

Schlussbericht

zu dem IGF-Vorhaben

Automatisierte Auslegung des Wegenetzes für Fahrerlose Transportsysteme (FTS)

der Forschungsstelle(n)

IPH – Institut für Integrierte Produktion Hannover gemeinnützige GmbH

Das IGF-Vorhaben 18007 N/1 der Forschungsvereinigung Bundesvereinigung Logistik e. V. (BVL) wurde über die



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



Bundesministerium
für Wirtschaft
und Energie

aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages gefördert.

Hannover, 08.11.2016

Ort, Datum

Sarah Uttendorf

Name und Unterschrift des/der Projektleiter(s)
an der/den Forschungsstelle(n)

Inhaltsverzeichnis

1. Zusammenfassung	1
2. Wissenschaftlich-technische und wirtschaftliche Problemstellung	3
3. Gegenüberstellung angestrebter Teilziele und erzielter Ergebnisse	3
4. Darstellung der erzielten Ergebnisse	7
AP1: Anforderungsanalyse	7
AP1.1: Definition der Zielkennzahlen und Validierungsparametern	7
AP1.2: Identifikation von Referenzanlagen.....	8
AP2: Analyse	9
AP2.1: Analyse der Referenzanlagen.....	9
AP2.2: Identifikation des Expertenwissens	9
AP3 Konzeption	10
AP3.1: Definition der Fuzzy-Regeln.....	10
AP3.2: Konzeption des Interpretationsverfahrens.....	12
AP3.3: Konzeption des Initialverfahrens	12
AP 3.4: Konzeption des Ergänzungsverfahrens	15
AP 3.5: Konzeption des Verfeinerungsverfahrens	17
AP 3.6: Konzeption des Expertensystems.....	18
AP4: Umsetzung	20
AP 4.1 Umsetzung des Fuzzy-Regelwerks.....	20
AP 4.2: Implementierung des Interpretationsverfahrens	21
AP 4.3: Implementierung des Initialverfahrens	23
AP 4.4: Implementierung des Ergänzungsverfahrens.....	24
AP 4.5: Implementierung des Verfeinerungsverfahrens	25
AP 4.6: Implementierung des Expertensystems	25
AP5: Validierung	27

AP 5.1: Durchführung von Tests und Simulationen	27
AP 5.2: Optimierung der Verfahren.....	28
Kritische Diskussion	29
5. Innovativer Beitrag und wirtschaftlicher Nutzen	30
Voraussichtliche Nutzung der angestrebten Forschungsergebnisse	30
Möglicher Beitrag zur Steigerung der Leistungs- und Wettbewerbsfähigkeit von KMU	31
6. Verwendung der Zuwendung	31
7. Umsetzung der Forschungsergebnisse / Transfer der Ergebnisse in die Wirtschaft.....	31
8. Durchführende Forschungsstelle	34
9. Förderhinweis.....	35

1. Zusammenfassung

Fahrerlose Transportsysteme (FTS) sind in modernen Produktionsanlagen mittlerweile fest etabliert. Einmal installiert übernehmen die fahrerlosen Transportfahrzeuge (FTF) automatisiert Aufgaben im Betrieb und sorgen für einen effizienten Produktionsfluss. Die Auslegung von FTS bedeutet im jetzigen Stand der Technik allerdings immer noch einen enormen Planungsaufwand und damit hohe Kosten. Neben der richtigen Auswahl der Fahrzeuge und der Spurführung ist vor allem die Planung des Wegenetzes für die Fahrzeuge sehr zeitintensiv und wird fast ausschließlich manuell von erfahrenen Systemplanern durchgeführt.

Die Wegenetauslegung für FTF entspricht einem komplexen Optimierungsproblem, da mehrere verschiedene Ziele gleichzeitig verfolgt werden müssen. Bspw. müssen neben möglichst kurzen Wegen, Kollisionen ausgeschlossen, der Freiraum maximiert sowie der Personenverkehr nicht behindert werden. Je nach Anwendungsfall werden den unterschiedlichen Optimierungszielen verschiedene Prioritäten zugeordnet.

In der Literatur existieren einige mathematische Ansätze mit denen es möglich ist, das mathematisch sinnvollste Wegenetz auf einem gegebenen Produktionslayout auszulegen. Allerdings werden viele der mathematischen Lösungen von erfahrenen Systemplanern verworfen, da sie aus unterschiedlichen Gründen (z. B. Brandschutz, Kundenwünsche, Erfahrungswerte) nicht auf ein reales Produktionslayout anwendbar sind. Die alleinige manuelle Auslegung des Wegenetzes durch Systemplaner ist sehr zeitintensiv und kann unter Umständen mehrere Wochen dauern. Geänderte Kundenwünsche ziehen aufwändige Iterationsschleifen nach sich.

In diesem Forschungsprojekt wurde eine Lösung entwickelt, die die Diskrepanz zwischen mathematischer Planung und manueller Planung löst und automatisiert ein Wegenetz auslegt, das effizient und direkt anwendbar ist. Allein durch die Eingabe der Transportmatrix, der FTF-Kinematik und des Produktionslayouts werden Wegenetze samt Alternativwegen automatisiert erstellt.

Die entwickelte Lösung basiert auf der Kombination von Wegenetalgorithmen (u.a. A*, Bellman-Ford) und einem Expertensystem, das auf Basis einer Fuzzy-Logik implementiert ist. Für das Aufstellen der Regelbasis wurden ausführliche Interviews mit erfahrenen Systemplanern durchgeführt. Mit Hilfe eines Webtools wurde den Experten eine Vielzahl von verschiedenen Wegenetzen gezeigt. Zu jedem Wegenetz fand eine Evaluierung hinsichtlich Einsatzbarkeit und Effizienz des Wegenetzes statt. Wichtige Kriterien für ein effizientes Wegenetz konnten durch linguistische Terme (z. B. „zu wenig Freifläche“, „zu viele geteilte Wege“) bewertet werden. Durch eine statistische Auswertung wurden eine gewichtete Regelbasis sowie Fuzzifizierungs-

und Defuzzifizierungsmethoden aufgestellt. Anschließend wurden diese Informationen mit Hilfe der Software MatLab in eine maschinenlesbare Form übertragen und mit dem bestehenden Wegenetzalgorithmus verknüpft.

Fuzzy-Logik wurde als Methode für die Abbildung des Expertenwissens in der Wissensbasis des vorgestellten Expertensystems ausgewählt, da sie in der Lage ist, die Unschärfe von Variablen zu erfassen und zu speichern. Eine Variable wird nicht wie im klassischen binärischen Ansatz als 0 oder 1 einem Attribut zugehörig ausgedrückt, sondern x kann graduell einem Attribut angehören. Die Fuzzy-Logik bietet für dieses Expertensystem den Hauptvorteil, mit linguistischen Variablen zu arbeiten. Menschliche Experten sind in der Lage, zielgerichtete Entscheidungen aufgrund ihres Wissens zu treffen. Allerdings ist die Art der Wissensrepräsentation unscharf. Eine Aussage, wie „Wenn viele Kreuzungen da sind und das Wegenetz an dieser Stelle sehr stark ausgelastet ist, dann lege einen Alternativweg an.“ beinhaltet Entscheidungskompetenz, ist aber schwer in der traditionellen Informatik umzusetzen. Die Fuzzy-Logik ist in der Lage, mit Begriffen wie „viele Kreuzungen“ oder „stark ausgelastet“ zu arbeiten und die Unschärfe zu speichern und verwertbar zu machen.

Die Ergebnisse des Projekts wurden in MatLab implementiert und stehen den beteiligten Projektpartnern als Software zur Verfügung. Der Benutzer kann auf einer Oberfläche die relevanten Daten zur Planung des FTS eingeben. Neben wichtigen Fahrzeugdaten (Größe, Geschwindigkeit etc.) lädt der Benutzer zudem die Hallenumgebung und die Transportaufträge ein. Anschließend kann der Benutzer die Wegenetzerstellung starten. Da die Ergebnisse des Projekts nicht in einem BlackBox-Ansatz umgesetzt werden sollten, kann der Benutzer zusätzlich die Regeln anders gewichten oder Regeln verändern. Die Software wurde im Rahmen einer Evaluierung bei den Projektpartnern für erste Planungen von Wegenetzen verwendet, um daraus weiteres Verbesserungspotenzial für die Software abzuleiten.

Die entwickelte Lösung wurde mit realen Produktionslayouts von Industriepartnern erprobt und die Wegenetze auf ihre Belastungsfähigkeit (Termintreue, Kollisionsfreiheit, maximaler Durchsatz etc.) hin getestet. Dazu wurden mit Hilfe der Software PlantSimulation und FlexSim die realen Hallenlayouts nachgebildet und verschiedene Transportszenarien simuliert. Zum Vergleich wurden manuell ausgelegte Wegenetze der Industriepartner verwendet. Insgesamt konnte gezeigt werden, dass die automatisierten Wegenetze deutlich schneller (< 5 Minuten) erstellt werden und dabei effizienter sind als die manuell erstellten Wegenetze. Dies zeigte sich vor allem in einer geringeren Auslastung der Fahrzeuge sowie geringeren Transportzeiten.

Insgesamt lässt sich somit festhalten, dass das Ziel des Vorhabens erreicht wurde.

2. Wissenschaftlich-technische und wirtschaftliche Problemstellung

Die heutige Art der Auslegung von Wegenetzen für FTS ist zeitaufwändig. Dies liegt vor allem an der fehlenden Automatisierung dieses Prozesses. Viele Planungsschritte müssen manuell erledigt werden und sind so abhängig von den jeweiligen Kapazitäten und Fähigkeiten der Planer. Zwar gibt es in den meisten Unternehmen bestimmte Standardprotokolle, die bei der Erstellung der Wegenetze abgearbeitet werden, dennoch beträgt die Auslegungsdauer dieser Wegenetze nach Gesprächen mit den beteiligten Projektpartnern oft einige Wochen.

Eine weitere Herausforderung liegt in der Form der Variablen innerhalb der Problemstellung bei der Planung von Wegenetzen. Oft gibt es keine „harten“ Zahlen, die die Grundlage für eine Entscheidung darstellen, sondern es liegen nur die subjektiven Einschätzungen der Systemplaner vor. Durch jahrelange Erfahrung können die Planer Entscheidungen, wie z. B. die Notwendigkeit von Alternativwegen, anhand der Transportmatrix und des Hallenlayouts festmachen. Diese Einschätzungen können meist nur in sprachlicher Form formuliert werden und sind so nicht in herkömmlicher Planungssoftware verwendbar. Die linguistischen Parameter enthalten aber viele wichtige Informationen über das zugrundeliegende System und die zu planenden Wegenetze.

Durch die linguistische Form der Parameter ist es zudem schwer, eine Wiederverwendbarkeit des Wissens sicher zu stellen. Bei jedem Projekt wird neues Wissen generiert, das im Idealfall bei neuen Planungsprozessen zur Verfügung stehen sollte. Leider geht dieses Wissen spätestens dann verloren, wenn der zuständige Systemplaner das Unternehmen verlässt oder für eine längere Zeit ausfällt. Anders als Kennzahlen und mathematische Formeln werden linguistische Parameter in den meisten Fällen nicht gespeichert und ihr Informationsgehalt geht verloren.

3. Gegenüberstellung angestrebter Teilziele und erzielter Ergebnisse

Ziel des Forschungsvorhabens war die Entwicklung eines Expertensystems zur automatisierten Auslegung des Wegenetzes für FTS. Die Interaktion des Anwenders mit dem System sollte dabei auf ein Minimum reduziert werden, um manuelle Schritte zu verringern. Der Anwender sollte lediglich die benötigten Eingabedaten bereitstellen. Die Daten sollten hierbei diese umfassen:

- die CAD-Daten der Einsatzumgebung des FTS,
- das Transportprofil mit detaillierter Beschreibung des Materialflusses,
- die Maße und die Kinematik der FTF

Das Expertensystem soll auf Basis dieser Daten in der Lage sein, ein vollständiges Wegenetz auszulegen und dem Anwender Statistikdaten zur Verfügung stellen. Insgesamt wurden 5 Teilziele definiert und erreicht:

Teilziel 1: Abbildung des Expertenwissens mittels eines Fuzzy Systems

Angestrebtes Teilziel aus dem Forschungsantrag:

Der Kern des Expertensystems ist das Wissen der Systemplaner. Deshalb sollten in diesem Teilziel die Erfahrungen der Systemplaner in einer Fuzzy-Logik abgebildet werden. Die Erfahrungen der Experten sollten sich zum einen in Fuzzy-Regeln widerspiegeln in der Form „WENN UND... DANN...“ und zum anderen in der Definition von Zugehörigkeitsfunktionen zu den einzelnen Variablen.

Korrespondierende Ergebnisse des Vorhabens:

Die Projektpartner stellten verschiedene Referenzszenarien in AP1 zur Verfügung. Gemeinsam wurden verschiedene Zusammenhänge analysiert. Zum einen wurden die Informationen diskutiert, die durch das Hallenlayout zur Verfügung stehen. Verschiedene Anordnungen der Stationen und der freien Flächen erlauben unterschiedliche Möglichkeiten der Auslegung des Wegenetzes. Die verschiedenen Transportprofile wurden betrachtet und Zusammenhänge zwischen Transporthäufigkeiten, Auslegung von Streckenabschnitten, Zusammenlegen von Wegen, die Einführung von Zusatzwegen diskutiert. Als Ergebnis wurde dieses Expertenwissen in Form eines Fuzzy-Regelwerks gespeichert. Das Fuzzy-Regelwerk wurde in MatLab mit Hilfe der Fuzzy Logic Toolbox umgesetzt.

Teilziel 2: Entwicklung eines Verfahrens zur automatisierten Interpretation der CAD-Daten

Angestrebtes Teilziel aus dem Forschungsantrag:

Die CAD-Daten der geplanten Einsatzumgebung bilden den Grundstein für die Auslegung des Wegenetzes. Systemplaner oder Konstrukteure können die Daten analysieren und interpretieren. Im Gegensatz zu einem Computer erkennen diese eine Tür oder ein Fester als solches und kennt die Bedeutung dieser Objekte. Weiterhin können Systemplaner Gänge und freie Flächen erkennen. Unter Ausnutzung dieser kann ein Weg von einer Station A zu einer Station B ausgelegt werden.

Korrespondierende Ergebnisse des Vorhabens:

Zur Erreichung dieses Teilziels wurde aufbauend auf dem FloodFill Algorithmus der Open Source Software „OpenCV“ ein Softwaredemonstrator entwickelt, das dem Benutzer erlaubt, gewünschte Objekte zu markieren und diesen eine Bedeutung

zuzuweisen. Der entwickelte Softwaredemonstrator ist in der Lage, geometrischen Objekten ihre semantische Bedeutung, wie z.B. „Station“, „Freifläche“ oder „Hindernnis“ zuzuordnen. Das Modell ist wie im Forschungsantrag gefordert unabhängig von einem speziellen Hallenlayout anwendbar und damit auch für zukünftige Forschungsvorhaben verwendbar.

Teilziel 3: Entwicklung eines Verfahrens zur Auslegung des initialen Wegenetzes

Angestrebtes Teilziel aus dem Forschungsantrag:

Der Softwarebenutzer legt initial ein Wegenetz aus, dazu wird das Transportprofil benötigt. Das Transportprofil enthält Angaben über die Beziehungen zwischen den Stationen im System. Ein Teil der Stationen tritt im System als Quelle, der andere Teil als Senke auf. Stationen, die beide Rollen annehmen können, existieren im System ebenso. Die Beziehungen zwischen den Stationen können mit Hilfe eines gerichteten Graphs nachgebildet werden. Demnach sind die Stationen die Knoten im Graph. Die Transportrichtung von der Quelle zur Senke wird durch eine gerichtete Kante (Pfeil von der Quelle zur Senke) angedeutet. Daraus kann ein initiales Wegenetz erzeugt werden. Allerdings ist dieses Wegenetz noch nicht kollisionsfrei und noch nicht optimiert auf die realen Bedingungen.

Korrespondierende Ergebnisse des Vorhabens:

Der Bellman-Ford-Algorithmus (BF) wird häufig in Szenarien verwendet, in denen ein gewichteter Graph optimiert werden soll. Zum Erreichen dieses Teilziel wurde der Bellman-Ford-Algorithmus so modifiziert (mod BF), dass er auf das FTF-Szenario anwendbar ist. Jede Station spiegelt einen Knoten in einem gewichteten Graphen wieder. Der mod BF spannt den Graphen basierend auf der Transportmatrix auf. Die Gewichte der Kanten werden hierbei durch die jeweilige Anzahl der Transporte auf der jeweiligen Transportstrecke bestimmt. Anschließend optimiert der mod BF die Anzahl der benötigten Transportstrecken und berechnet, ob Wege aufgrund zu geringerem Transportaufkommen zusammengelegt werden sollten oder vice versa ein weiterer Weg hinzugefügt werden soll. Diese Information wird anschließend zur eigentlichen Wegeplanung verwendet. Durch die Verwendung des mod BF konnte die Anzahl der benötigten Transportrouten minimiert werden und damit eine Rechenzeitoptimierung erreicht werden.

Teilziel 4: Entwicklung eines Verfahrens zur Erzeugung zusätzlicher Wege anhand des Transportprofils

Angestrebtes Teilziel aus dem Forschungsantrag:

Das Transportprofil enthält neben den Angaben über die Transportanzahl zwischen den Quellen und Senken auch die Angaben über die zeitliche Verteilung der Transporte über den Tag. Ein weiteres Teilziel ist es deshalb, diese Informationen zu nutzen, um zusätzliche Wegen, die den reibungslosen Ablauf der Transporte garantieren, im Wegenetz zu definieren. Oder falls wenig befahrene Wege definiert wurden, Wege zusammen zu legen. Der Algorithmus muss berücksichtigen, wie stark ein Weg zu einem späteren Zeitpunkt ausgelastet sein wird, abhängig von der zu erwartenden Anzahl von Transporten und der Anzahl der im System befindlichen FTF.

Korrespondierende Ergebnisse des Vorhabens:

Ein Teil dieses Teilziels wurde bereits in Teilziel 3 integriert, da eine gesonderte Betrachtung eine erhöhte Berechnungsdauer bedeutet hätte. Der andere Teil wurde mithilfe des Fuzzy-Regelwerks berücksichtigt. Es wurden gezielt Regeln von Experten definiert, die sich auf die Ausprägungen des Transportprofils beziehen. Für die Systemexperten war nicht nur die Anzahl der Transporte auf einer Strecke wichtig, sondern z. B. auch die Größe der Fahrzeuge oder die Geschwindigkeit der Fahrzeuge. Die Geschwindigkeit der Fahrzeuge ist z. B. relevant, um zu berechnen wie lange eine Kreuzung durch ein FTF belegt ist und damit den Weg für andere FTF blockiert. Je schneller das FTF, desto kürzer ist die Zeit in der die Kreuzung belegt ist. Die verschiedenen Regeln wurden so implementiert, dass sie als Output numerische Werte generieren, die als Parameter in den weiteren Algorithmus einfließen können, der in TZ 5 näher beschrieben wird.

Teilziel 5: Entwicklung eines Verfahrens zur Verfeinerung des Wegenetzes in Abhängigkeit der FTF-Eigenschaften

Angestrebtes Teilziel aus dem Forschungsantrag:

Die endgültige Kontur eines Wegenetzes ist von den FTF- sowie den Transportguteigenschaften bestimmt. Die Maße des FTF sind bspw. für den Abstand eines Weges von stationären Einrichtungen wichtig. Die Kinematik des FTF wirkt sich direkt auf die Kurvenradien aus. Ist das FTF vom Typ Schlepper, so müssen zusätzlich der Anhänger und seine Maße betrachtet werden. Je enger die Kurve und je länger das Transportmittel ist, umso größer ist die Fläche, die für die Kurvenbewegung freigehalten werden muss. Um zusätzliche Simulationen und Nachbesserungen zu ver-

meiden, werden im beantragten Forschungsvorhaben die oben genannten FTF-Eigenschaften direkt in die Auslegung des Wegenetzes mit einbezogen. Das zuvor initialisierte Wegenetz wird mithilfe von Parametern verfeinert, indem die Fuzzy-Regeln auf die Parameter angewendet werden.

Korrespondierende Ergebnisse des Vorhabens:

Die aus Teilziel 4 stammenden Parameter aus dem Fuzzy-Regelwerk wurden nun mit einem Wegenetz Algorithmus, dem A*-Algorithmus, verknüpft. Der A*-Algorithmus wurde so modifiziert (mod A*), dass er nicht nur den kürzesten Weg sucht, sondern dabei auch Abstände zu den Wänden und Stationen einhält – abhängig von der jeweiligen Fahrzeugbreite. Weiterhin wurden die verschiedenen Kurvenradien und Kurvengeschwindigkeiten bei der Auslegung des Weges berücksichtigt. Die numerischen Outputs aus dem Fuzzy-Regelwerk werden zusätzlich an den mod A* übermittelt und beeinflussen die Wegeauslegung. Damit wird erreicht, dass das Wegenetz nicht nur mathematisch effizient ist (durch den mod A*) sondern auch realistisch ist (durch das Erfahrungswissen innerhalb der Fuzzy-Logik).

4. Darstellung der erzielten Ergebnisse

In diesem Kapitel werden die erzielten Ergebnisse detailliert dargestellt. Die Darstellung ist in die fünf Schritte Anforderungsaufnahme (AP1), Analyse (AP2), Konzeption (AP3), Umsetzung (AP4), Validierung (AP5) und eine kritische Diskussion unterteilt.

AP1: Anforderungsanalyse

AP1.1: Definition der Zielkennzahlen und Validierungsparameter

Durchgeführte Arbeiten

Im Rahmen von AP1 wurden die Anforderungen an eine komplett automatisierte Erstellung von Wegenetzen für FTS aufgenommen und mit dem projektbegleitenden Ausschuss (PA) diskutiert. Die Anforderungsaufnahme erfolgte durch ein Treffen des PA am 25.06.2014 und zwei ausführlichen Interviews mit den Projektpartnern STILL GmbH und Götting KG.

Erzielte Ergebnisse

Als Ergebnis der Anforderungsaufnahme ist eine Liste mit definierten Anforderungen an die zu entwickelnde Software entstanden. Nachfolgend sind einige der wichtigsten Anforderungen aufgelistet:

- Nutzung als Planungs- und Realisierungshilfe,
- Einfache Bedienung,
- Leichte Erweiterbarkeit,
- Bereitstellung einer Exportfunktion des Wegenetzes,
- Möglichkeit für Rückfragen an den Benutzer,
- Auswahl verschiedener Fahrzeugtypen.

Zur späteren Überprüfung der zu entwickelnden Softwarelösung wurden zudem Validierungskriterien festgelegt, wie z. B. der Durchsatz von Transportgütern, die Gesamtlänge des Wegenetzes oder die von der Software benötigte Auslegungsdauer. Die Software sollte anhand von mehreren Referenzszenarien getestet werden. Als Testumgebung sollte hier u. a. Plant Simulation verwendet werden, um den Betrieb der ausgelegten Wegenetze zu simulieren. Die Simulationen gaben Aufschluss über die Eignung der Wegenetze für den FTS Betrieb.

AP1.2: Identifikation von Referenzanlagen

Durchgeführte Arbeiten

Zusammen mit den Projektpartnern, die installierte FTS-Anlagen besitzen oder bei Kunden installiert haben, wurden potentielle Referenzanlagen identifiziert. Diese sollten dazu dienen, Expertenwissen für AP2 zu extrahieren und das fertiggestellte Expertensystem zu validieren. Bei der Auswahl war eine ausreichende Anlagenkomplexität wichtig, um eine realistische Testumgebung zu gewährleisten. Als Informationen mussten die CAD-Daten der Einsatzumgebung, das Wegenetz der Anlage und die zugehörigen Transportprofile zur Verfügung stehen.

Erzielte Ergebnisse

Drei Referenzanlagen wurden durch die Projektpartner zur Verfügung gestellt. Das erste Referenzszenario wurde von der Volkswagen AG zur Verfügung gestellt. Diese Anlage wird bereits seit mehreren Jahren verwendet. Die Anlage zeichnet sich durch viele Stationen und lange und verzweigte Wege aus. Die weiteren Referenzszenarien wurden von der MLR GmbH und der Continental AG geliefert. Aus Geheimhaltungsgründen können die Anlagen nicht detailliert beschrieben werden. In beiden Szenarien handelt es sich um große Anlagen mit mehreren FTF, die stark verknüpfte Produktionsprozesse beliefern müssen. Dies bedeutet einen erhöhten Anspruch an Kriterien, wie die Termintreue der Anlieferung von Gütern.

AP2: Analyse

AP2.1: Analyse der Referenzanlagen

Durchgeführte Arbeiten

Zur Analyse der Referenzanlagen wurden Anlagenparameter aufgenommen, wie z. B.:

- Anzahl der FTF im System
- Anzahl Transportaufträge
- Durchsatz
- FTF-Auslastung

Diese Parameter wurden genauer analysiert und Wechselwirkungen betrachtet. Entscheidend war hierbei wie die Auswirkungen der Parameter auf die Gesamtperformance der Referenzanlagen sind.

Erzielte Ergebnisse

Die Analyse der Referenzanlagen gab Aufschluss über spezielle Eigenschaften der Wegenetze. Besonders interessant war hier die Zusammenführung von Wegen unter bestimmten Voraussetzungen, wie z. B. Größe der vorhandenen Freifläche oder Stärke des Transportaufkommens.

In Kombination mit der Betrachtung des Transportprofils konnten Zusammenhänge zwischen hohen Transporthäufigkeiten und Zusatzwegen hergestellt werden. Parallele Zusatzwege können z. B. ein Hinweis auf ein hohes Risiko von nicht eingehaltenen Transportterminen sein oder auf einen niedrigen Durchsatz.

AP2.2: Identifikation des Expertenwissens

Durchgeführte Arbeiten

Zur Identifikation des Expertenwissens wurde ein Fragebogen erstellt, der zum einen zur Identifikation der Fuzzy-Regeln und zum anderen zur Identifikation relevanter Inputvariablen für die Fuzzy-Logik genutzt wird. Dieser Fragebogen wurde an ausgewählte Projektpartner verteilt. Der Fragebogen beinhaltete beispielhafte Wegenetze, anhand derer die Experten Verbesserungsvorschläge direkt formulieren konnten. Zusätzlich wurden zwei intensive Einzelinterviews mit STILL GmbH und Götting KG durchgeführt, die direktes Feedback zu Zwischenständen des Softwaredemonstrators gaben.

Erzielte Ergebnisse

Die Fragebogen konnten Aufschluss über wichtige Implementierungsfaktoren für die Fuzzy-Logik liefern. Einzelinterviews mit Projektpartnern konnten zudem weiteren Input für das Fuzzy-Regelwerk liefern. Als Ergebnis dieses Arbeitspakets entstand eine Liste von relevanten Regeln, die bei der Erstellung eines anwendbaren Wegenetzes für FTF zu beachten sind. Eine Definition und Sortierung der Regeln sowie Überprüfung auf Redundanz erfolgte in AP3.1.

AP3: Konzeption**AP3.1: Definition der Fuzzy-Regeln***Durchgeführte Arbeiten*

Aus den in AP2.1 erstellten und ausgewerteten Fragebögen konnte in diesem AP eine Liste mit Fuzzy-Regeln aufgestellt werden. Die erstellten Fuzzy-Regeln wurden in drei Gruppen eingeteilt. Gruppe 1 enthält Regeln, die sich aus dem Layout der Einsatzumgebung ergeben, wie z. B. dem Standort der stationären und peripheren Einrichtungen. Regeln der Gruppe 2 hängen von der Transportmatrix ab, aus der abgelesen werden kann, wie viele Güter auf einem bestimmten Streckenabschnitt zu einem definierten Zeitpunkt transportiert werden müssen. Regeln der Gruppe 3 beschäftigen sich mit der Kinematik der einzelnen eingesetzten FTF.

Erzielte Ergebnisse

Eine Regelbasis wurde erstellt, die eine Vielzahl von Fuzzy-Regeln beinhaltet. Diese wurde durch das laufende Feedback der Projektpartner sukzessive erweitert. Ein Ausschnitt liefert die nachfolgende Tabelle 1.

Tabelle 1: Ausschnitt aus den aktuellen Fuzzy-Regeln

Re gel nr.	Optimierungsproblem	Inputfaktor	Fuzzyregel
1	Minimize #crossing	#Crossings	IF #Crossings_primary high AND #Crossings_secondary low THEN cost_overall_primary NOT low AND costs_overallsecondary low
			IF #crossings_primary low AND #crossingssecondary high THEN costs_overallprimary low AND cost_overall_primary NOT low
2	Minimize pathlength and minimize #turningpoints	pathlength, #turning-points	IF pathlength short AND #turning-points few THEN cost (for this path) low

3	Strongly driven paths shall not be taken by many paths	#transports, #mergedcells	IF #transports very high AND #mergedcells high THEN costs high. IF #transports high AND #mergedcells NOT low THEN costs medium. IF #transports low THEN costs low.
4	#closenessToWall, #AscendingArea	#closenessToWall, #AscendingArea	IF ClosenessToWall high AND AscendingArea Not critical THEN costs low IF Closeness ToWall high AND AscendingArea very critical THEN costs high
5	Minimize length overall	length_overall_primary Length_overall_secondary	IF length_overall_primary low AND length_overall_secondary high THEN cost_overall_primary low AND cost_overall_secondary NOT low IF length_overall_primary high and length_overall_secondary low THEN cost_overall_primary NOT low AND cost_overall_secondary low

Als Umgebung zur Implementierung der Fuzzy-Logik wird die MatLab Fuzzy Logic Toolbox verwendet. Abbildung 1 zeigt beispielhaft das Control-Panel. Durch ihre einfache Bedienoberfläche lassen sich neue Regeln einfach hinzufügen und später vom Benutzer ändern.

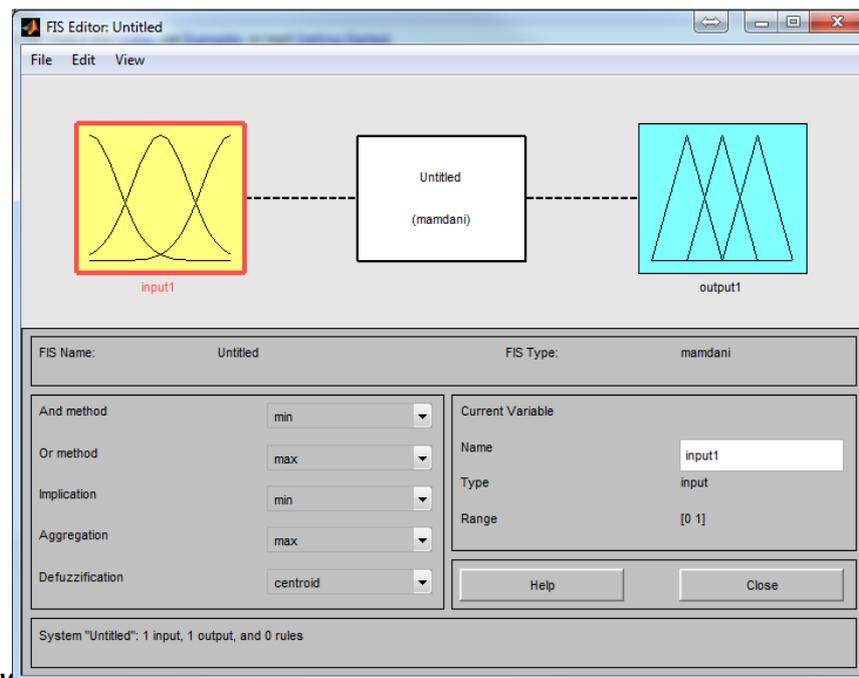


Abbildung 1: Panel zur Einbindung der Fuzzy-Regeln

AP3.2: Konzeption des Interpretationsverfahrens

Durchgeführte Arbeiten

Im Rahmen dieses AP erfolgte die Konzeption eines Verfahrens zur automatisierten Interpretation von CAD-Daten. Zunächst wurde definiert, welche Objekte automatisiert erkannt werden müssen, wie diese im CAD-Format definiert sind und welche Zeichenregeln dazu existieren. Anschließend fand eine Recherche von vorhandenen Erkennungsverfahren statt und ein Verfahrensablauf wurde entwickelt.

Erzielte Ergebnisse

Verschiedene Möglichkeiten der CAD-Erkennung wurden ausgewertet. Grundidee ist, kein komplett neues Modul zur CAD-Interpretation zu implementieren, sondern bestehende Programme zur Interpretation auf das spezielle Einsatzfeld von FTS zu adaptieren. Zunächst fand eine Evaluation einer Reihe von kommerziellen Programmen statt.

Das Programm AutoCAD, das ein Teil der CAD-Produktpalette von Autodesk ist, eignet sich durch seine vordefinierte Bibliothek von Bauteilen (Elektrotrassen, Türen, etc.) zum Konstruieren von Gebäuden. Grundrisse werden automatisch erstellt. Das Unterprogramm AutoCAD Map 3D ermöglicht es zudem, umfangreiche Funktionen im Bereich der Kartografie durchzuführen und durch verschiedene Schnittstellen Daten aus anderen Programmen und Quellen zu integrieren.

Das Design-Programm CAD6 Studio hingegen eignet sich gut zum Importieren, Erstellen und Bearbeiten von Wegenetzen im CAD-Hallenlayout. Zusätzlich ist hier eine Simulation möglich, um die Wegenetze auf ihre Befahrbarkeit zu testen.

Da die Interpretation aber frei verfügbar und auf alle CAD-Formate anwendbar sein sollte, wurde entschieden, aufbauend auf der FloodFill-Methode aus der OpenSource Software-Bibliothek OpenCV einen Softwaredemonstrator zu entwickeln, der die Layout-Erkennung ermöglicht. Dazu wurde ein Konzept für die Schnittstelle zwischen MatLab und OpenCV erstellt.

AP3.3: Konzeption des Initialverfahrens

Durchgeführte Arbeiten

In diesem AP wurde ein Konzept für die initiale Auslegung des Wegenetzes erstellt, das in späteren AP verfeinert wurde. Zur Erreichung dieses Ziels wurde über mehrere Monate eine Schnittstelle in MatLab implementiert, die als Schnittstelle zwischen

Inputfaktoren (Transportmatrix, Kinematikdaten, Hallenlayout) und den Fuzzy-Regeln dient.

Erzielte Ergebnisse

In Abbildung 2 ist der erarbeitete Ablauf des Initialverfahrens dargestellt. Zunächst werden das Hallenlayout und die Transportmatrix eingelesen. Anschließend läuft ein für das Forschungsprojekt modifizierter A*-Algorithmus (Mod A*) ab, der aus der Transportmatrix ein initiales Wegenetz erzeugt. Wichtige Kennzahlen aus diesem Wegenetz, wie z. B. die Anzahl der Kreuzungen, die Länge der Alternativwege oder die Anzahl der Transporte, werden an den Fuzzy-Logik-Controller übermittelt. Dieser trifft Entscheidungen mithilfe der zuvor implementierten Regelbasis aus AP 3.1 und gibt Stellparameter an den modifizierten A*-Algorithmus. Dieser erzeugt ein weiteres Wegenetz, das mit Hilfe der Fuzzy-Logik das Erfahrungswissen der Systemplaner berücksichtigt und somit Lösungen ausgeschlossen werden, die in der Realität nicht umsetzbar wären. Wenn eine zufriedenstellende Lösung erreicht wurde, bricht der Algorithmus ab.

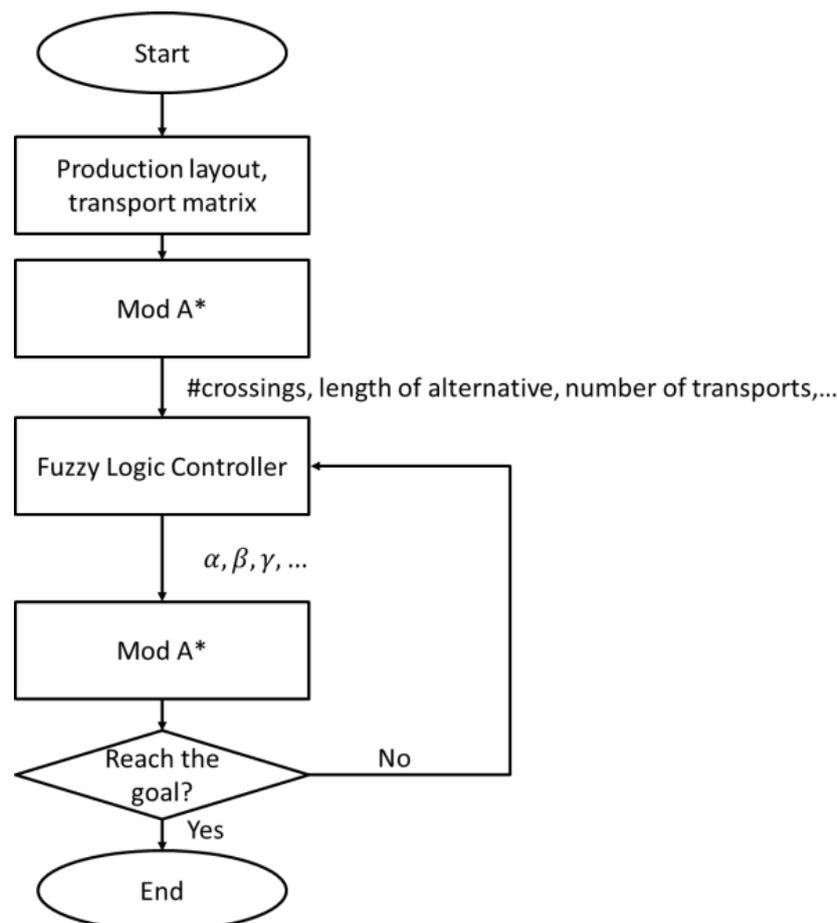


Abbildung 2: Ablauf des Initialverfahrens

In Abbildung 3 ist ein vom modifizierten A*-Algorithmus erstelltes Wegenetz zu sehen. Zu erkennen ist, dass die Stationen richtig als Quelle und Senke erkannt werden. Im ersten Stadium wird das Wegenetz noch nicht sehr realitätsnah ausgelegt, da die Wege zu viel Freifläche einnehmen und die Kurvenradien nicht berücksichtigt werden.

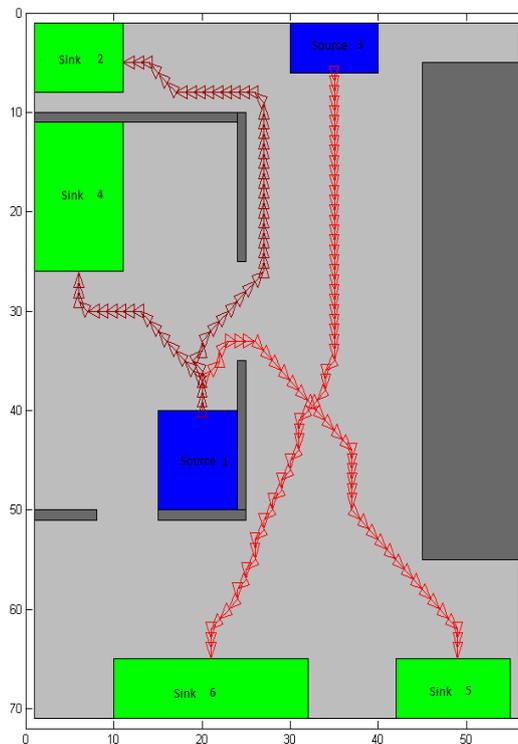


Abbildung 3: Initiales Wegenetz des modifizierten A*-Algorithmus

In Abbildung 4 ist durch die Verwendung der Fuzzy-Logik eine deutliche Verbesserung des Wegenetzes zu erkennen. Wege, die die gleiche Richtung besitzen, werden zusammengefasst. Die Anzahl diagonalen Wege wurde zur Platzeinsparung minimiert. Durch die Einbeziehung der Kurvenradien konnte zudem sichergestellt werden, dass die FTF das Wegenetz ohne Kollisionen befahren können.

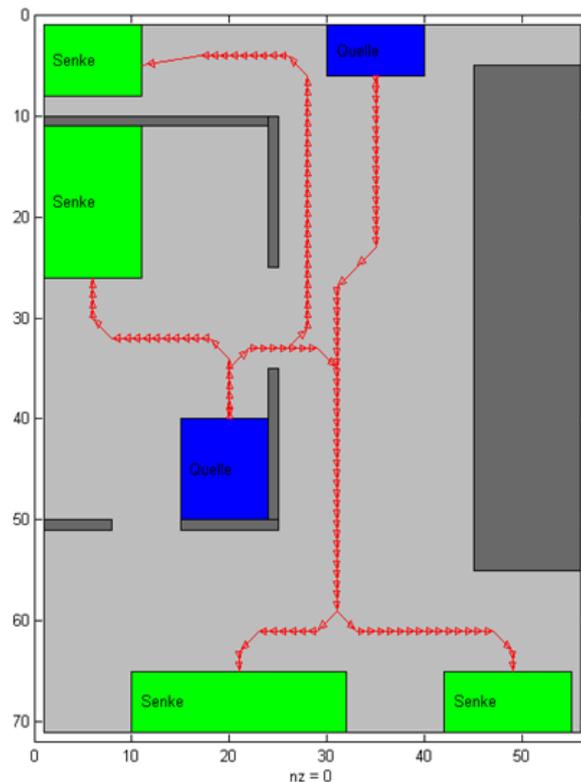


Abbildung 4: Initiales Wegenetz modifiziert durch den Fuzzy-Logik-Controller

AP 3.4: Konzeption des Ergänzungsverfahrens

Durchgeführte Arbeiten

In diesem Arbeitspaket wurde ein Verfahren zur Ergänzung des Wegenetzes um zusätzliche Wege konzipiert. Zur Erreichung dieses Ziels wurde das Expertensystem um zusätzliche Regeln erweitert, die gezielte Abfragen über die Kollisionswahrscheinlichkeit oder das Auftreten von Staus durchführen. Zur Erweiterung der Regelbasis wurden erneut Interviews geführt, um Experten entscheiden zu lassen, wann weitere Wege nötig sind. Dazu wurden verschiedene Szenarien gezeigt und die Bewertung der Experten erfasst.

Erzielte Ergebnisse

Die Experten bewerteten z. B. unter dem Gesichtspunkt der Auslastung des Wegenetzes, ob ein weiterer Weg zu diesem Zeitpunkt erforderlich ist. Aus diesen Bewertungen der Experten wurden weitere Regeln abgeleitet. Abbildung 5 zeigt ein beispielhaftes Szenario, das bewertet wurde. Zu sehen ist, dass die Auslastung durch die Zusammenlegung von drei verschiedenen Transportwegen (rot, schwarz, blau) zu einer Station zu hoch ist und die Generierung eines Alternativwegs die Auslastung der Wege reduziert.

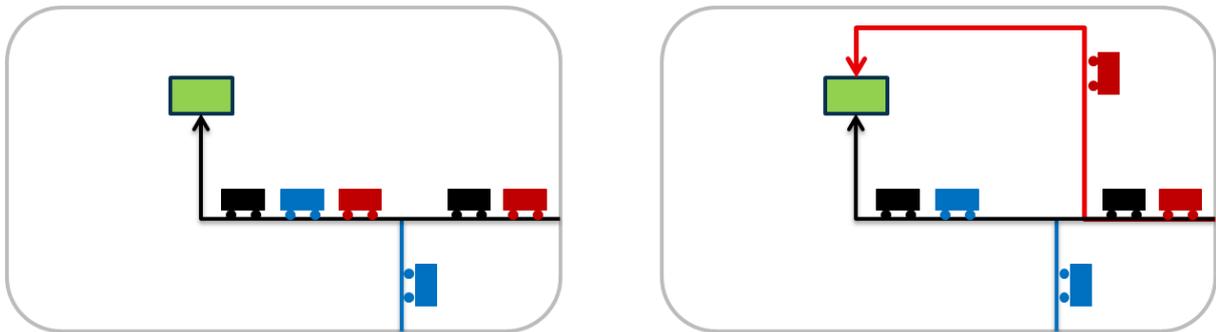


Abbildung 5: Expertenentscheidung über Alternativweg (links: Wegenetz mit zu hoher Auslastung eines Weges; rechts: Ergänzung eines Alternativweges durch Expertensystem)

Eine erstellte Regel zu diesem Szenario ist z. B.: „WENN Alternativweg mittel lang UND Transporthäufigkeit hoch DANN wenig zusammengeführte Wege (= Alternativweg generieren)“. Die Regeln wurden in den Fuzzy-Logik-Controller aufgenommen.

Zu jeder der möglichen Inputs (z. B. Länge Alternativweg, Auslastung, Transporthäufigkeit) in den Regeln wurde für die Regelbasis eine Zugehörigkeitsfunktion definiert. **Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.** zeigt drei Beispiele für von Experten definierte Zugehörigkeitsfunktionen.

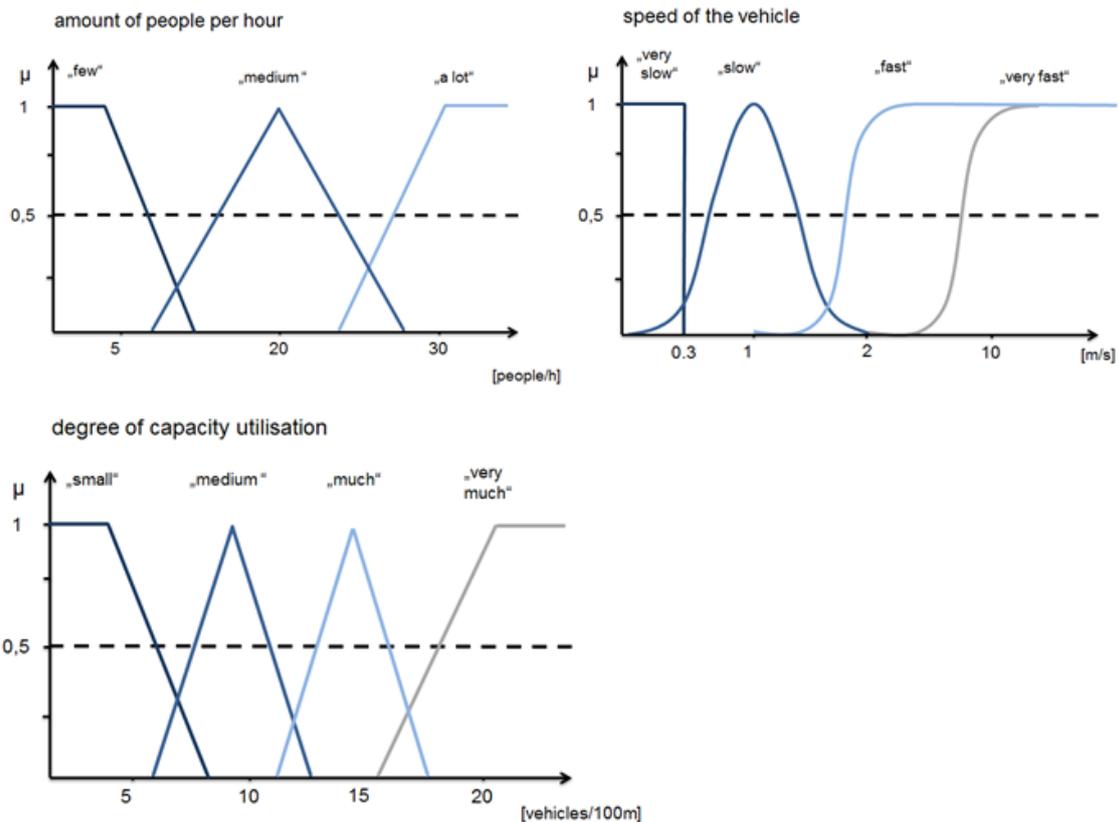


Abbildung 6: Zugehörigkeitsfunktionen für Inputs für den Fuzzy-Logik-Controller

Das Bild oben rechts zeigt z. B. die Zugehörigkeit zu der Variable „speed of the vehicle“, also der Geschwindigkeit des Fahrzeugs. Die Experten definierten, dass alle Geschwindigkeiten geringer als 0,3 m/s als sehr langsam angesehen werden können. Die weitere Aufteilung erfolgt graduell, so ist eine langsame Fahrt zwischen 0 und 2 m/s mit einer Glockenfunktion definiert. Die einzelnen Zugehörigkeitsfunktionen können sich überschneiden, so dass ein Input zu mehreren Attributen gehören kann (z. B. „langsam“ und „mittel schnell“).

AP 3.5: Konzeption des Verfeinerungsverfahrens

Durchgeführte Arbeiten:

In diesem AP wurde ein Konzept für ein Verfahren zur Verfeinerung des Wegenetzes entwickelt. Hierzu wurden relevante FTF-Kinematiken (z. B. Geschwindigkeit, Fahrzeugstelltyp, Maße) mit in den Algorithmus aufgenommen.

Erzielte Ergebnisse:

Mit Hilfe der Experten wurden relevante Fahrzeugdaten für das Wegenetz definiert. Neben den Abmessungen und den Geschwindigkeiten der FTF waren vor allem die Wahl des Fahrzeuggestells (z. B. Dreirad, Vierrad) und die Art der Lastaufnahme wichtig. Die Art des Fahrzeuggestells hat u. a. einen entscheidenden Einfluss auf die Wenderadien und die Rangierfähigkeit der Fahrzeuge vor Stationen. Abhängig von der Art der Lastaufnahme (z. B. über Gabelzinken oder Rollenförderer) wurden besondere Anfahrwege an Stationen berücksichtigt.

AP 3.6: Konzeption des Expertensystems*Durchgeführte Arbeiten:*

In diesem AP wurden die einzelnen Teilsysteme aus den vorherigen AP zu einem Gesamtsystem zusammengeführt. Dazu wurden verschiedene Schnittstellen konzipiert, die die Übertragung der einzelnen Teilergebnisse realisieren.

Erzielte Ergebnisse:

Abbildung 7 zeigt die Gesamtübersicht über das entwickelte Expertensystem.

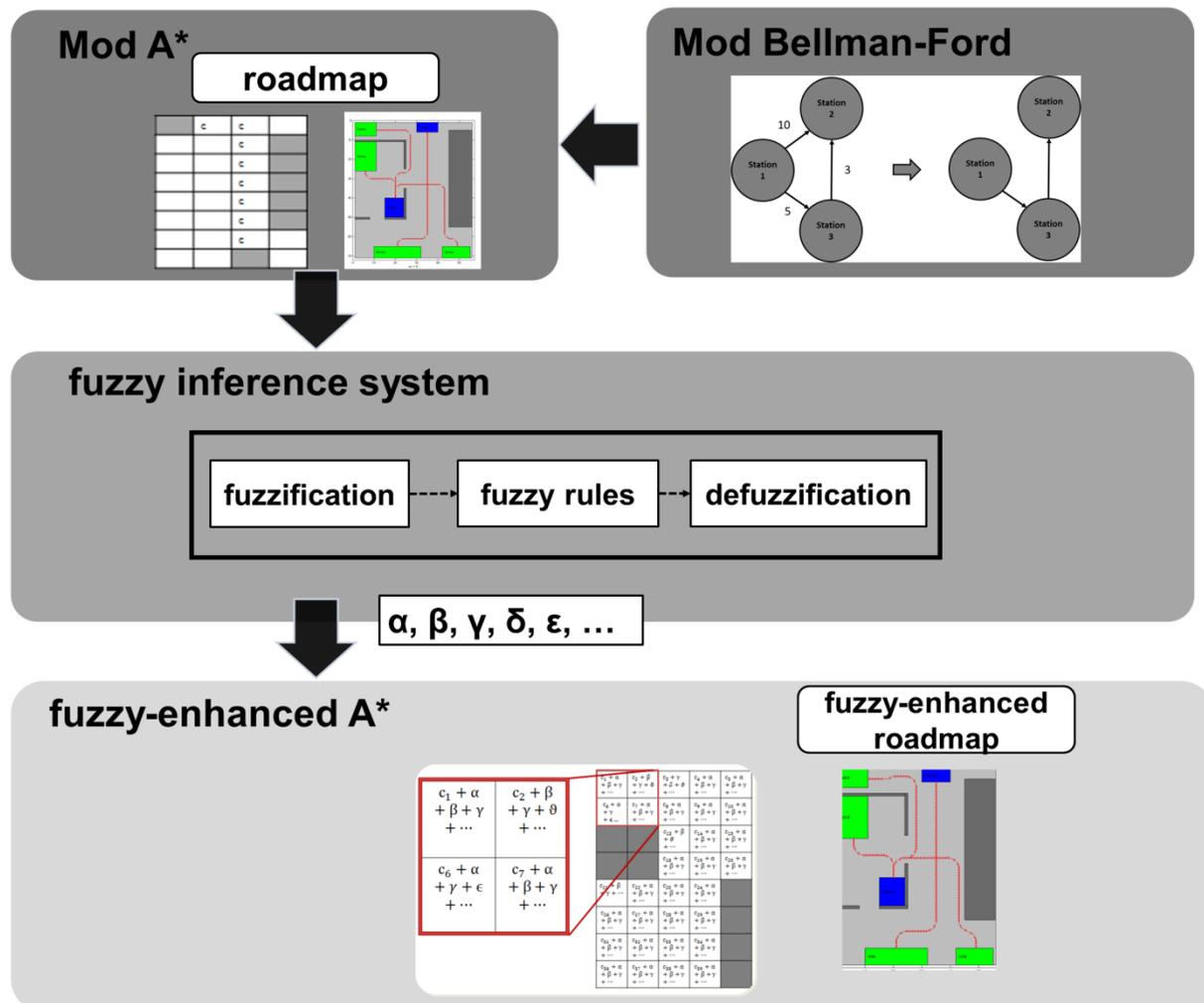


Abbildung 7: Übersicht über den Gesamtablauf des Expertensystems

Im **ersten Schritt** optimiert eine modifizierte Version des Bellman-Ford-Algorithmus (mod BF) die Anzahl der benötigten Transportrouten. Dazu wird ein gerichteter Graph erstellt, der alle Transportbeziehungen, die in der Transportmatrix angegeben sind als Kanten in den Graphen überträgt und alle Stationen als Knoten darstellt. Als Gewichte für die Kanten wird die jeweilige Anzahl der Transporte auf einer Wegstrecke definiert. Der mod BF berechnet nun anschließend, ob Transportwege aufgrund von zu wenigen Transporten zusammengelegt werden sollten oder falls zu viele Transporte stattfinden, alternative Wege generiert werden sollen. Die ausgewählte Transportbeziehungen werden dem mod A* im nächsten Schritt übermittelt.

Im **zweiten Schritt** unterteilt der mod A* das Layout in ein Gitter mit gleichgroßen Zellen. Jeder Zelle wird hierbei ein numerischer Kostenwert zugewiesen. Objekten und Stationen wird ein extrem hoher Wert zugewiesen. Wegstrecken, die besonders günstig sind, wird ein niedriger Wert zugewiesen. Anschließend berechnet der mod A* den günstigsten Weg von der jeweiligen Startstation zu der entsprechenden Zielstation.

Im **dritten Schritt** wird das Kostengitter, das Wegenetz und relevante Kennzahlen der Wege (z. B. Anzahl der Kreuzungen, Anzahl der Richtungsänderungen, Abstände zu Wand und Wegen) an den Fuzzy-Logik-Controller übergeben. Dieser fuzzifiziert die Werte zunächst (d. h. er weist den numerischen Zahlen anteilig linguistische Variablen zu) und anschließend werden die Werte an die Fuzzy Regeln übergeben. Hier werden basierend auf dem Expertenwissen Entscheidungen über das Wegenetz getroffen (z. B. ob ein Alternativweg geplant oder Wegabschnitte zusammengeführt werden sollen). Die Outputs der Regeln werden nachfolgend defuzzifiziert, d. h. den linguistischen Outputs werden numerische Werte in der Form von α, β, γ zugewiesen.

Diese numerischen Werte werden im **vierten Schritt** als Kosten auf das zugrundeliegende Kostengitter addiert. Anschließend berechnet ein Algorithmus erneut den kostengünstigsten Weg von den jeweiligen Startstationen zu den jeweiligen Zielstationen.

AP4: Umsetzung

AP 4.1 Umsetzung des Fuzzy-Regelwerks

Durchgeführte Arbeiten:

In diesem AP wurden die in den vorherigen AP erzielten Ergebnisse in eine Software implementiert. Hierzu wurde die Software MatLab und deren Fuzzy Logic Toolbox verwendet.

Erzielte Ergebnisse:

Die nachfolgende Abbildung 8 zeigt einen Ausschnitt aus der Regelbasis aus dem Fuzzy-Logik Interface. Die zuvor definierten Regeln wurden hier implementiert. Im oberen Fenster können die Regeln in „IF-THEN“-Form angelegt werden. So können die verschiedenen linguistischen Inputs miteinander verknüpft und einem Output zugeordnet werden. Zusätzlich kann im unteren Teil jeder Regel ein Gewicht zugewiesen werden.

Durch den einfachen Aufbau dieser Schnittstelle können die Anwender auch nach Projektende selbstständig die Regeln anpassen und weitere Regeln hinzufügen.

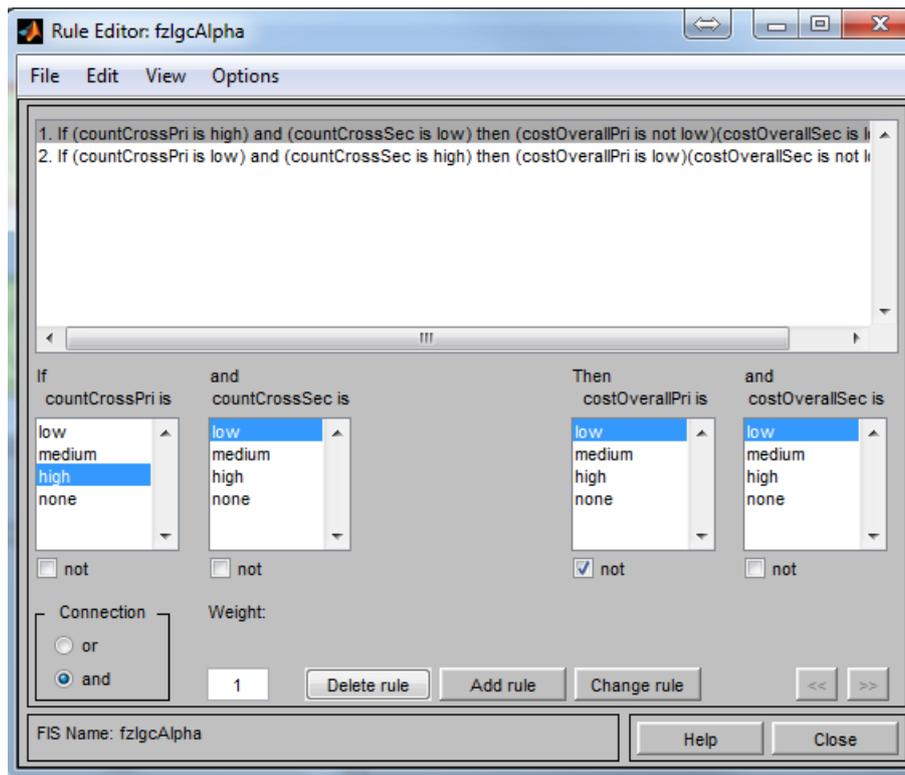


Abbildung 8: Oberfläche zur Implementierung der Regelbasis

AP 4.2: Implementierung des Interpretationsverfahrens

Durchgeführte Arbeiten:

In diesem AP wurde das entwickelte Interpretationsverfahren für die CAD-Daten implementiert. Dazu wurde neben einer Einlesefunktion der Daten auch eine Schnittstelle für den Benutzer implementiert, durch die er Objekten eine Funktion zuweisen kann. Als Grundlage zur CAD-Layouterkennung wurde die OpenSource Software OpenCV verwendet, deren Methode FloodFill für das Einsatzgebiet FTS erweitert wurde. Die Methode basiert auf einem flächenfüllenden Algorithmus.

Erzielte Ergebnisse:

Die nachfolgende Abbildung 9 zeigt die implementierte Benutzeroberfläche (engl.: graphical user interface, GUI) für das Interpretationsverfahren. Im oberen Bereich kann der Benutzer verschiedene Farben auswählen, um unterschiedliche Kategorien von Objekten zu definieren. Anschließend können die verschiedenen Objekte in dem Layout markiert werden.

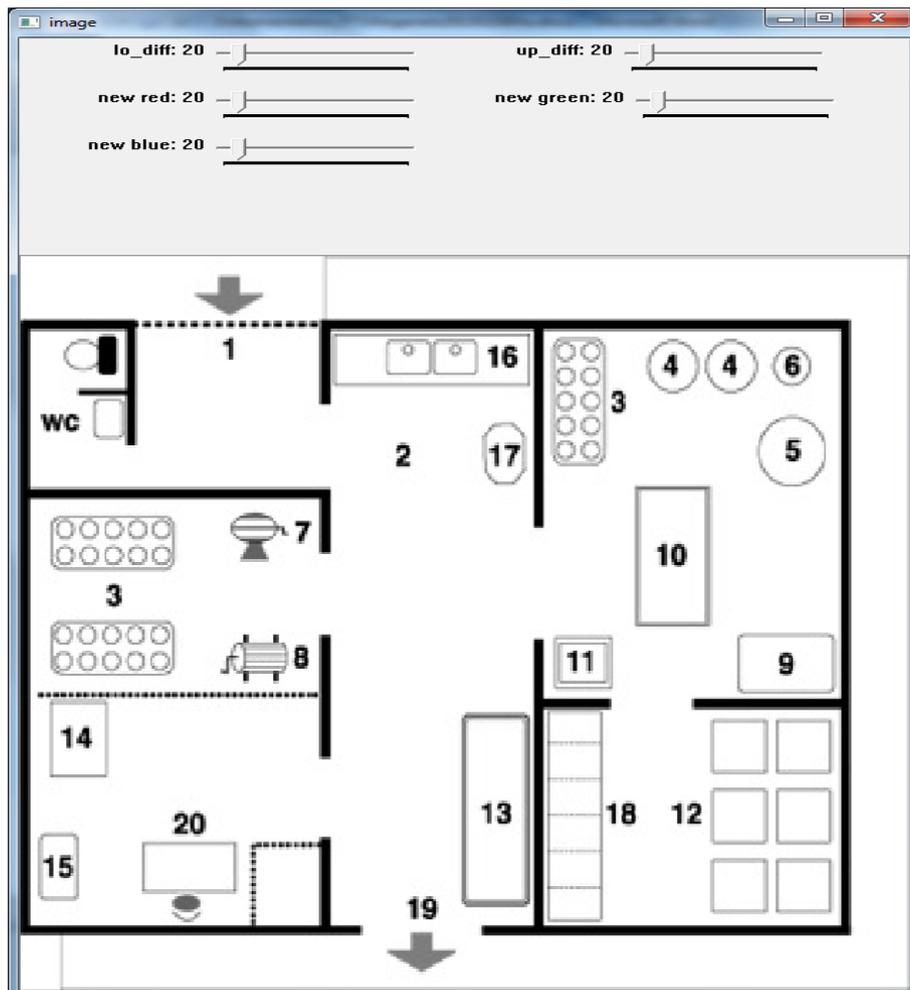


Abbildung 9: GUI des Interpretationsverfahrens

Bei ersten Versuchen traten Probleme bei der Erkennung von Objekten auf, die andere Objekte (z. B. Zahlen) einschließen. Deshalb wurde die FloodFill-Methode um einen Algorithmus erweitert, der die kleinste umschließende Hülle definiert. Abbildung 10 zeigt sowohl den flächenfüllenden Ansatz (links), als auch den Konturenansatz (rechts). Beim Konturenansatz wird jeweils die kleinste umschließende Hülle um ein Objekt berechnet.

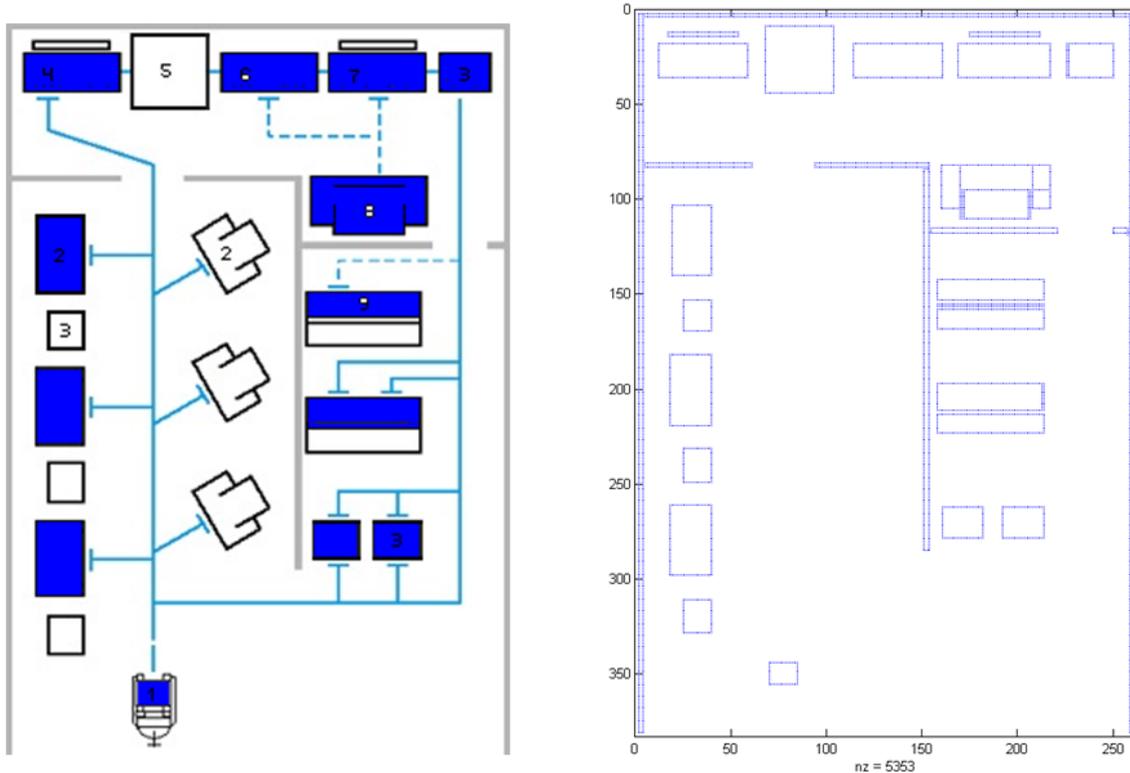


Abbildung 10: Ergebnis des Interpretationsverfahrens (links: Füllfunktion der Layouterkennung; rechts: Erkennung der Umriss)

AP 4.3: Implementierung des Initialverfahrens

Durchgeführte Arbeiten:

In diesem AP wurde das Verfahren zur Auslegung des initialen Wegenetzes implementiert. Dazu wurden verschiedene Wegenetzalgorithmen implementiert, die basierend auf einer Heuristik den optimalen Weg finden. Um den Start des Initialverfahrens zu realisieren, wurde zudem eine GUI entworfen und umgesetzt.

Erzielte Ergebnisse:

Abbildung 11 zeigt die GUI zum Starten der initialen Wegenetzauslegung. Im ersten Schritt berechnen die implementierten Wegenetzalgorithmen den optimalen Weg basierend auf ihrer zugrundeliegenden Heuristik. Wichtige Eigenschaften der Wegenetze (z. B. die Anzahl von Kreuzungen oder die Anzahl der Richtungsänderungen) werden im nächsten Schritt an den Fuzzy-Logik-Controller übergeben.

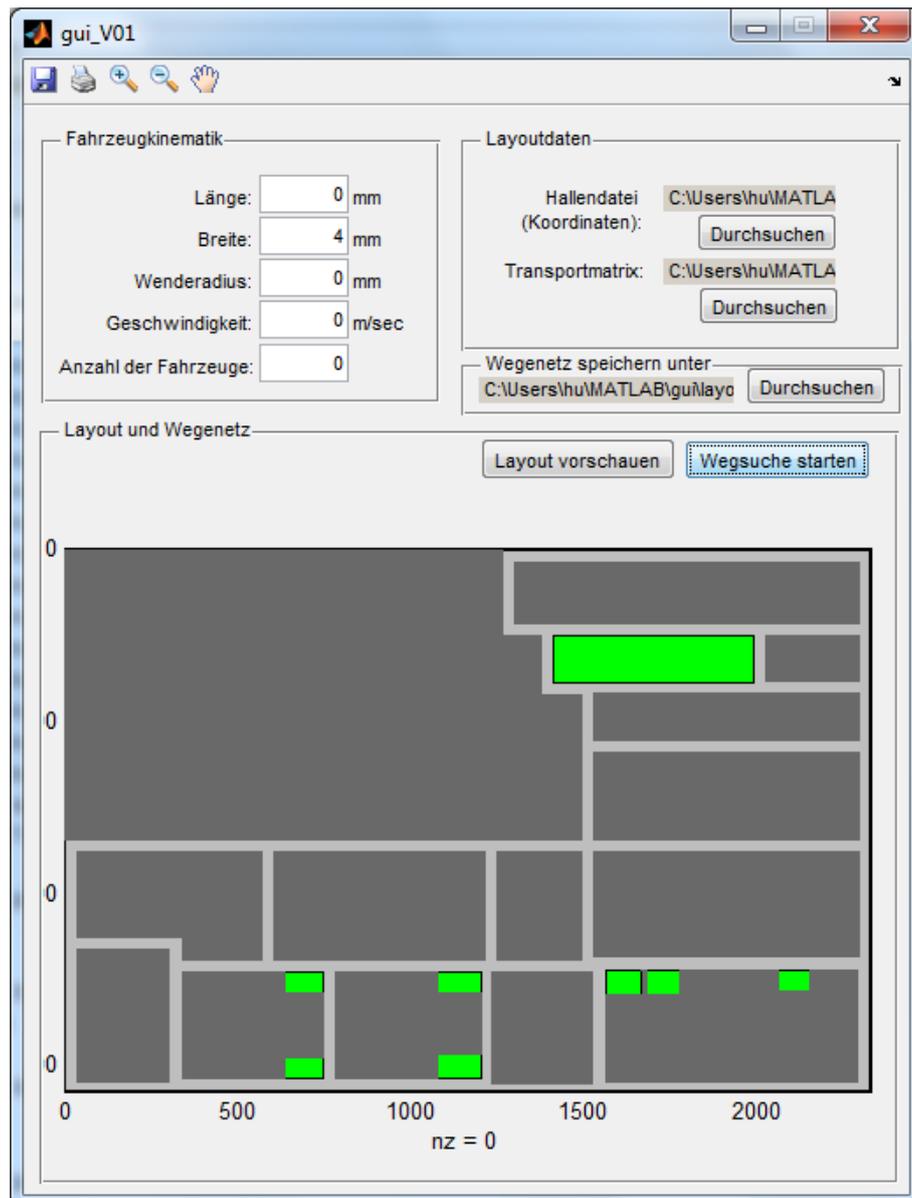


Abbildung 11: GUI des Expertensystems

AP 4.4: Implementierung des Ergänzungsverfahrens

Durchgeführte Arbeiten:

In diesem AP wurde ein Verfahren zur Ergänzung des Wegenetzes um zusätzliche Wege implementiert. Diese Regeln wurden zum bestehenden Regelwerk hinzugefügt und deren Outputs für die erneute Wegberechnung zur Verfügung gestellt.

Erzielte Ergebnisse:

Aufbauend auf den geführten Interviews in AP 3.4 wurden weitere Regeln in das in AP 4.4 entwickelte Fuzzy-Regelwerk aufgenommen. Durch die Aufnahme von weiteren Regeln konnte gewährleistet werden, dass z. B. bei hohen Transportaufkommen

und genügend Freifläche zusätzliche Wege eingeplant werden, oder dass zwei benachbarte Wege bei geringen Transportaufkommen zusammengeführt werden.

AP 4.5: Implementierung des Verfeinerungsverfahrens

Durchgeführte Arbeiten:

Neben der Ergänzung des Wegenetzes um weitere Wege, ist auch die Berücksichtigung der FTF-Kinematik relevant für ein anwendbares und effizientes Wegenetz. In diesem AP wurde sowohl das Regelwerk, als auch der A*-Algorithmus so modifiziert, dass Abstände zu Wänden, Wege und Stationen eingehalten werden und Kurven befahrbar sind.

Erzielte Ergebnisse:

Zum einen wurden aufbauend auf den in AP 3.4 geführten Interviews weitere Regeln in das Fuzzy-Regelwerk aufgenommen, die Bezug auf die FTF-Kinematik nehmen. Zum Beispiel wurden Regeln hinzugefügt, die sich auf die Kurvengeschwindigkeit des FTF beziehen. Falls das FTF eine hohe Kurvengeschwindigkeit besitzt, muss ein höherer Abstand zwischen Weg und Wand realisiert werden, da die Hüllkurve aufgrund von Personenschutz größer angesetzt werden muss. Zum anderen wurde der A*-Algorithmus so angepasst, dass er schon bei der Berechnung von Hüllkurven um feste Objekte (z. B. Stationen, Wände, Regale) ausgeht und einen Weg nur in einem gewissen Sicherheitsabstand zu diesen Objekten anlegt.

AP 4.6: Implementierung des Expertensystems

Durchgeführte Arbeiten:

Dieses AP 4.6 fasst die Ergebnisse der vorangegangenen AP zusammen und verbindet die einzelnen Module in einem Softwaredemonstrator. Auch der finale Softwaredemonstrator wurde in MatLab 2015 mit der MatLab Fuzzy Logic Toolbox realisiert.

Erzielte Ergebnisse:

Als Ergebnis dieses AP entstand ein Softwaredemonstrator, der bereits von den Unternehmen getestet und für eine Nutzung nach der Projektlaufzeit zur Verfügung gestellt wurde. Die nachfolgende Abbildung 12 zeigt den finalen Stand des erstellten Softwaredemonstrators.

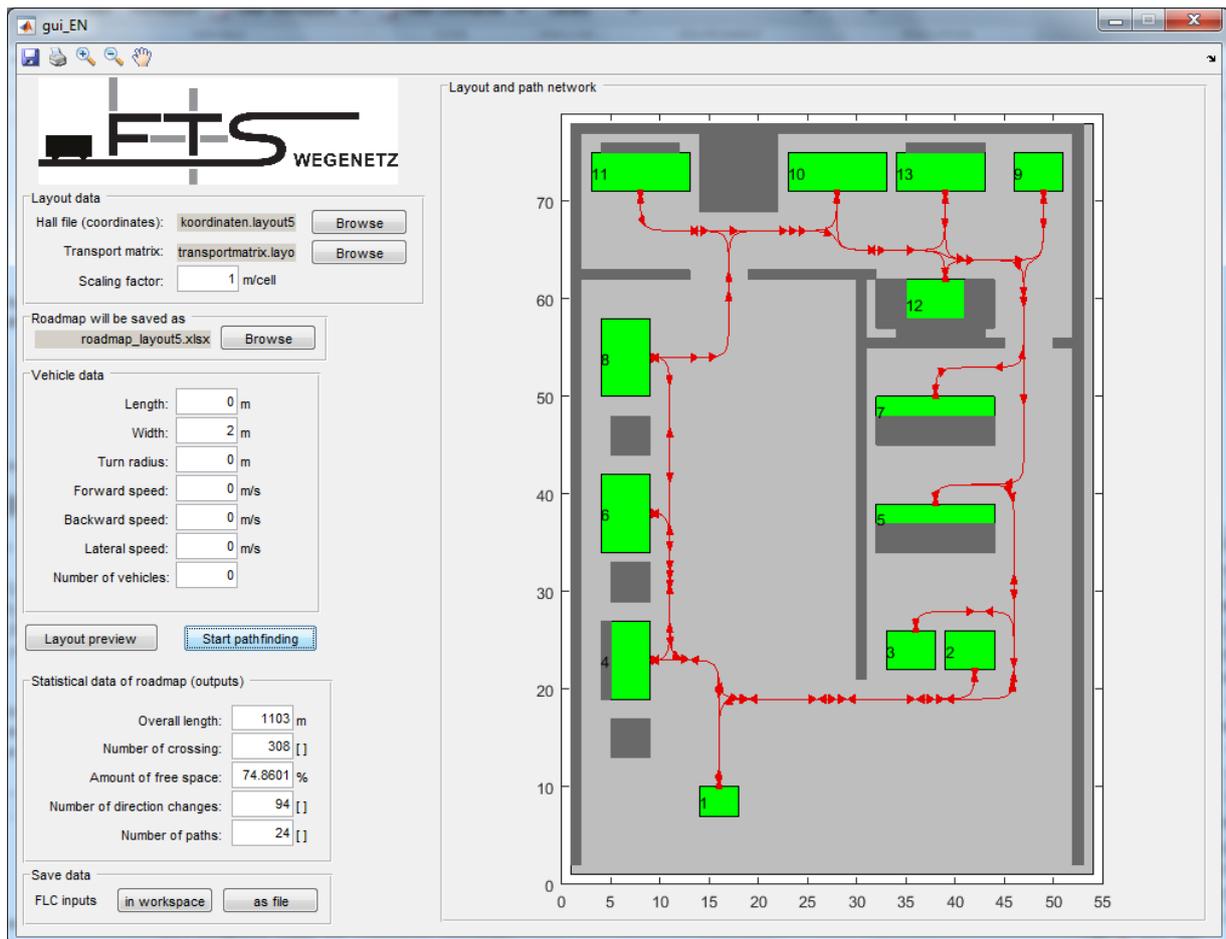


Abbildung 12: Oberfläche des finalen Softwaredemonstrators

In der oberen linken Ecke ist das eigens für das Projekt entworfene Logo zu sehen. Unterhalb kann der Benutzer angeben, wo das Hallenlayout und die Transportmatrix abgespeichert sind. Mit dem Skalierungsfaktor kann der Benutzer angeben, wie fein das Wegenetz generiert werden soll. Je feiner, desto länger ist die Berechnungsdauer. Anschließend kann der Benutzer angeben, wo das fertige Wegenetz gespeichert werden soll. Nachfolgend werden vom Benutzer die verschiedenen Parameter der FTF-Kinematik angegeben und die Anzahl der im System verwendeten FTF. Nachdem der Button „Start Pathfinding“ (Start der Wegenetzauslegung) betätigt wurde, erfolgt die eigentliche Berechnung des Wegenetzes im Hintergrund. Nachdem die Auslegung des Wegenetzes abgeschlossen ist, wird dieses auf der rechten Seite angezeigt und relevante Statistikdaten (z. B. die Gesamtlänge des Wegenetzes, die Anzahl der Kreuzungen, der Anteil der Freifläche) angegeben. Abschließend können diese Informationen und die verwendeten Fuzzy-Inputs exportiert werden.

AP5: Validierung

AP 5.1: Durchführung von Tests und Simulationen

Durchgeführte Arbeiten:

In diesem AP wurde das entwickelte Expertensystem getestet. Die Evaluierung erfolgte durch das Aufstellen von Simulationsmodellen in der Software FlexSim, die speziell für die Simulation von FTF ausgelegt ist. Abschließend wurden die erstellten Wegenetze noch mit den Systemexperten diskutiert und bewertet.

Erzielte Ergebnisse:

Zunächst wurden für drei Referenzszenarien FlexSim-Modelle aufgestellt. Aus dem FlexSim-Modell konnten Informationen über die Zustände der FTF abgeleitet werden. Die nachfolgende Abbildung 13 zeigt eine der zahlreichen Auswertungen.

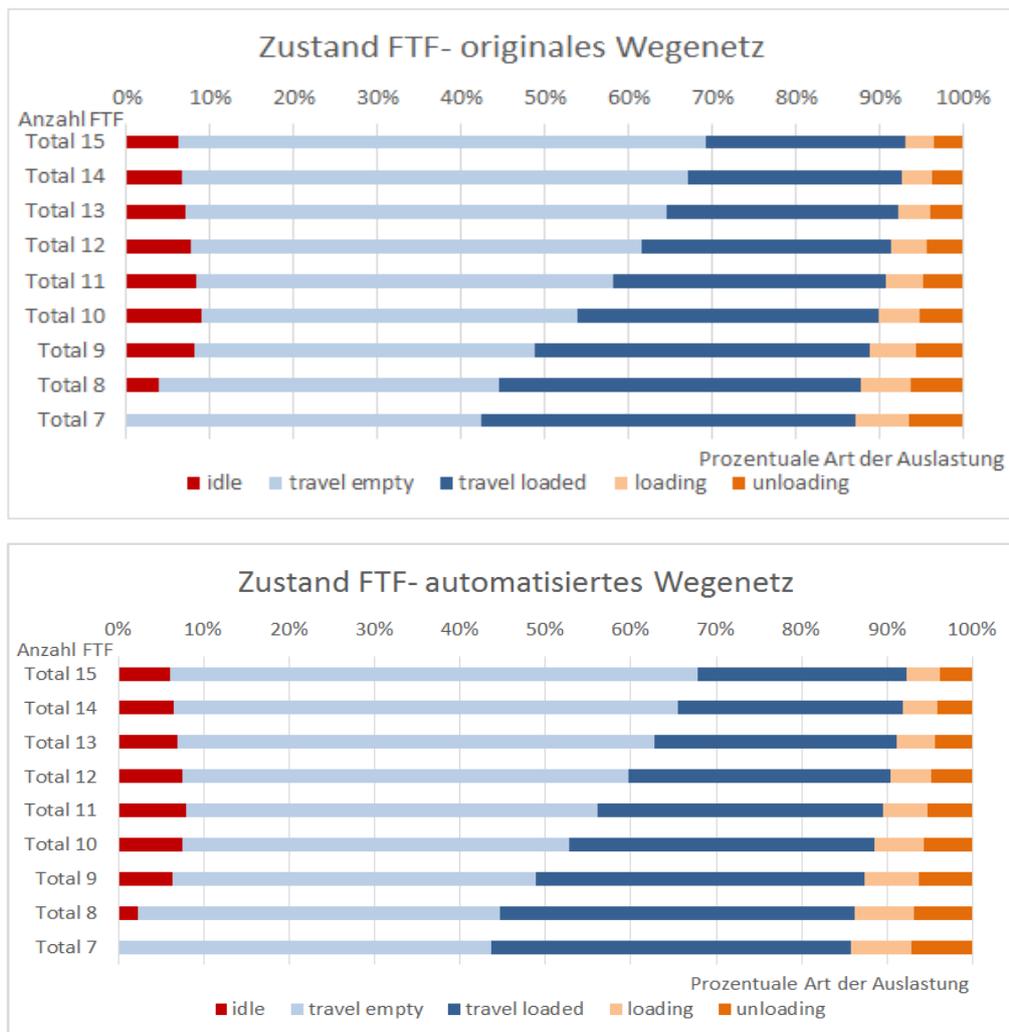


Abbildung 13: Mittels FlexSim ermittelte Zustände der FTF

Beide Diagramme zeigen, wie die Auslastung der FTF verteilt ist. Auf der Y-Achse ist die Anzahl, der im System befindlichen FTF zu sehen. Auf der X-Achse ist dargestellt, in welchen Zuständen das FTF sich befindet, z. B. „idle“, also wartend oder „travel loaded“, also beladen. Zu sehen ist, dass die Wartezeit („idle time“) bei dem automatisierten Wegenetz in allen Fällen etwas geringer ist und die Anzahl der beladenen Fahrten („travel loaded“) höher ist. Deutlicher wird dieser Vorteil noch durch die folgenden beiden Diagramme in Abbildung 14.



Abbildung 14: Simulierter Output in FlexSim

Im Diagramm ist auf der Y-Achse der Gesamtoutput der FTF über einen ganzen Tag in Stück pro Schicht zu sehen. Auf der X-Achse ist die Anzahl der verwendeten FTF zu sehen. Zu erkennen ist, dass der Output bei jeder der verwendeten FTF-Anzahlen im automatisierten Fall deutlich höher liegt.

AP 5.2: Optimierung der Verfahren

Durchgeführte Arbeiten:

In diesem AP wurden die Ergebnisse der Validierung analysiert und weitere Verbesserungspotenziale aufgedeckt. Diese flossen in die Verbesserung und Justierung von einzelnen Fuzzy-Regeln sowie in die Erweiterung des Software-Demonstrators ein.

Erzielte Ergebnisse:

Die Validierung im vorangegangenen AP 5.1 gab Aufschluss über etwaige Verbesserungspotenziale. Die Experten betrachteten erneut die Zugehörigkeitsfunktionen der einzelnen Variablen und justierten diese neu. Das Hauptaugenmerk lag auf der Erweiterung des Regelwerks. Zusätzlich wurde im Rahmen der Erweiterung eine Funktion zur Markierung von Risikobereichen umgesetzt. Abbildung 15 zeigt die implementierte GUI.



Abbildung 15: Oberfläche zur Markierung von Risikobereichen

Der Benutzer sieht auf der linken Seite das eingegebene Layout und kann in diesem sowohl Bereiche mit hohem Risiko (z. B. viel Personenverkehr) oder mittlerem Risiko (z. B. die Zwischenlagerung von Paletten) angeben. Diese Bereiche werden dann an den mod A* und die Fuzzy-Logik übermittelt und in der WegenetzAuslegung berücksichtigt.

Kritische Diskussion

Die automatisierten Wegenetze zeigten in den Simulationen, dass sie mindestens genauso effizient sind, wie manuell erstellte Wegenetze. In vielen Fällen wiesen sie sogar kürzere Transportzeiten und geringere Wartezeiten der Stationen auf. Dennoch lässt sich nicht ausschließen, dass die Wegenetze trotz mathematischer Effizienz von erfahrenen Systemplanern manuell nachbearbeitet werden müssen, um besondere Kundenwünsche zu erfüllen, die so im Regelwerk nicht berücksichtigt wurden.

Ein weiteres Verbesserungspotenzial des entwickelten Software-Demonstrators liegt in der Berücksichtigung einer größeren Anzahl von möglichen Fahrzeugtypen. Aufgrund des unterschiedlichen Fahrverhaltens von z. B. Unterfahr-FTF, Routenzügen

oder Drei-Rad-Kinematiken, konnten nicht alle Fahrzeugtypen berücksichtigt werden. Vor allem die anspruchsvolle Bahnplanung von Routenzügen mit ausschwenkendem Heck bedeutet eine detailreichere Wegplanung. Dies würde aber auch einen erhöhten Rechenaufwand erzeugen.

Außerdem sollte darauf geachtet werden, das Regelwerk in periodischen Abständen anzupassen, damit neue gesetzliche Vorschriften oder die Weiterentwicklung von FTF in den Regeln berücksichtigt werden.

Die automatisierte Auslegung von Wegnetzen für FTF bedeutet für die Systemplaner eine Reduktion der Auslegungsdauer von mehreren Tagen auf wenige Minuten. Auch wenn die Rechenzeit des Expertensystems ausreichend ist, könnte eine weitere Reduktion der Rechenzeit durch eine Programmierung des Software-Demonstrators in einer anderen Sprache als MatLab erreicht werden. Dafür würde sich z. B. C++ eignen. MatLab wurde in diesem Projekt gewählt, da es eine vorgefertigte Fuzzy Logic Toolbox bereitstellt, die die einfache Einbindung und Erstellung von Regeln, Fuzzifizierungs- und Defuzzifizierungsmethoden erlaubt.

5. Innovativer Beitrag und wirtschaftlicher Nutzen

Voraussichtliche Nutzung der angestrebten Forschungsergebnisse

Die Ergebnisse des Projektes wurden in MatLab implementiert und stehen als Softwaretool den beteiligten Projektpartnern zur Verfügung. Die entwickelte Benutzeroberfläche ist auch bedienbar ohne ein vertieftes Verständnis für die entwickelten Algorithmen. Der Benutzer kann in dieser Oberfläche die relevanten Daten zur Planung des Fahrerlosen Transportsystems eingeben. Neben wichtigen Fahrzeugdaten (Größe, Geschwindigkeit etc.) lädt der Benutzer zudem die Hallenumgebung und die Transportaufträge hoch. Anschließend kann der Benutzer die Wegsuche starten. Da die Ergebnisse des Projekts keinen BlackBox-Ansatz darstellen sollten, kann der Benutzer zusätzlich die Regeln anders gewichten oder Regeln verändern.

Der Softwaredemonstrator wird bei den Projektpartnern schon für eine erste Planung der Wegenetze verwendet.

Mit den Ergebnissen des Projektes können FTS-Hersteller und -planer automatisiert mit wenig Aufwand mehrere Varianten des Wegenetzes auslegen und simulativ erproben. Dadurch können objektiv nachvollziehbare Entscheidungen getroffen werden, sodass die Planungsqualität erhöht wird. Im Gegenzug können die FTS-Anwender auch ohne hochqualifizierte Mitarbeiter Änderungen oder Erweiterungen des Wegenetzes in der Betriebsphase schnell erproben. Hinzu kommt, dass das neue Expertensystem bereits in der Planungsphase eines Hallenlayouts von einem

potentiellen FTS-Anwender eingesetzt werden kann. Der Anwender erhält dadurch in diesem Planungsstadium eine Aussage über die Eignung seines Hallenlayouts für eine zukünftige FTS-Einführung.

Möglicher Beitrag zur Steigerung der Leistungs- und Wettbewerbsfähigkeit von KMU

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 neue Methoden zur verbesserten FTS-Planung entwickelt werden. Das entwickelte Expertensystem kann dazu beitragen, die Planung maßgeblich zu vereinfachen und damit die Planungsphase kürzer und zuverlässiger zu gestalten. Die Auslegungsdauer konnte bei komplexen Anlagen von mehreren Wochen auf mehrere Minuten reduziert werden. Die automatisierte Planung erfordert zudem weniger Personal und bietet ein hohes Maß an Effizienz. Dies resultiert in Zukunft in geringeren Personalkosten und Installationsinvestitionen. Die Forschungsergebnisse tragen somit zur Verbesserung und zur Steigerung der Wettbewerbsfähigkeit der KMU bei.

6. Verwendung der Zuwendung

Das Projekt wurde am IPH – Institut für Integrierte Produktion Hannover gemeinnützige GmbH vom 01.05.2016 bis zum 31.07.2016 von einem wissenschaftlichen Mitarbeiter mit fundierten Kenntnissen im Bereich der Produktionsautomatisierung bearbeitet. Der wissenschaftliche Mitarbeiter ist während der Projektlaufzeit durch eine studentische Hilfskraft unterstützt worden. Bei der Simulation der automatisierten und manuellen Wegenetze ist der wissenschaftliche Mitarbeiter von einem Techniker mit umfangreicher Simulationserfahrung unterstützt worden.

7. 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 Forschungsstelle und den Unternehmen des projektbegleitenden Ausschusses sowie weiteren interessierten Unternehmen hat bereits ein erster Wissenstransfer stattgefunden. Dieser ist die Basis für die praktische Umsetzbarkeit der Ergebnisse. Die Mitglieder des PA sind in der untenstehenden Tabelle 2 aufgeführt:

Tabelle 2: Mitglieder des Projektbegleitenden Ausschusses

Unternehmen	KMU	Ansprechpartner	Telefonnummer
EK Automation GmbH	X	Herr Karsten Bohlmann	+49 7121 514-290
Götting KG	X	Herr Dr.-Ing. Sebastian Behling	+49 5136 8096-17
Still GmbH	X	Herr Tino Krüger	+49 40-7339 - 1488
MLR Soft GmbH	X	Herr Lutz Meier	+49 7141 9748-138
VW AG		Herr Matthias Spath	+49 5361 9- 122774
WFT GmbH & Co. KG	X	Herr Robert Rupprecht	+49 9661 8778-29
Nuyts GmbH	X	Herr Kurt Krause	+49 8458 - 3904-0

Die bereits durchgeführten und noch geplanten Transfermaßnahmen sind dem Plan zum Ergebnistransfer in die Wirtschaft in Tabelle 3 und Tabelle 4 zu entnehmen.

Tabelle 3: Durchgeführte Transfermaßnahmen

Maßnahme	Rahmen	Zeitraum
Treffen des Projektbegleitenden Ausschusses	1. Projekttreffen: Vorstellung des Projekts	25.06.2014
	2. Projekttreffen: Vorstellung der ersten Ergebnisse	06.05.2015
	3. Projekttreffen: Vorstellung aktueller Wegenetze und erster Simulationsergebnisse	14.01.2016
	Abschlusstreffen: Vorstellung der Endergebnisse	26.07.2016
Veröffentlichung, Information der	Internet-Homepage http://fts-wegenetz.de/	Laufend

interessierten Öffentlichkeit	Uttendorf, S.; Eilert, B.; Ullmann, G.: „Automatisierte Auslegung des Wegenetzes für FTS – Künstliche Intelligenz mit menschlicher Logik“. In: Hebezeuge Fördermittel, HUSS-MEDIEN GmbH, 54. Jg. (2014), H. 7 8, S. 442-444.	08/2014
	Pressemitteilung: „Künstliche Intelligenz mit menschlicher Logik“	28.05.2014
	Uttendorf, S.; Ullmann, G.; Overmeyer, L.: Automatisierte Auslegung von Wegenetzen für Fahrerlose Transportsysteme – Ein fuzzybasierter Ansatz zur optimalen Wegenetzplanung. In: Industrie Management, GITO Verlag, 1/2015, H. 31, S. 48-52.	01/2015
	Uttendorf, S.; Overmeyer, L.: Fuzzy-enhanced path-finding algorithm for AGV roadmaps. 16th World Congress of the International Fuzzy System Association (IFSA), 9th Conference of the European Society for Fuzzy Logic and Technology (EUSFLAT), 2015 Atlantis Press, ISBN: 978-94-62520-77-6, ISSN: 1951-6851.	07/2015
	Uttendorf, S.; Overmeyer, L.: Fuzzybasierte Auslegung von Wegenetzen für fahrerlose Transportsysteme. In: Proceedings 25. Workshop Computational Intelligence, Dortmund, 26.-27. November 2015. S. 105-119, KIT Scientific Publishing, ISBN: 978-3-7315-0432-0; DOI: 10.5445/KSP/1000049620.	11/2015
	Pressemitteilung: „Fahrerlose Transportfahrzeuge: Wissenschaftler prüfen Wegenetz-Effizienz“	03.12.2015
	Uttendorf, S.; Overmeyer, L.: Automatisierte Auslegung von Wegenetzen für Fahrerlose Transportsysteme (FTS-Wegenetz). In: Hebezeuge Fördermittel, Forschungskatalog Flurförderzeuge 2016, HUSS-MEDIEN GmbH, 56. Jg. (2016), H. 6, S. 14.	06/2016
Weiterbildung	Betreuung eines Praktikums	09-10/2014

während der Projektlaufzeit	Betreuung einer Studienarbeit	12/2014- 02/2015
	Betreuung einer Masterarbeit	12/2015- 04/2016
	Betreuung einer Studienarbeit	12/2015- 04/2016
	Betreuung einer Bachelorarbeit	02/2016- 08/2016
Sonstiges	„Young Author Award“ beim 25. Workshop Computational Intelligence, Dortmund.	26.-27. November 2015

Tabelle 4: Geplante Transfermaßnahmen

Eingereichte Veröffentlichungen	Uttendorf, S.; Eilert, B.; Overmeyer, L.: Fuzzybased generation of roadmaps for AGVs. In: Automatisierungstechnik, at.	03/2017
	Uttendorf, S.; Overmeyer, L.: A fuzzy inference system for the automated generation of roadmaps for AGVs. In: IEEM2016- 2016 IEEE International Conference on Industrial Engineering and Engineering Management, 4.-7. Dezember 2016.	11/2016
Sonstiges	Nominierung für den Otto-von-Guericke Preis 2016 (IGF-Projekt des Jahres)	15.12.2016

8. Durchführende Forschungsstelle

Das IPH – Institut für Integrierte Produktion Hannover gGmbH ist eine gemeinnützige Forschungseinrichtung, die eng mit der Universität Hannover kooperiert. Die Gesellschafter des IPH, Prof. Behrens, Prof. Overmeyer und Prof. Nyhuis, sind gleichermaßen Inhaber produktionstechnischer Lehrstühle an der Universität Hannover. Die

Gliederung des IPH in die drei Abteilungen „Prozesstechnik“, „Produktionsautomatisierung“ und „Logistik“ spiegelt die Ausrichtung dieser Lehrstühle wider.

Das IPH ist hauptsächlich in der anwendungsorientierten Forschung und Entwicklung aktiv und wurde 1988 mit Unterstützung des niedersächsischen Wirtschaftsministeriums gegründet. Das IPH ist besonders der technologischen Förderung mittelständischer Industriebetriebe verpflichtet. Der Technologietransfer aus der Forschung in die Industrie erfolgt dabei hauptsächlich über gemeinsam mit der Industrie durchgeführte, öffentlich geförderte Verbundforschungsprojekte sowie über Fortbildungsseminare und Arbeitskreise für spezielle Zielgruppen aus Industrie und Handel. Darüber hinaus stellt das IPH laufend in einer Vielzahl ausschließlich industriefinanzierter Beratungsprojekte seine Praxisorientierung und Wettbewerbsfähigkeit unter Beweis.

Leiter der Forschungsstelle

IPH – Institut für Integrierte Produktion Hannover gGmbH

Prof. Dr.-Ing. Ludger Overmeyer

Geschäftsführender Gesellschafter des IPH – Institut für Integrierte Produktion Hannover gemeinnützige GmbH, Hollerithallee 6, 30419 Hannover, Tel.: 0511/27976-119

Dr.-Ing. Malte Stonis

Koordinierender Geschäftsführer des IPH – Institut für Integrierte Produktion Hannover gemeinnützige GmbH, Hollerithallee 6, 30419 Hannover, Tel.: 0511/27976-119

Projektleiter

M. Sc. Sarah Uttendorf

Wissenschaftliche Mitarbeiterin der Abteilung Produktionsautomatisierung des IPH

9. Förderhinweis

Das IGF-Vorhaben 18007 N/1 der Bundesvereinigung Logistik (BVL) e.V. wurde über die AiF im Rahmen des Programms zur Förderung der Industriellen Gemeinschaftsforschung (IGF) vom Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi) aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages gefördert.

Für die Förderung sei an dieser Stelle gedankt.