

# Schlussbericht

der Forschungsstellen

Nr. 1: IPH – Institut für Integrierte Produktion Hannover gemeinnützige GmbH

Nr. 2: OFFIS e.V.

zu dem über die



im Rahmen des Programms zur  
Förderung der Industriellen Gemeinschaftsforschung und -entwicklung (IGF)

vom Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie  
aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages

geförderten Vorhaben **17237 N**

***Dezentrale, agentenbasierte Selbststeuerung von Fahrerlosen Transportsystemen  
(FTS)***

(Bewilligungszeitraum: 01.07.2011 - 30.06.2013)

der AiF-Forschungsvereinigung

Bundesvereinigung Logistik e. V. (BVL)

---

Ort, Datum

Dr.-Ing. Georg Ullmann

Prof. Dr.-Ing. Jürgen Sauer

Name und Unterschrift der Projektleiter  
an den Forschungsstellen

Gefördert durch:



Bundesministerium  
für Wirtschaft  
und Technologie

aufgrund eines Beschlusses  
des Deutschen Bundestages

## Inhaltsverzeichnis

<b>1 Zusammenfassung</b> .....	<b>1</b>
<b>2 Gegenüberstellung angestrebter Teilziele und erzielter Ergebnisse</b> .....	<b>2</b>
<b>3 Darstellung der erzielten Ergebnisse</b> .....	<b>7</b>
3.1 AP 1: Anforderungsanalyse .....	7
3.2 AP 2: Konzeption und Modellierung der Agentenplattform und der Agententypen .....	8
3.3 AP 3: Konzeption des Regelwerks zur Steuerung .....	14
3.4 AP 4: Implementierung der Agentenplattform und Agententypen .....	21
3.5 AP 5: Implementierung der Algorithmen zur Steuerung .....	23
3.6 AP 6: Simulation der Agentensteuerung .....	25
3.7 AP 7: Optimierung und Bewertung des Steuerungskonzepts .....	28
3.8 AP 8: Projektmanagement und Dokumentation .....	29
<b>4 Wissenschaftlich-technischer und wirtschaftlicher Nutzen der erzielten Ergebnisse insbesondere für KMU</b> .....	<b>29</b>
4.1 Innovativer Beitrag .....	30
4.2 Industrielle Anwendungsmöglichkeiten .....	30
<b>5 Verwendung der Zuwendung</b> .....	<b>31</b>
5.1 Einsatz von wissenschaftlich-technischem Personal .....	31
5.2 Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit .....	32
<b>6 Umsetzung der Forschungsergebnisse / Transfer der Ergebnisse in die Wirtschaft</b> .....	<b>32</b>
6.1 Durchgeführte Transfermaßnahmen .....	33
6.2 Geplante Transfermaßnahmen .....	35
6.3 Einschätzung zur Realisierbarkeit des Transferkonzepts.....	35
6.4 Zusammenstellung aller veröffentlichten Arbeiten.....	36
<b>7 Durchführende Forschungsstellen</b> .....	<b>37</b>

7.1	Forschungsstelle 1: IPH – Institut für Integrierte Produktion Hannover gGmbH.....	37
7.2	Forschungsstelle 2: OFFIS e.V. – Institut für Informatik.....	38
<b>8</b>	<b>Angaben über gewerbliche Schutzrechte .....</b>	<b>39</b>
<b>9</b>	<b>Förderhinweis.....</b>	<b>39</b>
<b>10</b>	<b>Literaturverzeichnis .....</b>	<b>40</b>
<b>11</b>	<b>Abbildungsverzeichnis .....</b>	<b>42</b>
<b>12</b>	<b>Tabellenverzeichnis .....</b>	<b>42</b>

## 1 Zusammenfassung

Fahrerlose Transportsysteme (FTS) bestehen grundsätzlich aus einer Leitsteuerung, einem Kommunikationssystem und den Fahrerlosen Transportfahrzeugen (FTF). Die Steuerung des FTS hat die Aufgabe, einen Transportauftrag durchzuführen, sobald dieser von einem übergeordneten System erteilt wird. Der Transportauftrag wird von der FTS-Steuerung in eine tatsächliche Bewegung des FTF umgesetzt. Die Anzahl der FTF variiert dabei zwischen einigen wenigen bis hin zu 100 FTF. Die hohe Anzahl von FTF erhöht die Wahrscheinlichkeit von Behinderungen im Streckennetz. Die entstehenden dynamischen Verkehrssituationen werden von heutigen zentralen FTS-Steuerungen nur unzureichend berücksichtigt. Des Weiteren sind sie im Hinblick auf Veränderungen und Störungen zu wenig flexibel und robust. Dezentrale Ansätze können hier in erster Linie die Robustheit und Skalierbarkeit erhöhen. Statt einer komplexen zentralen Steuerung übernehmen dezentrale Agenten die Entscheidungen nach einfachen Regeln und tragen so zur erhöhten Fehlertoleranz bei. Daneben kann so der Komplexitätssteigerung durch Hinzufügen zusätzlicher FTF entgegen gewirkt werden.

Als Ergebnis dieses Vorhabens ist ein dezentral gesteuertes FTS basierend auf Agententechnologien entstanden. Die Agententechnologien machen das System einerseits sehr robust, andererseits aber auch sehr flexibel. Sie erlauben den Einsatz dezentraler Algorithmen und machen das System insgesamt effizienter. Für das agentenbasierte FTS wurde ein dezentrales Regelwerk erstellt, das Regeln für die Auftragsvergabe, Konfliktauflösung sowie die Routenplanung beinhaltet. Die Regeln wurden nach vorgegebenen Anforderungen entwickelt und aufeinander abgestimmt. Die Validierung des Regelwerks erfolgte im Rahmen von Simulationen mit einem implementierten Software-Demonstrator. Der Software-Demonstrator ist intuitiv nutzbar und erlaubt den im Vorhaben beteiligten Unternehmen die Erstellung von weiteren FTS-Layouts. Auf diese Weise können die Unternehmen zielgerichtet die eigene FTS-Leitsteuerung testen bzw. neue Szenarien planen.

Die Leistungsfähigkeit des entwickelten Ansatzes wurde durch eine Verifizierung anhand eines realen Beispiels aus der industriellen Praxis sichergestellt.

**Das Ziel des Vorhabens wurde erreicht.**

## 2 Gegenüberstellung angestrebter Teilziele und erzielter Ergebnisse

Im Rahmen des Forschungsvorhabens sollte die wissenschaftliche Fragestellung beantwortet werden, inwiefern sich durch ein agentenbasiertes, konsequent dezentral gesteuertes FTS eine vergleichbare oder höhere Wirtschaftlichkeit als bei heutigen FTS erreichen lässt. Dabei sollten insbesondere die folgenden Fragen betrachtet werden:

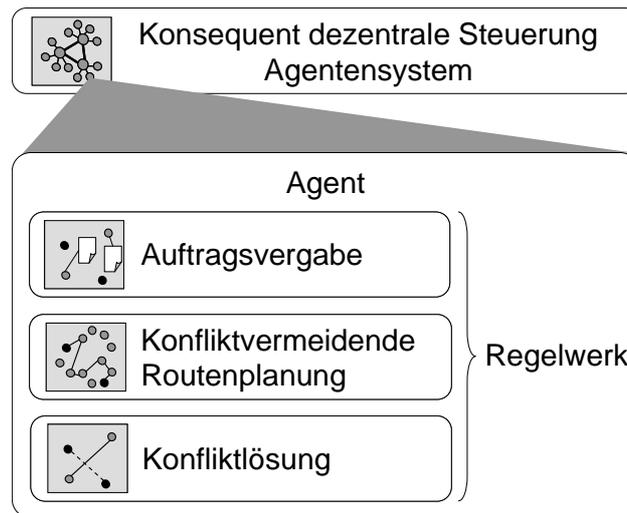
- Lassen sich Kennzahlen wie die Durchlaufzeit, durchschnittliche Transportdauer oder Anzahl Leerfahrten durch eine agentenbasierte Steuerung verbessern?
- Lässt sich die Robustheit des Systems durch eine agentenbasierte Steuerung erhöhen?
- Welchen Einfluss hat die agentenbasierte, dezentrale Auftragszuordnung auf die Wirtschaftlichkeit des FTS?
- Inwieweit lässt sich eine agentenbasierte, dezentrale (Produktions-)Steuerung zur Auflösung von Verkehrskonflikten in einem dynamischen System (FTS) einsetzen?

Zur Erreichung des Ziels sind im Forschungsantrag drei Teilziele (kursiv gedruckte Abschnitte) festgelegt worden, denen nachfolgend die erreichten Ergebnisse gegenübergestellt werden.

### **Teilziel 1: Konzeption eines Regelwerks für eine konsequent dezentrale, agentenbasierte Steuerung von FTS**

*Das erste Teilziel beinhaltete die Entwicklung von Steuerungsmethoden für FTS, die ohne zentrale Kontrollinstanz situativ entscheiden, dynamische Systemzustände berücksichtigen (z. B. Verkehrszustand im Streckennetz, Status der Auftragszuordnung) und eine erhöhte Robustheit und Flexibilität gegenüber Störungen im Betriebsablauf aufweisen. Die Steuerungsmethoden sollten die Auftragsdisposition flexibilisieren, für eine bessere Routenplanung sorgen und Konfliktsituationen (z. B. in Kreuzungsbereichen) auflösen bzw. vermeiden. Im Gegensatz zu bisherigen zentralen FTS-Steuerungen sollte das System konsequent dezentral gestaltet werden (Selbststeuerung). Das Gesamtkonzept ist in Abbildung 1 dargestellt.*

*Die konsequent dezentrale Steuerung sollte durch ein Agentensystem realisiert werden, das aus verschiedenen, miteinander agierenden Agenten besteht. Das Agentensystem sollte ein Regelwerk enthalten, das von den Agenten zur Auftragsvergabe, zur konfliktvermeidenden Routenplanung und zur Konfliktlösung benutzt wird.*



**Abbildung 1: Gesamtkonzept der konsequent dezentralen FTS-Steuerung**

Im Rahmen der Konzeptionsphase des Regelwerks wurden Verfahren zur dezentralen Auftragsvergabe, konfliktvermeidenden Routenplanung sowie zur Konfliktlösung entwickelt. Für die Auftragsvergabe wurde zunächst das Standardprotokoll für die Auktion von FIPA (Foundation for Intelligent Physical Agents [Fcp02]) ausgewählt. Das Protokoll gibt lediglich den Ablauf der Auktion vor. Die Gebotsberechnung wurde im Rahmen des Projekts ausgearbeitet und ausgiebig getestet. Es hat sich gezeigt, dass alle Transportaufträge termingerecht und fair (alle Stationen wurden gleich behandelt) vergeben wurden. Des Weiteren gibt das Protokoll nicht vor, wie ein Agentensystem mit parallelen Auktionen umzugehen hat. Ein Gebot wird anhand des aktuellen Zustands eines Agenten bestimmt. Nimmt der Agent an mehreren Auktionen 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 eine zustandsbasierte Gebotsberechnung eingeführt und erfolgreich getestet. Weitere Details zur dezentralen Auftragsvergabe sind im Abschnitt 3.3 zu finden.

Für die konfliktvermeidende Routenplanung wurde das Verfahren von „ter Mors“ [Mor07] ausgewählt. Dieses Verfahren löst das Problem des konfliktfreien Routings zentral. Daher wurde das zentrale Verfahren in ein dezentrales Verfahren überführt und um die Möglichkeit der kooperativen Routenplanung erweitert. Bei dem Verfahren handelt es sich um ein Graphen-basiertes Verfahren, das mit sogenannten freien Zeitslots arbeitet. Hierbei handelt es sich um Zeitintervalle für die keine Reservierungen vorliegen und die groß genug sind, damit ein FTF eine Kante (oder einen Knoten) innerhalb dieses Zeitintervalls passieren kann. Das Verfahren erlaubt also eine Berechnung von einem beliebigen Startpunkt (sowohl zeitlich, als auch örtlich) und ist somit für die konfliktfreie Routenplanung bestens geeignet. Die Eignung wurde

durch zahlreiche Tests nachgewiesen. Weitere Details zur konfliktfreien Routenplanung sind in Abschnitt 3.3 zu finden.

Des Weiteren wurden Verfahren zur Konfliktlösung konzipiert. Zunächst wurde davon ausgegangen, dass in einem realen System Mechanismen existieren, die nach dem 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 konzipiert, das den Ablauf der Konfliktauflösung beschreibt, und konkrete Lösungsstrategien, die in einem speziellen Konflikt anzuwenden sind, ausgearbeitet. Weitere Details zur Konfliktauflösung sind im Abschnitt 3.3 zu finden.

Insgesamt wurde durch das Zusammenspiel der Auktion und der konfliktvermeidenden Routenplanung ein sehr effizientes Agentensystem entwickelt, das mit den im folgenden Abschnitt beschriebenen Simulationen verifiziert werden konnte.

## **Teilziel 2: Umsetzung eines Simulationsmodells der Agentensteuerung**

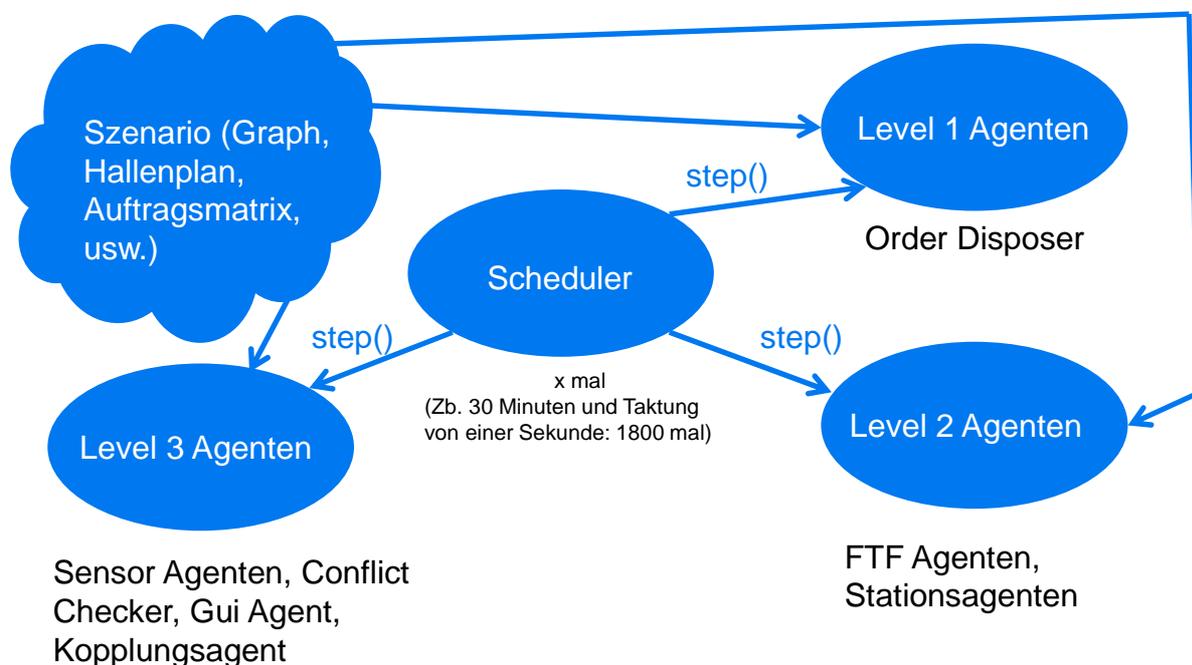
*In diesem Teilziel sollte ein Simulationsmodell der Agentensteuerung sowie eine ausführbare Simulation erstellt werden. Die Simulation sollte in der Lage sein, reale Szenarien zu simulieren. Die konkreten Anforderungen an dieses Teilziel waren:*

- 1. Umsetzung der Agenten in der Simulation,*
- 2. Umsetzung des vorgegebenen Szenarios,*
- 3. Ermittlung der wirtschaftlich relevanten Kennzahlen,*
- 4. Korrekte Umsetzung des Regelwerks zur Steuerung,*
- 5. Eine Simulationsgeschwindigkeit die eine Vielzahl an Simulationsläufen ermöglicht.*

Die entwickelte Simulation basiert auf Graphen und wurde mit MASON (siehe [Mas11]) umgesetzt. Der Graph bildet hierbei den Fahrkurs des FTS ab. Wege werden durch Kanten repräsentiert. Die Knoten des Graphen stellen die Verkehrspunkte da, wobei einigen der Verkehrspunkte Stationen und Parkplätze zugeordnet sind. Im Referenzszenario besteht der Graph aus 189 Knoten von denen 32 Knoten Stationen und 4 Knoten Parkplätze sind, sowie aus 472 Kanten. Die übrigen Knoten sind Kreuzungen.

Neben dem Graph besteht die Simulation im Wesentlichen aus einem Scheduler, der die in der Simulation befindlichen Agenten taktet sowie aus einem Nachrichtensystem, das in der Lage ist, die Kommunikation zwischen den Agenten zu simulieren.

Die Agenten im System sind in drei Ebenen (Levels) eingeteilt, die nacheinander getaktet werden. Im ersten Level sind die Order Disposer. Diese entsprechen im Prinzip den Stationen und verteilen die Aufträge an die Agenten entsprechend dem Regelwerk. Die Agenten im zweiten Level sind verantwortlich für tatsächliche Bewegungen. Dazu gehören die FTF Agenten und Agenten für Stationen. In Szenarien in denen es Brandschutztore oder Fahrstühle gibt, die mit Agenten gesteuert werden, sind auch diese Steuerungsagenten im zweiten Level. Im dritten Level sind Hilfsagenten, die keine direkte Repräsentanz in der physischen Welt haben. 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 2 dargestellt.



**Abbildung 2: Ablauf der Simulation**

Der Scheduler taktet die Simulation hierbei. Ein Takt entspricht dabei zum Beispiel einer Sekunde. In jedem Takt ruft er die Agenten auf. Zuerst die des ersten, dann die des zweiten und zum Ende die des dritten Levels. Alle Agenten handeln dann gemäß ihrem aktuellen Ziel.

Die beschriebene Simulation erfüllt alle fünf, oben aufgezählten Anforderungen. Die Simulation wurde mit Agenten realisiert, das vorgegebene Szenario wurde umgesetzt und justiert. Das System ist in der Lage die wirtschaftlich relevanten Kennzahlen zu ermitteln. Insgesamt ist das System auf einem handelsüblichen Notebook ca. 6.000 mal schneller als Realzeit. Damit kann eine Vielzahl an Simulationsläufen durchgeführt werden.

### Teilziel 3: Bewertung und Vergleich des Steuerungskonzepts durch Simulationsexperimente

Zur Erreichung des Teilziels 3 sollte im Rahmen einer Simulation der entwickelte Ansatz zur Selbststeuerung validiert und mit anderen möglichen Ansätzen zur FTS-Steuerung unter wirtschaftlichen Gesichtspunkten verglichen werden. Die Wirtschaftlichkeit sollte dabei unter den produktionslogistischen Zielgrößen (Hohe Termintreue, kurze Durchlaufzeit, hohe Auslastung) betrachtet werden. Nach Möglichkeit sollte dabei die Simulation eines realen Beispiels aus der industriellen Praxis betrachtet werden.

Für diesen Zweck wurde in Abstimmung mit den Mitgliedern des projektbegleitenden Ausschusses eine Getränkeabfüllanlage als Referenzszenario ausgewählt. Das Layout der Anlage ist in Abbildung 1 abgebildet.

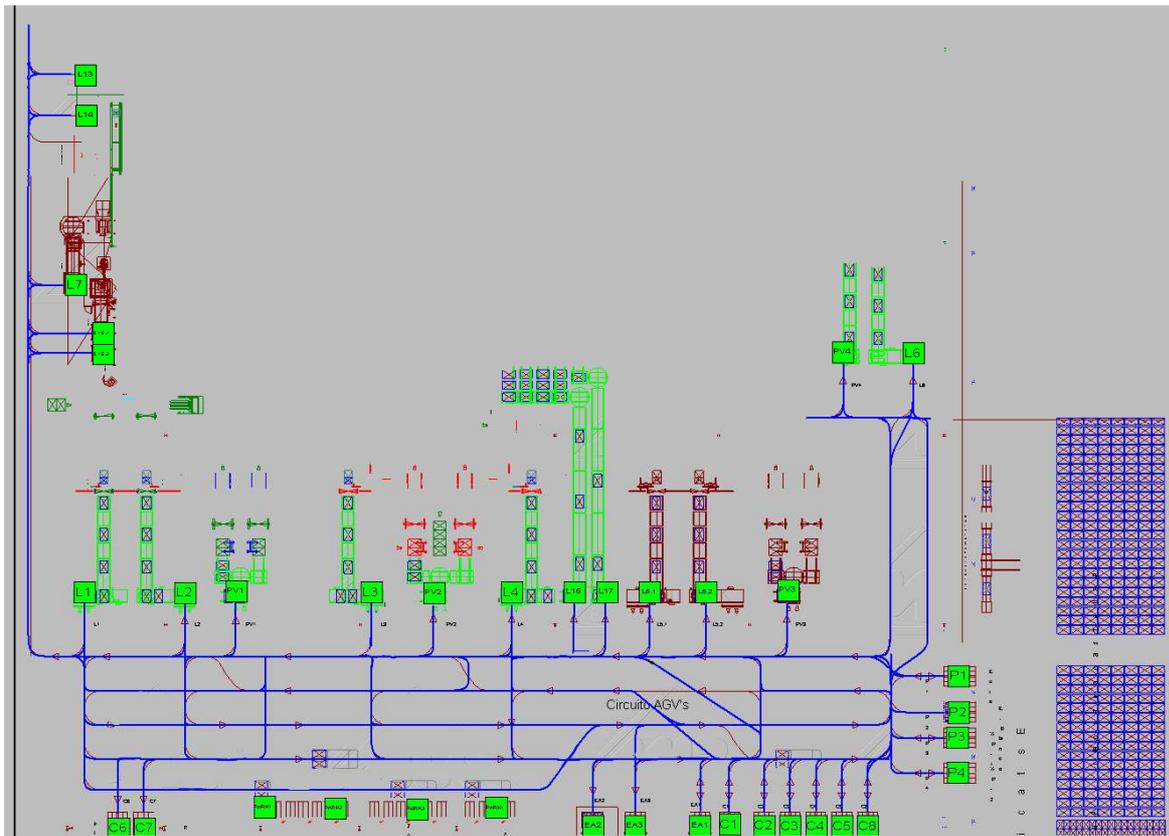


Abbildung 2: Das Layout des Referenzsystems

Für das ausgewählte Szenario, in dem insgesamt acht FTF im Einsatz sind, wurde dem Forschungsprojekt eine Simulation zur Verfügung gestellt, die eine reale, zentrale Steuerung simuliert und mit der die unten aufgeführten Kennzahlen bestimmt werden konnten.

Auf Grund der Absprachen mit dem projektbegleitenden Ausschuss wurde ein Zeitraum von einer halben Stunde als Referenzzeitraum ausgewählt. Innerhalb dieser Zeit werden insgesamt 26 Aufträge ausgeschrieben. Nach ca. 10 Minuten geht ein Fahrzeug in einen Fehlerstatus. Dieser Fehler wurde auch in der Simulation der

dezentralen Lösung integriert. Die ermittelten Kennzahlen zur Bewertung der zentralen Referenzsteuerung und der im Projekt entwickelten dezentralen Steuerung finden sich in der Tabelle 1.

**Tabelle 1: Kennzahlen zur Bewertung**

	Zentrale Steuerung	Dezentrale, Agenten basierte Steuerung
<b>Erfolgreich beendete Aufträge</b>	26,0	26,0
<b>Durchschnittliche Auftragsdauer (in sec)</b>	371,8	278,1
<b>Gefahrene Gesamtstrecke aller Fahrzeuge (in m)</b>	4500	4144
<b>Leerfahrtanteil (in %)</b>	56,77	55,35

Insgesamt lässt sich feststellen, dass die Umsetzung einer dezentralen Steuerung eines FTS mit den im Projekt entwickelten Regelwerken durchaus möglich und erfolgsversprechend scheint. Eine detailliertere Untersuchung der Simulationsergebnisse ist in den Abschnitten 3.6 und 3.7 dargestellt.

### 3 Darstellung der erzielten Ergebnisse

In diesem Kapitel werden die erzielten Ergebnisse dargestellt. Für jedes Arbeitspaket (AP) werden kurz die durchgeführten Arbeiten und anschließend ausführlich die erzielten Ergebnisse beschrieben.

#### 3.1 AP 1: Anforderungsanalyse

**Forschungsstelle Nr. 1, IPH – Institut für Integrierte Produktion Hannover**  
**Forschungsstelle Nr. 2, OFFIS – Institut für Informatik Oldenburg**

##### *Durchgeführte Arbeiten*

Im Rahmen des AP 1 wurden die Anforderungen an ein komplett dezentral gesteuertes Fahrerloses Transportsystem (FTS) aufgenommen und mit den beteiligten Projektpartnern diskutiert. Die Anforderungsaufnahme erfolgte in Form eines Fragebogens, der an die Projektpartner verschickt und anschließend ausgewertet wurde. Der Fragebogen wurde teilweise von den Industriepartnern selbst und teilweise in Diskussion mit den Forschungsstellen ausgefüllt.

##### *Erzielte Ergebnisse*

Als Ergebnis der Anforderungsaufnahme ist ein Lastenheft entstanden, das unter anderem die folgenden Punkte beschreibt:

- Referenzszenarien
- Agententechnologie
- Regelwerk zur Selbststeuerung

- Simulationstechnologie

Die Agententechnologien und die Simulationstechnologie werden in AP 2 näher beschrieben. Das Regelwerk zur Selbststeuerung ist Gegenstand von AP 3.

Für die Prüfung der Anforderungserfüllung, z. B. hinsichtlich der Verfügbarkeit oder Leistung, wurden von den Industriepartnern zwei Referenzszenarien bereitgestellt. Hierbei handelt es sich um zwei installierte FTS aus dem Produktions- und dem Krankenhausumfeld. Sie zeichnen sich durch zahlreiche periphere und stationäre Einrichtungen, unterschiedlich lange und verzweigte Wege, und vor allem im Krankenhaus durch zusätzlichen Personenverkehr aus. Ein weiteres Merkmal der beiden Szenarien ist die große Anzahl an FTF und unterschiedlichen Transportaufträgen.

Die beiden Szenarien wurden zusammen mit den vorliegenden Simulationen, die vor der Installation der FTS durchgeführt wurden, zur Verfügung gestellt. Aus diesen lassen sich Transportszenarien (z. B. Anzahl der Transportaufträge oder Häufigkeit) rekonstruieren und für die spätere Evaluierung des dezentralen FTS nutzen. Von großem Interesse sind hier die unterschiedlichen Transportarten und die Frage, wie gut das neue System sie bewältigt. Das agentenbasierte System soll genauso gute Ergebnisse sowohl bei planmäßigen Transportaufträgen, wie dem täglichen Abholen von schmutziger Wäsche, als auch bei unplanmäßigen Transportaufträgen, wie z. B. der Essensanlieferung für einen kürzlich eingelieferten Patienten, liefern.

Neben den Transportszenarien enthalten die Simulationen auch verschiedene Statistiken, die sich zur Gegenüberstellung der Zuverlässigkeit und Verfügbarkeit der beiden Systeme – zentral und dezentral gesteuert – sehr gut nutzen lassen. Zu den Statistiken zählen z. B. Fehlerstatistiken, Durchsatz, System-/Fahrzeugauslastung, Stillstandszeiten, Verfügbarkeit oder Auftragsdurchlaufzeit.

### **3.2 AP 2: Konzeption und Modellierung der Agentenplattform und der Agententypen**

#### **Konzeption und Modellierung der Agentenplattform und der Agententypen - Forschungsstelle Nr. 1, IPH**

##### *Durchgeführte Arbeiten*

Im Rahmen dieses Arbeitspaketes wurde zunächst nach möglichen Standards im Umfeld von Softwareagenten recherchiert. Die FIPA (Foundation for Intelligent Physical Agents, [Fia11]) ist hier besonders relevant. Neben den Grundbegriffen, wie Agent oder Agentenplattform, definiert FIPA auch Kommunikations- und Interaktionsprotokolle und legt den Grundrahmen für die Handhabung der Agenten fest. Bisher wurden 26 von FIPA erarbeitete Spezifikationen als Standards von der IEEE (Institute of Electrical and Electronics Engineers) akzeptiert.

Im nächsten Schritt wurde eine Agentenplattform ausgewählt. Das ausschlaggebende Kriterium war die Umsetzung der FIPA-Standards in der ausgewählten Plattform. Deshalb wurden zunächst FIPA-konforme Agentenplattformen recherchiert und anschließend bewertet.

Für die Identifikation und Modellierung der Agenten in einem FTS wurde im dritten Schritt nach einer Entwicklungsmethode gesucht. Die Kriterien waren hier unter anderem die Objektorientierung (als Voraussetzung für eine Java-basierte Entwicklung), die Unterstützung von UML als Modellierungswerkzeug sowie die Unterstützung in allen Phasen des klassischen Software-Entwicklungsprozesses.

### *Erzielte Ergebnisse*

Die Ergebnisse des AP 2 setzen sich zusammen aus den ausgewählten Agententechnologien (Tabelle 2) und den identifizierten Agenten im FTS.

**Tabelle 2: Eingesetzte Technologien**

<b>Standards</b>	FIPA
<b>Agentenplattform</b>	JADE
<b>Entwicklungsmethode</b>	PASSI
<b>Simulationsumgebung</b>	MASON

Abbildung 3 zeigt die Auflistung der FIPA-konformen Agentenplattformen und deren Bewertung anhand unterschiedlicher Kriterien. Einige subjektive Kriterien, wie die Popularität einer Plattform, wurden bei der Bewertung geringer gewichtet und sind deshalb in der Tabelle nicht enthalten. Wie der Bewertungstabelle zu entnehmen ist, erfüllt JADE [Jad11] alle Kriterien. Die Plattform ist aktuell (JADE 4.1.1, freigegeben am 18.11.2011) und sehr gut dokumentiert. JADE wurde daher für die Umsetzung des agentenbasierten FTS ausgewählt.

Plattform \ Kriterium	Aktualität		Verfügbarkeit		Dokumentation
	Wartung	Weiterentwicklung	Free Software	OpenSource	
Agent Development Kit	+	+	0	0	+
April Agent Platform	-	-	+	+	#
Comtec Agent Platform	-	-	-	-	#
FIPA-OS	-	-	+	+	#
Grasshopper	-	-	+	-	+
JACK Intelligent Agents	+	+	0	-	+
JADE	+	+	+	+	+
JAS (Java Agent Services API)	-	-	-	-	#
ZEUS	-	-	+	+	-
<b>Legende:</b>	+ erfüllt			- nicht erfüllt	
	0 zum Teil erfüllt			# keine Aussage	

**Abbildung 3: Auswahl einer Agentenplattform**

Für Agentensysteme ist eine Vielzahl von Entwicklungsmethoden, wie INGENIAS, SODA oder GORMAS ist verfügbar [FipG11]. Eine Methode, die den meisten Bewertungskriterien entsprach, ist PASSI (Process for Agent Societies Specification and Implementation) [Pas11]. Sie ist sehr gut strukturiert und führt den Entwickler Schritt für Schritt durch den gesamten Entwicklungsprozess. Angefangen mit der Beschreibung des Einsatzbereichs der Agenten und deren Identifikation, über die Beschreibung der sozialen Struktur der Agenten, bis hin zur Implementierung und Umsetzung des gesamten Systems (Abbildung 4). PASSI wurde außerdem für die Entwicklung FIPA-konformer Agentensysteme konzipiert und ist durch die Spezifikation „Design Process Documentation Template“ (FIPA SC00097B) sehr gut beschrieben und wurde daher für die Entwicklung des agentenbasierten FTS ausgewählt.

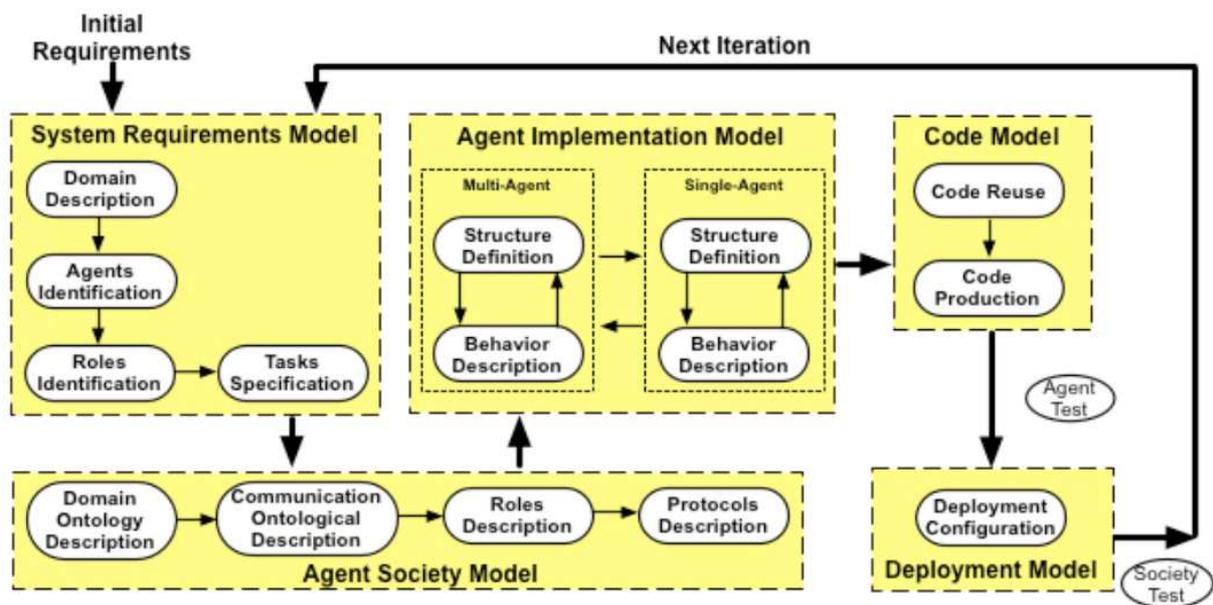


Abbildung 4: PASSI Designprozess (Quelle: [PAS11])

Die Identifikation und die Beschreibung der Aufgaben der Agenten in einem System erfolgt nach PASSI in vier Schritten (vgl. Abbildung 4, links oben). Die Identifikation wird hier beispielhaft an der Auftragsvergabe erläutert.

Im ersten Schritt wird die Auftragsvergabe in Form von UML-Diagrammen (Unified Modeling Language) modelliert. Speziell kommen hier Use Case-Diagramme zum Einsatz. Im zweiten Schritt werden einzelne Funktionen, die logisch miteinander zusammenhängen, zu Agenten gruppiert (vgl. Abbildung 5). Das Ergebnis der beiden ersten Schritte sind zwei Agenten mit den Namen „Orderer“ und „TransportOrderImprover“. Der „Orderer“ steht für alle Geräte und Personen, die einen Transportauftrag bei der Leitsteuerung veranlassen können. Diese sind z. B. Personal, Betriebsdatenerfassungsgeräte, Host-Rechnersysteme (ERP, PPS) oder Bearbeitungsstationen. Der „TransportOrderImprover“ ist die FTS-interne Materialflusssteuerung. Sie kommt zum Einsatz, wenn der Auftraggeber z. B. unvollständige Informationen zum Auftrag liefert.

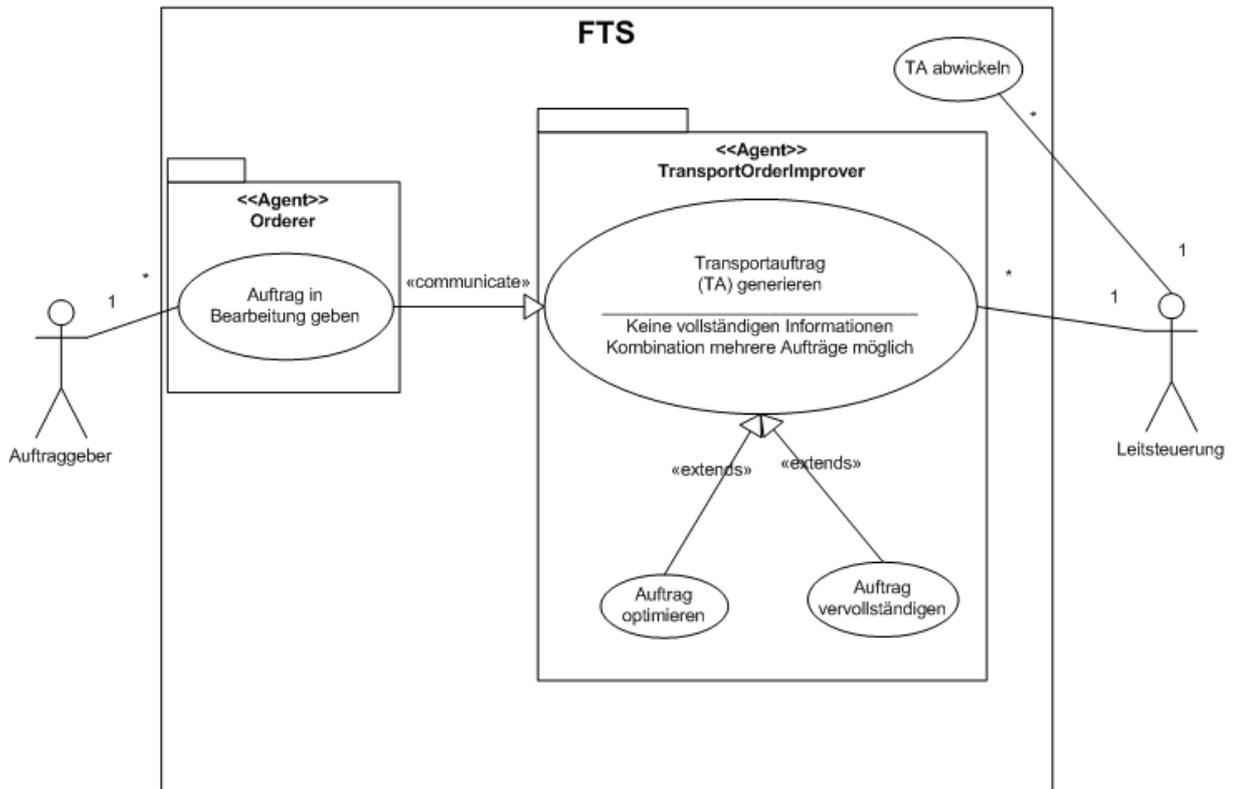


Abbildung 5: Agentenidentifikation am Bsp. der Auftragsvergabe

Die identifizierten Agenten wurden dem projektbegleitenden Ausschuss am 2. Treffen präsentiert und diskutiert. Insgesamt wurden 8 Agenten identifiziert. Ihre Aufgaben sind in Tabelle 3 beschrieben.

Tabelle 3: Identifizierte Agenten

Bezeichnung	Funktion	
Manager	Steuerung und Koordination, Kommunikation mit anderen Einheiten (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		Lastaufnahme

## **Auswahl eines Simulationstools - Forschungsstelle Nr. 2, OFFIS**

### *Durchgeführte Arbeiten*

Im Rahmen dieses Arbeitspaketes wurde ein geeignetes Simulationstool ausgewählt. Hierzu wurden folgende Simulationstools bzw. Libraries untersucht:

- AnyLogic
- AutoMod
- High Level Architecture (HLA)
- MASON (Multi Agent Simulation of Neighborhoods)
- PlantSimulation

### *Erzielte Ergebnisse*

AnyLogic ist ein Simulationstool was sowohl Discrete Event Simulation (DES) als auch Agenten-basierte Simulationen beherrscht (<http://www.anylogic.com/>). Es stellt Module für gängige Szenarien sowie eine ausgereifte Visualisierung zur Verfügung.

AutoMod ist ein Simulationswerkzeug zur Abbildung, Analyse und Emulation komplexer Systeme (<http://www.automod.de/>). Neben der klassischen Anwendung für die Fabrikplanung wurde AutoMod auch schon in Forschungsprojekten zu Multiagentensystemen (MAS) eingesetzt. Beispielsweise wurde die dezentrale multiagentenbasierte Steuerung eines Gepäckförderers auf einem Flughafen erfolgreich mit AutoMod simuliert [Roi10]. Um AutoMod verwenden zu können, müssten Lizenzen erworben werden. Der Erwerb eines Forschungslizenzpakets kostet aktuell ca. 5.000 Euro.

High-Level Architecture (HLA) ist eine vom US-amerikanischen Verteidigungsministerium (genauer dem "Defense Modeling and Simulation Office, DMSO for the U.S. Department of Defense") definierte Architektur zur integrierten und verteilten Simulation [Hla11]. HLA ist also keine eigenständige Simulationsplattform, sondern ein Konzept zur verteilten Simulation. Die Vorteile von HLA liegen in der Verwendbarkeit beliebiger Module für bestimmte Aufgaben (High Level Programmiersprachen, Matlab, Skriptsprachen, usw.). HLA basierte Simulationen werden bereits im Bereich Verkehr am OFFIS eingesetzt, zum Beispiel im Projekt HUMAN [Hum11]. Weiterhin wird im OFFIS an der Entwicklung von leistungsfähigen Tools für das Aufsetzen von HLA konformer Simulationen gearbeitet.

MASON (Multi Agent Simulation of Neighbourhoods) [Mas11] verfolgt als Ziel die Vereinfachung von Simulationen komplexer adaptiver Systeme, evolutionärer Algorithmen, Methoden der Selbstorganisation, des Physical Modelling sowie des Maschinellen Lernens. MASON wurde am OFFIS bereits im Projekt CogniLog [Cog11] für die Simulation von multiagentenbasierten Flurförderfahrzeugen eingesetzt. Tools,

die im Rahmen des Projekts entwickelt wurden, wie z. B. EnvEdit [Env11], konnten bei der Verwendung von MASON weiterverwendet werden.

PlantSimulation bildet komplexe Produktionssysteme und -prozesse in Computermodellen ab [Pla11]. PlantSimulation gehört zu den am weitesten verbreiteten Simulationstools für die Simulation von Abläufen in der Intralogistik.

Die Bewertung für die Auswahl des Basissystems erfolgte anhand der vier Parameter Multi-Agenten-basierte-Simulation (MABS), Performanz, Kosten und Einarbeitungszeit. Mit MABS ist hierbei gemeint, ob das System die Multi-Agenten-basierte Simulation bereits von sich aus unterstützt oder nicht. Performanz meint wie schnell die Simulation ablaufen kann. Kosten und Einarbeitungszeit sind eher weiche aber im Rahmen des Projektbudgets und der Projektlaufzeit dennoch wichtige Faktoren gewesen. Tabelle 4 stellt die Kriterien und die Erfüllungsgrade dar. Ein + bedeutet hierbei volle Erfüllung, ein O bedeutet, dass das Simulationstool die Anforderung teilweise erfüllt und ein -, dass das Simulationstool die Anforderung nicht erfüllt.

**Tabelle 4: Auswahl des Simulationstools**

	AnyLogic	AutoMod	HLA	MASON	Plant Simulation
MABS	+	+	+	+	-
Performanz	+	O	+	+	-
Einarbeitung	-	-	-	+	+
Kosten	-	-	-	+	+

Nach der erfolgten Bewertung wurde MASON als Simulationsumgebung für das Projekt ausgewählt. Drei Gründe waren dafür besonders ausschlaggebend. Erstens: MASON und die dazugehörigen Tools sind kostenlos. Für PlantSimulation, AnyLogic und AutoMod wären teils hohe Lizenzgebühren fällig geworden. Zweitens: MASON ist deutlich schneller als klassische DES Simulationen. Dieser Geschwindigkeitsvorteil kann beim Bestimmen geeigneter Parameter für das Regelwerk sehr hilfreich sein. Drittens: MASON ist bereits beim OFFIS im Einsatz. Dadurch verkürzt sich die Einarbeitungszeit deutlich, was bei einem auf 2 Jahre angesetzten Projekt ein gewichtiger Vorteil ist.

### **3.3 AP 3: Konzeption des Regelwerks zur Steuerung**

#### **Verfahren zur Auftragszuordnung und Konfliktlösung - Forschungsstelle Nr. 1, IPH**

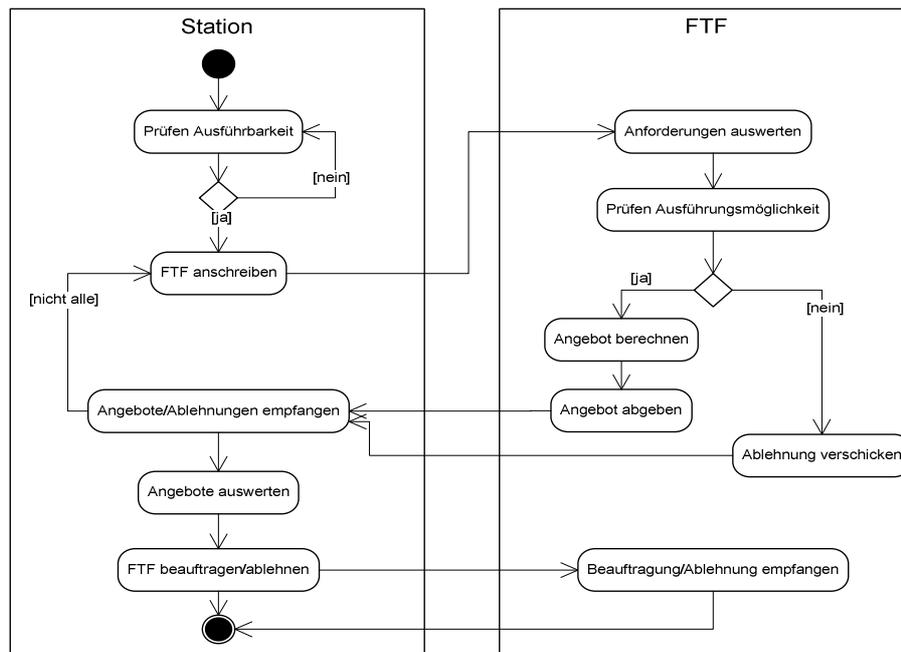
##### *Durchgeführte Arbeiten*

Im Rahmen der Konzeptionsphase des Regelwerks wurden zunächst existierende Verfahren zur dezentralen Auftragsvergabe recherchiert. Als eine mögliche Lösung für die Auftragsvergabe hat sich im Umfeld der Agenten die Auktion etabliert. Hierbei schreibt ein Agent (Auktionator) einen Transportauftrag aus und die anderen Agenten (Bieter) geben ihre Gebote ab. Der Bieter mit dem besten Gebot bekommt den Zuschlag und darf den Transportauftrag ausführen. Ein Standardprotokoll für die Auktion wird von FIPA vorgeschlagen [Fcp02]. Wie das Gebot berechnet wird, ist von der FIPA nicht festgelegt. Deshalb wurden verschiedene Verfahren zur Gebotsberechnung erarbeitet, die während der Simulationsphase in AP 6 bewertet wurden.

Neben der Auftragsvergabe wurden Verfahren zur Konfliktlösung entwickelt. Zunächst wurden mögliche Konfliktparteien und die Konfliktgründe identifiziert. Hierzu wurden alle Entitäten des FTS gegenübergestellt und Kommunikationspartner mit dem Potenzial zu einem Konflikt markiert. Danach wurden die Gründe des möglichen Konflikts zusammengestellt und die wahrscheinlichsten ausgewählt. Anhand dieser Auswahl wurden im letzten Schritt Strategien zur Konfliktlösung erarbeitet und ein allgemeines Vorgehen bei einem Konflikt definiert.

##### *Erzielte Ergebnisse*

Der Ablauf einer Auftragsvergabe anhand einer Auktion ist in Abbildung 1 dargestellt.



**Abbildung 6: Verlauf einer Auktion zwischen Auktionator (Station) und Bieter (FTF)**

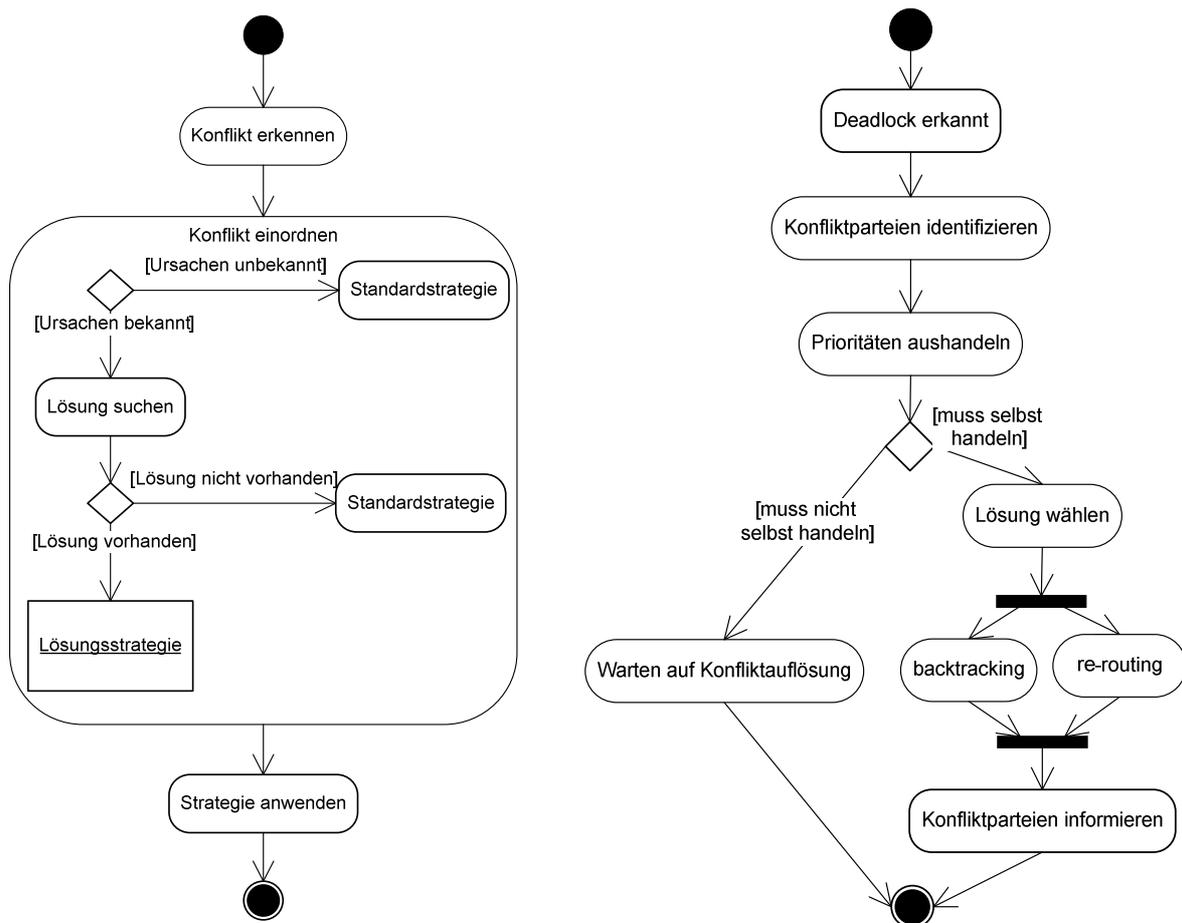
Der Ablauf der Auktion ist an das FIPA-Protokoll angelehnt und stellt einen Auktionator (Station) und einen Bieter (FTF) dar. Ist an einer Station Material abzuholen oder bereitzustellen, so wird ein Transportbedarf ausgeschrieben. Die FTF berechnen daraufhin ihre Gebote und übersenden sie an die Station, die ihrerseits die Gebote gegeneinander bewertet und das Beste auswählt. Die FTF bekommen danach entsprechend der Gebotsauswertung eine Zu- oder Absage.

Die Berechnung des Gebots erfolgt anhand des aktuellen Belegungszustands eines FTF und seiner Entfernung zum Auftragsort. Für einen neuen Auftrag, wird das Gebot wie folgt berechnet:

$$\text{Gebot} = \text{EndeLetzterVerplanterAuftrag} + \text{FahrtZurQuelle}$$

Das Ergebnis ist die früheste Zeit zu der ein FTF den Auftrag anfangen kann. Je kleiner dieser Wert ist, desto besser ist das Gebot.

Das konzipierte Vorgehen zur Konfliktlösung wird anhand des Beispiels einer Deadlock-Auflösung (z. B. Stau auf einer Strecke) erläutert (vgl. Abbildung 7). Im ersten Schritt wird ein Deadlock erkannt und die betroffenen Parteien identifiziert. Im nächsten Schritt werden Prioritäten (abhängig von aktuellen Aufträgen) ausgehandelt. Ein FTF mit geringerer Priorität ist gezwungen zu handeln und kann zwischen zwei Alternativen wählen: Backtracking (Zurücksetzen, bis das erste FTF die Möglichkeit hat, vorbei zu fahren) oder Re-Routing (Suchen nach einer alternativen Route). Ist die Deadlock-Situation aufgelöst, werden die beteiligten Parteien informiert und die Auftragsbearbeitung fortgesetzt.



**Abbildung 7: Verfahren zur Konfliktlösung (Links: allgemein, rechts: am Beispiel von Deadlock)**

Weitere Konflikte ergeben sich bei der Reservierung von Ressourcen (Streckenabschnitte, Übergabepätze) und bei internen Inkonsistenzen der Agenten, z. B. durch Verlust von Informationen.

## Verfahren zur konfliktvermeidenden Routenplanung - Forschungsstelle Nr. 2, OFFIS

### *Durchgeführte Arbeiten*

Im Rahmen der Konzeptionsphase wurden zunächst existierende Verfahren zur konfliktvermeidenden Routenplanung, speziell im Zusammenhang mit FTS, untersucht. Ein Großteil dieser Verfahren kam für das Projekt allerdings nicht in Frage, da es sich um zentrale Verfahren handelt, die sich nicht auf naheliegende Weise in dezentrale umwandeln ließen (zum Beispiel das Verfahren von „Broadbent et.al.“ [Bro85], oder das time window graph Verfahren von „Kim und Tanchoco,“ [Kim91]) oder weil die Verfahren nur für Hallenlayouts mit bestimmten Eigenschaften funktionieren (zum Beispiel das Verfahren von „Singh et.al.“ [Sin09]) was eine zu große Einschränkung für das zu entwickelnde dezentrale System darstellt.

Nach der Analyse vorhandener Verfahren wurde als geeignete Grundlage für die konfliktvermeidende Routenplanung das Verfahren von „ter Mors“ et.al [Mor07] ermittelt. Dieses Verfahren löst das Problem des konfliktfreien Routings zentral in einer asymptotischen Laufzeit von  $O(nv \log(nv) + nv^2)$  wobei  $n$  die Anzahl der Knoten im Hallenlayout und  $v$  die Anzahl der Fahrzeuge angibt.

Schließlich wurde das zentrale Verfahren in ein dezentrales Verfahren überführt und um die Möglichkeit der kooperativen Routenplanung erweitert. Zur Überführung wurden insbesondere Nachrichten und lokale Graphen benutzt.

### *Erzielte Ergebnisse*

Im Projekt wurde ein auf freien Zeitslots basierendes, dezentrales Routingverfahren auf Basis des Verfahrens von ter Mors et.al. [Mor07] entwickelt. In dem Verfahren bestimmt ein Fahrzeug seine abzufahrende Route mit den folgenden Schritten:

- Das Fahrzeug berechnet einen Graphen aus den freien Zeitslots
- Das Fahrzeug berechnet seine Route in diesem Graph.
- Das Fahrzeug informiert die anderen Fahrzeuge im System über seine geplante Route.

Für die Berechnung des Graphen werden zunächst für jede Ressource, das heißt jedes Wegsegment, jede Kreuzung, jede Station, die freien Zeitslots bestimmt. Ein freier Zeitslot ist hierbei ein Zeitintervall für das keine Reservierungen vorliegen und das groß genug ist, damit das Fahrzeug die Ressource innerhalb dieses Zeitintervalls traversieren kann. Für einen Weg, für den ein Fahrzeug 20 Sekunden brauchen würde und für den folgende Reservierungen vorliegen(jeweils als Sekunden seit Systemstart): [0-40], [50-80], [110-140,] ergeben sich folgende freie 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 (der Zeitraum 40-50).

Die so ermittelten freien Zeitslots dienen als Knoten im Graph. Pro Ressource kann es durchaus mehr als einen Knoten geben. Zwei Knoten  $f_1$  und  $f_2$  sind verbunden, wenn sie die folgenden Bedingungen erfüllen:

1. Die beiden Ressourcen sind im Layout-Graph miteinander verbunden
2. Das Maximum aus der Summe des Anfangs des Zeitintervalls von  $f_1$  und der minimalen Traversierungszeit der Ressource  $f_1$  sowie dem Ende des Zeitintervalls von  $f_1$  liegt im Intervall von  $f_2$
3. Die Eintrittszeit in  $f_2$  + die minimale Traversierungszeit  $f_2$  liegt im Intervall  $f_2$

Diese Bedingungen besagen, dass die beiden Ressourcen erreichbar sind (also zwei Wege zum Beispiel durch eine Kreuzung verbunden sind) und dass ausreichend Zeit

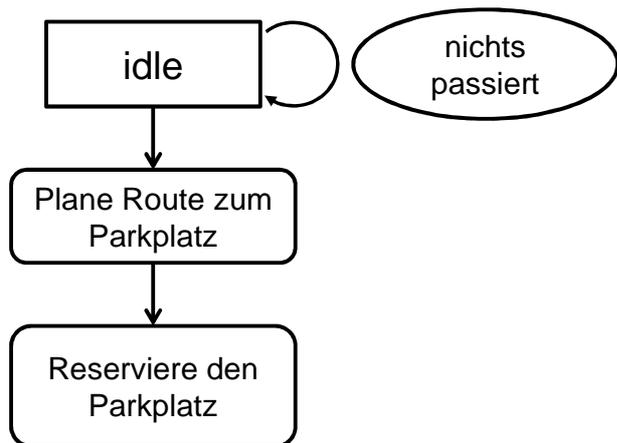
vorhanden ist, um von einer Ressource zur anderen zu gelangen und diese auch wieder im freien Zeitslot zu verlassen.

Die Route wird nun wie folgt berechnet: Ausgehend von der Startressource und der Startzeit (der Zeit, zu der die Route geplant werden soll) werden in einem Dijkstra ähnlichen Algorithmus die jeweils erreichbaren Zeitslots sowie die Eintrittszeit in diese bestimmt. Das Verfahren stoppt, sobald die Zielressource erreicht wurde. Das Ergebnis ist eine Folge aus 2-Tupeln die jeweils eine Ressource und eine Eintrittszeit beinhalten. Bei der Anfrage nach einer Route von der Ressource  $r_s$  zur Ressource  $r_z$  zum Zeitpunkt  $t_0$  wäre ein Resultat also beispielsweise die Folge:  $( (r_s, t_0), (r_1, t_1), (r_2, t_2), \dots, (r_z, t_z) )$ . Der Agent würde also zum Zeitpunkt  $t_z$  bei der Zielressource  $r_z$  ankommen. Die Differenz zwischen je zwei Zeitpunkten ist die Zeit, die der Agent auf der jeweiligen Ressource verbringen muss. Für die beiden Tupel  $(r_1, t_1), (r_2, t_2)$  würde das also bedeuten, dass der Agent im Zeitintervall  $[t_1, t_2]$ , also für  $t_2 - t_1$  Sekunden, auf der Ressource  $r_1$  sein muss. Hierbei kann es sein, dass  $t_2 - t_1$  größer ist, als die Zeit, die der Agent für das Traversieren der Ressource bei Höchstgeschwindigkeit benötigen würde. Ist dies der Fall, muss der Agent entweder einen Stop einlegen oder die Ressource mit eingeschränkter Geschwindigkeit befahren.

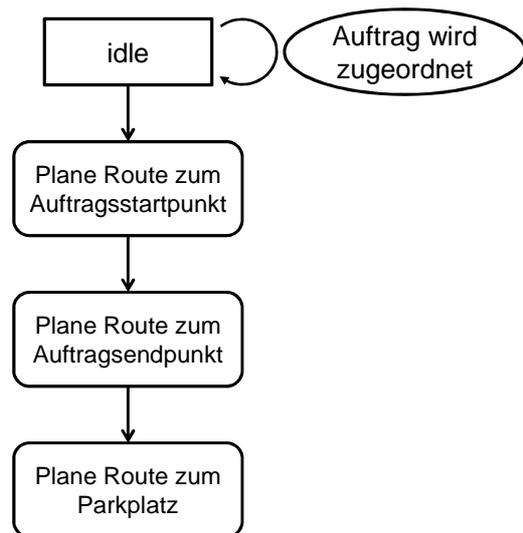
Nach Berechnung der Route informieren die Agenten die anderen Agenten im System über die geplante Route. Diese speichern die draus resultierenden Reservierungen in ihrem Graph. Im Fall der fehlerfreien Nachrichtenübertragung zwischen den Fahrzeugen, also wenn die in 3. verschickten Nachrichten auch jedes Fahrzeug erreichen, sind alle so ermittelten Routen konfliktfrei.

Die Planung der Routen wird hierbei angestoßen, wenn dem Fahrzeug ein neuer Auftrag zugeordnet wird. Der genaue Ablauf hängt hierbei von dem aktuellen Zustand des Agenten ab. Im Wesentlichen können vier Situationen unterschieden werden: Der Agent ist idle und bekommt keinen Auftrag zugewiesen, der Agent ist idle und bekommt einen Auftrag zugewiesen, der Agent fährt einen Auftrag und bekommt einen neuen Auftrag zugewiesen und der Agent parkt und bekommt einen Auftrag zugewiesen.

Wenn der Agent idle ist, also derzeit weder einen Auftrag zugeordnet hat noch auf einem Parkplatz steht wird die Route von der aktuellen Position aus zu einem freien Parkplatz geplant. Außerdem wird der Parkplatz reserviert. (Siehe Abbildung 10.) Dieser Zustand tritt zum Beispiel bei einem Anmelden im System ein.



**Abbildung 8:** Planungsablauf wenn der Agent idle ist und nichts passiert

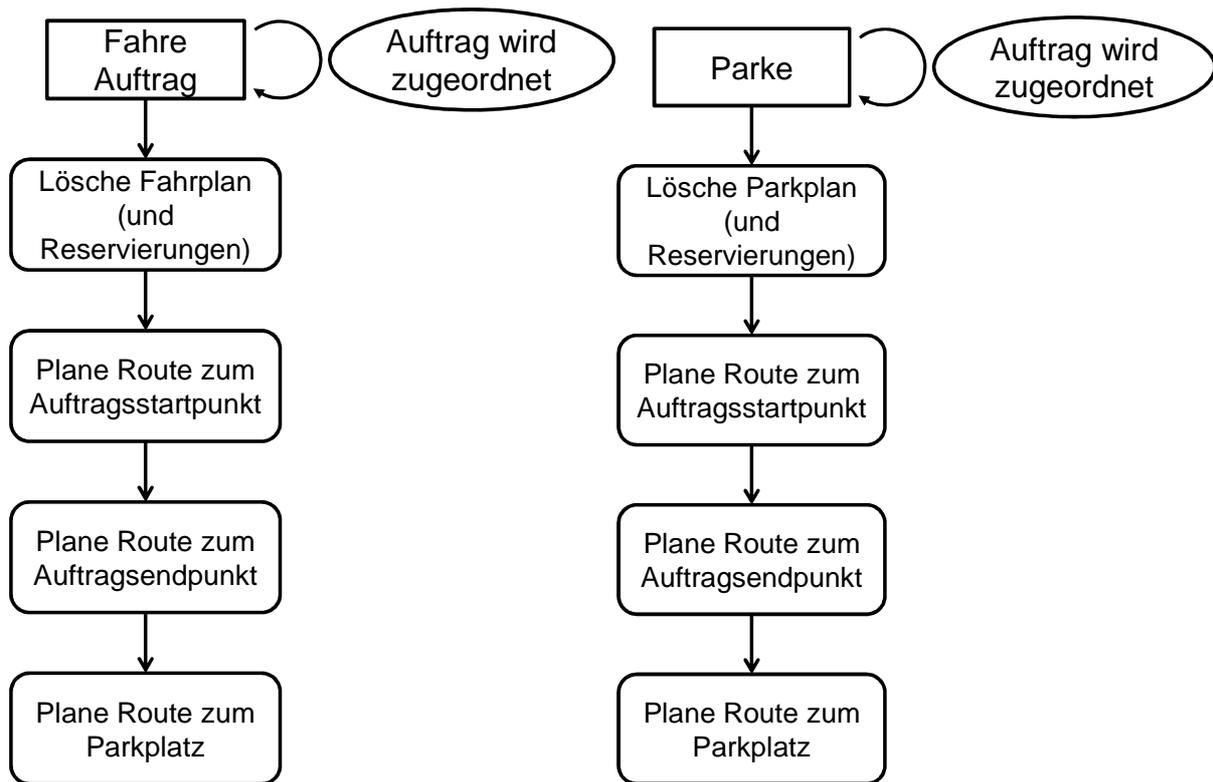


**Abbildung 9:** Planungsablauf wenn der Agent idle ist und einen Auftrag zugewiesen bekommt

Wenn der Agent idle ist und einen Auftrag zugewiesen bekommt plant er zunächst eine Route von der aktuellen Position zum Start des Auftrags. Anschließend reserviert er diese Position für den Beladevorgang. Danach plant er eine Route zum Endpunkt des Auftrags und reserviert diesen für das Entladen. Abschließend plant er eine Route zu einem freien Parkplatz und reserviert diesen. (Siehe Abbildung 11.)

Wenn er Agent bereits einen Auftrag ausführt und einen neuen Auftrag zugewiesen bekommt, löscht er als erstes den Parkplan, der in diesem Fall immer vorhanden ist, sowie die Parkplatzreservierung. Dann plant er eine Route vom Endpunkt des zuletzt geplanten Auftrags zum Startpunkt des neuen Auftrags. Anschließend reserviert er diese Position für den Beladevorgang. Danach plant er eine Route zum Endpunkt des Auftrags und reserviert diesen für das Entladen. Abschließend plant er eine Route zu einem freien Parkplatz und reserviert diesen. (Siehe Abbildung 12.)

Wenn der Agent gerade zu dem ihm zugewiesenen Parkplatz fährt, während er einen Auftrag zugewiesen bekommt, löscht er als erstes den Parkplan sowie die Parkplatzreservierung. Dann plant er eine Route vom Endpunkt der aktuellen Ressource zum Startpunkt des neuen. Anschließend reserviert er diese Position für den Beladevorgang. Danach plant er eine Route zum Endpunkt des Auftrags und reserviert diesen für das Entladen. Abschließend plant er eine Route zu einem freien Parkplatz und reserviert diesen. (Siehe Abbildung 13.)



**Abbildung 10:** Planungsablauf wenn der Agent einen Auftrag ausführt und einen weiteren Auftrag zugewiesen bekommt

**Abbildung 11:** Planungsablauf wenn der Agent einen Parkplan fährt und einen Auftrag zugewiesen bekommt

Bei allen Routenplanungen wird jeweils der Zeitpunkt zu dem ein Plan startet in die Berechnung einbezogen. Das bedeutet, dass die Pläne nur dann gültig, also konfliktfrei bleiben, wenn der Agent sich an seinen Plan hält. Sollte es zu zeitlichen Verzögerungen beim Abarbeiten eines Plans kommen, so muss eine Neuplanung angestoßen werden.

Ergänzt wurde dieses Verfahren um die Möglichkeit der Kooperation. Die Agenten können hierbei andere Agenten davon überzeugen, geplante Routen aufzugeben. Das Verfahren sieht dann wie folgt aus:

- Das Fahrzeug berechnet einen Graphen aus den freien Zeitslots für jedes Wegsegment.
- Das Fahrzeug berechnet den kürzesten Graph im Hallenlayout und überprüft mit Hilfe des Graphen der freien Zeitslots, ob es diese Route konfliktfrei fahren kann.
- Wenn die kürzeste Route nicht konfliktfrei ist, berechnet das Fahrzeug seine Route im Graphen der freien Zeitslots und überprüft, wie viel länger diese im Vergleich zur kürzesten Route ist.

- Ist die konfliktfreie Route um einen festgelegten Wert größer als die kürzeste fragt es beim blockenden Fahrzeug nach der Freigabe der benötigten Streckenabschnitte. Dieses bestimmt dann eine alternative, konfliktfreie Route und wenn diese nur um einen festgelegten Wert größer ist, gibt es seine ursprüngliche Route frei.
- Die Fahrzeuge informieren die anderen Fahrzeuge im System über ihre neu geplanten Routen.

Die Bedingungen unter welchen ein Agent um das Aufgeben einer Reservierung gebeten werden soll und wann der gebetene Agent dies annimmt sind hierbei entscheidend. Implementiert wurde bisher ein Aufgeben von idle Reservierungen. Hierbei wird das Konzept „Parken“ bzw. dedizierte Parkplätze aufgegeben. Im oben vorgestellten Ablauf ist das Parken notwendig, damit die Agenten nicht die Stationen, an denen sie zuletzt Aufträge beendet haben, blockieren. Unter Verwendung der idle-lock Kooperation fällt das Parken in den oben vorgestellten Abläufen weg. Stattdessen reserviert das Fahrzeug den Endpunkt des jeweils letzten Auftrags mit einer permanenten Reservierung, dem idle-lock. Wenn nun ein anderes Fahrzeug seine Route plant und dabei feststellt, dass ein solcher idle-lock zu einer Verlängerung seiner Route führt, fordert es den Inhaber dieser Reservierung dazu auf, diese freizugeben. Der Inhaber, der ja zu diesem Zeitpunkt im idle-Modus ist, also keinen Auftrag ausführt, gibt dieser Aufforderung immer nach und sucht nach der ihm nächstgelegenen Ressource für die es keine Reservierung gibt, plant eine Route zu dieser und reserviert diese mit einem idle-lock. Diese Ressource muss keine Station sein sondern kann auch ein normaler Wegabschnitt sein, für den im Moment keine Reservierungen vorliegen.

Sowohl das Verfahren mit dediziertem Parken als auch das Verfahren mit idle-locks führen zu konfliktfreien Routen, solange die Kommunikation fehlerfrei erfolgt. Die mit diesen Verfahren erzielten Ergebnisse werden in den Abschnitten 4.6 und 4.7 vorgestellt.

### **3.4 AP 4: Implementierung der Agentenplattform und Agententypen**

#### **Implementierung der Agentenumgebung - Forschungsstelle Nr. 1, IPH**

##### *Durchgeführte Arbeiten*

Die Implementierung der Agentenumgebung erfolgte nach dem in AP 1 gewählten Designprozess PASSI [Pas11]. In AP 2 wurden die Schritte „System Requirements Model“ und „Agent Society Model“ abgearbeitet. Im aktuellen Arbeitspaket wurden die Schritte „Agent Implementation Model“ (AIM), „Code Model“ (CM) und „Deployment Model“ (DM) durchgeführt.

Im Schritt AIM wurden die Struktur und die Verhaltensweisen (Behaviours) der Agenten definiert. Alle Agenten verfügen z. B. über eine zyklische Verhaltensweise, die die ankommenden Nachrichten verarbeitet und an weitere Verhaltensweisen des Agenten weiterleitet. Im Schritt CM wurde der tatsächliche Quellcode geschrieben und dokumentiert. Im letzten Schritt DM wurden die Agenten entsprechend ihrem späteren Einsatz auf realer Hardware auf verschiedene Container des JADE-Systems [JADE11], das in AP 1 als Agentenplattform ausgewählt wurde, verteilt.

### Erzielte Ergebnisse

Die definierten Agententypen mit ihren Rollen und Verhaltensweisen wurden implementiert. Die Verteilung der Agenten auf unterschiedliche Container wurde erfolgreich umgesetzt (vgl. Abbildung 12). Die JADE-Container lassen sich ohne viel Aufwand auf die reale Hardware verteilen. Der in Abbildung 12 gezeigte „AGV“-Container lässt sich also, zusammen mit allen installierten Agenten, direkt auf ein FTF übertragen. Die Container bilden ein verteiltes und somit dezentrales System.

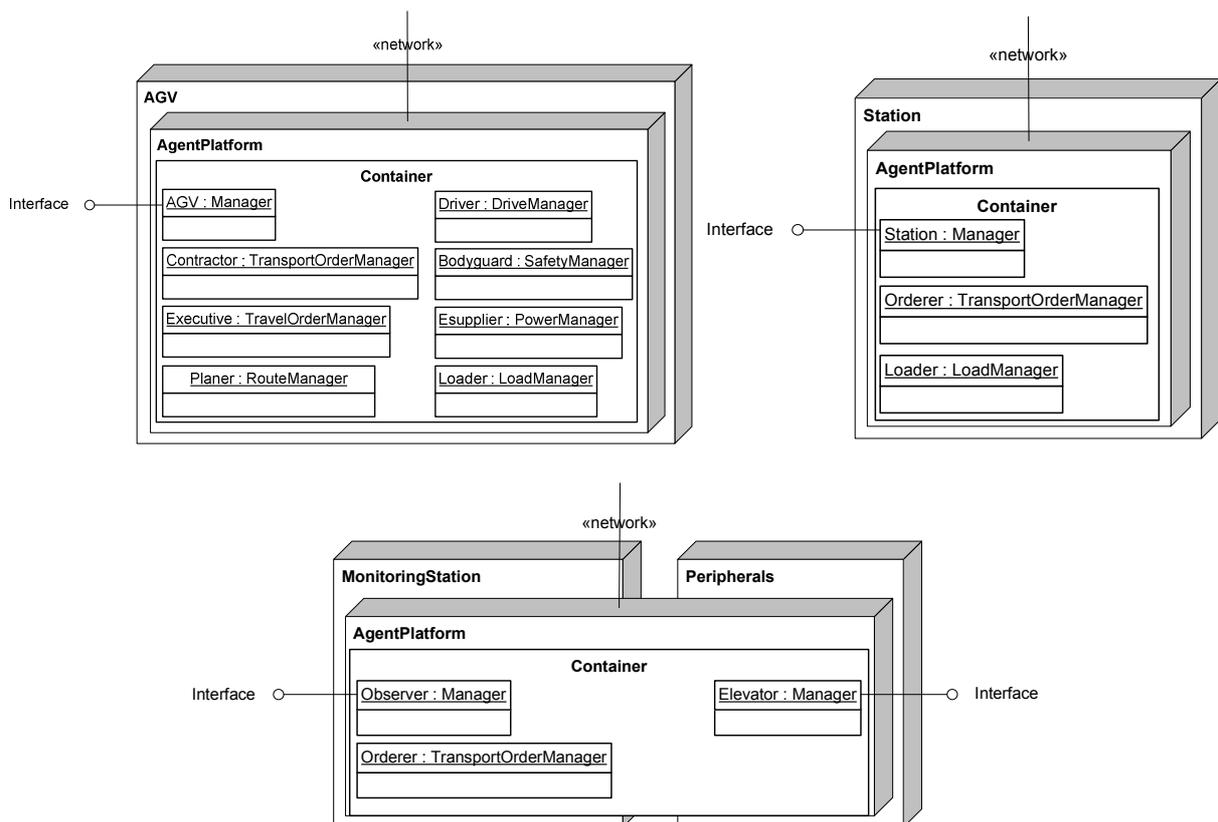


Abbildung 12: Verteilung der Agenten im System

## Anpassung der Simulationsumgebung - Forschungsstelle Nr. 2, OFFIS

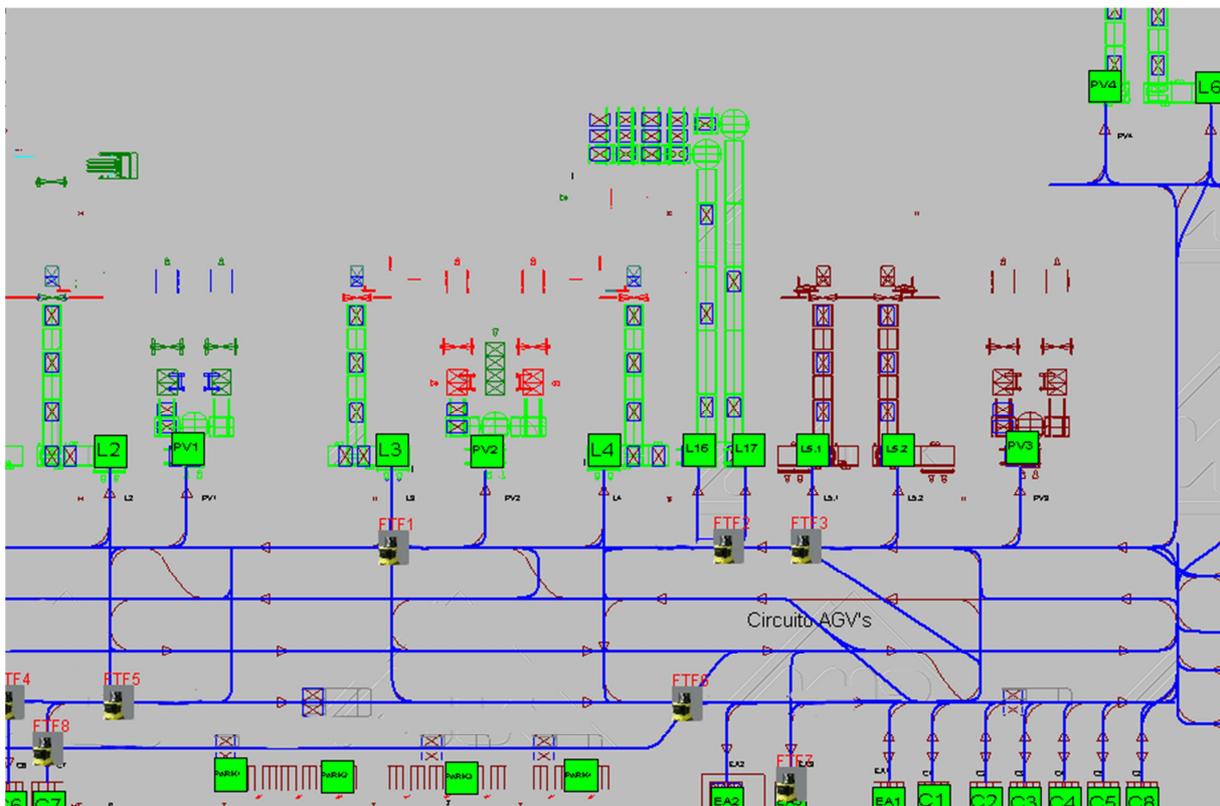
### Durchgeführte Arbeiten

Die Simulationsumgebung wurde soweit angepasst, dass sie alle Details aus der zur Verfügung stehenden Referenzsimulation abbilden kann. Weiterhin wurde das Sze-

nario der Referenzsimulation implementiert. Dieses besteht aus dem Hallenlayout inklusive Quellen, Senken und Parkplätzen, aus den Fahrzeugen inklusive deren Geschwindigkeiten sowie aus den Aufträgen, die in dem simulierten Zeitraum ausgeführt werden. Weiterhin wurde eine Kopplung zwischen der JADE Agentenplattform und der Simulationsumgebung implementiert.

### *Erzielte Ergebnisse*

Die Simulationsumgebung (vgl. Abbildung 13) entspricht in allen wichtigen Punkten der Referenzsimulation. Eine Kopplung der Simulationsumgebung und der JADE Agentenplattform ist über Socket-Nachrichten möglich.



**Abbildung 13: Layout des simulierten FTS**

## **3.5 AP 5: Implementierung der Algorithmen zur Steuerung**

### **Verfahren zur Auftragszuordnung und Konfliktlösung - Forschungsstelle Nr. 1, IPH**

#### *Durchgeführte Arbeiten*

In AP 5 wurden die in AP 3 konzipierten Verfahren zur Auftragszuordnung und Konfliktlösung implementiert. Zunächst erfolgten die Zuordnung der Verfahren zu den Agenten und die Implementierung zusätzlicher Verhaltensweisen. Anschließend wurden die Verfahren verifiziert (z. B.: Wurde ein Auftrag dem am besten geeigneten FTF zugeordnet?).

Zur Verifizierung und Validierung der implementierten Verfahren wurde ein Test-Tool entwickelt (vgl. Abbildung 14), bei dem der Schwerpunkt bei der Auftragszuordnung liegt und das Layout deshalb einfach gehalten wurde.

### Erzielte Ergebnisse

Die Verfahren zur Auftragszuordnung und Konfliktlösung wurden umgesetzt und getestet. Das Layout des Test-Tools besteht aus zwei Stationen, zwei Parkplätzen und dem unidirektionalen Fahrkurs. Für die Auftragsabarbeitung sind zwei FTF zuständig. Die Aufträge werden mit Hilfe der „generiere Auftrag“-Schaltfläche ins System eingelastet und von den Stationen an die FTF vergeben. Hat ein FTF einen Auftrag abgeschlossen, so generiert es selbstständig einen Parkauftrag und fährt zu einem Parkplatz. Alle Aufträge wurden korrekt und vollständig abgearbeitet.

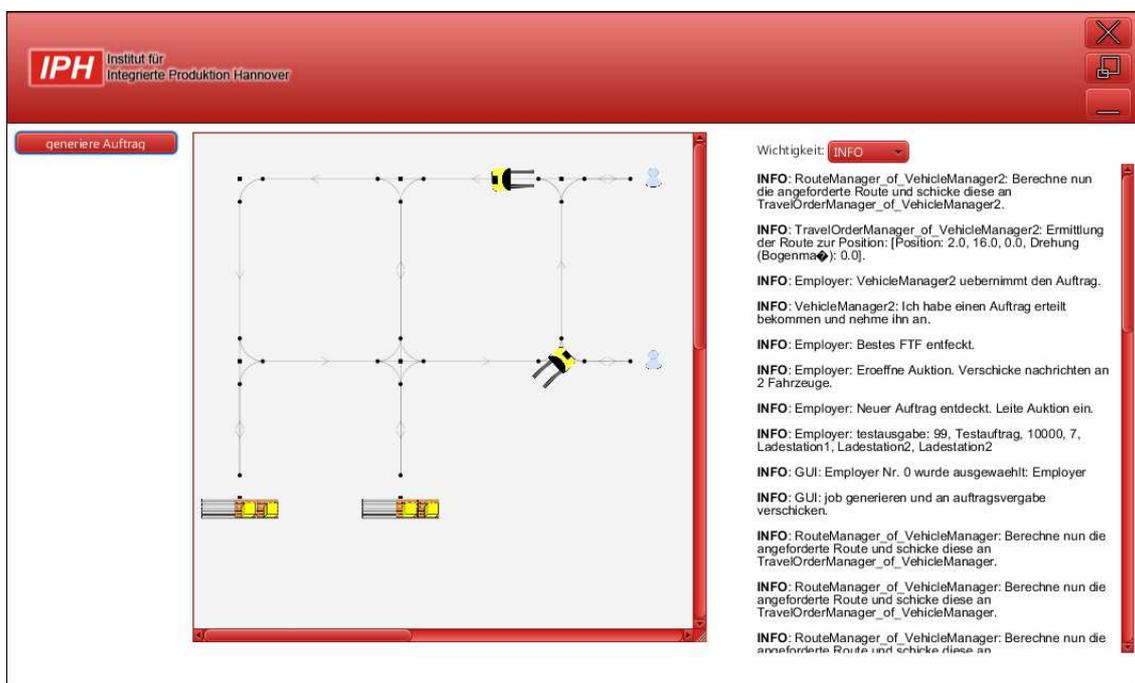


Abbildung 14: Testtool zur Untersuchung der implementierten Verfahren

## Verfahren zur konfliktvermeidenden Routenplanung - Forschungsstelle Nr. 2, OFFIS

### Durchgeführte Arbeiten

In AP 5 wurde zunächst die Repräsentation der Wege und Routen um die Möglichkeit von Reservierungen erweitert. Anschließend wurden die Verfahren zur konfliktfreien Routenplanung prototypisch umgesetzt.

### Erzielte Ergebnisse

Der Graph, der das Hallenlayout abstrahiert, wurde erfolgreich um Reservierungen erweitert. Die Reservierungen bestehen aus der ID des reservierenden Fahrzeugs

sowie einem Zeitintervall in dem das Fahrzeug die Kante reserviert. Sie werden direkt an die Kanten des Graphen annotiert. Jedes Fahrzeug hat hierbei einen eigenen, internen Graph mit Reservierungen. Sollte die Nachrichtenübermittlung und damit das Mitteilen von Reservierungen fehlerfrei funktionieren, sind alle Graphen identisch. Sollte es jedoch zu Fehlern bei der Nachrichtenübermittlung kommen, erhalten einige Fahrzeuge die Reservierungen nicht. In diesem Fall können sich die internen Graphen der einzelnen Fahrzeuge unterscheiden. Dies kann zum Beispiel bei einem nachträglichen Anmelden eines Agenten im System oder bei Problemen mit der Infrastruktur (WLAN) passieren.

Der so erweiterte Graph ermöglicht eine einfache Berechnung der Graphen der freien Zeitslots (siehe erzielte Ergebnisse AP 3) und somit eine Umsetzung des konfliktfreien und kooperativen Routings. Diese Verfahren wurden abstrakt implementiert.

### **3.6 AP 6: Simulation der Agentensteuerung**

#### **Forschungsstelle Nr. 1, IPH**

#### **Forschungsstelle Nr. 2, OFFIS**

Wie bereits in Kapitel 3 (Teilziel 3) beschrieben, wurden die entwickelten Ergebnisse nach Absprache mit dem projektbegleitenden Ausschuss an einem realen Szenario evaluiert. Bei dem Szenario handelt es sich um eine Getränkeabfüllanlage. Die Anlage ist in Abbildung 2 abgebildet. Die Abmessungen der Anlage sind 79 Meter x 125 Meter. Insgesamt operieren in der Halle 8 baugleiche FTF. Im betrachteten Zeitraum (eine halbe Stunde) werden insgesamt 26 Aufträge ausgeführt. Nach ca. 10 Minuten fällt ein Fahrzeug aus und blockiert dadurch den Wegabschnitt auf dem es ausfällt.

Insgesamt wurden folgende Konfigurationen untersucht:

1. Zentrale Referenz
2. 8 Fahrzeuge, nicht konflikt-vermeidendes Routing
3. 8 Fahrzeuge, konfliktvermeidendes Routing mit Ausfall
4. 8 Fahrzeuge, konfliktvermeidendes Routing ohne Ausfall
5. 8 Fahrzeuge, konfliktvermeidendes Routing mit idle-Kooperation, mit Ausfall
6. 7 Fahrzeuge, konfliktvermeidendes Routing ohne Ausfall
7. 6 Fahrzeuge, konfliktvermeidendes Routing ohne Ausfall
8. 5 Fahrzeuge, konfliktvermeidendes Routing ohne Ausfall
9. 4 Fahrzeuge, konfliktvermeidendes Routing ohne Ausfall

Dabei ist die erste Konfiguration die zentrale Steuerung, die uns als Referenz zur Verfügung gestellt wurde. Bei der zweiten Konfiguration wurde ein eher simples Verfahren implementiert. Jedes Fahrzeug plant seine Routen ohne andere Fahrzeuge zu berücksichtigen. Wenn es auf dem Weg zu einem Konflikt kommt, wird dieser durch zeitaufwändiges Zurücksetzen aufgelöst. Dieser Fall dient ausschließlich zur Verdeutlichung, dass eine dezentrale Steuerung ohne konfliktvermeidenden Ansatz größere Schwierigkeiten mit sich bringt. Bei der dritten Konfiguration fällt zum gleichen Zeitpunkt ein Fahrzeug aus und blockiert dieselbe Kante, wie es bei der zentralen Steuerung der Fall ist. In der vierten Konfiguration fällt dieses Fahrzeug nicht aus. In der fünften Konfiguration setzen wir zusätzlich zum konfliktvermeidendem Routing die vorgestellte idle-lock Kooperation ein.

In den Konfigurationen sechs bis neun wurden Simulationen mit einer reduzierten Anzahl von Fahrzeugen durchgeführt. Hierbei sollte untersucht werden, ob die geforderte Transportleistung auch mit weniger Fahrzeugen realisierbar ist. Die mögliche Fahrzeugreduktion ist laut dem projektbegleitenden Ausschuss eines der wichtigsten Ziele, darum wurde dieses Ziel als Schwerpunkt der Untersuchung gewählt.

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 Lauf. Die durchschnittlichen Werte der festgelegten Kennzahlen sind Tabelle 5 zu entnehmen.

**Tabelle 5: Ermittelte Kennzahlen**

<b>Nr.</b>	<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>	<b>4</b>	<b>5</b>	<b>6</b>	<b>7</b>	<b>8</b>	<b>9</b>
<b>Erledigte Aufträge</b>	26	26	26	26	26	26	26	25,3	20,1
<b>Durchschnittliche Auftragsdauer (in sec)</b>	371,1	521,3	275,5	278,1	273,5	287,6	300,3	379,2	395,5
<b>Gesamtstrecke aller FTF (in m)</b>	4500	4498	4144	4132	3897	3943	3927	3618	2591
<b>Leerfahrtanteil (in %)</b>	56,77	57,20	55,35	52,20	52,12	52,47	51,97	51,97	51,91
<b>Durchschnittliche Dauer bis zum Transportstart (in sec)</b>	-	81,5	59,3	57,7	54,12	70,2	83,8	172,4	194,5
<b>Max. Dauer bis zum Transportstart (in sec)</b>	-	245,3	240,1	237,7	241,6	240,4	250,7	439,7	827,9

Erledigte Aufträge meint hierbei, wie viele der insgesamt 26 Aufträge innerhalb des betrachteten Zeitraums beendet werden. Die Gesamtstrecke aller FTF gibt die gesamte Fahrstrecke an, betrachtet also sowohl Leerfahrten als auch Fahrten mit geladenen Transportgütern. Der Leerfahrtanteil gibt an, wie viel Prozent der gefahrenen Strecke leer gefahren wurde. Die durchschnittliche Dauer bis zum Transportstart gibt den durchschnittlichen Zeitraum an, der zwischen der Erstellung und Bekanntmachung eines Auftrags bis zum Beginn der Lastaufnahme vergeht. Die maximale Dauer bis zum Transportstart gibt dementsprechend den größten Zeitraum an, der zwischen der Erstellung des Auftrags und dem Beginn der Lastaufnahme vergangen ist.

Die Konfigurationen 8 und 9 garantieren hierbei nicht, dass alle Aufträge in der vorgegebenen Zeit zu Ende beendet werden. Auch steigen sowohl die durchschnittliche Wartedauer, als auch die maximale Wartedauer deutlich an. Diese beiden Konfigurationen erreichen die geforderte Transportleistung also nicht.

Bei den Konfigurationen 3-7 ist hingegen eine Verbesserung im Vergleich zur zentralen Steuerung zu erkennen. Konfiguration 3, die Basiskonfiguration der hier vorgestellten, dezentralen Steuerung, weist eine um 115,4 Sekunden kürzere durchschnittliche Auftragsdauer, eine 356 Meter kürzere Gesamtstrecke und einen 2,42 % besseren Leerfahrtanteil auf.

Im Vergleich zwischen Konfiguration 3 und Konfiguration 5, also zwischen unserer Basislösung und dem Integrieren der idle-lock Konfiguration fällt eine kleine Verbesserung bei der durchschnittlichen Auftragsdauer auf. Weiterhin fällt eine deutliche Reduzierung der Gesamtfahrstrecke in Konfiguration 5 im Vergleich zu Konfiguration 3 auf. Dieser Unterschied resultiert in dem Wegfall der Parkstrecken. Fährt ein Fahrzeug in Konfiguration 3 zu einem Parkplatz, wenn es keinen zugeordneten Auftrag mehr hat, kann es in Konfiguration 5 stehen bleiben oder einen näher liegenden Punkt im Wegenetz anfahren. Dieser Vorteil dürfte sich deutlich reduzieren, wenn die Auftragsdichte erhöht wird und damit einhergehend die idle Zeit reduziert wird. In diesem Fall steigt die Wahrscheinlichkeit, dass ein Fahrzeug schon einen Folgeauftrag zugewiesen bekommen hat, wenn es seinen aktuellen Auftrag beendet. Ist das der Fall, fährt das Fahrzeug in keiner der beiden Konfigurationen zu einem Parkplatz.

Die Reduzierung der Fahrzeuganzahl in den Konfigurationen 6-9 im Vergleich zu Konfiguration 4 zeigte eine stetige Verbesserung der gefahrenen Gesamtstrecke sowie des Leerfahrtanteils. Im Gegensatz dazu steht der Anstieg der durchschnittlichen Auftragsdauer sowie der durchschnittlichen und maximalen Wartedauer. 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 Rou-

ten 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.

### **3.7 AP 7: Optimierung und Bewertung des Steuerungskonzepts**

#### **Forschungsstelle Nr. 1, IPH**

#### **Forschungsstelle Nr. 2, OFFIS**

Das Steuerungskonzept kann insgesamt als erfolgreich bezeichnet werden. Die konzipierte und umgesetzte dezentrale Steuerung ist in der Lage, die Auftragsvergabe, die Routenplanung sowie die Auftragsdurchführung konfliktfrei durchzuführen. Die ermittelten Kennzahlen sind dabei besser als bei der zentralen Steuerung. Obwohl bei der Simulation Details abstrahiert wurden, die bei einer realen Umsetzung berücksichtigt werden müssten, kann davon ausgegangen werden, dass die Steuerung in der Lage ist, die anfallenden Transportaufträge effizient abzuarbeiten. Die abstrahierten Details betreffen insbesondere die Feinsteuerung bestimmter Situationen. Anstatt zum Beispiel die Lastaufnahme, bestehend aus langsamen Anfahren an die Station, Feinpositionieren an der Station, Lastaufnahme und langsamen Wegfahren von der Station in einzelnen Subschritten zu simulieren wurde die Zeit bestimmt, die diese Vorgänge zusammen benötigen und die Lastaufnahme dann als ein Vorgang mit gleicher Dauer modelliert.

Ein wesentlicher Vorteil der im Projekt konzipierten und implementierten Agentenbasierten, 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. Da der implementierte Algorithmus zur konfliktfreien Routenfindung von z. B. Wegen oder Kreuzungen auf beschränkt gleichzeitig nutzbare Ressourcen abstrahiert, funktioniert der Algorithmus 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 idle-Lock Kooperation hat, wie im vorherigen Abschnitt gezeigt, zu einer Verbesserung der Kennzahlen „gefahrte Strecke“ und „Leerfahrtanteil“ geführt. Eine Optimierungsmöglichkeit am entwickelten Steuerungskonzept könnte also das Einführen weiterer Kooperationen sein. Zuerst genannt werden kann hier das

Verhandeln über normale Reservierungen. Agenten würden in diesem Fall überprüfen, ob ein Agent, der eine für ihr aktuelles Ziel wichtige Reservierung inne hat, davon zu überzeugen ist, diese Reservierung wieder aufzugeben. Die Entscheidung ob diese Reservierung aufgegeben wird, würde in Abhängigkeit von den Auswirkungen auf das Gesamtsystem geschehen. Wenn es zum Beispiel im Gesamtsystem vor allem auf die Reduzierung der Fahrstrecke ankommt, würde die Entscheidung danach gefällt werden, 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 Entscheidungskennzahl verwendet werden. Genauso sind Kombinationen aus diesen Kennzahlen oder die Gewichtung anhand Kriterien, wie der Auftragspriorität, der Auftragsdeadline oder weiteren, systemrelevanten Faktoren möglich.

### **3.8 AP 8: Projektmanagement und Dokumentation**

#### **Forschungsstelle Nr. 1, IPH**

#### **Forschungsstelle Nr. 2, OFFIS**

Das Projektmanagement erfolgte während der gesamten Laufzeit des Forschungsprojekts. Das IPH übernahm dabei die Gesamtprojektleitung sowie die Koordination der Veröffentlichungen und des Berichtswesens. Das OFFIS unterstützte das IPH bei der Durchführung dieser Aufgaben. Für die wissenschaftliche Dokumentation der jeweiligen Arbeitsinhalte war jedes Institut selbst verantwortlich.

Während des Forschungsvorhabens wurden Beiträge in Fachzeitschriften publiziert, um die erarbeiteten Ergebnisse einem breiten Publikum bereitzustellen (s. Kap. 6.3). Weiterhin wurden Zwischenberichte und ein Abschlussbericht erstellt, in dem die Ergebnisse und die Vorgehensweise im Vorhaben beschrieben wurden.

### **4 Wissenschaftlich-technischer und wirtschaftlicher Nutzen der erzielten Ergebnisse insbesondere für KMU**

Die im Rahmen dieses Forschungsvorhabens betrachtete Branche ist durch den KMU-Charakter der Unternehmen geprägt. Nach Aussagen der im Projekt beteiligten Unternehmen, sind die meisten FTS-Hersteller und Komponentenlieferanten KMU. Allerdings vollzieht sich gerade ein Wandel des FTS-Marktes. Immer mehr große, im Intralogistikbereich etablierte Unternehmen, drängen in den Markt. Damit die Wettbewerbsfähigkeit der KMU erhalten bleibt, müssen die angebotenen FTS flexibler werden und bspw. eine bessere Skalierbarkeit bieten, um einem breiteren Anwenderkreis zugänglich zu werden.

Das neuentwickelte agentenbasierte System bietet diese Vorteile. Die dezentrale Planung und Fahrzeugsteuerung erlaubt Änderungen im Materialfluss mit weniger Konfigurationsaufwand sowie die Durchführung komplexerer Aufgaben. Weitere Vorteile und die Anwendungsmöglichkeiten sind nachfolgend beschrieben.

#### **4.1 Innovativer Beitrag**

In dem Forschungsvorhaben wurde eine dezentrale Steuerung für ein FTS entwickelt, mit dessen 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.

Folgende wesentliche Innovationen bietet das neue Konzept:

- Komplette dezentrale FTS-Steuerung,
- Komplexitätsreduktion der Gesamtsystemsteuerung und dadurch erhöhte Skalierbarkeit und Flexibilität bei Veränderungen,
- Kopplung auktionsbasierter Transportauftragsvergabe mit einem Zeitslots-basierten Routenplanungsalgorithmus, dadurch Ermöglichung der vorausschauenden konfliktfreien Planung
- Insgesamt verbesserte Wirtschaftlichkeit (Durchlaufzeit, Auslastung, geringere Anzahl an benötigten FT) des FTS bei dynamischen Randbedingungen.

#### **4.2 Industrielle Anwendungsmöglichkeiten**

Der Nutzen des Vorhabens wird von den Unternehmen des projektbegleitenden Ausschusses als hoch eingeschätzt. Die erzielten Ergebnisse sind sowohl für FTS-Hersteller, als auch für FTS-Anwender geeignet. Nach Aussagen der Projektpartner werden bereits 1/3 von rund 200 FTS-Installationen pro Jahr bei KMU durchgeführt, Tendenz steigend. Eine weitere Erhöhung dieses Anteils kann durch kostengünstigere und flexiblere FTS erfolgen. Braucht heute bspw. die Änderung eines installierten FTS hochqualifiziertes Personal und viel Aufwand, so ist es mit dem entwickelten dezentralen System möglich, auch ohne hochqualifizierte Mitarbeiter Änderungen oder Erweiterungen am FTS in der Betriebsphase vorzunehmen und schnell zu erproben. Sobald bspw. die Änderungen des Wegenetzes in das System eingepflegt

sind, werden diese von den FTF übernommen. Da die Routenplanung dezentral erfolgt, können die FTF sofort die neuen Wege nutzen und in ihre Routenplanung einbeziehen.

Bei den Herstellern bzw. den Ausrüstern von FTS zeichnet sich ein Trend zu mehr Autonomie bei den eingesetzten Fahrzeugen ab. FTS-Lösungen mit Fahrzeugen, die autonom auf Werksgeländen navigieren und sich jenseits abgesperrter Produktionsbereiche bewegen, benötigen dezentrale Entscheidungsmechanismen, da eine ständige Überwachung mit hohen Infrastrukturkosten verbunden wäre. Die Forschungsergebnisse aus diesem Vorhaben bieten den FTF-Ausrüstern die Methoden zur dezentralen Steuerung eines Gesamtsystems. Insbesondere die letztgenannten autonomen FTS-Lösungen, die ohne feste Spurführung und permanente Überwachung und Steuerung auskommen, sind mit weniger hohen Planungskosten und Investitionen in die Infrastruktur verbunden und werden daher zunehmend für KMU als Anwender interessant.

Der frei verfügbare Software-Demonstrator erlaubt allen interessierten Unternehmen die Erstellung von kompletten FTS-Szenarien (Layout, Anzahl der FTF, Transportaufträge). Somit kann jedes Unternehmen die Forschungsergebnisse individuell anpassen und Potenziale zur Steigerung der Effizienz eines FTS prüfen.

Die Forschungsergebnisse können somit zur Leistungsfähigkeit künftiger FTS-Generationen beitragen und die Attraktivität der FTS-Technik für KMU erhöhen, die bisher das Potenzial der Transportautomatisierung aufgrund hoher Investitionshürden nicht genutzt haben. Zusammenfassend ist zu erwarten, dass die Forschungsergebnisse KMU helfen werden, ihre Marktposition langfristig zu verbessern.

## **5 Verwendung der Zuwendung**

Das Projekt wurde am IPH – Institut für Integrierte Produktion Hannover gemeinnützige GmbH in Zusammenarbeit mit dem OFFIS – Institut für Informatik e. V. vom 01.07.2011 bis zum 30.06.2013 bearbeitet. Beide Institute stellten zur Bearbeitung des Projekts einen wissenschaftlichen Mitarbeiter (TVL E 13) mit fundierten Kenntnissen im Bereich der Künstlichen Intelligenz sowie Agententechnologien zur Verfügung.

### **5.1 Einsatz von wissenschaftlich-technischem Personal**

Der wissenschaftliche Mitarbeiter des IPH trug die Gesamtverantwortung für das Projekt und wurde für volle 24 Monate eingesetzt. Er wurde während der Projektlaufzeit durch eine studentische Hilfskraft im Umfang von 62 h pro Monat unterstützt. Die studentische Hilfskraft wurde bei der Datenerhebung und Datenauswertung sowie

Literaturrecherchen eingebunden. Bei der Implementierung des Software-Demonstrators ist der wissenschaftliche Mitarbeiter des IPH von einem technischen Mitarbeiter mit abgeschlossener Fachhochschulausbildung im Umfang von 6 Monaten unterstützt worden.

Der wissenschaftliche Mitarbeiter des OFFIS war hauptsächlich für die Umsetzung und Durchführung der Simulationen verantwortlich und wurde im Projekt für 18 Personenmonate eingesetzt.

## **5.2 Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit**

Die in AP1 durchgeführten Arbeiten waren notwendig, um Anforderungen an die Konzeption des neuen dezentralen FTS abzuleiten. Die Arbeiten sind angemessen, da das ausgewählte Referenzszenario sowie die festgelegten logistischen Kennzahlen nach Einschätzung des projektbegleitenden Ausschusses hinreichend für eine technische und logistische Bewertung des neuen dezentralen FTS sind.

Die in AP2 und AP3 durchgeführten Arbeiten zur Konzeption des Agentensystems und des Regelwerks sowie zur Konzeption der Simulationsumgebung waren notwendig, da sie den Kern des entwickelten Systems bilden. Die Arbeiten sind angemessen, da alle festgelegten Anforderungen an das dezentrale System dadurch erfüllt wurden.

Die in AP4 und AP5 durchgeführten Arbeiten zur Implementierung des Agentensystems und des Regelwerks sowie zur Umsetzung der Simulationsumgebung waren notwendig, um das neue System lauffähig zu machen und Simulationen durchführen zu können. Die Arbeiten sind angemessen, da sämtliche Komponenten, die zur Durchführung von Simulationen in AP6 notwendig sind, umgesetzt wurden.

Die in AP6 und AP7 durchgeführten Arbeiten zur Simulation und Optimierung des neuen Systems waren notwendig, um das System unter technischen und logistischen Aspekten zu verifizieren und zu verbessern. Die Arbeiten sind angemessen, da durch die geleistete Arbeit das Projektziel erreicht wurde.

Die Arbeiten in AP8 waren notwendig und angemessen, da sie die Dokumentation der Projektergebnisse umfassen und so den Transfer der Ergebnisse sicherstellen.

## **6 Umsetzung der Forschungsergebnisse / Transfer der Ergebnisse in die Wirtschaft**

Erste Schritte zum Ergebnistransfer sind während der Projektlaufzeit durchgeführt worden. Weitere Maßnahmen zur Verwertung und Verbreitung der Projektergebnisse sind im Anschluss an das Projekt vorgesehen. Über den Austausch zwischen Forschungsstellen und Unternehmen des projektbegleitenden Ausschusses sowie weiteren interessierten Unternehmen hat bereits ein Wissenstransfer stattgefunden. Die-

ser ist die Basis für die praktische Umsetzbarkeit der Ergebnisse. Die Mitglieder des projektbegleitenden Ausschusses sind in Tabelle 5 aufgeführt.

**Tabelle 5: Mitglieder des projektbegleitenden Ausschusses**

Unternehmen	KMU	Ansprechpartner
Götting KG	x	Behling, Sebastian
LinogistiX GmbH	x	Trautmann, Andreas
STILL GmbH		Krüger, Tino
Simplan Integrations GmbH	x	Kemper, Jörg
software4production GmbH	x	Berlak, Joachim
Nuyts GmbH	x	Krause, Kurt

## 6.1 Durchgeführte Transfermaßnahmen

Tabelle 6 beschreibt die bereits durchgeführten Transfermaßnahmen.

**Tabelle 6: Durchgeführte spezifische Transfermaßnahmen**

Durchgeführte Maßnahmen	Ziel	Rahmen	Datum/Zeitraum während des Bewilligungszeitraums
Veröffentlichung, Information der interessierten Öffentlichkeit	Ergebnistransfer in die Wirtschaft und Wissenschaft	Internet-Homepage www.fts-selbststeuerung.de	Laufend
		Pressemitteilungen: IPH	01.09.2011
		Publikationen: In: Hebezeuge Fördermittel	12/2011
		In: FTS-/AGV-Facts	09/2012
		Konferenzen: - ECAI 2012/ STAIRS 2012 Montpellier, France	27.-28. August 2012
		- ISC 2013, Industrial Simulation Conference, Belgien	22.-24. Mai 2013
		FTS-Fachtagung: Fraunhofer IML, Dortmund	20.09.2012
Weiterbildung	Qualifizierung von Studenten	Unterstützung bei den Projektaktivitäten sowie Recherchen	07/2011-06/2013
		Praktikum + Bachelorarbeit: Umsetzung eines Tools zur Validierung der Auftragsvergabe	09/2012 – 02/2013
		Bachelorarbeit: Entwicklung eines Tools zur Erstellung und Exportierung von annotierten	04/2012 – 08/2012

		Graphen	
		Bachelorarbeit: Erarbeitung eines Konzepts zur Umsetzung eines Fahrerlosen Transportsystems	03/2013 – 05/2013
Information der Unternehmen des Projektbegleitenden Ausschusses (PA)	Unmittelbarer Ergebnistransfer in die Wirtschaft, Fortschrittsbericht, Diskussion, Festlegungen, Abstimmung, Erfahrungsaustausch innerhalb des PA	1. Projekttreffen: Vorstellung des Projekts	21.09.2011
		Workshop: Konzeption und Umsetzung der Agententypen	06.03.2012
		2. Projekttreffen: Diskussion der Agenten	27.03.2012
		Workshop: Konzeption und Umsetzung des Regelwerks	24.07.2012
		3. Projekttreffen: Diskussion des Regelwerks	19.09.2012
		4. Projekttreffen: Vorstellung der Simulationen	13.02.2013
		5. Projekttreffen: Vorstellung und Diskussion der Projektergebnisse	25.06.2013
Bau von Demonstratoren, die für Demonstrationszwecke an der Fst verbleiben	Direkter Wissenstransfer in die Industrie	Implementierung eines Softwaredemonstrators unter dem Kriterium der Vorwettbewerblichkeit	Dezember 2012 – Januar 2013
Lehre	Anleitung der Studenten zur dezentralen, Agenten basierten Steuerung von Fahrerlosen Transportsystemen sowie deren Optimierung	Lehrveranstaltung Transportsysteme an der Carl von Ossietzky Universität Oldenburg (Prof. Dr.-Ing. Axel Hahn)	Sommersemester 2013

## 6.2 Geplante Transfermaßnahmen

Tabelle 7 beschreibt die noch geplanten Transfermaßnahmen.

**Tabelle 7: Geplante spezifische Transfermaßnahmen**

<b>Geplante Maßnahmen</b>	<b>Ziel</b>	<b>Rahmen</b>	<b>Datum / Zeitraum nach dem Bewilligungszeitraum</b>
Ansprache potenziell interessierter Unternehmen auch außerhalb des PA	Direkter Wissenstransfer in die Industrie	Vorstellungen der Projektergebnisse bei interessierten Unternehmen	kontinuierlich und auf Anfrage
Beratung von Unternehmen		Unterstützung bei der Planung und Einführung innovativer FTS	
Wissenschaftliche Publikationen / Dissertation, in Fachzeitschriften oder sonstigen gedruckten Veröffentlichungen	Nationaler und internationaler Ergebnistransfer	Nutzung der Projektergebnisse zur Anfertigung einer Dissertation	Ab Juli 2013
Weitergabe von ausführlichen Forschungsberichten	Nationaler und internationaler Ergebnistransfer	Veröffentlichung Abschlussbericht	August 2013
Übernahme der Ergebnisse in Lehre und Weiterbildung	Anleitung der Studenten zur Nutzung der Methoden der Künstlichen Intelligenz	Einbeziehung der Ergebnisse in die Lehrveranstaltungen: Intralogistik und Transporttechnik des Instituts für Transport- und Automatisierungstechnik (ITA) der Leibniz Universität Hannover	Ab Wintersemester 2013/2014

## 6.3 Einschätzung zur Realisierbarkeit des Transferkonzepts

Nach Aussagen der Projektpartner ist die konfliktfreie Routenplanung sowohl als dezentrale, als auch zentrale Lösung in heutigen Systemen umsetzbar. Die Ansprache potenziell interessierter Unternehmen erscheint daher sinnvoll und realisierbar.

An der Anfertigung einer Dissertation wird bereits gearbeitet. Die Ergebnisse des Projekts werden in der Dissertation vertieft und erweitert. Spätestens in zwei Jahren steht der interessierten Öffentlichkeit eine sehr ausführliche Beschreibung des Agentensystems mit einem erweiterten Regelwerk zur Verfügung. Die Maßnahme ist daher realisierbar.

Die Einbeziehung der Ergebnisse in die Lehrveranstaltungen erscheint ebenso realisierbar. Die Methoden der Künstlichen Intelligenz (zu den auch die Agententechno-

logie zählt) werden bereits auf viele technische Systeme übertragen. Die Lehrveranstaltung „Automatisierung: Steuerungstechnik“ des ITA bietet bspw. einen Überblick über die Einsatzmöglichkeiten in der Regelungs- und Steuerungstechnik. Die Einbeziehung der Ergebnisse in die Lehrveranstaltungen ist daher machbar und wird von den Verantwortlichen befürwortet.

Insgesamt erscheint das Konzept zum Transfer der Projektergebnisse als realisierbar und wird von den Forschungsstellen wie geplant verfolgt.

#### **6.4 Zusammenstellung aller veröffentlichten Arbeiten**

##### *Erschienen*

- Schachmanow, J.; Overmeyer, L.; Nickel, R.: Projekt „Dezentrale, agentenbasierte Selbststeuerung von FTS“ – Agenten im „soften“ Einsatz der Intralogistik. In: Hebezeuge Fördermittel, Huss Verlag, o. Jg. (2011), H. 12, S. 688-689.
- Schwarz, C.; Schachmanow, J.: Mission Dezentralisierung: Agenten verhelfen FTS zu mehr Selbstständigkeit. In: FTS-/AGV-Facts, Sonderausgabe der Fachzeitschrift Staplerworld, 1. Jg. (2012), H. 1, S. 20-21.
- Schwarz, C.; Sauer, J.: Towards Decentralised AGV Control With Negotiations. In: Proceedings of the 6th "Starting Artificial Intelligence Research" Symposium (STAIRS). 2012, S. 270-281.
- Schwarz, C.; Schachmanow, J.; Sauer, J.; Overmeyer, L.; Ullmann, G.: Coupling Of A Discrete Multi Agent Simulation With A Real Time Multi Agent Simulation. In: Proceedings of the 11th Annual Industrial Simulation Conference (ISC). 2013, S. xx-xx.
- N. N.: Fahrerlose Transportfahrzeuge werden erwachsen. IPH Pressemitteilung, 01.09.2011.

##### *Geplant*

- Veröffentlichung der Simulationsergebnisse

## **7 Durchführende Forschungsstellen**

### **7.1 Forschungsstelle 1: IPH – Institut für Integrierte Produktion Hannover gGmbH**

Das IPH - Institut für Integrierte Produktion Hannover gemeinnützige GmbH ist 1988 aus der Leibniz Universität Hannover heraus entstanden und seitdem als Forschungs- und Entwicklungsdienstleister auf dem Gebiet der Produktionstechnik tätig. Zu seinen Kunden zählen Unternehmen aus der Industrie und Forschungsvereinigungen. Die Arbeitsschwerpunkte des IPH sind Forschung und Entwicklung, Beratung und Qualifizierung in den Bereichen Prozesstechnik, Produktionsautomatisierung und Produktions- und Logistiknetzwerke. Das Unternehmen hat seinen Sitz im Wissenschaftspark Marienwerder im Nordwesten von Hannover und beschäftigt aktuell 55 Mitarbeiter, davon 19 Projektingenieure.

#### **Leiter der Forschungsstelle:**

Geschäftsführende Gesellschafter:

Prof. Dr.-Ing. Ludger Overmeyer  
Prof. Dr.-Ing. Bernd-Arno Behrens  
Prof. Dr.-Ing. habil. Peter Nyhuis

Koordinierender Geschäftsführer:

Dr.-Ing. Georg Ullmann

#### **Projektleiter:**

Dr.-Ing. Georg Ullmann

#### **Anschrift:**

IPH - Institut für Integrierte Produktion Hannover gGmbH  
Hollerithallee 6  
30419 Hannover  
Telefon: +49 511 27976-0  
Telefax: +49 511 27976-888  
E-Mail: info@iph-hannover  
Internet: www.iph-hannover.de

Hannover, den 30.09.2013

---

Prof. Dr.-Ing. Ludger Overmeyer  
(Geschäftsführender Gesellschafter)

---

Dr.-Ing. Georg Ullmann  
(Koord. Geschäftsführer)

## 7.2 Forschungsstelle 2: OFFIS e.V. – Institut für Informatik

Das 1991 gegründete Institut OFFIS erforscht neue Formen computergestützter Informationsverarbeitung in den Anwendungsbereichen Energie, Gesundheit und Verkehr. Es ist über eine Kooperationsvereinbarung ein An-Institut der Universität Oldenburg. Etwa zweihundert Mitarbeiterinnen und Mitarbeiter arbeiten in öffentlich geförderten Projekten, Entwicklungs-, Beratungs- und Auftragsforschungsprojekten. Einen Forschungsschwerpunkt des Bereichs Verkehr, in dem das beantragte Forschungsvorhaben angesiedelt ist, bilden verlässliche autonome und mobile Systeme.

### Leiter der Forschungsstelle:

Vorstände:

Prof. Dr. Werner Damm

Prof. Dr.-Ing. Wolfgang Nebel (Vorsitzender)

Prof. Dr. Dr. h.c. Hans-Jürgen Appelrath

Geschäftsführer:

Dr. Holger Peinemann

Bereichsvorstand Verkehr:

Prof. Dr.-Ing. Axel Hahn

Bereichsleiter Verkehr:

Dr. Frank Oppenheimer

### Projektleiter:

Prof. Dr.-Ing. Jürgen Sauer

### Anschrift:

OFFIS e. V.

Escherweg 2

26121 Oldenburg

Telefon: +49 441 9722-0

Telefax: +49 441 9722-102

E-Mail: [institut@offis.de](mailto:institut@offis.de)

Internet: <http://www.offis.de>

Oldenburg, den 30.09.2013

---

Dr. Holger Peinemann  
(Leiter der Forschungsstelle)

---

Prof. Dr.-Ing. Jürgen Sauer  
(Projektleiter)

## **8 Angaben über gewerbliche Schutzrechte**

Im Rahmen des Projekts wurden durch das IPH sowie das OFFIS keine gewerblichen Schutzrechte angemeldet.

## **9 Förderhinweis**

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

Für die Förderung sei an dieser Stelle gedankt.

## 10 Literaturverzeichnis

- [Bro85] Broadbent , A.J. et al: Free ranging AGV systems: promises, problems and pathways. In: Proc. 2nd Int. Conf. on Automated Materials Handling (1985), S. 221–237
- [Cog11] N. N.: CogniLog: <http://www.cognilog.uni-hannover.de/index.html>. Abgerufen in 2011.
- [Env11] N. N.: EnvEdit - A GRAPHICAL ENVIRONMENT EDITOR: <http://www.offis.de>, 2011.
- [Fcp02] N. N.: FIPA Contract Net Interaction Protocol Specification. <http://www.fipa.org/specs/fipa00029/SC00029H.pdf>. Abgerufen am 25.01.2013.
- [Fia11] N. N.: Foundation for Intelligent Physical Agents. [www.fipa.org/](http://www.fipa.org/). Abgerufen in 2011.
- [Fip11] N. N.: FIPA Design Process Documentation and Fragmentation Working Group. <http://www.pa.icar.cnr.it/cossentino/fipa-dpdf-wg/docs.htm>. Abgerufen in 2011.
- [Hla11] N. N.: High Level Architecture (HLA) — Framework and Rules. <http://simlab.gyte.edu.tr/docs/IEEE%20Std%201516-2000.pdf>. Abgerufen in 2011
- [Hum11] N. N.: Model-based Analysis of Human Errors during Aircraft Cockpit System Design. <http://www.human.aero/>. Abgerufen in 2011
- [Jad11] N. N.: JADE (Java Agent DEvelopment Framework). <http://jade.tilab.com/>. Abgerufen in 2011
- [Kim91] Kim, C.W. ;Tanchoco, J.M.A.: Conflict-free shortest-time bidirectional AGV routeing. In: International Journal of Production Research 29 (1991), Nr. 12, 2377–2391.
- [Mas11] N. N.: MASON (Multi Agent Simulation of Neighbourhoods). <http://www.cs.gmu.edu/~eclab/projects/mason/>. Abgerufen in 2011.
- [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.
- [Pas11] N. N.: PASSI (a Process for Agent Societies Specification and Implementation). <http://www.pa.icar.cnr.it/passi/index.html>. Abgerufen in 2011.
- [Pla11] N. N.: PlantSimulation. <http://www.simplan.de/de/software/tools/plant-simulation?gclid=CLSQmJPt1K4CFYOFDgodNDmyaw>. Abgerufen in 2011.

- [Roi10] Roidl, M.; Foller, G.: „Simulation von multiagentenbasierten Materialflusssteuerungen“, 2010
- [Sin09] Singh, Namita; Sarngadharan, P. V.; Pal, Prabir K.: AGV scheduling for automated material distribution: a case study. In: Journal of Intelligent Manufacturing 22 (2009), Juli, Nr. 2, 219–228.

## 11 Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Gesamtkonzept der konsequent dezentralen FTS-Steuerung.....	3
Abbildung 4: Das Layout des Referenzsystems .....	6
Abbildung 5: Auswahl einer Agentenplattform.....	9
Abbildung 6: PASSI Designprozess (Quelle: [PAS11]).....	10
Abbildung 7: Agentenidentifikation am Bsp. der Auftragsvergabe .....	11
Abbildung 8: Verlauf einer Auktion zwischen Auktionator (Station) und Bieter (FTF)	15
Abbildung 9: Verfahren zur Konfliktlösung (Links: allgemein, rechts: am Beispiel von Deadlock) .....	16
Abbildung 10: Planungsablauf wenn der Agent idle ist und nichts passiert .....	19
Abbildung 11: Planungsablauf wenn der Agent idle ist und einen Auftrag zugewiesen bekommt.....	19
Abbildung 12: Planungsablauf wenn der Agent einen Auftrag ausführt und einen weiteren Auftrag zugewiesen bekommt.....	20
Abbildung 13: Planungsablauf wenn der Agent einen Parkplan fährt und einen Auftrag zugewiesen bekommt .....	20
Abbildung 14: Verteilung der Agenten im System .....	22
Abbildung 15: Layout des simulierten FTS .....	23
Abbildung 16: Testtool zur Untersuchung der implementierten Verfahren .....	24

## 12 Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Kennzahlen zur Bewertung.....	7
Tabelle 2: Eingesetzte Technologien.....	9
Tabelle 3: Identifizierte Agenten .....	11
Tabelle 4: Auswahl des Simulationstools .....	13
Tabelle 5: Mitglieder des projektbegleitenden Ausschusses .....	33
Tabelle 6: Durchgeführte spezifische Transfermaßnahmen .....	33
Tabelle 7: Geplante spezifische Transfermaßnahmen .....	35