

Selbstgesteuerte Fahrerlose Transportsysteme

Self Guided Vehicle Systems

Christoph Schwarz¹
Jurij Schachmanow²
Jürgen Sauer³
Ludger Overmeyer⁴
Georg Ullmann²

¹ OFFIS – Institut für Informatik e. V.

² IPH – Institut für Integrierte Produktion Hannover

³ Carl von Ossietzky Universität Oldenburg

⁴ Leibniz Universität Hannover

Eine zentrale Steuerung von Fahrerlosen Transportsystemen (FTS) wird den Anforderungen einer wandlungsfähigen Produktion nicht mehr gerecht. Mit Verfahren aus dem Bereich der Künstlichen Intelligenz kann eine Steuerung dezentralisiert und flexibilisiert werden. Die Aufgaben der zentralen Steuerung können auf diesem Wege auf verschiedene Entitäten im System verteilt und ihre Komplexität verringert werden. Der vorliegende Artikel befasst sich mit der Dezentralisierung einer FTS-Steuerung. Die Schwerpunkte liegen auf der Auftragsvergabe, der Routenfindung sowie der Konfliktlösung.

[Schlüsselwörter: FTS, Simulation, Agenten-Systeme, JADE, MASON]

A central control of automated guided vehicle systems (AGVS) doesn't longer satisfy the requirements of a versatile production. With procedures from the field of artificial intelligence a control can be decentralized and made more flexible. In this way the tasks of the central control can be distributed to different entities in the system. Thus the complexity of the tasks is reduced. The present article deals with the decentralization of the AGVS control and focuses on the order allocation, route finding and conflict resolution.

[Keywords: AGVS, Simulation, Multi Agent Systems, JADE, MASON]

1 EINLEITUNG

Fahrerlose Transportsysteme bestehen grundsätzlich aus einer Leitsteuerung, einem Kommunikationssystem und den Fahrerlosen Transportfahrzeugen (FTF). Die Steuerung des FTS hat die Aufgabe einen Transportauftrag durchzuführen. Hierzu wird der Transportauftrag von der Steuerung in eine tatsächliche Bewegung des FTF umgesetzt. Die Anzahl der FTF variiert dabei zwischen einigen wenigen bis hin zu 100 FTF.

Bei modernen FTS zeichnet sich ein Trend in Richtung intelligenter, dezentraler Systeme ab (z. B. [Nie06]). Hierbei spielen die sogenannten Agententechnologien, die ursprünglich aus dem Bereich der Künstlichen Intelligenz stammen eine wichtige Rolle. Agenten sind autonome Einheiten, die anhand vorgegebener Regeln selbstständig Entscheidungen treffen. Aufgaben in einem FTS, z. B. die Vergabe von Transportaufträgen oder die Routenplanung, können also durch bestimmte Verhaltensmuster der Agenten abgebildet werden.

In einem gemeinsamen Forschungsprojekt zwischen OFFIS – Institut für Informatik e. V und IPH – Institut für Integrierte Produktion Hannover wurde ein Gesamtkonzept für die dezentrale Selbststeuerung von FTS erarbeitet. Das Konzept sowie die Ergebnisse einer Simulationsstudie werden in diesem Artikel präsentiert.

2 DAS AGENTENBASIERTE FTS

Die wesentlichen Aufgaben einer FTS-Leitsteuerung sind die Auftragsvergabe, die Routenplanung sowie die Konfliktlösung. Im Rahmen der Konzeption wurden deshalb dezentrale Verfahren für diese Aufgaben entwickelt.

Die Dezentralität der Verfahren wurde durch den Einsatz von Software-Agenten erreicht. Dabei wurde zunächst ein FTS analysiert, die Entitäten im System identifiziert und die Aufgaben des Systems dokumentiert. Die Gesamtbeschreibung des Systems bot nun die Möglichkeit, Aufgaben ähnlichen Typs zu gruppieren und so Aufgabenmodule zu bilden. Anhand der Module wurden anschließend die Agententypen definiert, die in Tabelle 1 beschrieben sind. Der Agententyp Manager ist bspw. für die übergeordnete Steuerung einer Entität eines FTS und die Koordination der untergeordneten Agenten zuständig. Jede Entität ist dabei durch mehrere Agententypen komplett definiert.

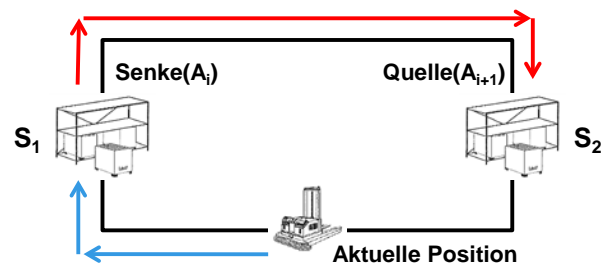
Tabelle 1. Definierte Agententypen

Bezeichnung	Funktion	
Manager	Steuerung und Koordination, Kommunikation mit anderen Entitäten (FTF, Stationen), Bereitstellung/Verarbeitung von Statusmeldungen	
RouteManager	Routenplanung, Verwaltung des Kartenmaterials	
TransportOrderManager	Auftragsabarbeitung	Annahme der Transportaufträge, Durchführung von Auktionen, Zerlegung der Transportaufträge in Fahraufträge
TravelOrderManager		Annahme der Fahraufträge, Zerlegung der Fahraufträge in Befehle und Übergabe an die zuständigen Agenten
SafetyManager	Schnittstellen zur Hardware	Sicherheitssystem
DriveManager		Bahnführung, Lagererfassung
PowerManager		Energiemanagement
LoadManager		Lasthandling

Die Auftragsvergabe des FTS ist in Form einer Auktion umgesetzt. Dabei treten die FTF als Bieter und Stationen als Verkäufer auf. Jeder neue Auftrag wird von der zugehörigen Station zunächst an alle FTF ausgeschrieben. Daraufhin geben die FTF ihre Gebote ab und erhalten davon abhängig eine Zu- oder Absage. Das Protokoll ist an den Standard von FIPA (Foundation for Intelligent Physical Agents) [Fcp02] angelehnt. Jedoch gibt der FIPA-Standard lediglich den Ablauf der Auktion vor. Die Angebotsberechnung wurde deshalb im Rahmen des Projekts entwickelt. Sie basiert auf dem aktuellen Zustand und der Position eines FTF. Die wesentliche Zustandsinformation ist dabei, ob ein FTF gerade frei oder belegt ist. Die Belegung kann aus einem oder mehreren eingeplanten Aufträgen bestehen. Für die Angebotsberechnung sind immer die Endzeit des letzten eingeplanten Auftrags sowie die Position des FTF in der Zukunft von Bedeutung. Das Beispiel in Abbildung 1 demonstriert die Angebotsberechnung.

Nimmt ein Agent an mehreren Auktionen gleichzeitig teil, so kann es zu Überschneidungen kommen. Unter Umständen bekommt ein Agent dann mehrere Zusagen für Transportaufträge, obwohl sich sein Zustand mit jedem angenommenen Transportauftrag ändert. Um solche Konstellationen zu vermeiden, wurde die Angebotsberechnung um eine zustandsbasierte Variable erweitert. Das folgende Beispiel verdeutlicht den Ablauf: Nehmen wir an, dass das FTF₁ zum Zeitpunkt t_0 keinen Auftrag hat und sich auf einem Parkplatz mit der Position $P(x, y)$ befindet. Zum gleichen Zeitpunkt schreiben die Stationen S_1 und S_2 Aufträge A_1 und A_2 an die FTF aus. Das FTF₁ berechnet das Angebot(A_1) sowie das Angebot(A_2) ausgehend aus seinem aktuellen Zustand und gibt beide ab. Nehmen wir weiter an, dass zufällig die Angebote des FTF₁ die Besten im Vergleich zu den anderen FTF sind, weshalb die Stationen S_1 und S_2 beide eine Zusage an FTF₁ schicken. Nehmen wir nun als Letztes an, dass die Zusage von S_1 früher kommt, als die Zusage von S_2 . FTF₁ stellt nun anhand seines aktuellen Zustands und der Zu-

standsvariable, die im Angebot A_1 abgespeichert ist, fest, dass das Angebot noch gültig ist und nimmt den Auftrag an. In diesem Moment ändert sich der Zustand von FTF₁ und das Angebot A_2 wird ungültig, weshalb die Zusage von S_2 von FTF₁ abgewiesen wird.



- $Anfahrtszeit(A_{i+1}) =$
 $FindeRoute(Endzeit(A_i), Senke(A_i), Quelle(A_{i+1}))$
- $Angebot = Endzeit(A_i) + Anfahrtszeit(A_{i+1})$

Legende: S_n – Station mit der ID = n; A_i – Auftrag mit der ID = i

Abbildung 1. Angebotsberechnung bei der Auktion

Wie aus dem Beispiel erkennbar ist die Berechnung des Angebots stark von der Routenplanung abhängig. Deshalb wurde bei der Entwicklung des Verfahrens zur konfliktvermeidenden Routenplanung eine spezielle Anforderung in den Vordergrund gestellt: Das Verfahren soll in der Lage sein, die zukünftigen Zustände des Systems zu berücksichtigen.

Die konfliktvermeidende Routenplanung wurde an das Verfahren von „ter Mors“ [Mor07] angelehnt. Dieses Verfahren löst das Problem des konfliktfreien Routings zentral und wurde daher in ein dezentrales Verfahren überführt. Des Weiteren wurde das Verfahren um die Möglichkeit der kooperativen Routenplanung erweitert. Die Berechnung der Route ist dabei von einem beliebigen Startpunkt aus (sowohl zeitlich, als auch örtlich) möglich und erfüllt somit die aufgestellte Anforderung.

Das Verfahren von „ter Mors“ verwendet, wie viele andere Verfahren zur Routenberechnung, Techniken aus der Graphentheorie. Ein Graph besteht hierbei aus Knoten und Kanten und beschreibt den logischen Aufbau eines Wegenetzes. D. h. für jedes Wegsegment ist eine Kante und für jede Kreuzung oder Station ein Knoten im Graph vorhanden. Sowohl Kanten, als auch Knoten werden im Verfahren als Ressourcen betrachtet. Zusätzlich zu den Kanten und Knoten wurde im Verfahren eine zeitliche Komponente in Form eines sogenannten „Zeitslots“ integriert. Ein freier Zeitslot ist hierbei ein Zeitintervall für das keine Reservierungen vorliegen und das groß genug ist, damit ein FTF die Ressource innerhalb dieses Zeitintervalls passieren kann. Für einen Weg, den ein Fahrzeug in 20 Sekunden zurücklegen würde und für den folgende Reservierungen vorliegen(jeweils als Sekunden seit Systemstart): [0-40], [50-80], [110-140,], ergeben sich folgende freien Zeitslots [80-110], [140-max]. Die anderen Zeiten sind entweder schon reserviert oder der Zeitraum ist zu klein, als dass der Weg innerhalb der Zeit abgefahren werden kann (z. B. der Zeitraum [40-50]).

Die Bestimmung der abzufahrenden Route erfolgt nun in den drei nachfolgenden Schritten:

1. Das FTF berechnet einen Graphen aus den freien Zeitslots
2. Das FTF berechnet seine Route in diesem Graph.
3. Das FTF informiert die anderen Fahrzeuge im System über seine geplante Route.

Das folgende vereinfachte Beispiel veranschaulicht die Berechnung der Routen durch die FTF. Nehmen wir an, dass im System drei FTF vorhanden sind und sie sich zum Zeitpunkt 0 im Knoten a (links im Graph) befinden. Nehmen wir weiterhin an, dass ihre Zielknoten jeweils mit c, f und e markiert sind. Die Länge der Wege ist durch die Zeit, die ein FTF braucht, um diesen Weg zu passieren, festgelegt und ist an die Kanten angehängt. Vom Knoten a zum Knoten b braucht ein FTF 5 Zeiteinheiten.

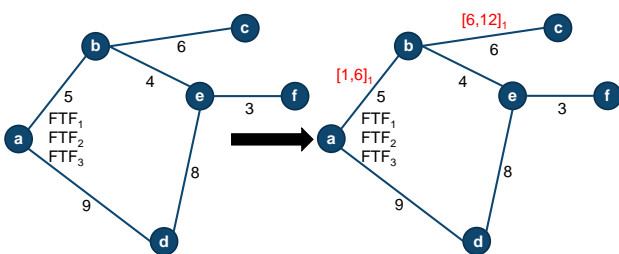


Abbildung 2. Routenplanung des ersten FTF

Das FTF₁ fängt mit der Planung der Route von a nach c an (vergl. Abbildung 2) und berechnet die freien Zeitslots [1, 6]₁ und [6, 12]₁ für die Kanten ab und bc. Das FTF₁ kann also sofort starten und würde den Knoten c nach 12 Zeiteinheiten erreichen (der Weg ab-bc wurde

vorher als der kürzeste Weg berechnet). Nach Berechnung der Route informiert FTF₁ die anderen FTF im System über die geplante Route. Diese speichern die daraus resultierenden Reservierungen in ihrem Graph.

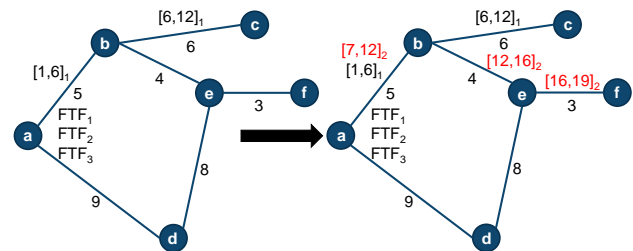


Abbildung 3. Routenplanung des zweiten FTF

Als nächstes plant FTF₂ die Route von a nach f (vgl. Abbildung 3). Der Weg über ab-be-ef ist der kürzeste. Da die Kante ab für den Zeitslot [1-6]₁ belegt ist, kann FTF₂ erst zum Zeitpunkt 7 starten. Die Kanten be und ef sind noch nicht reserviert und können sofort passiert werden. Insgesamt erreicht FTF₂ seinen Zielknoten nach 19 Zeiteinheiten an. Das ist schneller, als der Weg ad-de-ef, für den 20 Zeiteinheiten benötigt werden.

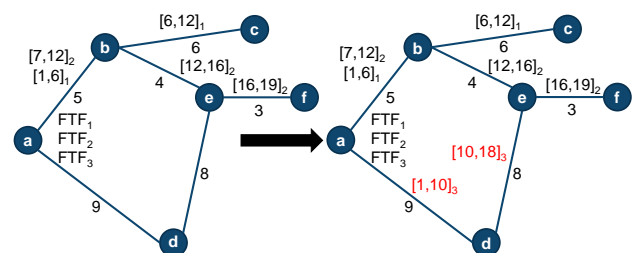


Abbildung 4. Routenplanung des dritten FTF

Als letztes plant FTF₃ seine Route zum Knoten e (vergl. Abbildung 4). Der Weg ab-be ist der kürzeste. Allerdings ist die Kante ab bis zum Zeitpunkt 12 reserviert. D.h. FTF₃ könnte erst zum Zeitpunkt 13 starten und würde zum Zeitpunkt 22 Knoten e erreichen. Der Weg ad-de ist deshalb für FTF₃ günstiger. Es erreicht seinen Zielknoten zum Zeitpunkt 18. Damit ist die Planung der drei FTF abgeschlossen und sie können ihre Fahrt starten.

Neben der Auftragsvergabe und Routenplanung wurden Verfahren zur Konfliktlösung konzipiert. Zunächst wurde davon ausgegangen, dass in einem realen System Mechanismen existieren, die nach einem Ausfall einer Komponente diese wieder in den Grundzustand versetzen (initialisieren) und den alten Zustand wiederherstellen (synchronisieren) können. Diese Mechanismen sind meistens in einem zweiten Leitreechner (Backup-Rechner) hinterlegt und erlauben einen sicheren Betrieb des FTS. Auf die Mechanismen wurde daher nicht weiter eingegangen. Stattdessen wurden Verfahren konzipiert, die die Auflösung von Verkehrskonflikten und Ressourcenkonflikten erlauben. Hierzu wurden ein Protokoll erstellt, das den Ablauf der Konfliktauflösung beschreibt, und konkrete

Lösungsstrategien ausgearbeitet, die in einem speziellen Konflikt anzuwenden sind. Das Vorgehen bei der Konfliktauflösung, soll anhand des Beispiels eines Deadlock in Abbildung 5 erläutert werden.

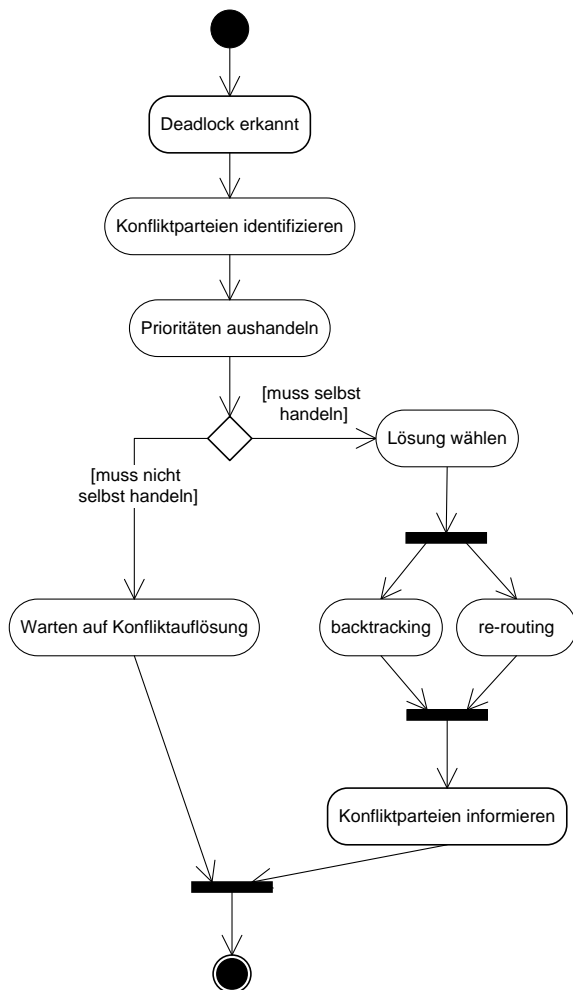


Abbildung 5. Auflösung eines Deadlock

Ein Deadlock ist dabei einer Situation, in der bspw. zwei FTF den gleichen Weg zur gleichen Zeit befahren möchten. Dies kann passieren, wenn Reservierungen der Routen nicht von allen FTF empfangen oder falsch interpretiert wurden. Im ersten Schritt muss ein Deadlock erkannt werden. Dies kann bspw. mit Hilfe der Sensormeldungen des FTF erfolgen. Im zweiten Schritt müssen die Konfliktparteien identifiziert werden. Hierfür schicken die betroffenen FTF eine Anfrage mit der aktuellen Position und der Konfliktbeschreibung an alle anderen FTF. Sobald die betroffenen FTF im direkten Kontakt stehen, können sie im dritten Schritt die Prioritäten ihrer aktuellen Aufträge aushandeln. Das FTF₁ mit dem höher priorisierten Auftrag muss nicht selbst handeln. Das FTF₂ ist zum Handeln gezwungen und wählt im vierten Schritt die zur Situation passende Lösung: Stehen sich bspw. die FTF auf einem Weg gegenüber, so wählt das FTF₂ das „backtracking“ (Rückwärtsfahren bis zur ersten Passiermöglichkeit)

und ermöglicht dem FTF₁ die Durchfahrt. Das FTF₂ ist nun in der Lage seine Fahrt fortzusetzen und der Konflikt ist aufgelöst.

Mit den Regeln zur Konfliktlösung wurde das dezentrale Regelwerk komplettiert. Das entworfene Agentensystem wurde mit Hilfe der im folgenden Abschnitt beschriebenen Simulationen verifiziert.

3 SIMULATIONEN

In der entwickelten Simulation wird der Fahrkurs des FTS als Graph modelliert. Die Knoten des Graphs repräsentieren hier sowohl Stationen zur Lastaufnahme und Lastabgabe sowie Parkplätze, als auch Kreuzungen. Die Kanten repräsentieren die Fahrwege. Als Grundlage für die Simulation wurde MASON (Multi-Agent Simulation of Neighborhoods, [Luk04]) genutzt.

Die Agenten in der Simulation sind im Scheduler (Steuerprogramm zur Regelung der zeitlichen Ausführung mehrerer Prozesse) in drei Ebenen eingeteilt. In der ersten Ebene befinden sich die Agenten, die für die Vergabe von Aufträgen zuständig sind. Die zweite Ebene umfasst alle Agenten, die für die Bewegung von Fahrzeugen oder Stationen zuständig sind. In Szenarien in denen es weitere bewegliche Objekte, wie z. B. Fahrstühle oder Brandschutzstore, gibt, sind auch die für die Steuerung dieser Objekte zuständigen Agenten in der zweiten Ebene eingeordnet. Die dritte Ebene ist für Hilfsagenten vorgesehen. Hilfsagenten sind Agenten, die keiner Entität in der physikalischen Welt zuzuordnen sind. Dazu gehören zum Beispiel Agenten, die Sensoren simulieren und Agenten, die für die Visualisierung der Simulation zuständig sind.

Der Ablauf der Simulation ist in Abbildung 6 dargestellt. Der Scheduler übernimmt die Taktung der Simulation. In jedem Zeitschritt ruft er nacheinander jeden Agenten der ersten Ebene, dann jeden Agenten der zweiten Ebene und abschließend jeden Agenten der dritten Ebene einmal auf. Die Größe eines solchen Zeitschritts kann hier beliebig gewählt werden. In der im nächsten Abschnitt beschriebenen Simulation entspricht ein Zeitschritt einer Sekunde. Jeder aufgerufene Agent bestimmt dann, was er innerhalb des Zeitschritts tut. Die Entscheidung hängt dabei von seinem internen Zustand sowie seiner Wahrnehmung vom Zustand seiner Umgebung ab. Das serielle Aufrufen der drei Ebenen hat den Grund, dass ein gemischtes Aufrufen die Ergebnisse verfälschen könnte. Würde die Auftragsvergabe beispielsweise nicht vor den Bewegungen ausgeführt, sondern parallel dazu, hätten sich einige Agenten in diesem Zeitschritt schon bewegt und andere nicht. Die Agenten der dritten Ebene benötigen schließlich den aktuellen Zustand des Systems, nachdem sich alle Agenten bewegt haben.

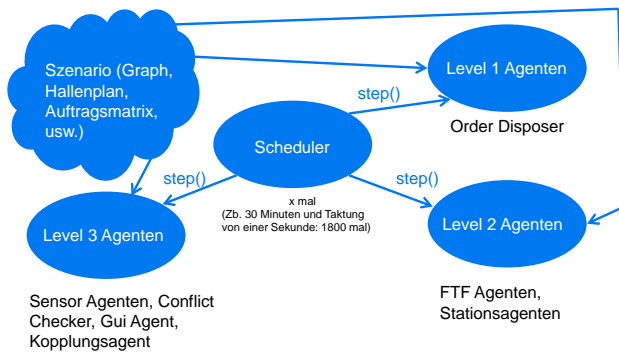


Abbildung 6. Aufbau der Simulation

Neben dem Scheduler und dem Graphen wurde ein Nachrichtensystem in der Simulation integriert. Dieses kann von den Agenten genutzt werden, um miteinander zu kommunizieren.

4 REFERENZSYSTEM UND AUSWERTUNG DER SIMULATIONSERGEBNISSE

Die entwickelten Ansätze zur dezentralen Steuerung von Agenten wurden mit einem Referenzszenario verglichen. Dieses Szenario wurde von einem Industriepartner zur Verfügung gestellt. Bei dem Szenario handelt es sich um eine Getränkeabfüllanlage. Die Anlage ist in Abbildung 7 abgebildet. Die Abmessungen der Anlage sind 79 Meter x 125 Meter. Der repräsentierende Graph besteht aus 472 Kanten und 189 Knoten, von denen 32 Knoten Stationen und 4 Knoten Parkplätze und die übrigen Knoten Kreuzungen sind.

Im Referenzszenario operieren insgesamt 8 baugleiche FTF in der Anlage. Insgesamt müssen von dem FTS 52 Transportaufträge pro Stunde absolviert werden. Neben den Ausmaßen der Halle sowie den Fahreigenschaften der FTF wurden vom Industriepartner die erreichten Kennzahlen mit einer zentralen Steuerung überlassen sowie eine Simulation dieser Steuerung.

In einem ersten Schritt wurden die Parameter zur FTF-Bewegung, wie z. B. Beschleunigung und Geschwindigkeit, so eingestellt, dass sie mit der zur Verfügung stehenden Referenz übereinstimmen. Die Validierung ergab eine Übereinstimmung des Referenzszenarios mit der aufgebauten Simulation in den Kennzahlen von über 98%.

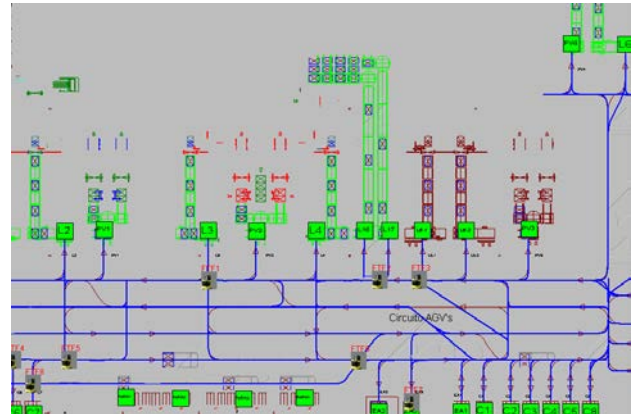


Abbildung 7. Das Referenzszenario

Zur Überprüfung der vorgestellten Verfahren wurden folgende Konfigurationen untersucht:

1. 8 FTF, zentral gesteuerte Referenz
2. 8 FTF, dezentral
3. 7 FTF, dezentral
4. 6 FTF, dezentral
5. 5 FTF, dezentral

Die erste Konfiguration entspricht den Daten, die vom Industriepartner bereitgestellt wurden. Die anderen Konfigurationen arbeiteten mit den entwickelten Methoden zur Routenfindung und Auftragsvergabe. Primäres Ziel der Untersuchungen war es, herauszufinden, ob die Anzahl der benötigten Fahrzeuge durch den Einsatz der entwickelten Verfahren reduziert werden kann. Der simulierte Zeitraum betrug eine halbe Stunde. Insgesamt wurde jede Konfiguration 1.000-mal simuliert. In jedem Schritt wurde hierbei die Reihenfolge, in der die Agenten handeln, zufällig bestimmt. Da die Reihenfolge gerade beim Planen der Routen eine Rolle spielt (das Fahrzeug, das zuerst plant, muss mit weniger Reservierungen umgehen), kommt es zu unterschiedlichen Werten in jedem Simulationslauf. Die durchschnittlichen Werte der festgelegten Kennzahlen sind Tabelle 2 zu entnehmen.

Aus den Ergebnissen ist erkennbar, dass die entwickelten Verfahren zu einer deutlichen Steigerung der Systemperformanz geführt haben. Der Vergleich mit je 8 FTF (Konfigurationen 1 und 2) zeigt, dass die dezentrale Steuerung zu ca. 22% kürzerer durchschnittlicher Auftragsdauer, zu ca. 8% kürzerer gefahrener Gesamtstrecke und ca. 8% geringerem Leerfahrtanteil führt.

Tabelle 2. *Ermittelte Kennzahlen*

Konfiguration Kennzahl	1	2	3	4	5
Erledigte Aufträge (in Stk)	26	26	26	26	25,3
Durchschnittliche Auftragsdauer (in sec)	371,1	278,1	287,6	300,3	379,2
Gesamtstrecke aller FTF (in m)	4500	4132	3943	3927	3618
Leerfahrtanteil (in %)	56,77	52,20	52,47	51,97	51,97
Durchschnittliche Transportstartdauer (in sec)	-	57,7	70,2	83,8	172,4
Max. Transportstartdauer (in sec)	-	237,7	240,4	250,7	439,7

Die Reduzierung der Fahrzeuganzahl (Konfigurationen 2-5) führt zu weiteren Verbesserungen bei der Gesamtstrecke und dem Leerfahrtanteil, aber zu Verschlechterungen bei der Auftragsdauer. Auch die durchschnittliche sowie die maximale Dauer bis zum Transportstart, also die Zeit, die zwischen dem Ausschreiben des Auftrags und dem Start des Beladevorgangs vergeht, wird schlechter je weniger Fahrzeuge eingesetzt werden. Das kann insbesondere dann zu einem Problem führen, wenn die Stationen nur einen kleinen Puffer haben und die Transportaufträge schnell abgeholt werden müssen, um den Puffer wieder zu leeren. Die Verbesserungen im Bereich der gefahrenen Gesamtstrecke und des Leerfahrtanteils kommen hierbei im Wesentlichen durch zwei Faktoren zu Stande. Zum einen führen weniger Fahrzeuge zu weniger Reservierungen auf den Strecken und somit zu Routen mit weniger bzw. kleineren Umwegen. Zum anderen führt die steigende durchschnittliche Auftragsdauer dazu, dass die Fahrzeuge häufiger schon einen Folgeauftrag haben, wenn sie ihren aktuellen Auftrag beenden.

Bei einer Reduzierung auf 5 Fahrzeuge (Konfiguration 5) erledigte das System durchschnittlich nur noch 25,3 von 26 Aufträgen. Es ist daher nicht mehr in der Lage die angeforderte Transportleistung zu erbringen.

5 OPTIMIERUNG UND AUSBLICK

Die konzipierte und umgesetzte dezentrale Steuerung ist in der Lage, die Auftragsvergabe, die Routenplanung sowie die Auftragsabwicklung konfliktfrei durchzuführen. Die ermittelten Kennzahlen sind dabei besser als bei der zentralen Steuerung. Obwohl die Simulation einen geringeren Detaillierungsgrad aufwies, kann davon ausgegangen werden, dass die dezentrale Steuerung in der Lage ist, die anfallenden Transportaufträge effizient abzuarbeiten. Die abstrahierten Details betreffen insbesondere die Feinsteuerung bestimmter Situationen. Anstatt bspw. die Lastaufnahme, bestehend aus langsamem Anfahren an die Station, Feinpositionieren an der Station, Lastaufnahme und langsamem Wegfahren von der Station in einzelnen Schritten zu simulieren, wurde die Zeit bestimmt, die diese Vorgänge zusammen benötigen und die Lastaufnahme dann als ein Vorgang mit gleicher Dauer modelliert. Das realitätsnahe Lastspiel würde möglicherweise in eine längere Reservierung der Wege vor einer Station resultieren, was die Routenplanung der anderen FTF beeinflusst. Nichtsdestotrotz ist das vorgestellte Verfahren einem zentralen Verfahren, bspw. der in realen Systemen üblichen Blockstreckensteuerung, überlegen.

Ein wesentlicher Vorteil der konzipierten und implementierten Agenten-basierten, dezentralen Steuerung ist die einfache und schnelle Erstellung oder Veränderung eines Szenarios. Außer der Erstellung des Graphs und dem ggf. notwendigen Annotieren von Strecken, ist keine spezielle Anpassung der Logik notwendig. Das Verfahren zur konfliktfreien Routenfindung wurde so implementiert, dass alle Entitäten im System auf gleiche Ressourcen abgebildet werden. Es funktioniert sowohl für das Befahren von einfachen Strecken, als auch für das Durchfahren von Brandschutzschleusen oder das Benutzen von Fahrstühlen. Die Agenten berücksichtigen hierbei die Reservierung von Fahrstühlen genauso wie die Reservierung von Wegen oder Stationen. Das Hinzufügen oder Entfernen von Fahrzeugen kann durch ein einfaches An- oder Abmelden der Agenten im System realisiert werden. Eine Anpassung der Routenplanung oder der Auftragsvergabe ist hierfür nicht notwendig. Ebenso kann eine Änderung des Layouts einfach durch die Verteilung einer neuen Karte erfolgen.

Das Einführen der Kooperation bei der Routenplanung hat zu einer Verbesserung der Kennzahlen „Gesamtstrecke aller FTF“ und „Leerfahrtanteil“ geführt. Eine Optimierungsmöglichkeit am entwickelten Steuerungskonzept könnte also das Einführen weiterer Kooperationen sein. Zuerst kann hier das Verhandeln über Reservierungen genannt werden. Agenten würden in diesem Fall überprüfen, ob ein Agent, der eine für sein aktuelles Ziel wichtige Reservierung vorhält, davon zu überzeugen ist, diese Reservierung wieder aufzugeben. Die Entscheidung, würde in Abhängigkeit von den Auswirkungen auf das Gesamtsystem geschehen. Wenn es im

Gesamtsystem bspw. vor allem auf die Reduzierung der Fahrstrecke ankommt, würde die Entscheidung danach gefällt, welche Strecke die an der Verhandlung beteiligten Agenten bei Beibehaltung der ursprünglichen Reservierung und welche bei Aufgabe dieser Reservierung fahren müssten. Anstatt der Strecke kann auch die Zeit als Entscheidungskriterium verwendet werden. Genauso sind Kombinationen aus diesen Kriterien oder die Gewichtung anhand Kriterien, wie der Auftragspriorität, der Auftragsdeadline oder weiteren, systemrelevanten Faktoren möglich.

6 ZUSAMMENFASSUNG

In diesem Beitrag wurde eine komplett dezentrale Steuerung für ein FTS präsentiert, mit deren Hilfe die FTF auf der Grundlage von sich dynamisch ändernden Informationen ihre Transportplanung durchführen. Die Berücksichtigung der dynamischen Verkehrsdaten und der Lastsituation sowie die dezentrale Entscheidung und Datenhaltung stellen Neuerungen für FTS dar. Aktuell werden entweder zentralisierte Steuerungsverfahren eingesetzt oder die FTF bewegen sich auf statischen Transportrouten und haben dadurch sehr eingeschränkte Möglichkeiten auf Änderungen des Systemzustands zu reagieren. Im entwickelten System hingegen kooperieren die Agenten, die die Koordination der FTF untereinander sowie eine proaktive dynamische Planung ermöglichen. Dadurch werden Entscheidungen effizienter und vorausschauender getroffen.

Insgesamt wurde eine Komplexitätsreduktion der Gesamtsystemsteuerung und dadurch eine erhöhte Skalierbarkeit und Flexibilität bei Veränderungen erreicht. Die Kopplung auktionenbasierter Transportauftragsvergabe mit einem Zeitslot-basierten Routenplanungsalgorithmus ermöglichte eine vorausschauende konfliktfreie Planung. Nicht zuletzt wurde eine Verringerung der Durchlaufzeit der Aufträge und eine höhere Auslastung der FTF bei dynamischen Randbedingungen nachgewiesen, was zu einer verbesserten Wirtschaftlichkeit des FTS führt.

Danksagung

Das IGF-Vorhaben 17237 N der Forschungsvereinigung Bundesvereinigung Logistik e. V. (BVL) wurde über die AiF im Rahmen des Programms zur Förderung der Industriellen Gemeinschaftsforschung (IGF) vom Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages gefördert.

LITERATUR

- [Fcp02] N. N.: FIPA Contract Net Interaction Protocol Specification. http://www.fipa.org/specs/fipa00029/S_C00029H.pdf. Abgerufen am 25.01.2013.
- [Luk04] Luke, Sean; Cioffi-Revilla, Claudio; Panait, Liviu; Sullivan, Keith: MASON: A new multi-agent simulation toolkit. In: Proceedings of the 2004 Swarm-Fest Workshop, 2004.
- [Mor07] Mors, AW ter; Zutt, J.: Context-aware logistic routing and scheduling. In: Proceedings of the Seventeenth International Conference on Automated Planning and Scheduling (2007), 328–335.
- [Nie06] Niemann, B.; Baum, M.; Overmeyer, L. (2006): Aufbau von fahrerlosen Transportsystemen (FTS) durch eine dezentrale Datenstruktur, Logistics Journal, 2006.

Dipl.-Math. Christoph Schwarz, studierte an der Universität Osnabrück Mathematik mit Anwendungsfach Informatik. Von 2011 bis 2013 war er als Wissenschaftlicher Mitarbeiter im OFFIS – Institut für Informatik tätig. Aktuell ist er als Wissenschaftlicher Mitarbeiter an der Carl von Ossietzky Universität Oldenburg tätig.

Adresse: Carl von Ossietzky Universität, Ammerländer Heerstraße 114-118, 26129 Oldenburg. Tel: +49 441 798 4473, Email: Christoph.Schwarz@uni-oldenburg.de

Dipl.-Math. Jurij Schachmanow, studierte an der Leibniz Universität Hannover Mathematik mit Studienrichtung Informatik und Anwendungsfach Physik. Seit 2011 ist er am IPH – Institut für Integrierte Produktion Hannover gGmbH als Projektingenieur im Bereich Produktionsautomatisierung tätig.

Adresse: IPH – Institut für Integrierte Produktion Hannover gGmbH, Hollerithallee 6, 30419 Hannover
Tel: +49 511 279 76-223, Fax: +49 511 279 76-888,
E-Mail: schachmanow@iph-hannover.de

Prof. Dr.-Ing. Jürgen Sauer, studierte Informatik an der TU Dortmund, promovierte und habilitierte zu Themen der intelligenten Ablaufplanung in Produktion und Logistik. Seit 2006 ist er als Professor in der Wirtschaftsinformatik in der Fakultät II (Informatik, Wirtschafts- und Rechtswissenschaften) der Universität Oldenburg und als wissenschaftlicher Leiter im Informatik-Institut OFFIS tätig. Arbeitsschwerpunkte sind Anwendungen der Künstlichen Intelligenz in der Logistik und im Management von Rechenzentren. Er ist Sprecher der Fachgruppe „Planen und Konfigurieren“ im Fachbereich Künstliche Intelligenz der GI.

Adresse: Carl von Ossietzky Universität Oldenburg, Ammerländer Heerstraße 114-118, 26129 Oldenburg.
Tel: +49 441 798 4488, Email: sauer@uni-oldenburg.de

Prof. Dr.-Ing. Ludger Overmeyer, studierte Elektrotechnik an der Universität Hannover und arbeitete im Anschluss als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Laser Zentrum Hannover e.V. (LZH). Nach seiner Promotion zum Dr.-Ing. war er als Führungskraft im Bereich Forschung und Entwicklung im Maschinen- und Anlagenbau für die Halbleiterindustrie tätig. Seit 2002 leitet er das Institut für Transport- und Automatisierungstechnik (ITA) der Leibniz Universität Hannover. Im Jahr 2007 übernahm er die Funktion eines geschäftsführenden Gesellschafters des IPH – Institut für Integrierte Produktion Hannover gemeinnützige GmbH.

Adresse: ITA – Institut für Transport- und Automatisierungstechnik, An der Universität 2, 30823 Garbsen
Tel: +49 511 762 2503, Fax: +49 511 762 4007,
E-Mail: ludger.overmeyer@ita.uni-hannover.de

Dr.-Ing. Georg Ullmann, studierte Maschinenbau an der TU München mit den Schwerpunkten Systematische Produktentwicklung und Raumfahrttechnik. Im Anschluss sammelte er erste Berufserfahrung am Fraunhofer-Institut für Produktionsanlagen und Konstruktionstechnik (IPK) in Berlin im Bereich Virtuelle Produktentstehung. Von 2007 bis 2011 war er am IPH – Institut für Integrierte Produktion Hannover gGmbH als Projektingenieur im Bereich Produktionsautomatisierung tätig. Nach Abschluss seiner Promotion im November 2010 leitete er die Abteilung Logistik. Seit 2012 ist er koordinierender Geschäftsführer des IPH.

Adresse: IPH – Institut für Integrierte Produktion Hannover gGmbH, Hollerithallee 6, 30419 Hannover
Tel: +49 511 279 76-119, Fax: +49 511 279 76-888,
E-Mail: ullmann@iph-hannover.de