

31. Deutscher Materialfluss-Kongress 2024

Simulative Evaluation des koordinativen Steuerungsansatzes für heterogene Flurförderzeugsysteme

Florian Rothmeyer, M. Sc.



Prof. Dr.-Ing. Johannes Fottner
fml – Lehrstuhl für
Fördertechnik Materialfluss Logistik
Technische Universität München
Boltzmannstraße 15
85748 Garching

Simulative Evaluation des koordinativen Steuerungsansatzes für heterogene Flurförderzeugsysteme

Aufgrund der steigenden Beliebtheit von fahrerlosen Transportsystemen (FTS) stellt sich die Frage, wie Bestands- und Neusysteme mit wenig Integrationsaufwand verknüpft werden können. Der neuartige Ansatz des sogenannten Systemkoordinators stellt eine mögliche Lösung dar, indem er als Zwischenebene oberhalb der Leitsteuerungen von FTS oder auch manuell bedienten Transportsystemen eine Weiterverteilung der Transportaufträge vornimmt. In diesem Beitrag wird erläutert, wie der Ansatz derzeit in einem modularen Simulationsaufbau untersucht wird, um Empfehlungen zur Gestaltung der Schnittstellen der Leitsteuerungen sowie der Optimierungsalgorithmen im Systemkoordinator aussprechen zu können.

1 Motivation

Das Interesse an fahrerlosen Transportfahrzeugen (FTF) steigt in den letzten Jahren ungebrochen. Diesem Trend liegen verschiedene Ursachen zugrunde. So verlangt die zunehmend individualisierte Produktion mit kleinen Losgrößen nach einer planbaren Versorgungslogistik mit entsprechend zuverlässigen Transportmitteln, um zeit- und kosteneffizient arbeiten zu können. Ein weiteres Entscheidungskriterium für die Anschaffung von FTF ist der Mangel an Fachkräften für manuell bediente Flurförderzeuge (FFZ) bzw. die damit einhergehenden hohen Personalkosten.

Aufgrund dieses Trends steigt die Anzahl von FTF in Betrieben, siehe Bild 1. In diesem Zuge steigt aus zwei Gründen auch die Heterogenität der eingesetzten FFZ-Systeme:

1. Neben neu angeschafften FTF setzen Betriebe oft bereits Gabelstaplerflotten oder Routenzüge ein.
2. Die Anzahl der von FTF durchführbaren Aufgaben steigt mit dem technologischen Fortschritt, sodass in immer mehr Materialflusssystemen verschiedenartige FTF nebeneinander eingesetzt werden.

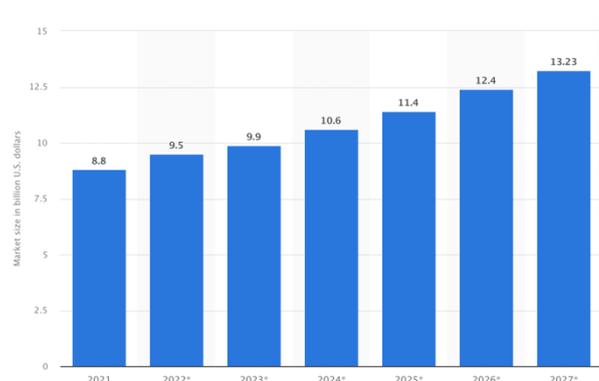


Bild 1: Prognostizierte Entwicklung des weltweiten Marktvolumens für fahrerlose Transportsysteme (FTS) im Zeitraum 2022–2027, ausgehend vom tatsächlichen Marktvolumen 2021 [Sta-2023].

Mit zunehmender Anzahl an Verkehrsteilnehmern pro Fläche steigt der Bedarf einer Verkehrssteuerung, die alle Fahrzeuge berücksichtigt. Sie stellt durch die vorausschauende Planung der Routen einen flüssigen Verkehr sicher. Somit minimiert sie Wartezeiten, die durch gegenseitige Blockaden entstehen könnten. In klassischen fahrerlosen Transportsystemen (FTS) ist eine Verkehrssteuerung üblicherweise als Teilfunktion der Leitsteuerung vorhanden [VDI-4451].

In heterogenen Systemen aus mehreren Flotten fahrerloser sowie manuell bedienter FFZ mit entsprechend mehreren Leitsteuerungen gibt es jedoch derzeit noch keine Möglichkeit der gemeinsamen Verkehrssteuerung. Die Verkehrssteuerungen der einzelnen Leitsteuerungen haben keine Kenntnis über die Fahrzeuge der jeweils anderen Flotten und können somit keine hilfreichen Steuerungseingriffe vornehmen. Eine übergreifende Verkehrssteuerung, die den Zustand der Fahrzeuge aller Flotten kennt, könnte dagegen auf gewinnbringende Weise auf den Verkehrsfluss einwirken.

Ohne die Abschaffung der herstellerspezifischen Leitsteuerungen und Einführung einer zentralen, übergreifenden Leitsteuerung mit integrierter Verkehrssteuerung, wie es vom Verband der deutschen Automobilindustrie (VDA) mit der Richtlinie VDA 5050 [VDA-5050] angestrebt wird, steht eine übergreifende Verkehrssteuerung jedoch vor zwei Hürden: Erstens geben die Leitsteuerungen der beteiligten Flotten über ihre Schnittstellen nach außen nur wenige Informationen preis. Zweitens kann die übergreifende Verkehrssteuerung nur indirekt über das Senden von Transportaufträgen an die Leitsteuerungen Einfluss auf die einzelnen Fahrzeuge nehmen.

Um diesem Problem zu begegnen, wurde am Lehrstuhl für Fördertechnik Materialfluss Logistik (fml) der TUM das Konzept des sogenannten Systemkoordinators entwickelt (siehe Bild 2). Er wird mit mehreren Leitsteuerungen verbunden und soll lediglich durch die intelligente Zuweisung eingehender Transportaufträge an die verschiedenen Subsysteme einen Mehrwert in der Transporteffizienz erreichen, der dem einer übergreifenden Verkehrssteuerung ähnlich ist. Somit versteht sich das Konzept des Systemkoordinators als Gegenentwurf zur VDA 5050.

Das grundlegende Konzept des Systemkoordinators inklusive Architekturen und internen Abläufen wurde bereits in [Fot-2022] vorgestellt. Weiterhin wurde in [Rot-2023] ein Versuchsaufbau vorgestellt, der die simulative Bestimmung der Unterschiede in der erreichbaren Transporteffizienz bei Verwendung verschiedener Konfigurationen des Systemkoordinators ermöglicht. In diesem Beitrag liegt der Fokus daher auf der experimentellen Evaluation des Konzeptes mittels des Versuchsaufbaus. Im Folgenden wird zunächst das Konzept grob erläutert und anschließend der Versuchsaufbau knapp dargestellt. Anschließend wird die Strategie zur Durchführung der Versuche, insbesondere die Wahl der Konfigurationen des Koordinators und ihrer Parameter, vorgestellt. Der Beitrag schließt mit einem Ausblick auf vorläufige Ergebnisse und offengebliebene Fragestellungen.

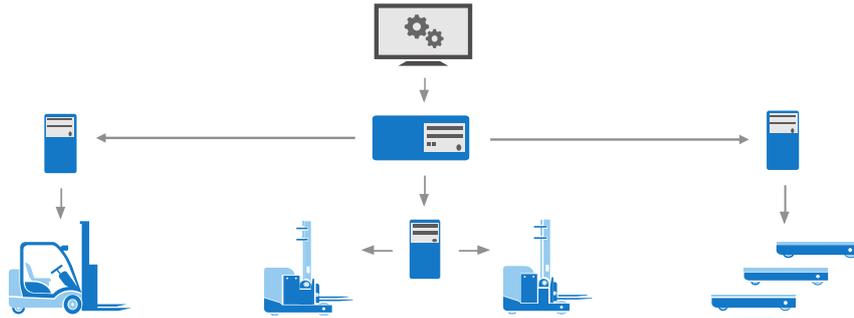


Bild 2: Schema eines exemplarischen Transportsystems mit mehreren separaten Subsystemen. Es findet sich eine Staplerflotte mit Leitsystem (unten links) sowie zwei Flotten fahrerloser Transportfahrzeuge, jeweils mit einer Leitsteuerung (unten mittig und unten rechts). Zentral findet sich der Systemkoordinator, der empfangene Transportaufträge an die angeschlossenen Leitsteuerungen weitergibt.

2 Architektur des Systemkoordinators und interne Abläufe

Ziel des Systemkoordinators ist eine gegenüber dem unkoordinierten Parallelbetrieb mehrerer FFZ-Flotten im gleichen Arbeitsraum höhere Transporteffizienz. Um diese zu erreichen, sieht der Konzeptentwurf für den Systemkoordinator einen Mechanismus aus vier Schritten vor. Ihre Funktionen und ihr Zusammenspiel werden im Folgenden vorgestellt. Anschließend wird der dritte der vier Schritte, die tatsächliche Weiterverteilung von Transportaufträgen, genauer beleuchtet.

2.1 Vier Schritte der Koordination

Für die erfolgreiche Weitervermittlung und Durchführung von Transportaufträgen führt der Systemkoordinator vier Teilaufgaben aus.

1. Schritt: Der Systemkoordinator empfängt analog zu herkömmlichen FFZ-Leitsystemen Transportaufträge von übergeordneten Systemen zur Steuerung des innerbetrieblichen Materialflusses oder der Produktion. Hierzu zählen vor allem Enterprise-Resource-Planning-, Lagerverwaltungs- oder Manufacturing-Execution-Systeme. Potentiell können mehrere Systeme parallel Aufträge an den Systemkoordinator schicken. Daher muss im ersten Schritt der Koordination eine **formelle Angleichung der Transportaufträge** durchgeführt werden.

2. Schritt: Verschiedene Transportaufträge bedingen potentiell verschiedene Fähigkeiten der Transportmittel. Diese hängen von der Art und Masse des Ladungsträgers, der geometrischen Gegebenheiten an Aufnahme- und Abgabeort, aber auch von der Beschaffenheit des Transportweges und weiterer Parameter ab. Der Koordinator führt daher im zweiten Schritt eine **Selektion geeigneter Transportsysteme** aus.

3. Schritt: Die selektierte Teilmenge geeigneter Flotten wird herangezogen, um die zentrale Frage der Koordinationsaufgabe zu beantworten: **An welche Flotte wird ein Transportauftrag zu welcher Zeit weitergegeben?** Die Antwort auf diese Frage kann entweder für jeden eingehenden Auftrag einzeln oder für mehrere im Bündel getroffen werden. Es gibt verschiedene Algorithmen, die dazu herangezogen werden können. Sie unterscheiden

sich unter anderem im Umfang der benötigten Informationen und in der Entscheidungsgüte. Der Systemkoordinator wurde modular aufgebaut, sodass ein einfacher Vergleich verschiedener Algorithmen mit verschiedenen Informationsbeständen möglich ist. Eine genauere Beschreibung der Funktionsweise findet sich in Abschnitt 2.2.

4. Schritt: Nach der Zuordnung von Transportaufträgen zu Transportsystemen wird die **Kommunikation zur Weitergabe der Aufträge** eingeleitet. Anschließend wartet der Systemkoordinator auf Rückmeldungen des Transportsystems zum Fortschritt der Aufträge und gibt diese weiter an die auftraggebende Stelle.

Die vier Schritte sind ähnlich zu den Aufgaben einer klassischen Leitsteuerung in FTS oder Flotten manuell bedienter Flurförderzeuge. So nennt die Richtlinie VDI 2510 die Transportauftragsabwicklung als zentralen Bestandteil von FTS-Leitsteuerungen, welche laut VDI 4451 Blatt 7 wiederum aus der Transportauftragsverwaltung, der Fahrzeugdisposition und der Fahrauftragsabwicklung besteht. Die Transportauftragsverwaltung findet sich in Schritt 2 und 3 wieder, da sie prüft, ob Aufträge grundsätzlich ausführbar sind. Die Fahrzeugdisposition ist Kernaufgabe von Schritt 3, jedoch kann der Systemkoordinator nicht ein Fahrzeug direkt, sondern nur seine Flotte insgesamt zur Abwicklung eines Auftrags anweisen. Die Fahrauftragsabwicklung im Sinne der Überwachung und Kommunikation des Zustands von Aufträgen findet in Schritt 4 statt. [VDI-2510, VDI-4451]

2.2 Weiterverteilung von Transportaufträgen als Hauptaufgabe

Unter den oben vorgestellten Schritten des Koordinationsmechanismus ist der dritte Schritt der komplexeste. Die beiden zentralen Entscheidungen, *wann* und *an wen* ein Transportauftrag vergeben wird, werden in der Literatur zu FTS-Leitsteuerungen auch als *Scheduling* und *Disposition* bezeichnet [Ryc-2022]. Die Adaption vorhandener Algorithmen für die Erfüllung dieser Aufgaben im Systemkoordinator ist nur eingeschränkt möglich, da zwischen ihm und den zu steuernden Fahrzeugen noch eine weitere Steuerungsebene agiert. Aufgrund dieser Steuerungshierarchie ist für den Systemkoordinator keine vollständige Beobacht- und Steuerbarkeit des Zustands der Fahrzeuge gegeben.

Die Beobachtbarkeit kann verbessert werden, indem die Schnittstellen der Leitsteuerungen zum Systemkoordinator erweitert werden. Je nach Scheduling- und Dispositionsalgorithmus können beispielsweise die Batteriezustände, aktuellen Positionen oder geplanten Routen der Fahrzeuge, aber auch Fahrzeug-Auftrag-Zuordnungen einbezogen werden.

Die Steuerbarkeit der Auftragszuordnung zu bestimmten Fahrzeugen könnte ebenfalls durch eine Veränderung der bestehenden Leitsteuerungen verbessert werden. Hier wäre jedoch die Eingriffstiefe und -komplexität wesentlich höher. Gleichzeitig würde der Eingriff die Kernkompetenzen der Leitsteuerung und damit des Herstellers des Transportsystems in dem Maße beschneiden, in dem sich Vorteile für den Systemkoordinator ergeben. Aus diesen Gründen konzentriert sich der vorliegende Beitrag lediglich auf die Untersuchung der Schnittstellengestaltung zur Beobachtbarkeit sowie auf die Algorithmenauswahl.

3 Software-in-the-Loop-Prüfstand zur simulativen Evaluation

Um die Effektivität des Systemkoordinator-Konzepts bestimmen zu können, muss also eine bestmögliche Schnittstellenkonfiguration zwischen Systemkoordinator und Leitsteuerungen in Kombination mit passenden Algorithmen für Scheduling und Disposition gefunden werden. Aufgrund der großen Komplexität der beteiligten Systeme (Transport-, IT-, Kommunikations-, Materialfluss- und Produktionssysteme) kann diese Untersuchung nicht mit vertretbarem Aufwand analytisch durchgeführt werden. Stattdessen können die Fragestellungen mittels Simulationen beantwortet werden.

Hierfür wurde bereits ein Konzept vorgestellt, das die modulare und realitätsnahe Simulation des Verhaltens des Systemkoordinators in einem sogenannten Software-in-the-Loop-Prüfstand ermöglicht [Rot-2023]. Der Prüfstand besteht aus drei Modulen:

- Ein einfaches **beauftragendes System** sendet Transportaufträge aus einer Tabelle anhand vorbestimmter Zeitabstände an den Systemkoordinator.
- Mehrere **Leitsteuerungsinstanzen** der Software openTCS empfangen die vorverarbeiteten Transportaufträge vom Systemkoordinator. Die Software kann auch für die Steuerung realer FTF eingesetzt werden und bietet daher eine große Realitätsnähe.
- Eine **Materialflusssimulation** bildet das Zeitverhalten der gesteuerten Fahrzeuge und insbesondere die Interaktionen zwischen Fahrzeugen verschiedener Flotten ab. Das Simulationsmodell enthält keine eigene Steuerungslogik, sondern empfängt fertige Fahrzeug-Auftrag-Zuordnungen von den Leitsteuerungen. Weiterhin werden im Simulationsmodell die zu messenden Größen für die Beurteilung der Effektivität ermittelt.

Die Module kommunizieren über TCP-Pakete, daher können sie für Experimente entweder gemeinsam mit dem Systemkoordinator auf einem Rechner oder verteilt in einem Rechnernetzwerk ausgeführt werden.

4 Evaluationsstrategie mit Parametervariation

Für die Bewertung der Effektivität des Systemkoordinator-Konzepts werden Experimente mit mehreren Konfigurationen der oben beschriebenen Schnittstellen sowie verschiedenen Algorithmen durchgeführt. Hier werden zunächst die gewählten Randbedingungen diskutiert und anschließend die Simulationsstrategie mit den verschiedenen Konfigurationen und Parametern erläutert.

4.1 Randbedingungen und Experimentaufbau

Für die Experimente wird ein möglichst realitätsnahes Szenario modelliert, das dennoch die Allgemeingültigkeit der Ergebnisse nicht beeinträchtigt. Folglich wird ein generisches Netzwerk von unidirektional befahrbaren Transportwegen gewählt, das in den Abmessungen sowie Anzahlen der Kreuzungen, Quellen und Senken üblichen Anlagen großer Industrieunternehmen ähnelt. Die Anzahl der Fahrzeuge wird wie auch die Frequenz eingehender Transportaufträge am oberen Limit machbarer Konfigurationen angesetzt, um möglichst hohe Auslastungen und eine große Zahl kritischer Koordinationsentscheidungen zu

provozieren. Als Vereinfachungen werden verkettete Transporte und Fahrzeuge mit einer Kapazität größer eins ausgeschlossen. Folglich gibt es nur voneinander unabhängige Transportaufträge von jeweils einer Quelle zu einer Senke.

Alle Versuche werden mit Stichprobengröße eins durchgeführt und es werden für eine über alle Konfigurationen statischen Auftragsliste einer Schicht (8 Stunden) für jeden Auftrag die Zeitpunkte von Auftragsweitergabe an ein Transportsystem, Bearbeitungsstart durch ein Fahrzeug, Lastaufnahme und Lastabgabe (= Bearbeitungsende) gemessen.

4.2 Konfigurationen des Systemkoordinators und Parameterraum

Während die Randbedingungen und der Experimentaufbau über die Versuche hinweg konstant bleiben, wird die Konfiguration des Systemkoordinators und seiner Schnittstelle zu den Leitsteuerungen variiert. Damit sollen relative Unterschiede der Ausprägungen in ihrer Auswirkung auf die Transporteffizienz des Gesamtsystems identifiziert werden. Folgende Ausprägungen des Systemkoordinators wurden für die Versuche ausgewählt:

- **Kenntnis der Auslastungen der Transportsysteme:** Der Systemkoordinator erfährt das Verhältnis zwischen aktiven Fahrzeugen und Transportaufträgen jedes beteiligten Transportsystems. Diese Information kann er nicht selbst ermitteln, da potentiell weitere Akteure Transportaufträge an die jeweiligen Leitsteuerungen schicken können und außerdem Fahrzeuge durch Defekte oder leeren Energiespeichern ausfallen können. Eine Parametervariation ist hier in der Aktualisierungsfrequenz der Information möglich. Optimierungsziel des Systemkoordinators ist eine möglichst gleichmäßige Auslastung der Transportsysteme, um Auftragsstaus zu vermeiden, die sich negativ auf die Durchlaufzeiten auswirken würden.
- **Kenntnis der aktuellen Positionen der beteiligten Fahrzeuge:** Die aktuellen Positionen der Fahrzeuge können entweder per Nennung des jedes durchfahrenen Knotens im Wegenetz oder per geometrischen Koordinaten in zwei Dimensionen übermittelt werden. Die geometrischen Koordinaten können wiederum in der Präzision variiert werden. Die Aufgabe des Systemkoordinators ist hier die Selektion geeigneter Fahrzeuge, die auf möglichst blockierungsfreien Routen zwischen den bereits mit Aufträgen versehenen Fahrzeugen navigieren. Zum Einsatz kommen dabei von Leitsteuerungen adaptierte Algorithmen für Routenfindung und Disposition sowie optional für das Scheduling.
- **Kenntnis der Auftrag-Fahrzeug-Zuordnungen:** Hiermit kann der Systemkoordinator die aktuellen Zielpositionen aller Fahrzeuge in Erfahrung bringen. Für diese Informationsbasis ist keine Parametervariation vorgesehen. Das Ziel des Systemkoordinators ist die Selektion eines Fahrzeugs, das einen möglichst kurzen Weg vom letzten Auftragsendpunkt zum Startpunkt des neuen Auftrags zurücklegen muss. Hier kommen wiederum modifizierte Algorithmen aus der Routenplanung sowie Scheduling und Disposition zum Einsatz.

Daneben dient eine rein zufällige Weiterverteilung der Transportaufträge als Referenz.

5 Ausblick auf vorläufige Ergebnisse und weiteren Forschungsbedarf

Da die Experimente noch nicht abgeschlossen sind, kann an dieser Stelle nur eine vorläufige, qualitative Bewertung vorgenommen werden. Es zeigte sich, dass der Systemkoordinator mit der Kenntnis der Auftrag-Fahrzeug-Zuordnungen kurzzeitig einen signifikant höheren Durchsatz des Gesamtsystems erreichen konnte als bei zufälliger Auftragsweitergabe. Jedoch zeigte sich eine Häufung von Aufträgen auf einem Transportsystem, sodass die Durchlaufzeiten und in der Folge auch der Durchsatz deutlich schlechter wurden als im Referenzszenario. Durch die Zufallsverteilung werden hier implizit die Auslastungen der Teilsysteme ausgeglichen. Folglich muss in weiteren Experimenten in allen Konfigurationen des Systemkoordinators ein Grenzwert für die Auslastungen der beteiligten Systeme berücksichtigt werden.

Zukünftige Forschung am Systemkoordinator kann als weitere Schnittstellenausprägung die Routen der einzelnen Fahrzeuge betrachten, wodurch eine zeitenfensterbasierte Routenplanung als Entscheidungsgrundlage für die Auftragsweiterverteilung vorgenommen werden könnte. Weiterhin kann die Auswirkung heterogener Schnittstellenausprägungen der beteiligten Transportsysteme untersucht werden. Eine vertiefte Bewertung der Ausprägungen des Systemkoordinators ließe sich mittels der Erfassung weiterer Kennzahlen mit Fokus auf Wirtschaftlichkeit, Mensch-Roboter-Interaktion und Ressourceneffizienz erreichen.

Literaturverzeichnis

- [Fot-2022] Fottner, J.; Rothmeyer, F.: EPoSystKo – Entwicklung und Potentialanalyse eines Systemkoordinators für den typübergreifenden Einsatz von Flurförderzeugen. München 2022, ISBN: 978-3-948514-21-1.
- [Rot-2023] Rothmeyer, F.; Fottner, J.: Software-In-The-Loop Test Bench for the Evaluation of the Coordinative Fleet Control Approach in Intralogistics. In: Proceedings of the 37th ECMS International Conference on Modelling and Simulation, Florenz 2023.
- [Ryc-2022] De Ryck, M.; Versteyhe, M. und Debrouwere, F.: Automated guided vehicle systems, state-of-the-art control algorithms and techniques. In: Journal of Manufacturing Systems 54, 2020.
- [Sta-2023] Statista GmbH: Size of the global automated guided vehicle (AGV) market in 2021, with a forecast through 2027. 2023, <https://www.statista.com/statistics/1358162/global-automated-guided-vehicle-market-size/> (aufgerufen am 29.01.2024).
- [VDA-5050] Verband der deutschen Automobilindustrie: Schnittstelle zur Kommunikation zwischen Fahrerlosen Transportfahrzeugen (FTF) und einer Leitsteuerung. VDA 5050, Version 2.0.0, 2022.
- [VDI-2510] Verband deutscher Ingenieure: Fahrerlose Transportsysteme (FTS). VDI 2510, 2005.
- [VDI-4451] Verband deutscher Ingenieure: Kompatibilität von Fahrerlosen Transportsystemen (FTS) – Leitsteuerung für FTS. VDI 4451 Blatt 7, 2005.