung	59
7.2.3	Ausprägung 3 (Zuordnung Auftrag-Fahrzeug) mit hoher zeitlicher Auflösung	60
7.2.4	Ausprägung 4 (Kenntnis der Routen aller Fahrzeuge)	60
7.3	Ablauf der Versuche	61
7.4	Ergebnisse	62
7.4.1	Entwicklung der Wartezeiten	62
7.4.2	Verteilung der Bearbeitungszeiten	64

7.4.3	Summe der Bearbeitungszeiten	66
7.4.4	Vergleich von Konfiguration 4 mit der Referenzkonfiguration	67
7.5	Abgeleitete Handlungsempfehlungen für FFZ-Hersteller/-Anwender	72
7.5.1	Empfehlungen bzgl. Schnittstellen von Leitsteuerungen	72
7.5.2	Empfehlungen bzgl. Algorithmen in einem Systemkoordinator	73
8	Zusammenfassung der Forschungsergebnisse und Ausblick	75
8.1	Zusammenfassung und Bewertung der Forschungsergebnisse	75
8.2	Ausblick	78
	Literaturverzeichnis	81
	Abbildungsverzeichnis	85
	Tabellenverzeichnis	87
Anhang A	Ablauf der zeitfensterbasierten Routenfindung	A-1

Abkürzungsverzeichnis

AiF	Arbeitsgemeinschaft industrieller Forschungsvereinigungen
DSRM	Design Science Research Methodology
ERP	Enterprise Resource Planning
FFZ	Flurförderzeug
fml	Lehrstuhl für Fördertechnik Materialfluss Logistik
FTF	Fahrerloses Transportfahrzeug
FTS	Fahrerloses Transportsystem
KMU	Kleinere und mittlere Unternehmen
MQTT	Message Queue Telemetry Transport
SiL	Software-in-the-Loop
TUM	Technische Universität München
VDA	Verband der Automobilindustrie e. V.

1 Einleitung

Der Lehrstuhl für Fördertechnik Materialfluss Logistik (fml) der Technischen Universität München (TUM) besteht seit 1907 und forscht an den Förder- und Lagermitteln der Intralogistik. Lag zu Beginn der Fokus noch auf Kranen als klassischen flurfreien Fördermitteln, so wurden zunehmend flexible, flurgebundene Fördermittel wie Routenzüge oder Stapler in Betracht gezogen. Über den Zwischenzustand des elektronisch assistierten manuellen Betriebs der Fahrzeuge bewegte sich die Forschung in den letzten Jahren in die Richtung der Robotik. Sie ermöglicht nicht nur den Eins-zu-eins-Ersatz manuell bedienter Fahrzeuge durch solche mit automatischer oder autonomer Steuerung, sondern eröffnet auch neue technische Anwendungsmöglichkeiten, Prozessvarianten und sogar Geschäftsmodelle: Auf technischer Ebene bieten Transportroboter beispielsweise die sichere, wiederholgenaue, automatische Aufnahme und Abgabe von Ladungsträgern, die gleichzeitig robust gegenüber durch den Menschen eingebrachten Ungenauigkeiten in der Positionierung ist. Zusammen mit der Fähigkeit des automatischen oder autonomen Fahrens lassen sich Transportprozesse schlanker darstellen und an die Bedarfe der Unternehmen anpassen. Beispielsweise kann die Einsteuerung von Transportaufträgen in die Hand des Montagepersonals gegeben werden, das Material anfordert und dieses zuverlässig und automatisch nach vorhersehbarer Zeit erhält. Zuletzt lassen sich solche Transportvorgänge auch als eigenes Geschäftsmodell aus der Wertschöpfung des anwendenden Unternehmens ausgliedern: Über die Schnittstelle zur Kommunikation von Transportaufträgen kann ein Dienstleister eine skalierbare Anzahl an Robotern am Materialfluss teilhaben lassen und präzise die durchgeführten Transporte abrechnen.

Am Lehrstuhl fml wird die Robotik, wie alle Forschungsgebiete des Lehrstuhls, auf drei Ebenen betrachtet: Es sind sowohl Komponenten als auch Systeme und Prozesse Gegenstand der Untersuchungen. Als **Komponenten** verstehen sich im Falle der Robotik einzelne Funktionsbausteine von Transportrobotern wie Sensoren zur Navigation oder Lastaufnahmemittel für die automatische Be- und Entladung. Weiterhin zählen dazu Leitsteuerungen, die als Teil fahrerloser Transportsysteme (FTS) für die effiziente Vergabe von Transportaufträgen an Roboter ihrer Flotte verantwortlich zeichnen. Auf Ebene der **Systeme** werden beispielsweise Einsatzmöglichkeiten von Robotersystemen bewertet und ihre Schnittstellen zu anderen Systemen für eine hohe Effizienz des gesamten Materialflusses optimiert. Die Systeme mobiler Transportroboter sind stets eingebettet in **Prozesse**, beispielsweise solche der Interaktion mit Menschen im operativen Betrieb oder auch Einführungsprozeduren auf Management-, Planungs- und

Integrationsebene. Die umsichtige Gestaltung dieser Prozesse entscheidet mit über den Erfolg des Einsatzes von Robotern in der Intralogistik.

Das Forschungsprojekt „EPoSysKo – Entwicklung und Potentialanalyse eines Systemkoordinators für den typübergreifenden Einsatz von Flurförderzeugen“ bewegt sich auf allen drei genannten Untersuchungsebenen. Letztendlich sollen die Projektergebnisse den Entscheidern in kleinen und mittleren Unternehmen (KMU) eine Hilfestellung für den Einführungsprozess an die Hand geben, um die Anwendbarkeit von FTS zu erleichtern. Der Fokus liegt dabei auf der Frage, wie die Schnittstellen neu zu implementierender Robotersysteme geartet sein sollten, sodass bereits im Unternehmen existierende Flurförderzeug-Systeme möglichst effizient und mit wenig Anpassungsaufwand mit den neuen Systemen zusammenwirken können. Dreh- und Angelpunkt des im Projekt entwickelten Vorschlags ist der sogenannte Systemkoordinator, der einerseits selbst ein System darstellt, andererseits aber mit den Bestands- und Neusystemen von Flurförderzeugen interagieren muss, um eine Vorsteuerung von Transportaufträgen vorzunehmen. Wie die Funktionen des Systemkoordinators und seine Schnittstellen auszulegen sind, hängt wesentlich davon ab, welche Informationen die beteiligten Komponenten auf Fahrzeugebene bereitstellen können. So könnte der Systemkoordinator beispielsweise Transportaufträge zurückhalten, die einen Bereich betreffen, in dem sich ein temporäres Hindernis befindet, wäre dafür aber auf die entsprechende Wahrnehmungs- und Kommunikationsfähigkeit der beteiligten Fahrzeuge angewiesen.

In diesem Kapitel wird zunächst die Problemstellung der Integration von FTS in heterogene Systeme von Flurförderzeugen aus wissenschaftlicher, technischer und wirtschaftlicher Sicht beleuchtet, bevor die Zielstellung des Projekts definiert wird. Anschließend wird die Vorgehensweise zur Lösung des Problems geschildert.

1.1 Wissenschaftliche, technische und wirtschaftliche Problemstellung

Dem Forschungsprojekt EPoSysKo 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.

1.1.1 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 (FFZ) 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 Materialflusssysteme 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.

1.1.2 Technische Problemstellung

Das geschilderte wirtschaftliche Dilemma ließe sich mithilfe neuartiger technischer Lösungen auflösen. Solche Lösungen sind allerdings noch nicht standardisiert verfügbar,

1.1 Wissenschaftliche, technische und wirtschaftliche Problemstellung

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.

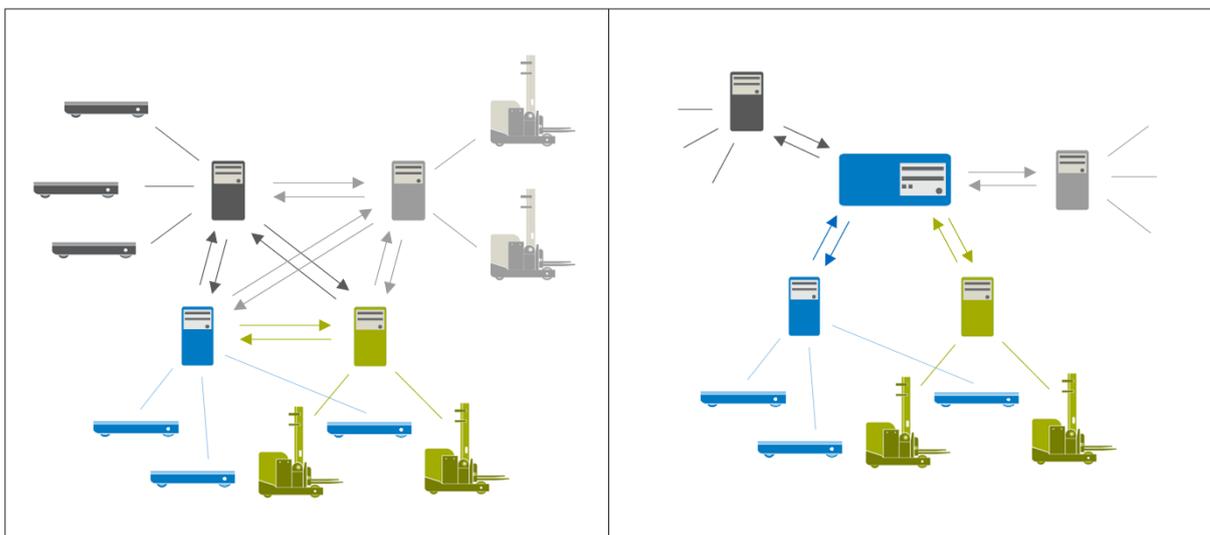


Abbildung 1: Varianten der Vernetzung mehrerer Transportsysteme über die Leitsteuerungen. Links direkte, dezentrale Kommunikation, rechts zentrale Kommunikation über einen Koordinator

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

1.1 Wissenschaftliche, technische und wirtschaftliche Problemstellung

Somit wird klar, dass die zentral verwaltete Vielfalt an Transportsystemen in einem Materialflusssystem deutliche Vorteile gegenüber der dezentralen Variante aufweist. Im Projekt EPoSystKo 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.

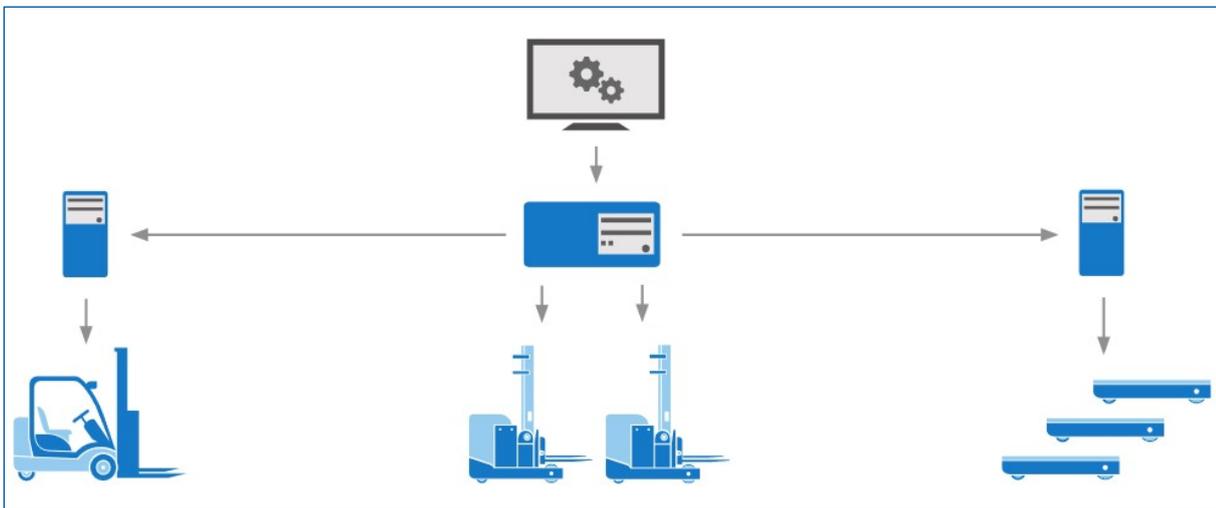


Abbildung 2: Systemarchitektur eines Materialflusssystems mit mehreren mobilen Transportsystemen (links, rechts) und Einzelfahrzeugen (unten mittig), die von einem Koordinator (mittig) vorgesteuert werden

1.1.3 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 EPoSysKo 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 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.

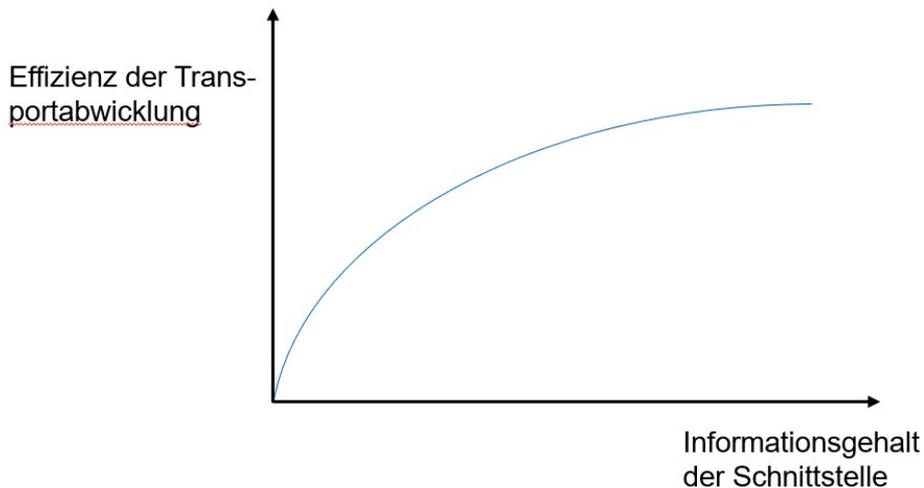


Abbildung 3: Qualitative Darstellung des Verhältnisses zwischen Schnittstellenausprägung und Potential zur Effizienzsteigerung im Systemkoordinator

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

1.2.1 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 identischen Detailgrad aufweisen. Dies bedeutet, dass bei unterschiedlich aufgelösten Informationsbeständen aus den Leitsteuerungen ein kleinster gemeinsamer Nenner bezüglich des Detailgrads gefunden werden muss, der in der Folge 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 und Ausarbeitung der Algorithmen für den 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 des Koordinators

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 einer 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.

Die Meilensteine wurden schrittweise erarbeitet, wobei umfangreiche Erkenntnisse über den Forschungsgegenstand gewonnen wurden. Diese werden – gegliedert nach den drei Zyklen der Design Science Research Methodology (DSRM) [Hev-2004] – in den folgenden Kapiteln vorgestellt. Zunächst wird in Kapitel 2 der Forschungsgegenstand umrissen und die technischen Komponenten sowie die Akteure erklärt. Zusammen mit der bereits in Abschnitt 1.1 erläuterten Problemstellung stellt dies den sogenannten Relevance Cycle der DSRM dar. Im Anschluss werden in Kapitel 3 wissenschaftliche Ansätze vorgestellt, die Teile der hier betrachteten Problemstellung

1.3 Vorgehensweise und Lösungsweg

behandeln oder auf sie übertragbar sind. Damit ist der sogenannte Rigor Cycle erfüllt. Im dritten Schritt, dem sogenannten Design Cycle, wird das Konzept des Systemkoordinators entworfen, umgesetzt und ein Proof-of-Concept durchgeführt. Dies findet sich in den Kapiteln 4 bis 7. Im abschließenden Kapitel 8 werden die erzielten Ergebnisse den eingangs gestellten Fragen gegenübergestellt und in den allgemeinen Forschungskontext eingebettet. Dabei werden auch offengebliebene, relevante Forschungslücken benannt.

2 Grundlagen zu innerbetrieblichen 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 EPoSystKo 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 mehrerlei Hinsicht zentrale oder dezentrale Strukturen erkennen. Da diese Strukturen sich teilweise im sogenannten

Systemkoordinator widerspiegeln, der in EPoSysKo 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 derselben 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 Stand der Wissenschaft

Die Idee des Systemkoordinators für die Orchestrierung mehrere Flurförderzeug-Systeme ist in der wissenschaftlichen Literatur ohne Vorbild. Für die Konzeptentwicklung und Implementierung des Koordinators kann daher nur in Teilen auf bestehende Ansätze zurückgegriffen werden.

Da der Koordinator ähnlich einer FTS-Leitsteuerung eine Verteilung von Transportaufträgen vornimmt, lassen sich Teile ihrer Funktionen übertragen. Im Folgenden wird daher das Routing genauer beleuchtet, welches neben dem Scheduling und der Fahrzeugdisposition eine der operativen Hauptaufgaben von Leitsteuerungen ist [VDI-4451b, Ryc-2020].

Neben der Entwicklung der Funktion des Koordinators muss diese in Experimenten evaluiert werden. Hierfür bietet sich die Simulation an, da sich so Versuchsreihen über lange Laufzeiten und mit variierenden Parametern mit wenig Aufwand durchführen lassen. Die Literatur zeigt verschiedene geeignete Methoden der Simulation von FTS auf. Ein Überblick wird in Abschnitt 3.2 gegeben.

3.1 Routing von FTF

Das Routing von FTF beschäftigt sich mit der Wegefindung für die Fahrten der Roboter im Arbeitsraum. Über die verschiedenen existierenden Methoden, dieses Problem zu lösen, wird im Folgenden ein Überblick gegeben. Zunächst wird allerdings auf den Zusammenhang des Routings mit dem Scheduling von FTF eingegangen.

Ziel des Scheduling ist die zeitliche Koordinierung unterschiedlicher FTF unter Berücksichtigung von Deadlines oder Prioritäten der auszuführenden Aufträge. Die Herausforderung des Scheduling liegt darin, in einer bestimmten vorgegebenen Zeit und unter Benutzung begrenzter Ressourcen möglichst viele Transportaufträge auszuführen. Hierbei ist die Anzahl der ausführenden FTF minimal zu halten und gleichzeitig die summierte Fahrdauer der FTF zu minimieren. [Qiu-2002]

Das Routing von FTF erfolgt nach dem Scheduling und beschäftigt sich mit der Aufgabe, einen geeigneten Weg zum Ziel zu finden. Eine optimierte Route kann nach den folgenden Gesichtspunkten ausgelegt werden:

1. Möglichst minimaler Energieaufwand
2. Kürzeste Strecke
3. Kürzeste verstrichene Zeit

Ein möglichst minimaler Energieaufwand berücksichtigt die Energiekosten des FTF beim Abfahren der Route. So kann beispielsweise eine sehr kurvenreiche Route durch die Beschleunigungs- und Bremsvorgänge einen höheren Energieverbrauch als eine kurvenarme Route haben. Die Auswahl der Route nach der kürzesten Strecke bietet den Vorteil der geringen Fahrdauer und der Besetzung einer geringen Anzahl von Knotenpunkten. Mit dem Ziel der Routenplanung nach der kürzesten verstrichenen Zeit werden unterschiedliche Geschwindigkeiten von FTF berücksichtigt. Dies ist insbesondere relevant, wenn verschiedenartige Fahrzeuge oder Systeme verschiedener Hersteller kombiniert werden. [Dan-1988]

Sobald eine Auswahl nach einem Gesichtspunkt getroffen wurde, ist im nächsten Schritt das Kriterium der Routingfähigkeit zu untersuchen. Hierfür ist zunächst zu prüfen, ob eine Route existiert, die das FTF von Beginn zum Ziel des Fahrauftrags führt. Anschließend muss die Möglichkeit des staufreien, konfliktfreien und Deadlock-freien Befahrens der Route sichergestellt werden. [Tag-1995]

In vielen Anwendungen von FTS sind nur eine sehr geringe Anzahl an FTF und Transportaufträgen involviert [Qiu-2002]. Daher werden für diese Fälle die Transportaufträge nach dem First-Come-First-Serve-Prinzip eingeplant und üblicherweise dem am wenigsten weit vom Beginn des Auftrages befindlichen FTF zugeordnet [Guz-1997, Lin-1994].

In anderen Anwendungen besteht das Problem, dass einer großen Zahl an Transportaufträgen nur eine geringe Anzahl an FTF gegenübersteht. Hier reicht das Scheduling nach dem First-Come-First-Serve-Prinzip nicht mehr aus, um eine möglichst effiziente Zuordnung an Transportaufträgen zu erzielen, da beispielsweise gleichzeitig mehreren FTF Transportaufträge zu den gleichen Zielen zugeordnet werden könnten [Qiu-2000]. Somit wird das Kriterium des staufreien Routings verletzt und es muss eine andere Methode angewandt werden, die Wartezeiten, Verkehrsauslastung oder verfügbare Fahrzeuge berücksichtigt. Solche Methoden lassen sich in statische und zeitenfensterbasierte, also dynamische Ansätze unterteilen.

3.1.1 Statische Ansätze

Bei einer geringen Menge verfügbarer FTF besteht der Anreiz, eine möglichst simple Lösung für das obig angesprochene Problem zu finden.

Broadbent et al. stellen das Konzept eines konfliktfreien und zeitoptimierten FTF-Routings vor. Die Idee besteht darin, zunächst mit dem Dijkstra-Algorithmus die kürzeste Route zu ermitteln. Hierfür wird eine Matrix erzeugt, die genau die Besetzungszeiten der FTF an den jeweiligen Knoten veranschaulicht. Ziel ist es, Kollisionen vor der Fahrt bereits auszuschließen, indem nachfolgende FTF ihre Fahraufträge verzögert erhalten. So kann das zunächst aktivierte FTF den Auftrag zuerst beenden. [Bro-1985]

Egbelu schlägt dagegen einen Ansatz vor, der auf bidirektionale Fahrkurse zurückgreift, da im Gegensatz zu unidirektionalen Fahrkursen, wie sie beispielsweise bei herkömmlichen Routenzügen angewendet werden, FTF einen Streckenabschnitt grundsätzlich in beiden Richtungen befahren können. Damit kann ein höherer Durchsatz an FTF erzielt werden. Dies erhöht allerdings die Komplexität des Problems, da hierdurch die Anzahl der Freiheitsgrade verdoppelt wird und mehrere FTF einen Streckenabschnitt gleichzeitig beanspruchen können. [Egb-1987]

Daniels präsentiert ebenfalls einen Algorithmus für das Routing von FTF in einem bidirektionalen Fahrkurs. In diesem wird der PSP-Algorithmus von Glover et al. angewandt, um die kürzeste Route zu ermitteln [Qiu-2002, Glo-1985]. Der Vorteil dieses Algorithmus ist das Finden einer kollisionsfreien Route, ohne die Routen anderer FTS zu ändern. Hierfür wird die errechnete Route eines Fahrzeugs blockiert und kann nicht von nachfolgenden Fahrzeugen in Anspruch genommen werden. Streckenabschnitte der blockierten Route sind ebenfalls nicht befahrbar. Die Blockierung der Route wird beim Beenden des Transportauftrags aufgehoben. Dieser Ansatz birgt das Problem, dass durch das Blockieren von Routen möglicherweise das Finden von Routen für weitere FTF behindert wird. Damit ist dieser Algorithmus lediglich für Anwendungen mit einer niedrigen Anzahl an FTF sinnvoll. [Dan-1988]

3.1.2 Zeitfensterbasierte Ansätze

Um das Wegenetz effizienter zu nutzen, wurde die oben vorgestellte Idee des statischen Routings mit dynamischen Mechanismen abgewandelt. Unter anderem können zeitfensterbasierte Methoden für das dynamische Routing angewandt werden. Hierfür wird die Auslastung der verfügbaren Ressourcen erhöht, indem nicht wie im statischen Ansatz die ermittelte Route gesperrt wird, sondern nach errechneten Zeitfenstern lediglich Teile der Strecke blockiert werden. Damit wird allerdings eine höhere Komplexität des Verfahrens in Kauf genommen.

Huang et al. stellen einen Algorithmus vor, mit dem FTF nach der kürzesten verstrichenen Zeit in einem bidirektionalen Fahrkurs geroutet werden. Zunächst wird ein Graph erzeugt, in welchem alle Knoten im Layout abgebildet werden. Zwei Knoten sind dann miteinander verbunden, wenn ein Pfad zwischen beiden Knoten existiert. Dieser Ansatz hat den Nachteil, dass die Berechnung deutlich aufwendiger wird, je größer die Anzahl der Knoten ist. [Hua-1989]

Von Kim und Tanchoco wird ein kollisionsfreier und zeitoptimierter Algorithmus für das Routen von FTF in einem bidirektionalen Fahrkurs vorgestellt. Hierbei werden die Routen mithilfe des Dijkstra-Algorithmus errechnet. Jeder Knoten beinhaltet eine Liste an durch FTF besetzten Zeitfenstern und gleichzeitig eine Liste an freien Zeitfenstern für FTF, die diese noch besetzen werden. Hierfür wird der Zeitfenstergraph erstellt, in welchem diese Knoten hinterlegt werden. Abschließend werden die FTF über die freien Knoten geroutet. Dieser Algorithmus eignet sich für ein kleines Layout mit wenigen Fahrzeugen. [Kim-1991]

1993 erweitern Kim und Tanchoco den erarbeiteten Ansatz aus dem Jahr 1991, indem lediglich den FTF, die aktuell keinen weiteren Auftrag ausführen, ein neuer Auftrag zugeordnet werden kann. [Kim-1993]

3.2 Simulation heterogener Transportsysteme

Für die Untersuchung von heterogener Transportsysteme ist eine Simulation unabdingbar, der Untersuchungsgegenstand könnte aufgrund seiner Größe und Komplexität nur unter enormem Aufwand anwendungsnah und wiederholgenau in der Realität abgebildet werden. Weiterhin ermöglicht eine Simulation, Informationen wie Durchsatz, Wartezeiten oder auch das Validieren von Scheduling-Algorithmen einfach grafisch darzustellen. Ist ein Simulationsmodell erstellt, so kann eine Vielzahl an untereinander vergleichbaren Versuchen durchgeführt werden.

Für die Auslegung und Untersuchung von Transportsystemen werden häufig ereignisdiskrete Simulationen herangezogen. Die hierfür entwickelte Software Plant Simulation ist im deutschsprachigen Raum weit verbreitet. Daher werden auf ihr aufbauende Ansätze der Simulation heterogener Transportsysteme im Folgenden näher beleuchtet.

Neben der Verwendung von multifunktionalen Simulationsumgebungen können Transportsysteme auch simuliert werden, indem reale Steuerungssysteme mit virtuellen Fahrzeugen verbunden werden. Diese empfangen Fahrbefehle und geben

entsprechend einer simulierten Fahrt Rückmeldungen an die Steuerung, sodass ein Hardware-in-the-Loop-System entsteht. In der Wissenschaft existieren verschiedene solche Ansätze, die auf der Software openTCS aufbauen. Sie ist die einzige bekannte quelloffene Leitsteuerung. Solche Ansätze werden im Folgenden ebenfalls vorgestellt.

3.2.1 Simulation mit Plant Simulation

Plant Simulation ist eine Software zur Simulation, Analyse, Visualisierung und Optimierung von Produktionsprozessen, Materialflüssen, sowie logistischen Abläufen. Die Simulationsumgebung eignet sich sehr gut zur Erstellung von Modellen, die einen Fahrkurs mit FTS abbilden. Durch die ereignisdiskrete Berechnung können Simulationen gegenüber dem simulierten Zeitabschnitt enorm beschleunigt werden, wobei allerdings die Simulationszeit nicht linear, sondern in Sprüngen verläuft. Auf der anderen Seite kann die Simulation in skaliertem Echtzeit durchgeführt werden. Hier läuft die Simulationszeit linear ab, daher ist diese Funktion für Ko-Simulationen mit weiterer Software von Vorteil. Ein weiterer Vorteil von Plant Simulation ist die Möglichkeit, Bausteine zu erstellen, durch welche der Benutzer selbstgeschriebene Methoden aufrufen kann. Eine mögliche Anwendung ist der Datenaustausch mit anderen Programmen über TCP-Kommunikation.

Viharos et al. präsentieren in ihrem Artikel die Erstellung eines ereignisdiskreten Simulationsmodells, welches für die Ansteuerung von FTS in einem automatisierten Montagesystem angewandt wird. Hierfür wird zunächst ein beispielhaftes Modell in Plant Simulation erstellt, wie Abbildung 4 zeigt. [Vih-2018]

In der formulierten Problemstellung von Viharos et al. geht es darum, Produkte zur nächsten Station zu transportieren, die dann einen Verarbeitungsschritt durchleben. Diese Produkte werden mithilfe von FTF zu den jeweiligen Industrierobotern transportiert, die in Abbildung 4 als Robot1, Robot2 usw. dargestellt werden. Die Beschriftungen *AGVPool1* und *AGVPool2* stellen Parkplätze für FTS dar. Die Anzahl an FTF, die diese Anlage befahren können, ist nicht fest definiert und kann damit frei vorgegeben werden. Das unverarbeitete Produkt wird über die Quelle *Source1* oder *Source2* über ein FTS aufgeladen und wird nach dem Durchlaufen der Verarbeitungsschritte über die Roboter zur Senke *Drain1* oder *Drain2* transportiert.

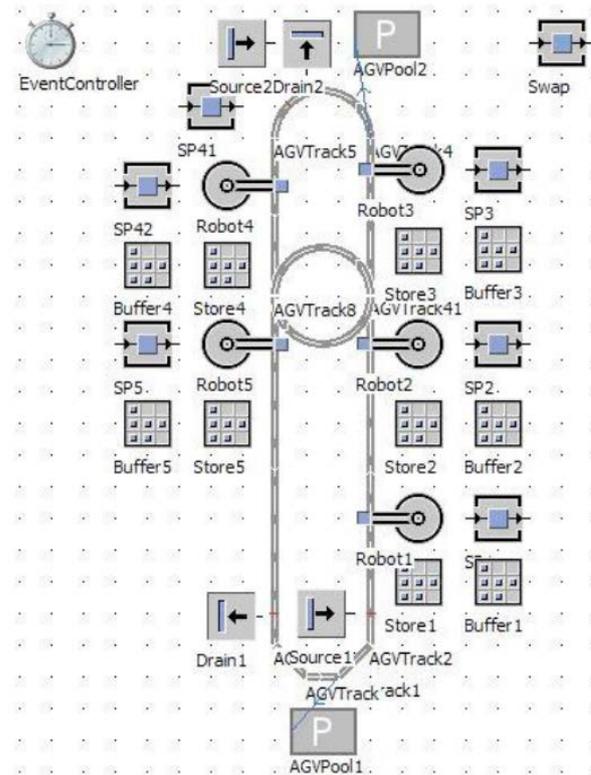


Abbildung 4: Modell einer automatisierten Montageanlage abgebildet in Plant Simulation [Vih-2018]

Lienert stellt eine Methodik zur simulationsbasierten Durchsatzanalyse FTF-basierter Kommissioniersysteme vor. Ziel der Methodik ist das Modellieren unterschiedlicher Systemtypen von FTF-basierten Kommissioniersystemen, sodass eine einheitliche Abbildung in einer Simulationsumgebung ermöglicht wird. Weiterhin wird der Ansatz des zeitfensterbasierten Routings in der Methodik integriert. Als Simulationsumgebung verwendet Lienert die Software Plant Simulation, um die Durchsatzanalyse durchzuführen. [Lie-2021]

3.2.2 Simulation mit openTCS

Die Open-Source-Software openTCS wird vom Fraunhofer-Institut für Materialfluss und Logistik in der Programmiersprache Java entwickelt. Sie bietet die Funktionalität, ein Wegenetz für FTF zu erstellen. Weiterhin können Transportaufträge erstellt werden, die dann entweder zufällig oder einem bestimmten FTF zugeordnet werden. Zusätzlich erlaubt openTCS die Integration verschiedener Arten von FTF über sogenannte Vehicle Driver, wodurch beliebige heterogene Fahrzeugsysteme gesteuert werden können. Über die Vehicle Driver können genauso virtuelle Fahrzeuge eingebunden werden, sodass die Steuerung ohne ein reales Materialflusssystem simulativ getestet werden kann. openTCS ist so gestaltet, dass Entwickler eigene Scheduling-Algorithmen über Interfaces hinzufügen können. [ope-2022b, ope-2022a]

Abbildung 5 zeigt exemplarisch den Operations Desk der Software openTCS. Auf diesem ist das Wegenetz mit vier FTF und mehreren Aufnahme- und Abgabestationen abgebildet. Weiterhin bietet openTCS die Möglichkeit Aufladestationen zu simulieren, die angefahren werden müssen, wenn ein FTF einen kritischen Batterieladezustand erreicht.

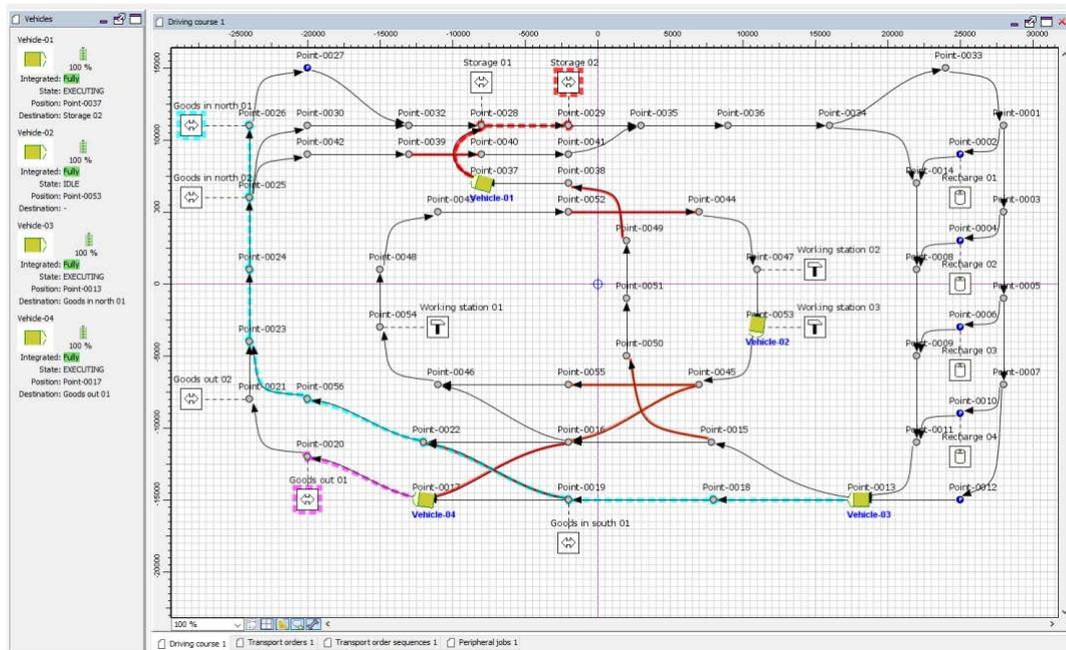


Abbildung 5: Operations Desk von openTCS mit exemplarischem Wegenetz sowie Fahrzeugen (gelb) und ihren Routen (verschiedene Farben, gestrichelt)

Wißing et al. kombinieren die Software openTCS mit einem selbstentwickelten Control Framework für omnidirektionale FTF. Hierbei wird die Grundfunktion des openTCS-Kernels genutzt, die es über Vehicle Driver erlaubt, eigene Fahrzeugfunktionen zu implementieren. In diesem Fall enthält der Vehicle-Driver die für den Informationsaustausch mit anderen Netzwerkpartnern notwendigen Funktionen wie die TCP-Kommunikation. [Wiß-2014]

3.2 Simulation heterogener Transportsysteme

In Abbildung 6 wird der Aufbau der Systemarchitektur nach Wißing et al. veranschaulicht. Zunächst werden neue Transportaufträge beispielweise über SAP, PPS oder LVS empfangen. Diese werden dann über den openTCS-Kernel automatisch an die FTF zugewiesen. Die Zuweisung von Transportaufträgen kann konfiguriert werden. Jedes FTF wird über eine Vehicle-Driver-Instanz repräsentiert. Der Map-Manager bildet die Kontrollebene, da dieser über TCP-Kommunikation alle FTF-Informationen, wie beispielsweise Hindernisse oder Fahraufträge erhält. Das Fahren der FTS wird über den Map-Manager kontrolliert, während die Positionsdaten über den Vehicle-Driver an den Kernel weitergeleitet werden.

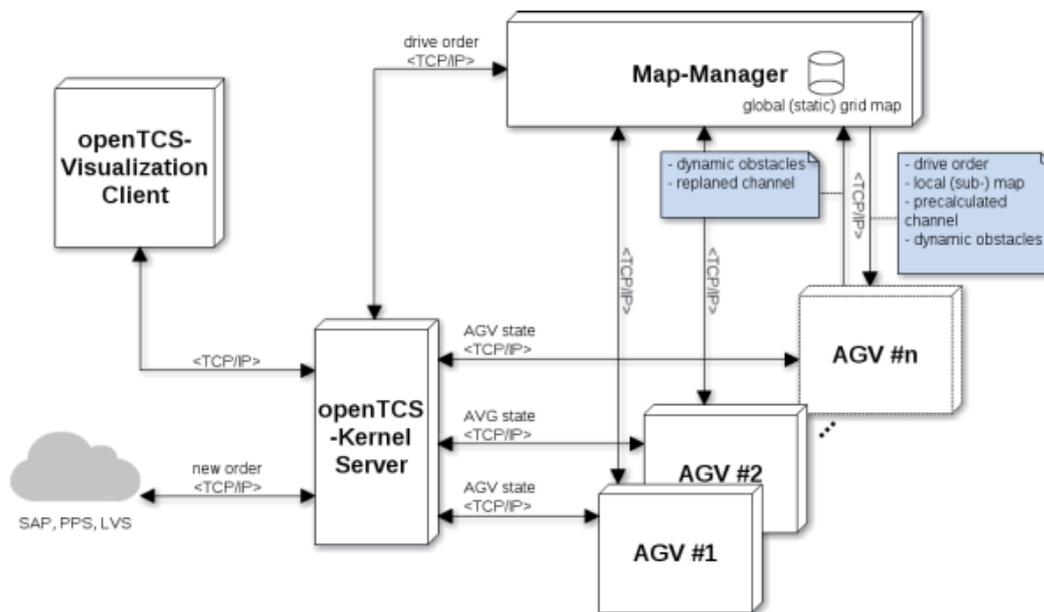


Abbildung 6: Systemarchitektur der Kombination von openTCS mit dem Control Framework [Wiß-2014]

Eine andere Anwendungsmöglichkeit von openTCS wird durch Ai et al. präsentiert. Hier wird openTCS mit dem Kommunikationsprotokoll MQTT kombiniert. Das MQTT-Protokoll dient in diesem Fall als Kommunikationsmittel zwischen einer Station und dem Transporter. openTCS wird als Instanz für die Weiterverarbeitung von Transportaufträgen verwendet. Die Erstellung von Transportaufträgen wird über andere Services wie ERP, MES oder andere Systeme gehandhabt. Der Operations Desk von openTCS dient als visuelle Übersicht der Map. [Ai-2021]

Abbildung 7 zeigt den Systemaufbau dieser Anwendung, wobei hier ersichtlich wird, dass das Gesamtsystem um den MQTT-Server herum aufgebaut ist. Dieser dient als zentrale Einheit. Diese Anwendung ist speziell für Cloud-Architekturen geeignet und zielt auf die Nutzung der 5G-Mobilfunktechnologie ab.

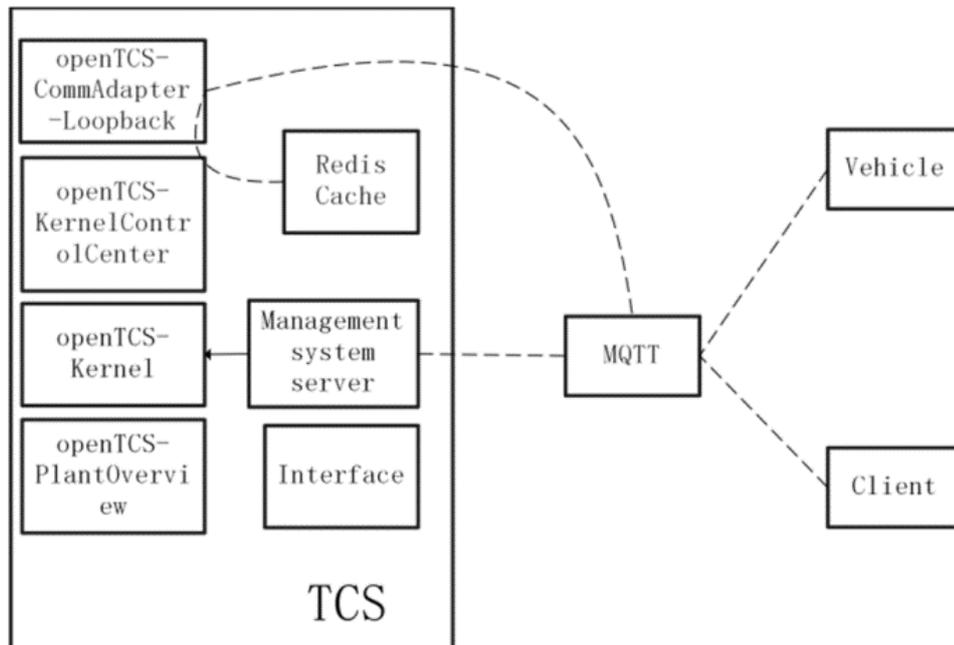


Abbildung 7: Systemaufbau mit openTCS (vier Blöcke in der linken Spalte), Fahrzeugen (rechts) und der Vernetzung mittels MQTT [Ai-2021]

4 Vision einer neuartigen kaskadierten Steuerungsstruktur

Wie im vorangegangenen Kapitel aufgezeigt wurde, gibt es keinen wissenschaftlich belegten Ansatz, mehrere Flotten mobiler Transportroboter mit geringem Aufwand in der Schnittstellenanpassung gemeinsam und effizient zu steuern. Derzeit herrschen zentralisierte Transportsysteme vor, die einen Anschluss weiterer Fahrzeuge nur nach eng definierten Kommunikationsrichtlinien erlauben. Dezentral gesteuerte Systeme erfordern neben umfangreichen Schnittstellen zusätzlich eine auf allen Fahrzeugen gleich geartete Logik zur Kooperation und können daher die in Abschnitt 1.1 formulierte Problemstellung ebenfalls nicht lösen.

Im Folgenden wird daher ein neuartiger Ansatz zur Steuerung heterogener Transportsysteme vorgestellt, der verschiedene Elemente bestehender Ansätze kombiniert und dadurch die Effizienz in Implementierung und Betrieb erhöhen soll. Die Steuerung basiert auf einem koordinierenden Element. Die Unterschiede des Ansatzes zu bestehenden Lösungen werden anschließend dargelegt.

4.1 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.

4.1 Architektur des Flottenverbunds mit Systemkoordinator

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 8 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 gegebenen-

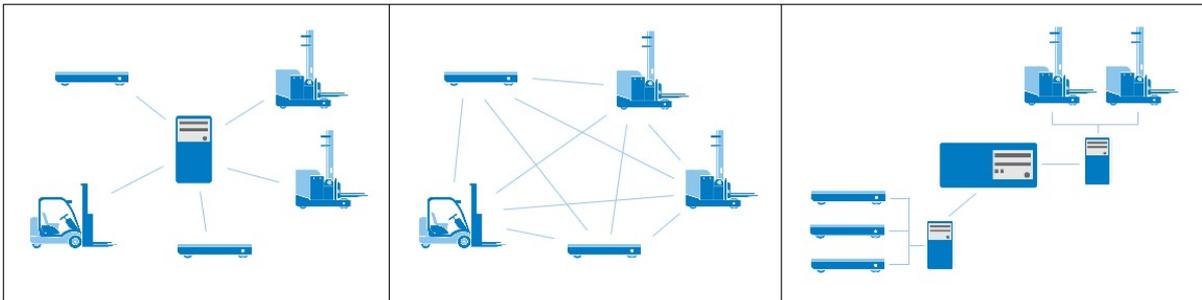


Abbildung 8: Verschiedene Steuerungsarchitekturen in Transportsystemen. Links ein klassisches, zentral gesteuertes Transportsystem, mittig ein dezentral gesteuertes Transportsystem, rechts der koordinative Steuerungsansatz

falls 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.

4.2 Vergleich mit bestehenden Ansätzen

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- bzw. 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-4451a].
- 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 auktionenbasierte Algorithmen relevant. Letztere finden sich insbesondere bei dezentral organisierten Fahrerlosen Transportsystemen [Ryc-2020].

5 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.

5.1 Grundfunktionalität

Empfängt der Systemkoordinator einen Transportauftrag, werden vier Schritte durchlaufen. Sie sind in Abbildung 6 veranschaulicht.

5.1.1 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.

5.1.2 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.

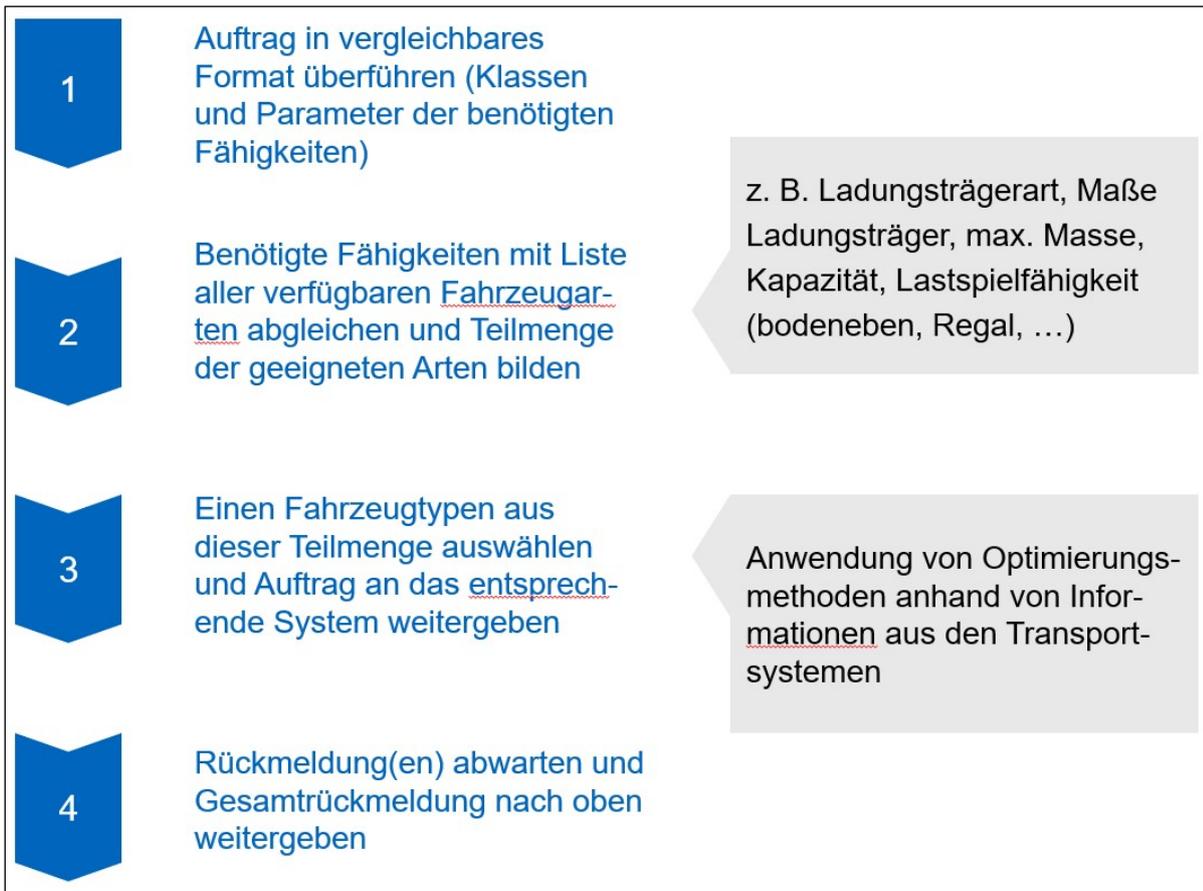


Abbildung 9: Vier durchzuführende Schritte beim Eingang eines Transportauftrags im Koordinator

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.

5.1.3 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 5.2 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 5.3 vorgestellt.

5.1.4 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.

5.2 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,

mdie sich direkt auf die Zeit und damit auf die Wirtschaftlichkeit auswirken, von über-
ragender Bedeutung sind. Daher wurde die Gestaltung des ausführlichen Kennzah-
lensystem nicht weitergeführt. Stattdessen wurde mit den in Abschnitt 1.2 bereits ge-
nannten Parametern gearbeitet, um die Güte der Transportauftragsverteilung zu mes-
sen.

5.3 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 Kom-
binationen aus Optimierungsmethoden und Informationsgehalten sind beschränkt. Um
die zentrale Frage des Forschungsprojekts nach der Gestaltung der Schnittstellen zwi-
schen Leitsteuerungen und Koordinator beantworten zu können, müssen verschie-
dene 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 Gegeben-
heiten 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.).

5.4 Ausprägung 1: Nur Übermittlung von Transportaufträgen und -rückmeldungen

Auf Basis dieser vier Klassen wurden mehrere Ausprägungen des Koordinators entwickelt, die auf die jeweils verfügbaren Informationen zurückgreifen. Ihr Zusammenhang ist in Abbildung 10 dargestellt. Sie werden in den folgenden Abschnitten vorgestellt.

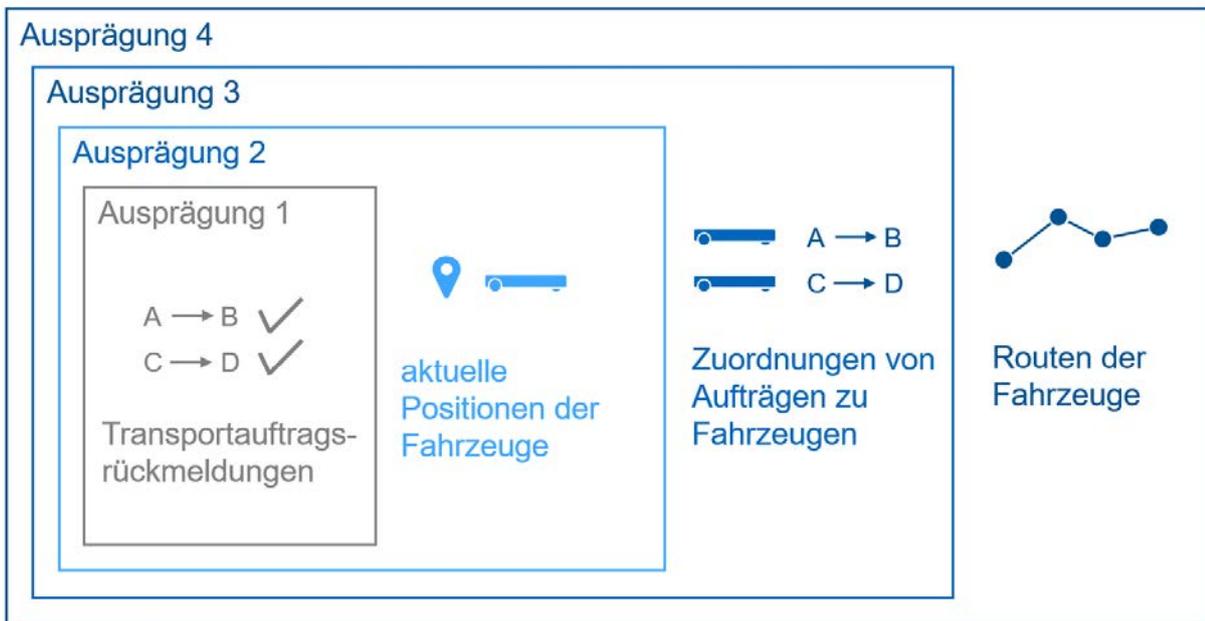


Abbildung 10: Zusammenhang der aufeinander aufbauenden Ausprägungen des Koordinators

5.4 Ausprägung 1: Nur Übermittlung von Transportaufträgen und -rückmeldungen

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

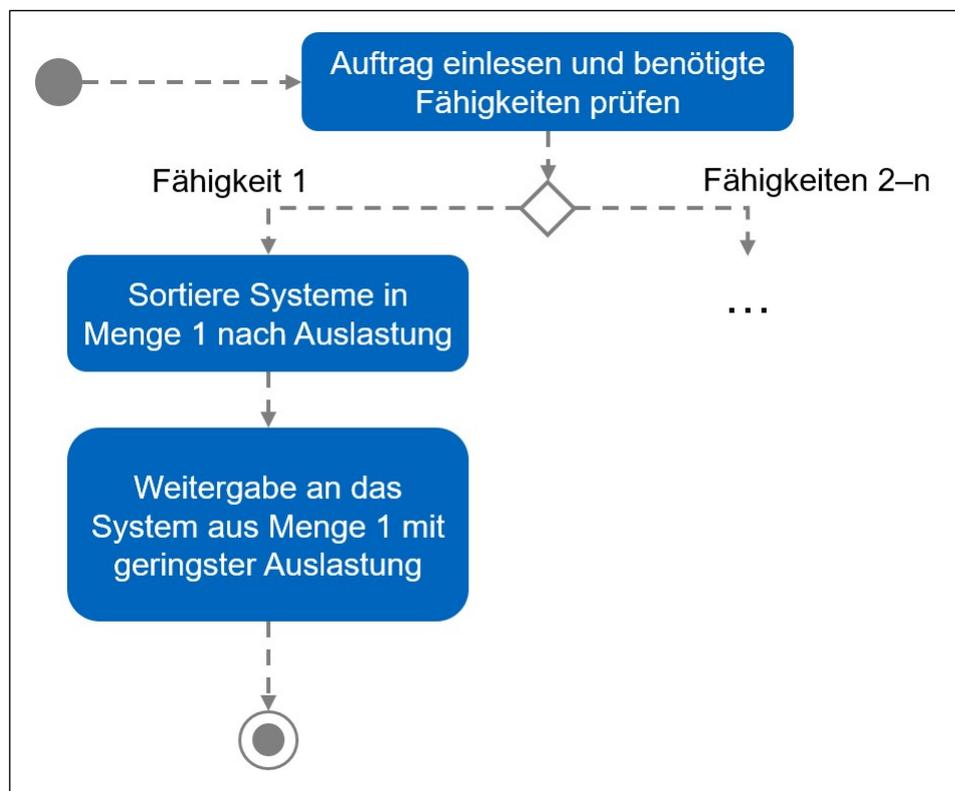


Abbildung 11: Vorgehen des Koordinators zur Transportauftragsverteilung bei kleiner Informationsbasis

stets an das System vergeben, das die geringste Auslastung aufweist. In Abbildung 11 wird das Vorgehen des 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.

5.5 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 kann die Übertragung auch vom Koordinator im Bedarfsfall initiiert werden. Diese Variante ist in Abbildung 12 dargestellt. Hier werden die drei 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.

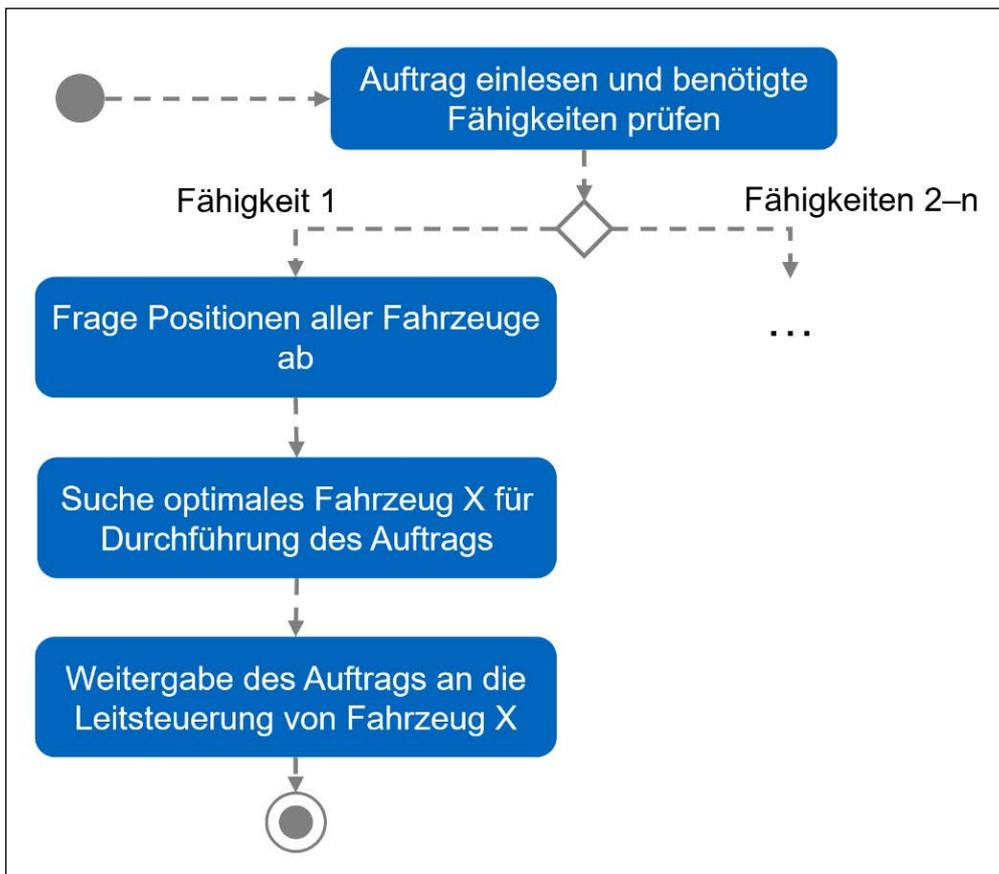


Abbildung 12: Vorgehen des Systemkoordinators zur Transportauftragsverteilung bei Verfügbarkeit der Fahrzeugpositionen. Der Schritt der Positionsabfrage ist optional, sofern die Subsysteme die Positionen automatisch übertragen

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.

5.6 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.

5.7 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 13 ist der grundlegende Ablauf des Verteilalgorithmus dieser Koordinator-Ausprägung dargestellt. Es wird deutlich, dass der Koordinator nun eine eigene Re-

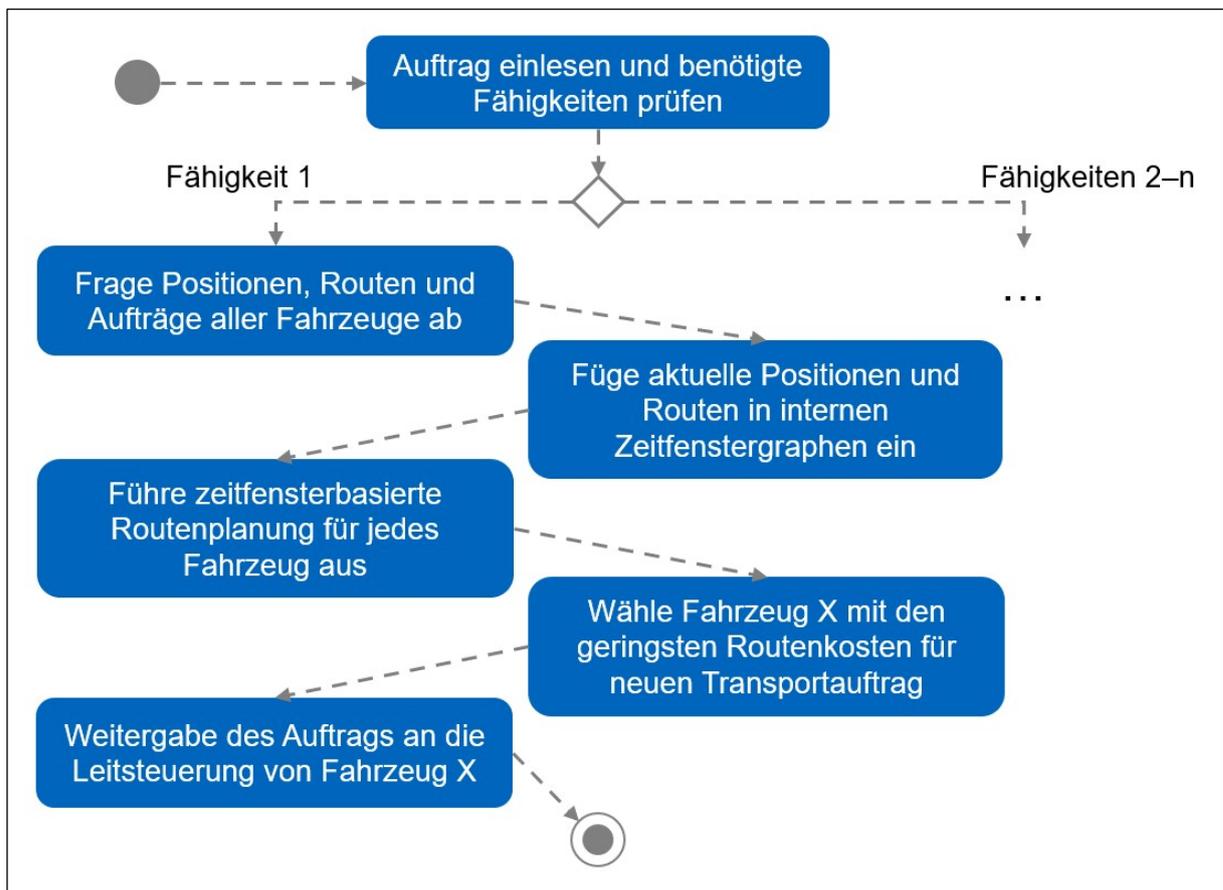


Abbildung 13: Vorgehen des Systemkoordinators zur Transportauftragsverteilung bei Verfügbarkeit der Routen der Fahrzeuge. Neue Routen werden zwischen den bestehenden hindurchgeplant

präsentation 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.

5.7 Ausprägung 4: Zusätzlich Übermittlung von Routen

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.

6 Versuchsaufbau zur vergleichenden Analyse der Koordinator-Ausprägungen

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.

6.1 Architektur und Kommunikationswege

In Abbildung 14 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.

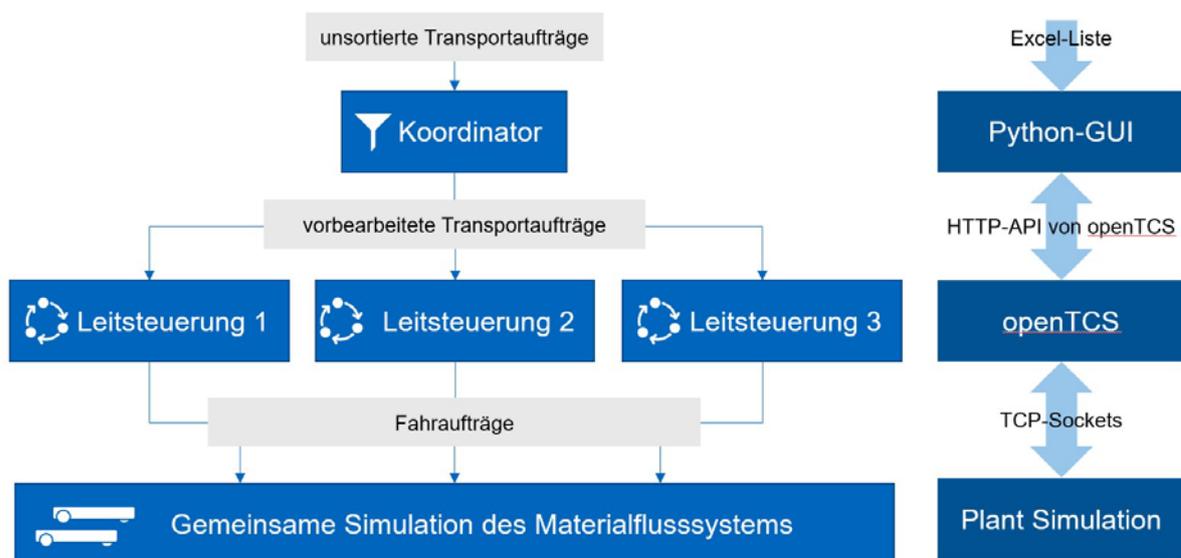


Abbildung 14: Schema des Versuchsaufbaus zur Durchführung von Simulationen. Links die Softwarekomponenten und Kommunikationsinhalte, rechts die technische Umsetzung

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 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 14 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

6.2 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 15 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 Drop-down-Menü mit verschiedenen Optimierungsalgorithmen, wie sie in Abschnitt 5.6 vorgestellt wurden. Der eingestellte Optimierungsalgorithmus wird während des Simulationslaufs auf die Aufträge aus der Liste angewendet, die nacheinander mit gestreutem Zeitabstand aktiv werden.

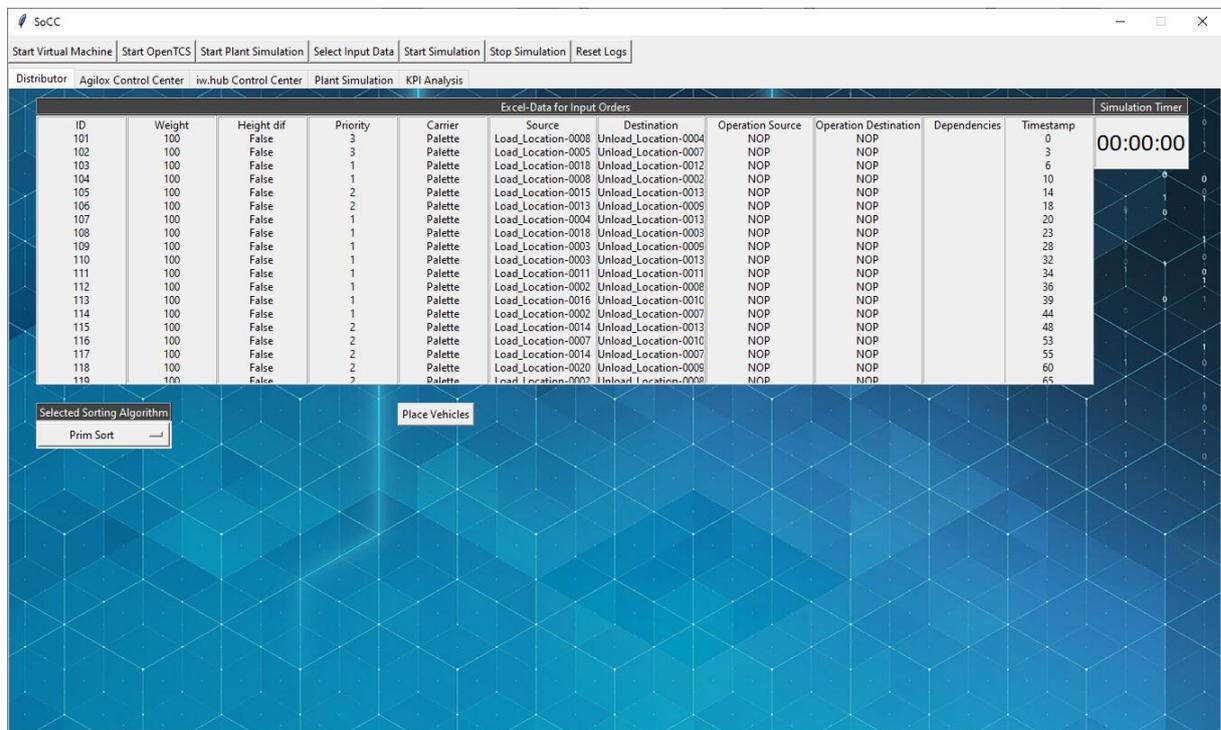


Abbildung 15: Hauptfenster des Koordinators mit Steuerelementen für die Handhabung des Prüfstands sowie der Verteilalgorithmen

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

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

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.

6.2.1 Implementierung der Verteilalgorithmen

Die Algorithmen zur Weiterverteilung der Transportaufträge an die Subsysteme sind entsprechend der grundsätzlichen Abläufe, welche in Kapitel 5 beschrieben wurden, umgesetzt. Es werden die jeweils benötigten Informationen gesammelt und darauf basierend die eingehenden Transportaufträge einzeln beurteilt und über die Web-API an die openTCS-Instanz des ausgewählten virtuellen FTS weitergeleitet. Im Falle der Berücksichtigung von Routen entsprechend der Ausprägung 4 (siehe Abschnitt 5.7) ist dieser Ablauf deutlich komplexer, daher wird er im Folgenden näher beschrieben.

Zur Routenfindung und damit auch zur Fahrzeugsystemauswahl für neu eingehende Transportaufträge wird der zeitfensterbasierte Ansatz herangezogen. Vorteil dieses Ansatzes ist, wie bereits in Abschnitt 5.7 erläutert, die höhere Effizienz durch eine größere Auslastung des Map-Layouts. Damit können Kollisionen und Deadlocks gezielt vermieden werden. Die Ausführung des zeitfensterbasierten Ansatzes sieht wie folgt aus:

In Abbildung 28 (siehe 8.2Anhang A) ist dargestellt, wie der entwickelte zeitfensterbasierte Routenfindungsmechanismus ausgeführt wird. Zunächst wird in der Initialisierung der Zeitfenstergraph erstellt, in dem alle Knoten des Wegenetzes hinterlegt sind. Fahrzeuge, die durch die initiale Platzierung bereits Knoten besetzen, werden im Zeitfenstergraph eingetragen. Anschließend erfolgt die Ausführung des ersten Transportauftrags.

Für die Zuweisung des ersten Transportauftrags an ein FTF wird zunächst die Verfügbarkeit aller FTF geprüft. Danach wird nach dem Kriterium der Zeitoptimierung das am besten geeignete Fahrzeug ausgewählt. Im letzten Schritt wird die Routingfähigkeit des FTF geprüft, indem zunächst berechnet wird, zu welchen Zeiten welche Knotenpunkte durch das FTS besetzt sein werden.

Im Folgeschritt wird die Berechnung mit den Belegungen im Zeitfenstergraphen verglichen und abhängig von auftauchenden Überschneidungen der Zeitfenster die Entscheidung über das Einreihen des Auftrags in einer Queue getroffen. Andernfalls wird der Transportauftrag an das Steuerungssystem des

ausgewählten Fahrzeugs geschickt und die berechneten Knotenbelegungen im Zeitfenstergraphen eingetragen.

Wurde der Transportauftrag geschickt, erfolgt die Überprüfung, ob die Simulation beendet wurde. Ist dies der Fall, so wird das Programm beendet. Andernfalls wird geprüft, ob der Auftrag aus einer Queue kommt. Wenn es sich nicht um einen Queue-Auftrag handelt, wird ein Timer gestartet. Dieser wird nach einem Ablauf von drei Sekunden gestoppt. Nach dem Stopp des Timers wird der nächste Transportauftrag ausgeführt.

Sobald ein Transportauftrag in eine Queue geschickt wird, weil er zu dem aktuellen Zeitpunkt nicht ausgeführt werden kann, wird in der dreisekündigen Pause die Queue abgearbeitet. Aufträge aus einer Queue beeinflussen den Timer nicht.

6.2.2 Mechanismus zur Dokumentation der Simulationen

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.

6.3 Umsetzung der Leitsteuerungen

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

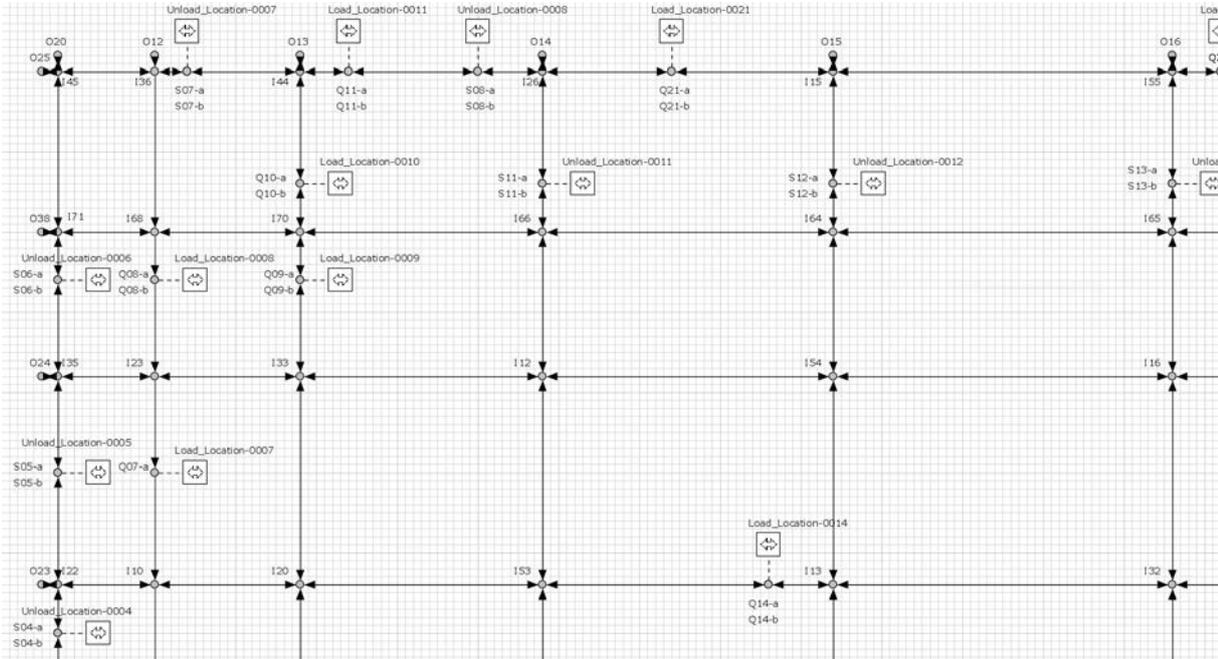


Abbildung 16: Ausschnitt des verwendeten exemplarischen Transportnetzes, modelliert in der Leitsteuerungssoftware openTCS. Sichtbar sind Kreuzungen, Fahrwege sowie Aufnahme- und Abgabestellen

gewählt. 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

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

eine Klasseninstanz angelegt, die 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 17 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

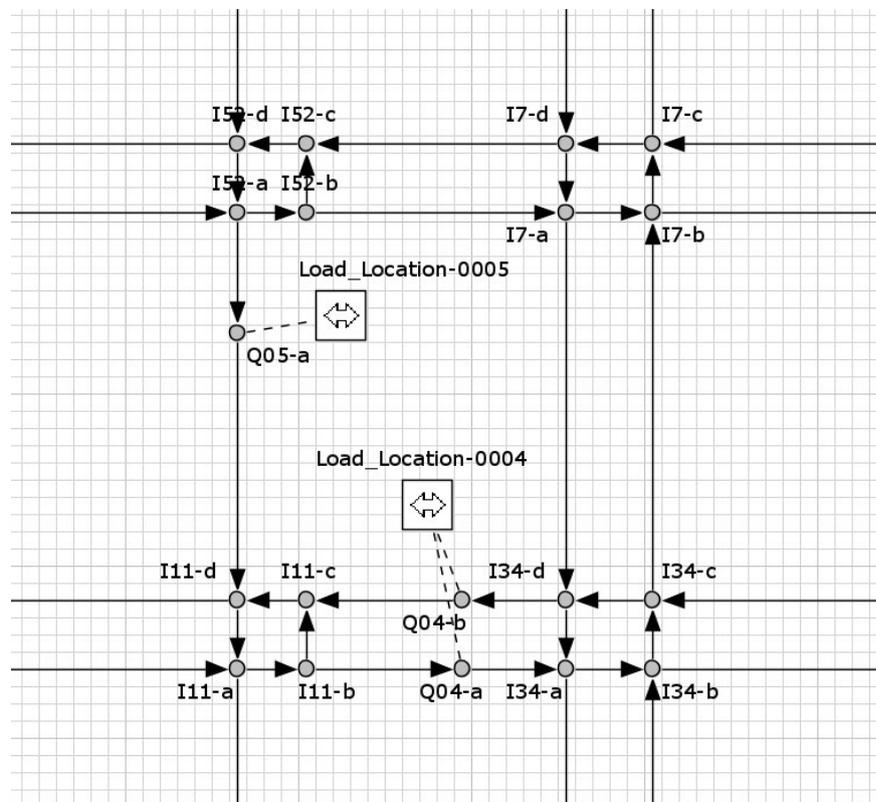


Abbildung 17: Detail der Kreuzungsmodellierung in openTCS. Es gibt 4 Subpunkte, die gegen den Uhrzeigersinn miteinander verbunden sind

6.3 Umsetzung der Leitsteuerungen

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 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 18 ist ein Layout-Ausschnitt mit mehreren Fahrzeugen und ihren von der Leitsteuerung geplanten Routen dargestellt.

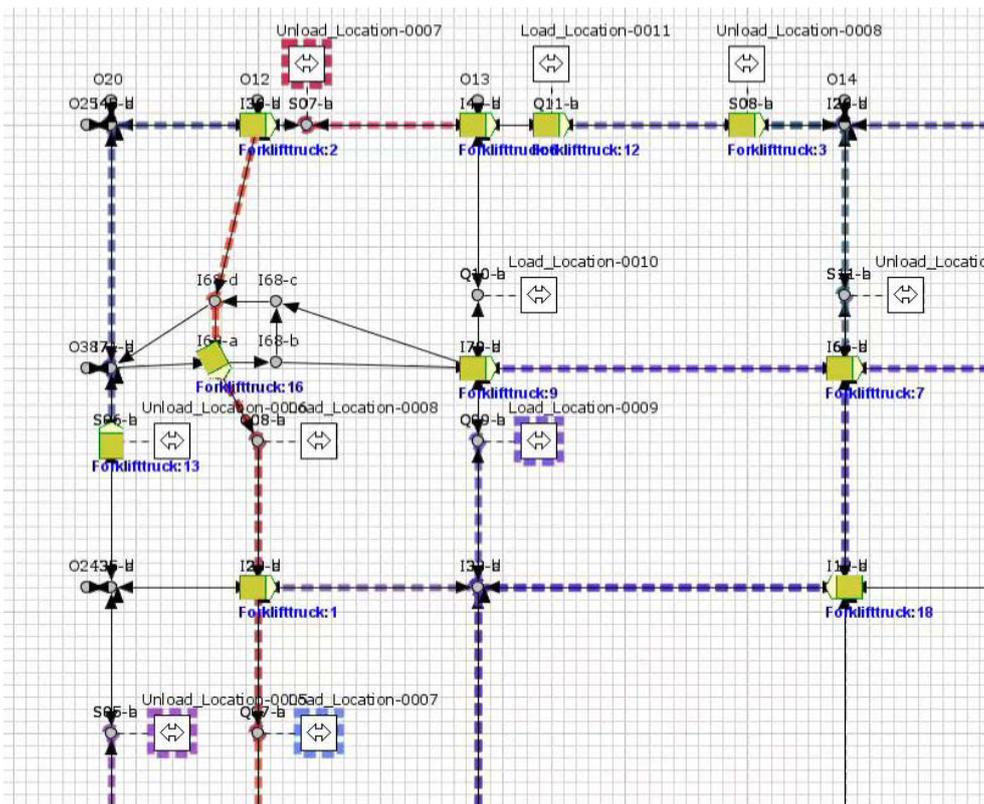


Abbildung 18: Layoutausschnitt aus openTCS mit mehreren Transportfahrzeugen und ihren geplanten Routen (farbig, gestrichelt)

Das korrekte Abfahren der Abfolgen von Knoten wird durch die Leitsteuerung anhand der Positionsrückmeldungen des Fahrzeugs überwacht. Wird eine andere Route

6 Versuchsaufbau zur vergleichenden Analyse der Koordinator-Ausprägungen

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.

6.4 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 Lay-

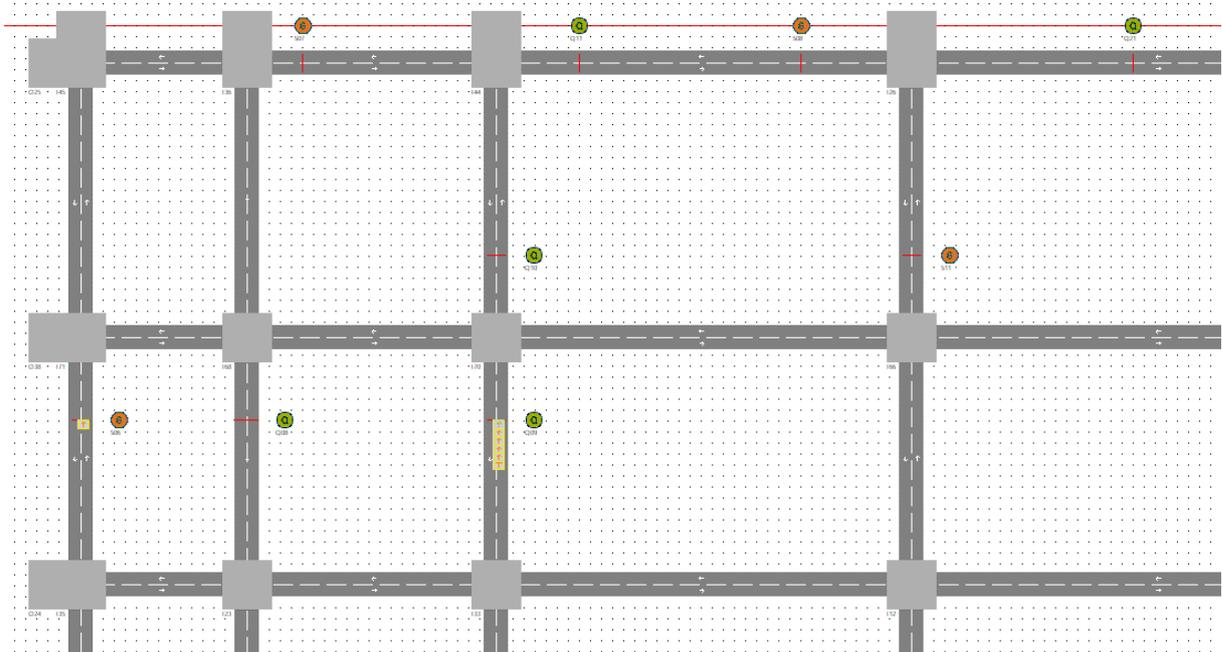


Abbildung 19: Ausschnitt des verwendeten exemplarischen Transportnetzes, modelliert in der Software Siemens Plant Simulation. Sichtbar sind Kreuzungen (hellgrau), Fahrwege (dunkelgrau), Aufnahme- und Abgabepunkte (grün/orange) sowie Fahrzeuge (gelb)

outs angeschlossen werden, gleichzeitig kann der vorliegende Versuchsaufbau von Simulationsexperten leicht nachvollzogen werden.

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 19 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 20 zu sehen ist.

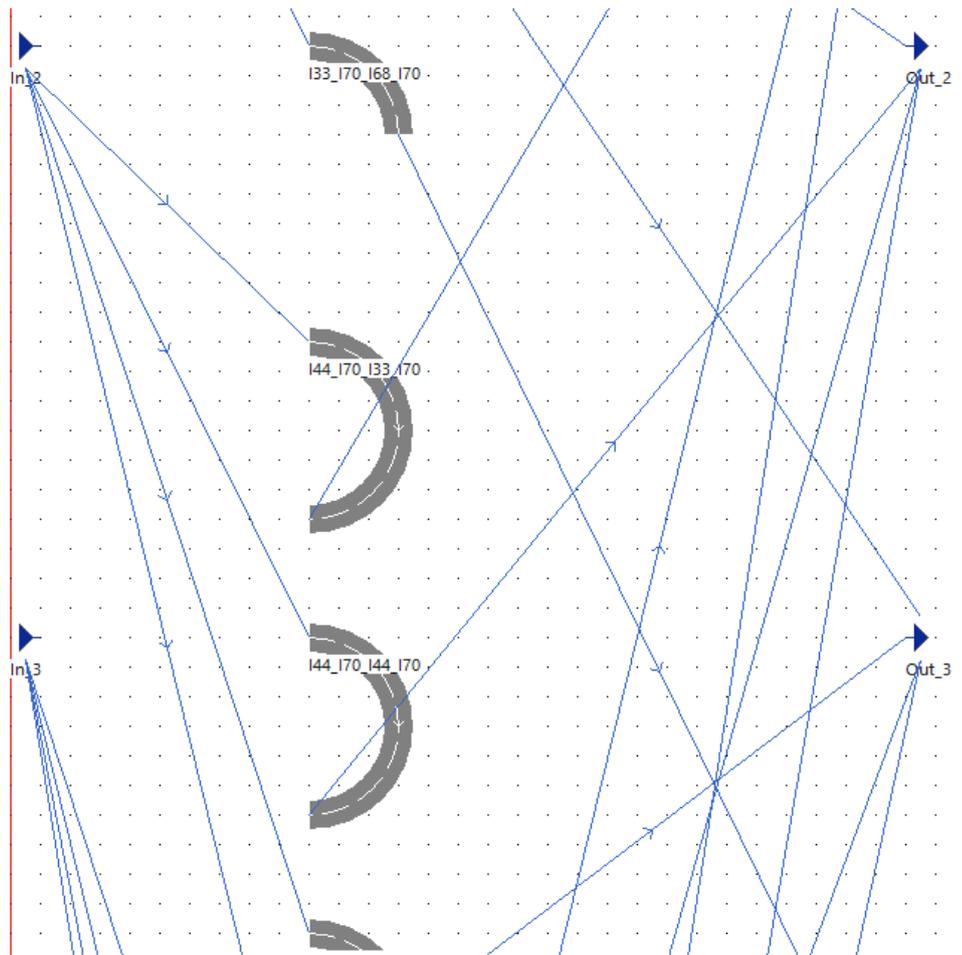


Abbildung 20: Detail der Modellierung einer Kreuzung in Plant Simulation. Jedes Kurvenelement kennzeichnet eine Abbiegerelation

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.

6.5 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 EPoS SysKo 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 Materialflusssystemes 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.

7 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.

7.1 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.

7.1.1 Layout:

Als Referenzlayout wird eine große Lagereinrichtung eines Automobilherstellers gewählt. Darin sind mehrere Lagersysteme kombiniert. Teilweise werden die Lagerbereiche manuell mit Gabelstaplern bedient, anderenteils automatisch mit Regalbediengeräten. Der für die Simulation relevante Teil des Materialflusssystemes 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.

7.2 Verwendete Konfigurationen des Systemkoordinators

- Es werden drei 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	Anz. Fahrzeuge
Fahrerloses Transportsystem 1	1 m/s	12
Gabelstaplerflotte mit zentralem Leitsystem	2 m/s	12
Fahrerloses Transportsystem 2	1,5 m/s	6

7.1.2 Randbedingungen der Simulation:

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

- Die **Simulationsdauer** wurde auf 4 Stunden festgelegt. Dies entspricht der Hälfte einer Schicht, die sich im Dauerbetrieb dreimal pro Tag wiederholt. Unregelmäßigkeiten innerhalb einer Schicht sollten ausreichend abgebildet sein.
- 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.

7.2 Verwendete Konfigurationen des Systemkoordinators

Vier Konfiguration des Systemkoordinators wurden für die Evaluierung ausgewählt und implementiert: Neben einer Referenzkonfiguration wurden zwei Varianten der Zuordnung von Aufträgen zu Fahrzeugen sowie die Routen aller Fahrzeuge als Informationsbestände herangezogen. Die vier Konfigurationen werden im Folgenden näher beschrieben.

7.2.1 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 21 dargestellte Verhalten: Der Koordinator verteilt jeden eingehenden Transportauftrag nach dem Abgleich der benötigten und der be-

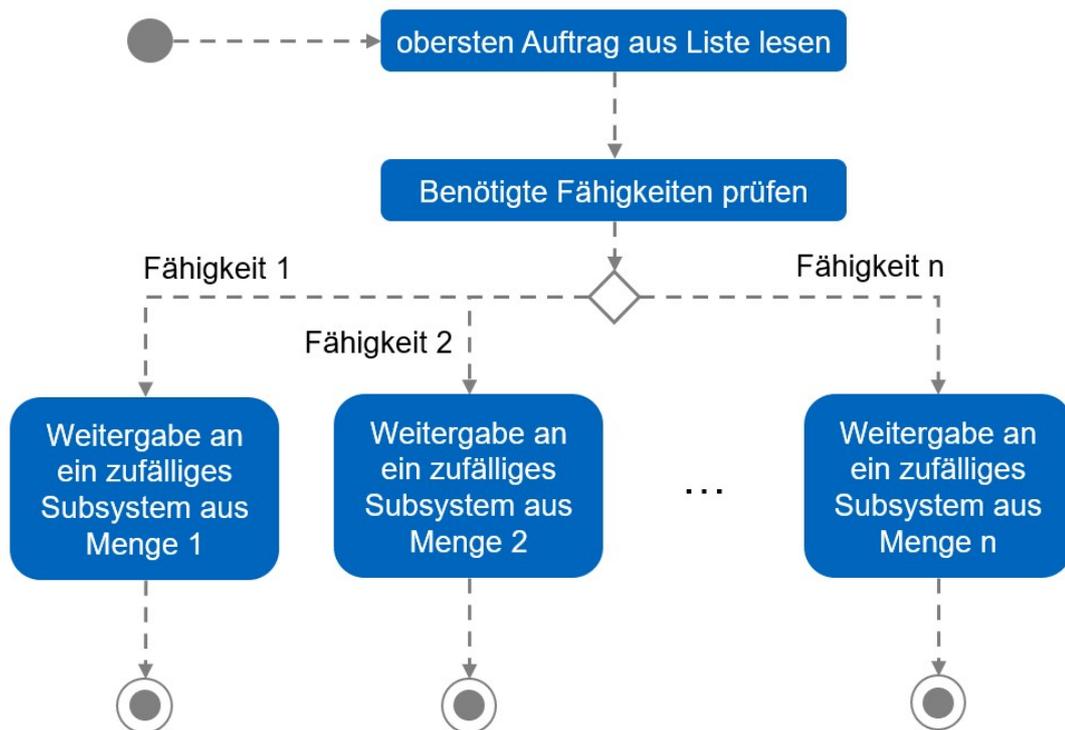


Abbildung 21: Programmablauf des Koordinators in der Referenzkonfiguration. Nach dem Fähigkeitsabgleich wird der Transportauftrag zufällig an ein Subsystem weitergegeben

reitgestellten Fähigkeiten sofort und zufällig an eines der ihm zugeordneten Transportsysteme. Dieser Mechanismus wird im Folgenden auch als „Random Sort“ bezeichnet.

7.2.2 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.

7.2.3 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.

7.2.4 Ausprägung 4 (Kenntnis der Routen aller Fahrzeuge)

Diese Ausprägung erfordert am meisten Kommunikationsaufwand zwischen den Fahrzeugleitsteuerungen und dem Systemkoordinator, da nach jeder Auftragszuordnung an ein Fahrzeug die gewählte Route dem Koordinator mitgeteilt werden muss. Gleichzeitig ist der Rechenaufwand im Koordinator gegenüber den vorgenannten Ausprägungen deutlich erhöht, da viele mögliche Routenoptionen mit dem bestehenden

Zeitfenstergraphen abgeglichen werden müssen. Diese Ausbaustufe des Koordinators wird im Folgenden auch als „Timewindow Sort“ bezeichnet.

7.3 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 6.5 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.

7.4 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 die Koordinatorkonfigurationen 1 bis 3 gemessenen Werte der drei Größen nacheinander vorgestellt. Die vierte Konfiguration wird in einem angeschlossenen Abschnitt extra betrachtet und mit der Referenzkonfiguration verglichen, da die Simulationen in diesem Fall aufgrund technischer Probleme mit weniger Fahrzeugen durchgeführt werden mussten.

7.4.1 Entwicklung der Wartezeiten

In Abbildung 22 sind die Entwicklungen der Wartezeiten über die Simulationsdauer hinweg aufgetragen. 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.

7 Evaluierung des Koordinators mit ausgewählten Schnittstellenkonfigurationen

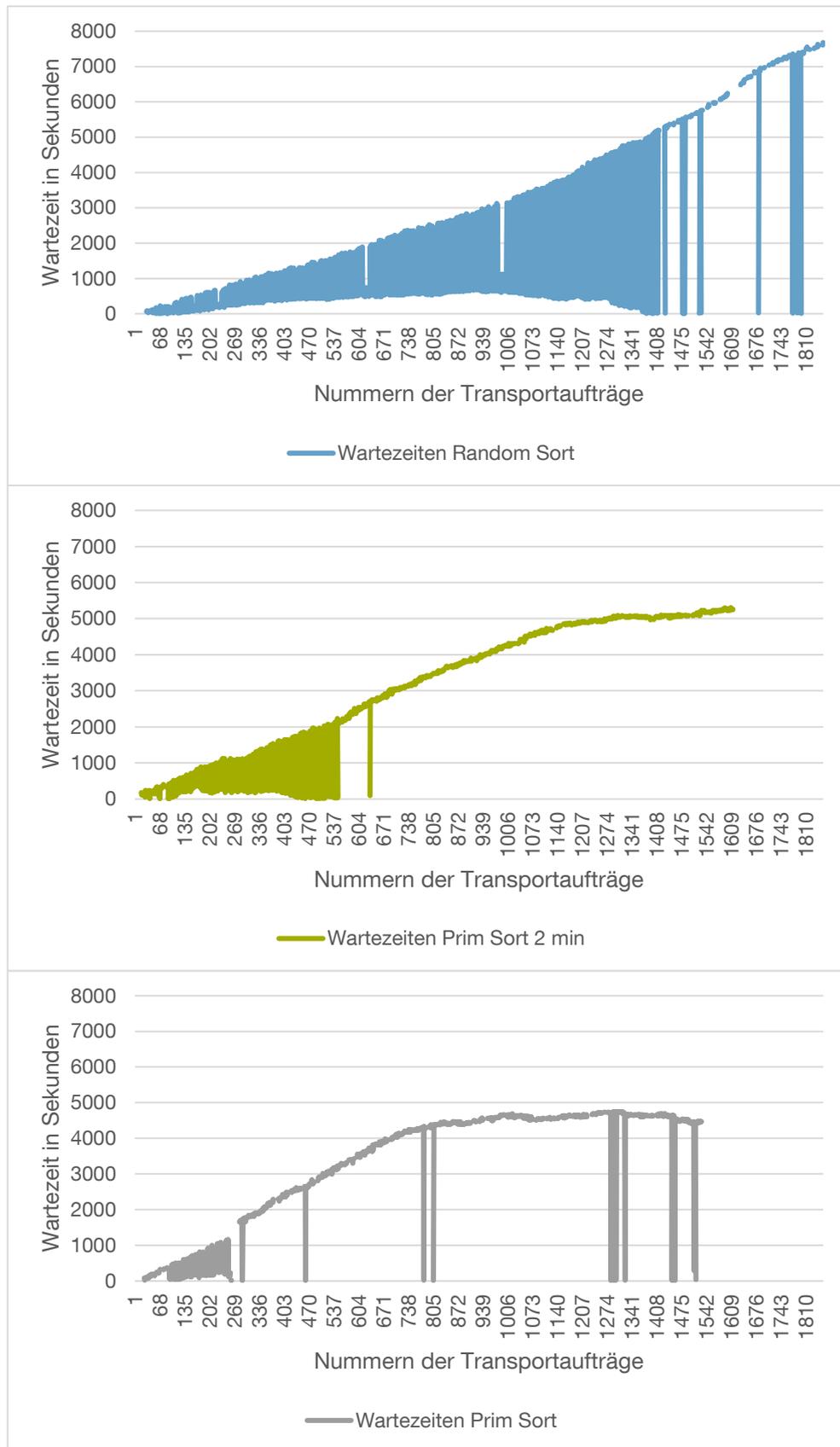


Abbildung 22: Diagramme der Entwicklungen der Wartezeiten nach Koordinatorkonfiguration (oben Referenzkonfiguration, mittig Konfiguration mit niedriger zeitlicher Informationsdichte, unten Konfiguration mit hoher Dichte)

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.

7.4.2 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 23 sind die Verteilungen grafisch veranschaulicht.

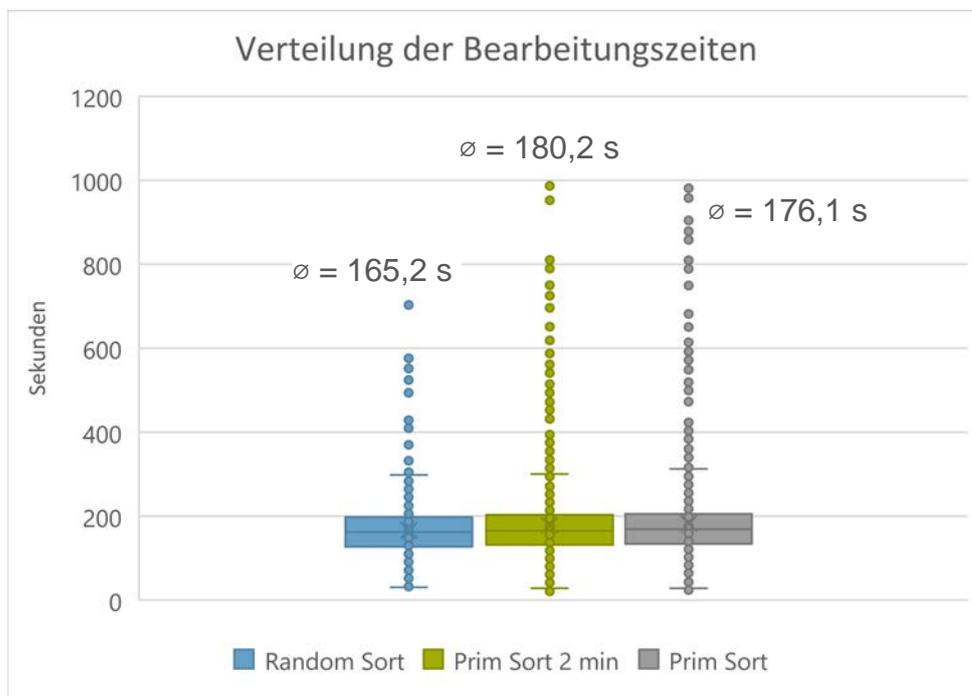


Abbildung 23: Diagramm mit Verteilungen der Bearbeitungszeiten der Transportaufträge, gegliedert nach Koordinatorkonfiguration

Es zeigt sich, dass die zufällige Auftragsweitergabe 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 Konfiguration erklären: Der Systemkoordinator vergibt Aufträge immer an das Transportsystem, 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 23 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.

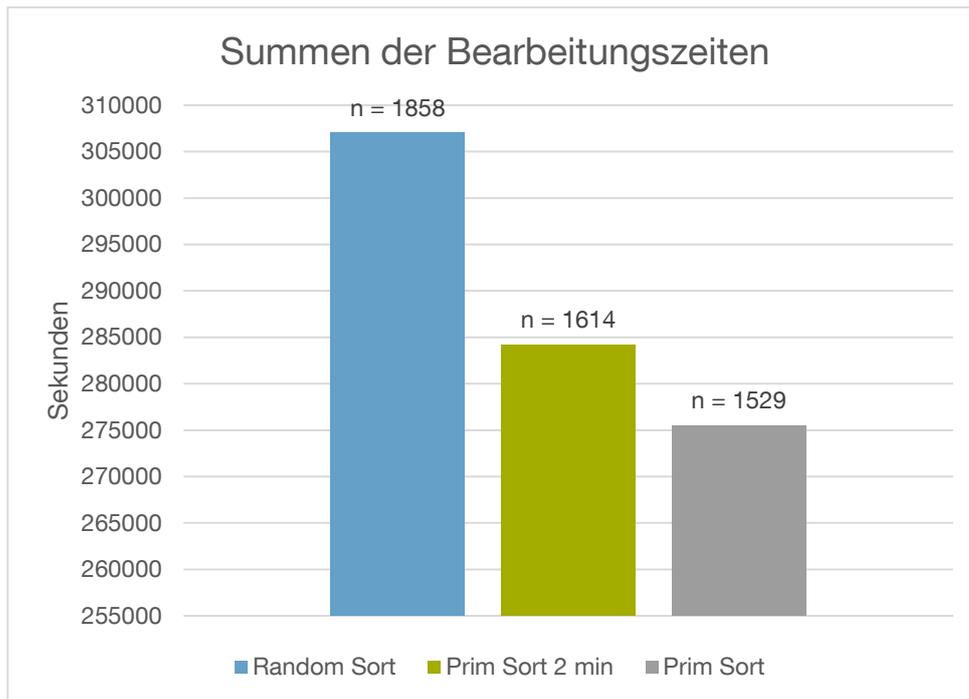


Abbildung 24: Diagramm mit Summen der Bearbeitungszeiten der Transportaufträge, gegliedert nach Koordinatorkonfiguration

7.4.3 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 24 zugrunde liegt, 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: $\frac{284194,6116 \text{ s}}{432.000 \text{ s}} = 65,8 \%$
- Konfiguration 3: $\frac{275486,9059 \text{ s}}{432.000 \text{ s}} = 63,8 \%$

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.

7.4.4 Vergleich von Konfiguration 4 mit der Referenzkonfiguration

In Abweichung von Tabelle 2 wurde für die Evaluierung des Systemkoordinators in Konfiguration 4, also mit Berücksichtigung bereits geplanter Routen, eine geringere Anzahl an Fahrzeugen gewählt. Es wurden die zwei in Tabelle 3 abgebildeten Fahrzeugkonstellationen herangezogen. Sie bestehen aus jeweils vier bzw. sechs Fahrzeugen der zwei Flotten „Fahrerloses Transportsystem 1“ und „Gabelstaplerflotte mit zentralem Leitsystem“. Diese Einschränkung des Umfangs ist der Komplexität der Routenplanung und dem daraus resultierenden Rechenaufwand des Koordinators geschuldet. Die weiteren Simulationsparameter blieben unverändert. Im Folgenden werden die Messergebnisse der Größen „Anzahl der durchgeführten Transportaufträge“ und „Bearbeitungszeiten“ präsentiert, welche sich in den vorherigen Versuchen als besonders bedeutsam herausgestellt haben.

Tabelle 3: Verwendete Transportsysteme und Fahrzeugzahlen bei Experimenten zur Untersuchung der Konfiguration 4 des Koordinators

Typ	Anzahl Fahrzeuge	
	Konstellation 1	Konstellation 2
Fahrerloses Transportsystem 1	4	6
Gabelstaplerflotte mit zentralem Leitsystem	4	6

Anzahl der erfüllten Aufträge

Zunächst wird untersucht, welche Anzahl an Transportaufträgen beendet wurde. Hierbei wurden jeweils drei Versuche nach Fahrzeugkonstellation 1 mit den Koordinator-konfigurationen zur routingbasierten und zur zufälligen Auftragsweitergabe durchgeführt. In Abbildung 25 oben werden die Ergebnisse miteinander verglichen. Es lassen sich deutliche Unterschiede im Auftragsdurchsatz erkennen. Die Verteilung mittels Random Sort erreicht im Durchschnitt 27 beendete Transportaufträge, während die

7.4 Ergebnisse

Anwendung des zeitfensterbasierten Routingalgorithmus im Schnitt eine Anzahl von 108 beendeten Transportaufträgen erzielt.

Ein weiterer Versuchsdurchlauf erfolgt mit der Fahrzeugkonstellation 2. Der Einsatz von zwölf FTF verändert den Auftragsdurchsatz deutlich, siehe Abbildung 25 unten. Der Random-Sort-Algorithmus erreicht in dieser Konstellation einen durchschnittlichen

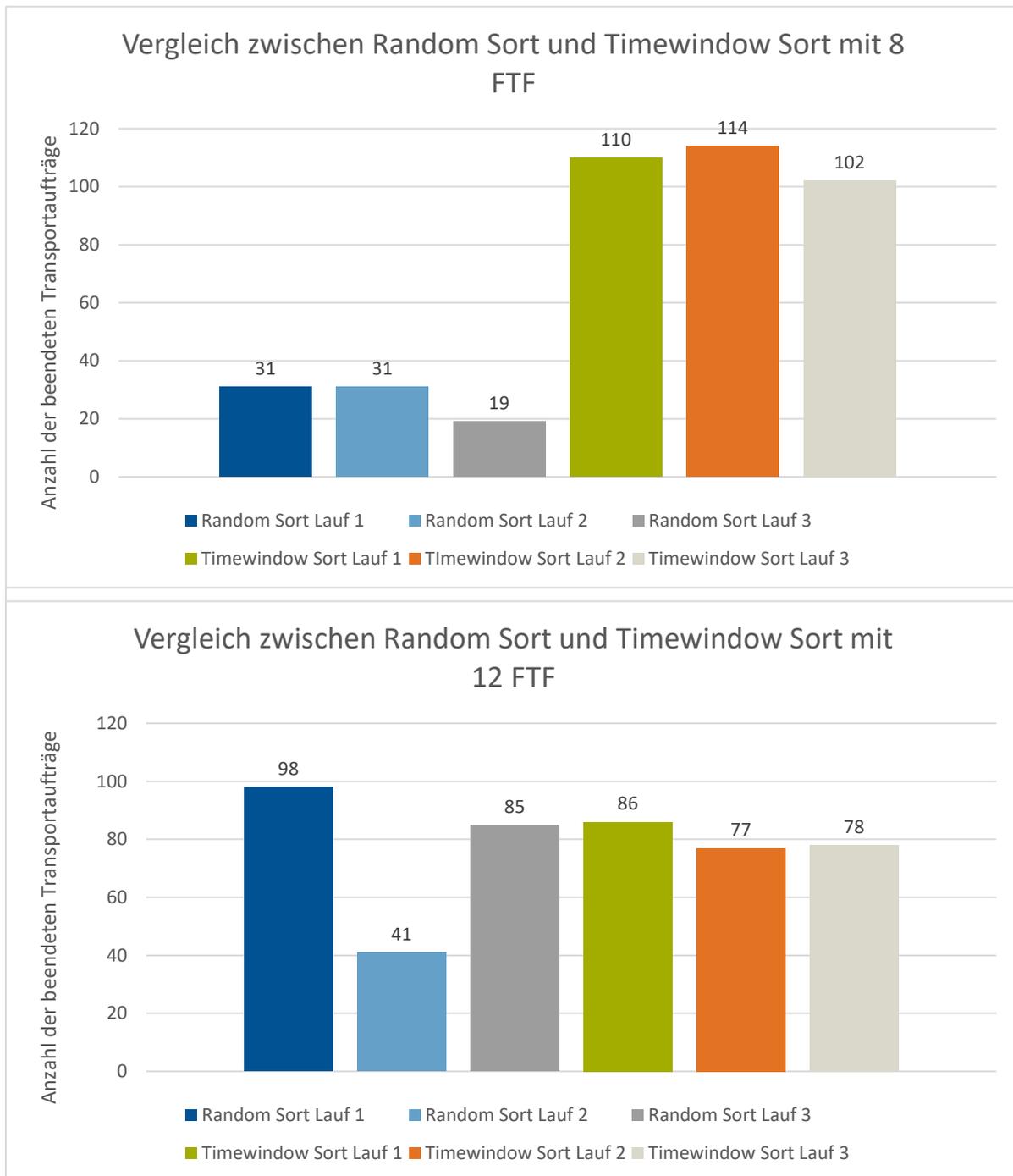


Abbildung 25: Diagramme mit Anzahlen durchgeführter Transportaufträge in Fahrzeugkonstellation 1 (oben) und 2 (unten), aufgeschlüsselt nach jeweils drei Versuchsläufen mit zufälliger und zeitfensterbasierter Auftragsweitergabe

Auftragsdurchsatz von 74, während der Timewindow-Sort-Algorithmus einen Durchschnitt von 80 erzielt.

Auffällig ist die höhere Varianz der Simulationsdurchläufe mit dem Random-Sort-Algorithmus, wie an den Unterschieden der Balkenhöhen in Abbildung 25 zu erkennen ist. In der Versuchsdurchführung fällt auf, dass die FTF-Positionen in Plant Simulation und openTCS häufig nicht übereinstimmen. Dies liegt daran, dass in openTCS nur ein FTF einen Knoten besetzen kann. Dies hat zur Folge, dass eine Aneinanderreihung von FTF in openTCS abgebildet wird, wie in Abbildung 26 illustriert ist. Durch die asyn-

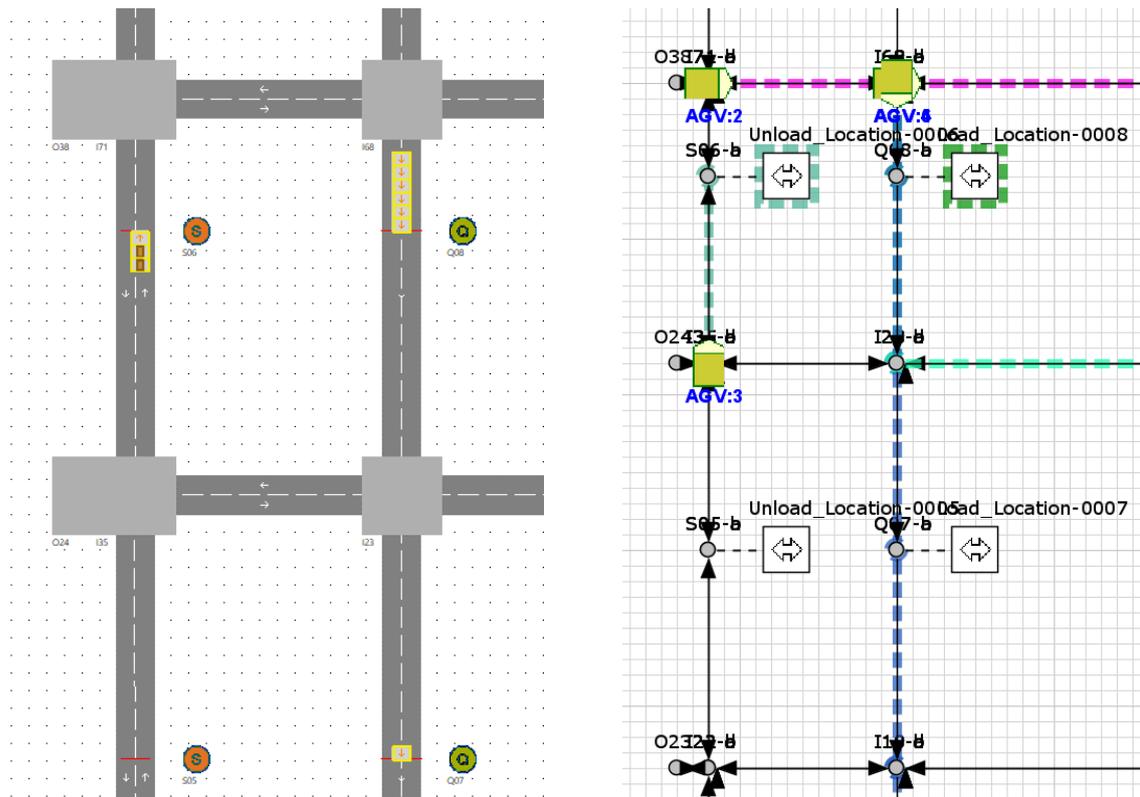


Abbildung 26: Asynchrone Fahrzeugpositionen in Plant Simulation und openTCS; in Plant Simulation (links) sind die Fahrzeuge bereits weiter gefahren als in der openTCS-Repräsentation (rechts)

chrone Darstellung der Fahrzeugpositionen zwischen Plant Simulation und openTCS kommt es zu erheblichen Problemen im Routing der FTF. In diesem Beispiel befindet sich laut Plant Simulation ein FTF in der Quelle *Load_Location-0008*, während das betroffene FTF in openTCS durch ein anderes FTF blockiert wird. Die Folge ist ein Deadlock, mit dem ein Aufstauen von FTF verursacht wird. Somit wird die Ausführung weiterer Transportaufträge verhindert. Der Timewindow-Sort-Algorithmus umgeht dieses Problem durch das zeitenfensterbasierte Planen der Routen der FTF. Die Situation von Blockaden wird präventiv vermieden, sodass eine möglichst störungsfreie Zuordnung an Transportaufträgen ermöglicht wird. Dies ist der Grund, warum die

Simulationsdurchläufe unter Verwendung des Timewindow-Sort-Algorithmus eine geringere Varianz haben.

Die Fahrzeugkonstellation 2 zeigt hingegen die Stärken des Random-Sort-Algorithmus. Während der Random-Sort-Algorithmus weiterhin das Problem des asynchronen Verhaltens zwischen Plant Simulation und openTCS erfährt, stehen mehr FTF zur Verfügung, die Transportaufträge ausführen können. Somit sinkt die Wahrscheinlichkeit eines vollständigen Stopps an der Durchführung der Transportaufträge. Weiterhin wird nach dem Random-Sort-Algorithmus einem zufälligen verfügbaren FTF ein Transportauftrag sofort zugewiesen. Dies ist bei der Verwendung des Timewindow-Sort-Algorithmus hingegen nicht der Fall. Der Nachteil des entwickelten Ansatzes liegt im erhöhten Aufwand der Zuweisung eines Transportauftrags. Zunächst wird im Timewindow-Sort-Algorithmus untersucht, welches FTF verfügbar ist und den kürzesten Weg zur nächsten Quelle hat. Ist anschließend das Kriterium Routingfähigkeit nicht erfüllt, so wird der Transportauftrag in eine Queue gesetzt. Somit ist dieses Routingverfahren speziell bei einer höheren Anzahl an FTF nach dem aktuellen Stand etwas weniger gut geeignet.

Verteilung der Bearbeitungszeiten

Weiterhin werden die Bearbeitungszeiten für die Ausführung der Transportaufträge untersucht. In Abbildung 27 ist jeweils ihr Durchschnitt (oben) und ihre Verteilung (unten) für die zwei Fahrzeugkonstellationen und zwei Koordinatorkonfigurationen abgebildet.

Es zeigt sich, dass die durchschnittliche Bearbeitungszeit bei der Anwendung des Random-Sort-Algorithmus mit zwölf FTF 74 Sekunden deutlich schlechter ausfällt als mit acht Fahrzeugen. Beide Ergebnisse sind schlechter als bei der Anwendung des zeitenfensterbasierten Verteilalgorithmus, wobei hier der Durchschnittswert bei zwölf Fahrzeugen geringfügig besser als bei acht Fahrzeugen ausfällt. Die Verteilung der Bearbeitungszeiten zeigt ein ähnliches Muster, ist jedoch zwischen zufälliger und zeitenfensterbasierter Auftragsweitergabe weniger unterschiedlich. Auffällig sind die Ausreißer in der Fahrzeugkonstellation 2 bei Anwendung des Timewindow-Sort-Algorithmus.

Die erhöhten Bearbeitungszeiten der nach dem Random-Sort-Algorithmus verteilten Transportaufträge lassen sich durch die zufällige Auftragszuordnung erklären. Zunächst erhält ein zufälliges FTF einen Transportauftrag. Hierbei wird zum einen die Entfernungen der geeigneten Fahrzeuge vom Auftrag und zum anderen die bereits geplanten Routen nicht berücksichtigt. Dies hat zur Folge, dass durch sich aufstauende Fahrzeuge anderer FTF die Bearbeitung des Transportauftrags verzögert werden kann. Die Gefahr, dass durch einen Stau der FTF die Bearbeitungsdauer eines

7 Evaluierung des Koordinators mit ausgewählten Schnittstellenkonfigurationen

Transportauftrags wesentlich erhöht wird, nimmt mit der Anzahl an FTF im Gesamtsystem zu, weshalb der Random-Sort-Algorithmus mit zwölf FTF die höchste durchschnittliche Bearbeitungszeit erzielt.

Der Timewindow-Sort-Algorithmus erzielt geringere durchschnittliche Bearbeitungszeiten, da zum einen bei der Verteilung durch den Koordinator das zeitoptimierte

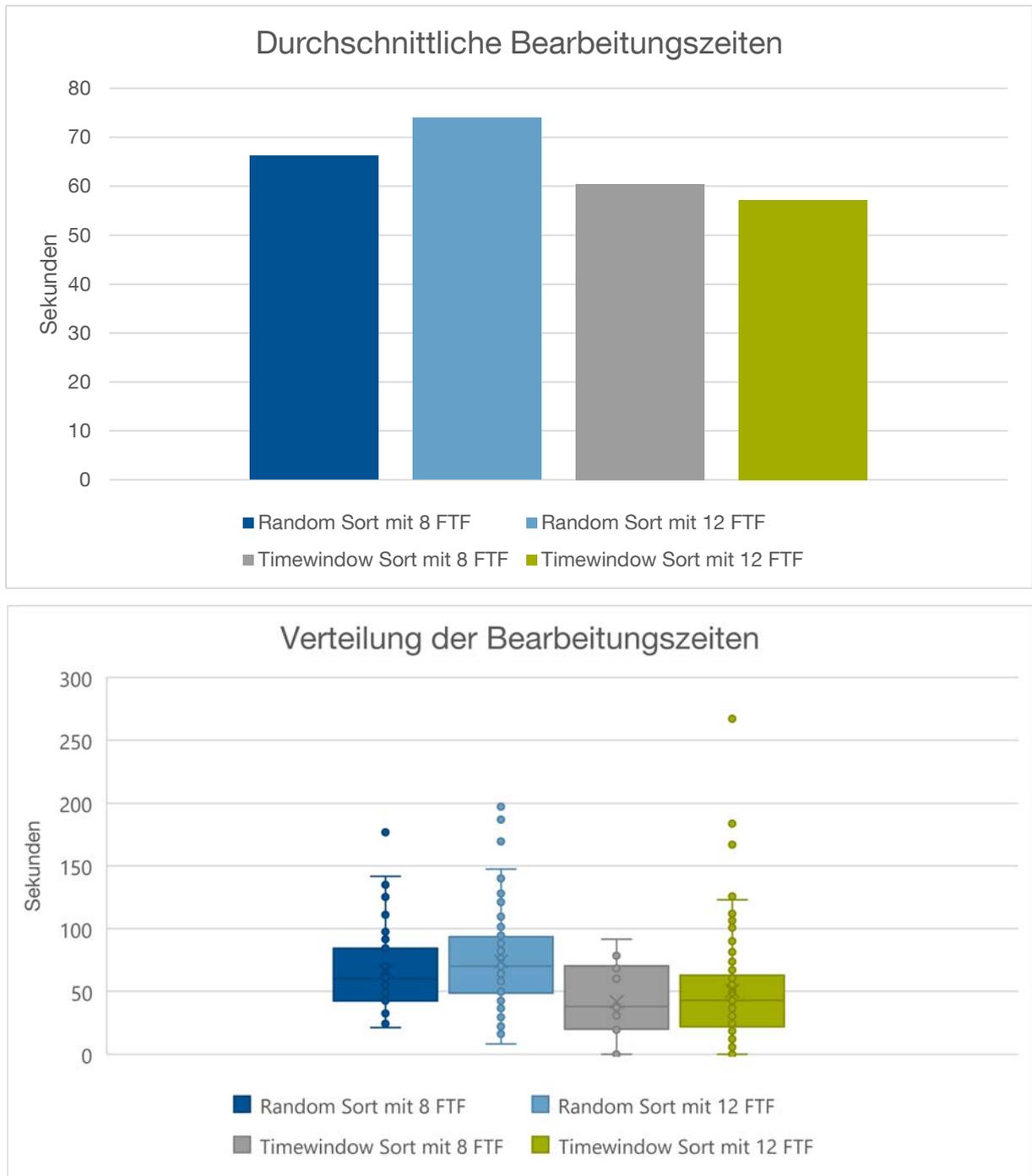


Abbildung 27: Diagramme zu den Bearbeitungszeiten der Transportaufträge bei zwei Koordinatorkonfigurationen und zwei Fahrzeugkonstellationen; oben die durchschnittlichen Bearbeitungszeiten, unten die Verteilungen als Box Plots

Routing angewandt wird. Zusätzlich werden nur solche Transportaufträge weitergegeben, deren benötigte Zeitfenster mit den bereits belegten Zeitfenstern nicht in Konflikt stehen. Dadurch wird das Aufstauen von FTF verhindert, was sich in der niedrigeren durchschnittlichen Bearbeitungszeit widerspiegelt.

Wird die Verteilung der Bearbeitungszeiten genauer betrachtet, so wird jedoch beim Timewindow-Sort-Algorithmus eine höhere Varianz der Bearbeitungszeiten festgestellt. Grund hierfür ist ein auftretender Bug aus der Implementierung, in welchem nicht immer bereits belegte Zeitfenster berücksichtigt werden. Aufträge, die hierdurch fälschlicherweise an ein FTS weitergegeben werden, erzielen in diesen Fällen durch mögliches Aufstauen eine erhöhte Bearbeitungszeit. Dies ist ein weiterer Grund, warum die Varianz der Bearbeitungszeiten des Timewindow-Sort-Algorithmus der Verteilung der Bearbeitungszeiten des Random-Sort-Algorithmus ähnelt.

7.5 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.

7.5.1 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.

7.5.2 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.
- Bei der Berücksichtigung von Routen wird eine hohe Rechenleistung des Systemkoordinators benötigt. Die Software und Hardware müssen also entsprechend ausgelegt werden, da andernfalls Verzögerungen bei der Transportauftragszuweisung entstehen können, die in der Größenordnung der Bearbeitungszeit liegen.

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

7.5 Abgeleitete Handlungsempfehlungen für FFZ-Hersteller/-Anwender

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.

8 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.

8.1 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 Lager-beziehungsweise 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 drei 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 zwei der drei 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 dritte Konfiguration verwendet zusätzlich die Fahrzeugrouten, welche von den verbundenen Leitsteuerungen an den Koordinator gesendet werden. Die nun mögliche vollständige Verkehrssteuerung stellt hohe Anforderungen an die Datenverarbeitung im Koordinator, ist jedoch in ihrem Effizienzsteigerungspotential zukunftsweisend.

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.

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.

8.2 Ausblick

Im Forschungsprojekt EPoSystKo 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 seit November 2022 im nachfolgenden Projekt „KolUmBot – Kollektives Umgebungsinformationssystem für mobile Roboter“ erforscht. Dieses wird unter dem Kennzeichen 22665 N durch die Arbeitsgemeinschaft industrieller Forschungsvereinigungen "Otto von Guericke" e.V. (AiF) gefördert.

Literaturverzeichnis

- [Ai-2021] Ai, Changsheng u. a.: AGV scheduling system based on MQTT protocol. In: 2021 4th International Conference on Advanced Electronic Materials, Computers and Software Engineering (AEMCSE). IEEE, 2021.
- [Bro-1985] Broadbent, A. J.: Free ranging AGV systems: promises, problems and pathways. In: Proceedings of the 2nd International Conference on Automated Materials Handling, 1985.
- [Dan-1988] Daniels, Stephen Craig: Real-time conflict resolution in automated guided vehicle scheduling. The Pennsylvania State University, 1988.
- [Egb-1987] Egbelu, Pius J.: The use of non-simulation approaches in estimating vehicle requirements in an automated guided based transport system. In: Material flow 4.1-2, 1987.
- [Glo-1985] Glover, Fred; Klingman, Darwin und Phillips, N.: A new polynomially bounded shortest path algorithm. In: Operations Research 33.1, 1985.
- [Guz-1997] De Guzman, M. C.; Prabhu, N. und Tanchoco, J. M. A.: Complexity of the AGV shortest path and single-loop guide path layout problems. In: International Journal of Production Research 35.8, 1997.
- [Hev-2004] Hevner, A. R.; March, S. T.; Park, J., und Ram, S.: Design science in information systems research. MIS quarterly, 2004.
- [Hua-1989] Huang, J.: A labeling algorithm for the navigation of automation guided vehicles. In: Advance in Manufacturing Systems Engineering, Proceedings of the ASME Winter Annual Meeting. Bd. 37, 1989.
- [Kim-1991] Kim, Chang W. und Tanchoco, Jose M. A.: Conflict-free shortest-time bidirectional AGV routing. In: The International Journal of Production Research 29.12, 1991.

- [Kim-1993] Kim, Chang W. und Tanchoco, Jose M. A.: Operational control of a bidirectional automated guided vehicle system. In: The International Journal of Production Research 31.9, 1993.
- [Lag-2004] Lagoudakis, Michail G. u. a.: Simple auctions with performance guarantees for multi-robot task allocation. In: 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. In: International Conference on Neural Information Processing. Springer, Cham, 2017.
- [Lie-2021] Lienert, Thomas: Methodik zur simulationsbasierten Durchsatzanalyse FTF-basierter Kommissioniersysteme. Dissertation, Technische Universität München, 2021.
- [Lin-1994] Lin, J. T. und Dgen, P.-K.: An algorithm for routeing control of a tandem automated guided vehicle system. In: The International Journal of Production Research 32.12, 1994.
- [Mor-2007] Mors, Adriaan ter; Zutt, Jonne; Witteveen, Cees: Context-Aware Logistic Routing and Scheduling. In: International Conference on Automated Planning and Scheduling, 2007.
- [ope-2022a] The openTCS developers: openTCS: Developer's Guide, Version 5.6.0. <https://www.opentcs.org/docs/5.6/developer/developers-guide/opentcs-developers-guide.html>, aufgerufen am 15.11.2022.
- [ope-2022b] The openTCS developers: openTCS: User's Guide, Version 5.6.0. <https://www.opentcs.org/docs/5.6/user/opentcs-users-guide.html>, aufgerufen am 15.11.2022.
- [Qiu-2000] Qiu, Ling und Hsu, Wen-Jing: Routing AGVs on a mesh-like path topology. In: Proceedings of the IEEE Intelligent Vehicles Symposium 2000. IEEE, 2000.
- [Qiu-2002] Qiu, Ling u. a.: Scheduling and routing algorithms for AGVs: A survey. In: International Journal of Production Research 40.3, 2002.

- [Ryc-2020] De Ryck, Matthias; Versteyhe, Mark und Frederik Debrouwere: Automated guided vehicle systems, state-of-the-art control algorithms and techniques. In: Journal of Manufacturing Systems 54, 2020.
- [Tag-1995] Taghaboni-Dutta, Fataneh und Tanchoco, Jose M. A.: Comparison of dynamic routing techniques for automated guided vehicle system. In: International Journal of Production Research 33.10, 1995.
- [VDA-5050] Verband der deutschen Automobilindustrie: Schnittstelle zur Kommunikation zwischen Fahrerlosen Transportfahrzeugen (FTF) und einer Leitsteuerung. VDA 5050, 2022.
- [VDI-4451a] Verband deutscher Ingenieure: Kompatibilität von Fahrerlosen Transportsystemen (FTS) – Schnittstelle zwischen Auftraggeber und FTS-Steuerung. VDI 4451 Blatt 5, 2005.
- [VDI-4451b] Verband deutscher Ingenieure: Kompatibilität von Fahrerlosen Transportsystemen (FTS) – Leitsteuerung für FTS. VDI 4451 Blatt 7, 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. In: Proceedings 2007 IEEE International Conference on Robotics and Automation. IEEE, 2007.
- [Vih-2018] Viharos, Andor Bálint und Németh, István: Simulation and scheduling of AGV based robotic assembly systems. In: 16th IFAC Symposium on Information Control Problems in Manufacturing INCOM, 2018.
- [Wiß-2014] Wißing, Matthias u. a.: Hybrid navigation system for mecanum based omnidirectional automated guided vehicles. In: ISR/Robotik 2014; 41st International Symposium on Robotics. VDE, 2014.

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Varianten der Vernetzung mehrerer Transportsysteme über die Leitsteuerungen. Links direkte, dezentrale Kommunikation, rechts zentrale Kommunikation über einen Koordinator	5
Abbildung 2: Systemarchitektur eines Materialflusssystems mit mehreren mobilen Transportsystemen (links, rechts) und Einzelfahrzeugen (unten mittig), die von einem Koordinator (mittig) vorgesteuert werden	6
Abbildung 3: Qualitative Darstellung des Verhältnisses zwischen Schnittstellenausprägung und Potential zur Effizienzsteigerung im Systemkoordinator	8
Abbildung 4: Modell einer automatisierten Montageanlage abgebildet in Plant Simulation [Vih-2018]	22
Abbildung 5: Operations Desk von openTCS mit exemplarischem Wegenetz sowie Fahrzeugen (gelb) und ihren Routen (verschiedene Farben, gestrichelt)	23
Abbildung 6: Systemarchitektur der Kombination von openTCS mit dem Control Framework [Wiß-2014]	24
Abbildung 7: Systemaufbau mit openTCS (vier Blöcke in der linken Spalte), Fahrzeugen (rechts) und der Vernetzung mittels MQTT [Ai-2021]	25
Abbildung 8: Verschiedene Steuerungsarchitekturen in Transportsystemen. Links ein klassisches, zentral gesteuertes Transportsystem, mittig ein dezentral gesteuertes Transportsystem, rechts der koordinative Steuerungsansatz	28
Abbildung 5: Vier durchzuführende Schritte beim Eingang eines Transportauftrags im Koordinator	32
Abbildung 10: Zusammenhang der aufeinander aufbauenden Ausprägungen des Koordinators	36
Abbildung 11: Vorgehen des Koordinators zur Transportauftragsverteilung bei kleiner Informationsbasis	37
Abbildung 12: Vorgehen des Systemkoordinators zur Transportauftragsverteilung bei Verfügbarkeit der Fahrzeugpositionen. Der Schritt der Positionsabfrage ist optional, sofern die Subsysteme die Positionen automatisch übertragen	38
Abbildung 13: Vorgehen des Systemkoordinators zur Transportauftragsverteilung bei Verfügbarkeit der Routen der Fahrzeuge. Neue Routen werden zwischen den bestehenden hindurchgeplant	41

Abbildung 14: Schema des Versuchsaufbaus zur Durchführung von Simulationen. Links die Softwarekomponenten und Kommunikationsinhalte, rechts die technische Umsetzung	43
Abbildung 15: Hauptfenster des Koordinators mit Steuerelementen für die Handhabung des Prüfstands sowie der Verteilalgorithmen	45
Abbildung 12: Ausschnitt des verwendeten exemplarischen Transportnetzes, modelliert in der Leitsteuerungssoftware openTCS. Sichtbar sind Kreuzungen, Fahrtwege sowie Aufnahme- und Abgabestellen	48
Abbildung 17: Detail der Kreuzungsmodellierung in openTCS. Es gibt 4 Subpunkte, die gegen den Uhrzeigersinn miteinander verbunden sind	49
Abbildung 18: Layoutausschnitt aus openTCS mit mehreren Transportfahrzeugen und ihren geplanten Routen (farbig, gestrichelt)	50
Abbildung 19: 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)	53
Abbildung 20: Detail der Modellierung einer Kreuzung in Plant Simulation. Jedes Kurvenelement kennzeichnet eine Abbiegerelation	55
Abbildung 21: Programmablauf des Koordinators in der Referenzkonfiguration. Nach dem Fähigkeitenabgleich wird der Transportauftrag zufällig an ein Subsystem weitergegeben	59
Abbildung 22: Diagramme der Entwicklungen der Wartezeiten nach Koordinatorkonfiguration (oben Referenzkonfiguration, mittig Konfiguration mit niedriger zeitlicher Informationsdichte, unten Konfiguration mit hoher Dichte)	63
Abbildung 23: Diagramm mit Verteilungen der Bearbeitungszeiten der Transportaufträge, gegliedert nach Koordinatorkonfiguration	64
Abbildung 24: Diagramm mit Summen der Bearbeitungszeiten der Transportaufträge, gegliedert nach Koordinatorkonfiguration	66
Abbildung 25: Diagramme mit Anzahlen durchgeführter Transportaufträge in Fahrzeugkonstellation 1 (oben) und 2 (unten), aufgeschlüsselt nach jeweils drei Versuchsläufen mit zufälliger und zeitenfensterbasierter Auftragsweitergabe	68
Abbildung 26: Asynchrone Fahrzeugpositionen in Plant Simulation und openTCS; in Plant Simulation (links) sind die Fahrzeuge bereits weiter gefahren als in der openTCS-Repräsentation (rechts)	69
Abbildung 27: Diagramme zu den Bearbeitungszeiten der Transportaufträge bei zwei Koordinatorkonfigurationen und zwei Fahrzeugkonstellationen; oben die durchschnittlichen Bearbeitungszeiten, unten die Verteilungen als Box Plots	71
Abbildung 28: Ablauf der zeitenfensterbasierten Routenfindung für die Transportauftragszuordnung im Koordinator.	A-1

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Textbasiertes Kommunikationsprotokoll zwischen openTCS und Plant Simulation	52
Tabelle 2: Transportsysteme im Referenz-Materialflusssystem und ihre Eckdaten	58
Tabelle 3: Verwendete Transportsysteme und Fahrzeugzahlen bei Experimenten zur Untersuchung der Konfiguration 4 des Koordinators	67

Anhang A Ablauf der zeitfensterbasierten Routenfindung

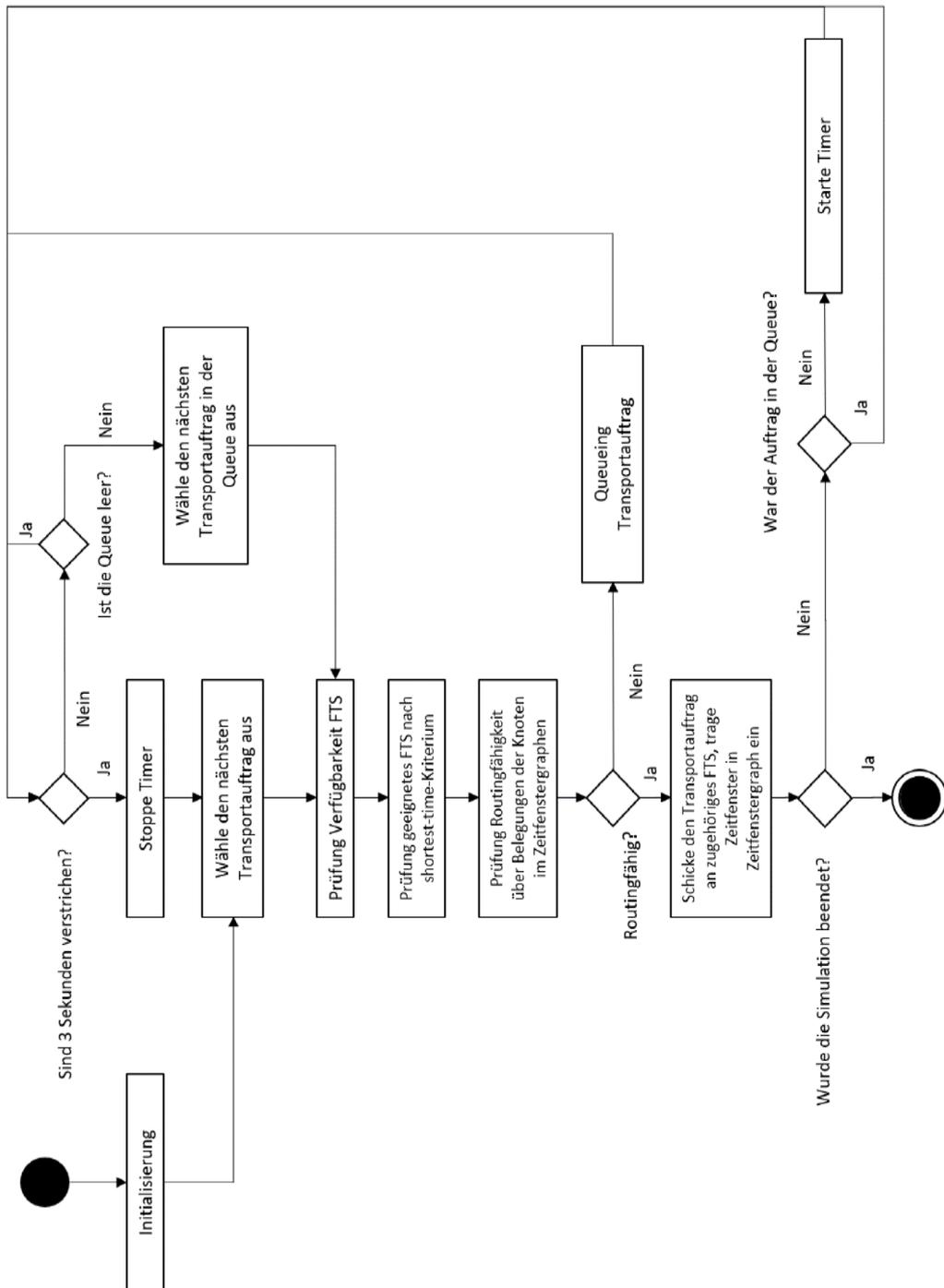


Abbildung 28: Ablauf der zeitfensterbasierten Routenfindung für die Transportauftragszuordnung im Koordinator.