

# Schlussbericht vom 31.05.2022

---

zu IGF-Vorhaben Nr. 20516 BR

## Thema

Schwarmverhalten autonomer Transportsysteme - SVAT

## Berichtszeitraum

01.02.2019 - 31.05.2022

## Forschungsvereinigung

Forschungsgemeinschaft Intralogistik/Fördertechnik und Logistiksysteme e.V.

## Forschungseinrichtung(en)

TU Dresden - Professur für Technische Logistik (FE 1)

TU Dresden - Professur für Arbeitswissenschaften (FE 2)

Gefördert durch:

## **Beschreibung der Problemstellung**

Typische Einsatzszenarien für Fahrerlose Transportsysteme (FTS) in der Intralogistik sind der Transport in Containerterminals, Lager- bzw. Umschlagszentren sowie in Produktionen. Gegenüber Stetigförderern bieten FTS dabei eine deutlich höhere Flexibilität bei gleichzeitigem Verzicht auf Fahrzeugführer (vgl. Fragapane u. a. 2021). Bei FTS werden in Ergänzung zu bereits häufig eingesetzten spurgebundenen Fahrzeugsystemen (englisch: automated guided vehicles – AGV) in letzter Zeit auch zunehmend die Vorzüge des Einsatzes einer Flotte freinavigierender, autonomer Transportfahrzeuge (englisch: autonomous mobile robots - AMR) diskutiert. Dabei bedeutet freinavigierend, nicht nur das Fehlen einer physischen Spur (häufig „Roadmap“ genannt), sondern auch keine feste Vorgabe virtueller Pfade. AMR sind dabei prinzipiell in der Lage, jederzeit autonom ihren Fahrweg zu berechnen bzw. zu ändern.

Somit sind AMR ganz grundsätzlich in der Lage, auf direkten/kürzesten Wegen zu fahren und Hindernisse durch Verlassen der geplanten Route gezielt zu umfahren. So weisen beispielsweise Xin u. a. (2015) und Duinkerken u. a. (2006) eine höhere Transportleistung freinavigierender Fahrzeuge im Vergleich zu spurgebundenen Fahrzeugen auf einer rasterartigen Roadmap nach. Dagegen sind Transportsysteme basierend auf autonomen, freinavigierenden Fahrzeugen in der Praxis jedoch nur selten bzw. nur pilothaft in Anwendung, insb. der Einsatz einer „Vielzahl“ autonomer Fahrzeuge, also einer größeren Fahrzeugflotte, findet in der Realität kaum statt. Dies steht im Widerspruch zu den umrissenen Vorzügen und lässt sich trotz eines sprunghaften Anstieges der Zahl von Anbietern oft mit dem Fehlen passender Steuerungsansätze für das Flottenmanagement erklären. Der hohe Freiheitsgrad freinavigierender Fahrzeuge führt direkt zu einer höheren Komplexität der Steuerung (vgl. Antakly u. a. 2017). Überspitzt formuliert ist der konstruktiv/technische Entwicklungsstand der Fahrzeuge der Entwicklung der Systemsteuerung voraus.

Im Bereich der mobilen Robotik werden freinavigierende Fahrzeuge bereits seit Jahrzehnten entwickelt und eingesetzt. Der Hauptunterschied zwischen den Bereichen der mobilen Robotik und FTS in der Intralogistik ist, neben der typischen Flottengröße, insbesondere das zugrundeliegende Paradigma hinsichtlich Zielerfüllung. Während Roboter in der Regel als autonome Einheiten mit egoistischen Zielen begriffen werden, die sich gegenseitig als dynamische Hindernisse wahrnehmen, wird bei FTS der Fokus auf Kooperation, gemeinsame Zielerreichung bzw. auf die übergeordnete Performanz des gesamten Transportsystems gelegt.

Insbesondere im Bereich der mobilen Robotik verläuft die Streckenwahl bzw. Kollisionsvermeidung autonomer Transportfahrzeuge bisher häufig reaktiv – zu Lasten des Flussgrades bzw. Durchsatzes des gesamten Schwarmes. Zur Verdeutlichung sind typische Szenarien in Abbildung 1 dargestellt.

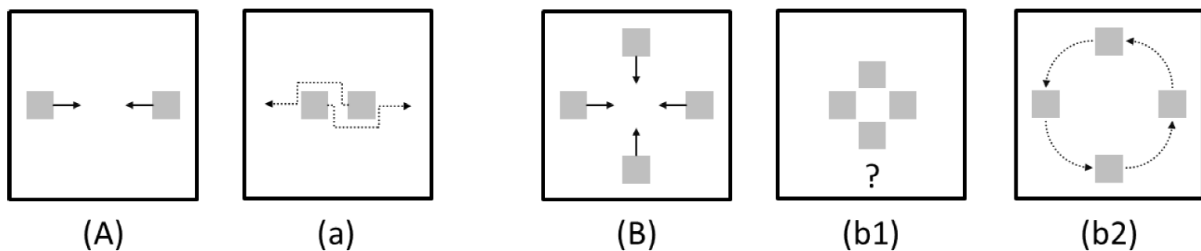


Abbildung 1: Minimalbeispiel zur reaktiven Streckenwahl autonomer Fahrzeuge (Rechtecke: Fahrzeuge; Pfeile: Fahrstrecke bzw. -richtung)

Skizziert in Abbildung 1 sind autonom agierende Fahrzeuge mit der Aufgabe, jeweils die Position des gegenüberliegenden Fahrzeuges auf kürzestem Wege zu erreichen. In (A) treffen sich beide Fahrzeuge in der Mitte des Raumes, handeln die Ausweichstrategie aus und vermeiden die Kollision zum letztmöglichen Zeitpunkt durch Wahl der skizzierten Fahrwege in (a). Die Ausgangssituation in (B) führt bei gleichen Annahmen zum Zustand (b1). Nach Maßgabe einer dezentralen Steuerung müsste jedes Fahrzeug mit jedem verhandeln, was im schlimmsten Fall zum Deadlock führt. Gäbe es eine zentrale Steuerungsebene, die, wie in (b2) dargestellt, bspw. im Vorhinein ein priorisiertes Fahren auf virtuellen Strecken entgegen dem Uhrzeigersinn vorsieht, wäre kein Ausweichen notwendig.

Die Motivation des Forschungsprojekts bestand darin, zu überprüfen, ob bzw. wann es vorteilhaft ist, den Freiheitsgrad autonomer, freinavigierender Fahrzeuge bei der Streckenwahl mittels vordefinierter Regeln einzuschränken, um insgesamt eine höhere Leistung des gesamten Transportsystems zu erhalten. Dabei musste der Freiheitsgrad eines einzelnen Fahrzeugs zwangsläufig beschnitten werden, jedoch unter der Maßgabe der Vermeidung, dass die Fahrzeuge sich analog zu AGV nur noch auf fest vorgegebenen Spuren bewegen. Inwieweit dabei beispielsweise die Nachteile längerer Fahrstrecken die Vorteile geringerer Kollisionen aufwiegen, war Gegenstand der Forschung. Konkret wurden im Forschungsprojekt mögliche Ansätze zur Entwicklung eines vordefinierten Regelwerks in Abhängigkeit von Layout und Flottengröße entwickelt und untersucht.

Die folgende einfache Analogie soll die Forschungsaufgabe weiter verdeutlichen: Im Straßenverkehr sind sich alle Akteure einig, dass ein Agieren entsprechend eines zentralen Regelwerks (der Straßenverkehrsordnung) einem rein autonomen Agieren vorzuziehen ist – der Nutzen des Einzelnen (bspw. der kürzeste Weg, eine schnelle Ankunft) wird der Nutzenmaximierung des Schwarms untergeordnet. So zeigt beispielsweise Sheffi (1984) auf, dass das Nutzergleichgewicht (englisch: „user equilibrium“ - UE), also das Ergebnis von egoistischen Strategien aller Fahrzeuge, eine schlechtere Lösung als das Systemoptimum darstellt, bei dem einzelne Fahrzeuge bewusst einen Nachteil in Kauf nehmen.

Unter der Prämisse eines hohen Flussgrades sichert ein zentrales Regelwerk proaktiv eine geringe Anzahl von Kollisionen unter autonom agierenden Fahrzeugen und erreicht somit eine Verlagerung des Ergebnisses vom Nutzergleichgewicht hin zum Systemoptimum. Hier setzte das Forschungsvorhaben mit der Frage an, ob sich für eine Flotte autonomer, freinavigierender Fahrzeuge (sowie abhängig vom zugrundeliegenden Layout) statische, vordefinierte Regeln oder Verhaltensweisen finden lassen, welche die gesamte Performanz der Transportsystems erhöhen.

## **Kurzfassung der Ergebnisse und Gegenüberstellung der durchgeführten Arbeiten und der Ergebnisse mit den Zielen**

Wie bereits in der Beschreibung der Problemstellung deutlich wurde, verfolgte das Projekt insbesondere das Ziel der Entwicklung zentraler Regeln zur präventiven Konfliktvermeidung bei einer Flotte spurungebundener, autonomer Transportfahrzeuge in der Intralogistik. Diese Regeln sollten entweder möglichst generisch sein oder leicht an unterschiedliche Bedingungen, wie beispielsweise verschiedene Layouts, angepasst werden können.

Hierzu wurde im Projekt zuerst eine Literatur- bzw. Praxisrecherche zu typischen Ansätzen der Konfliktvermeidung, dem Routing bzw. der globalen und lokalen Routenplanung freinavigierender Transportfahrzeuge in der Intralogistik durchgeführt. Zusätzlich wurden ggf. passende Ansätze in verwandten (Wissenschafts-)Gebieten wie beispielsweise der „mobilen Robotik“ evaluiert. Basierend auf den erkannten Stärken und Schwächen etablierter Ansätze, wurden eigene Konzepte entwickelt, die bestenfalls mit etablierten Ansätzen kombiniert werden können.

Insgesamt wurden im Projekt drei grundsätzliche Ansätze entwickelt:

- Das sog. Lane-Konzept, bei dem a priori Vorzugskorridore für ein konkretes Layout erstellt werden und das versucht, sowohl Konfliktwahrscheinlichkeit als auch Fahrdistanz zu minimieren.
- Die Beachtung dynamischer Hindernissen (anderen Fahrzeugen) bei der globalen Routenplanung in ROS.
- Die Auswahl einer konkreten globalen Route aus einem Pool alternativer Routen mittels Verfahren des Maschinellen Lernens.

Eigens entwickelte Experimentierumgebungen ermöglichten eine Evaluierung der Konzepte anhand von Simulationen und Feldexperimenten. Dabei erwies sich in Vorstudien insbesondere das Lane-Konzept als vorteilhaft und leicht anpassbar an unterschiedlichste Bedingungen wie z. B. die Flottengröße oder das Transportaufkommen. Deshalb wurde der Fokus des Projekts sowie vorliegenden Abschlussberichts auf dieses Konzept gelegt.

Im Zuge eines ausführlichen Praxisteils wurden konkrete Hypothesen aufgestellt, ein Design of Experiments und Datenmodell entwickelt und ausführliche Studien durchgeführt, um das Lane-Konzept unter verschiedenen Bedingungen zu evaluieren. Mit Hilfe des Konzepts kann zwar kein universell gültiges Regelwerk abgeleitet werden. Allerdings ermöglicht das Konzept die einfache Erstellung von Verhaltensregeln, die an praktische Variablen, wie Layout, Flottengröße und Transportfluss angepasst werden können. Das Projekt liefert somit ein Vorgehensmodell, mit dessen Hilfe die Performanz einer Flotte freinavigierender Transportsysteme in der Intralogistik gesteigert werden kann. Dabei ist die angewandte Methode kombinierbar mit jedem weiteren Ansatz zur Routenfindung und verbessert entweder die Performanz einer Flotte freinavigierender Fahrzeuge oder verringert die Rechenzeit zum Finden einer geeigneten Lösung.

## **Durchgeführte Arbeiten im Berichtszeitraum**

Im Hauptteil dieses Schlussberichts wird der Inhalt des Forschungsprojekts „SVAT“ ausführlich dargestellt. Dabei werden die durchgeführten Arbeiten sowie Ergebnisse und Erkenntnisse anhand der einzelnen Arbeitspakete (AP) bzw. Arbeitsteilpakete (ATP) des Projekts ausführlich erläutert.

### **AP 1 Identifikation und Entwicklung von Fahr- und Ausweichstrategien**

Das grundsätzliche Ziel dieses Arbeitspakets war einerseits, eine Übersicht zu vorhandenen Fahr- bzw. Ausweichstrategien aus verschiedenen wissenschaftlichen Bereichen zu erstellen und andererseits darauf aufbauend, potenzielle Ansätze, die auf die Problemstellung angewandt werden können, zu entwickeln. Hierzu wurde in ATP 1.1 eine umfangreiche Literaturrecherche durchgeführt. In ATP 1.2. wurden Bestandsaufnahmen bei Unternehmen der Praxis bzw. des PA unternommen. In ATP 1.3. wurden gefundene Ansätze/Algorithmen auf die beschriebene Problemstellung adaptiert bzw. neue Algorithmen entwickelt. In ATP 1.4 wurde eine Recherche zu gängigen KI-Bibliotheken durchgeführt und in ATP 1.5. wurden konkrete KI-Ansätze auf die skizzierte Problemstellung angewandt.

Die folgenden Kapitel vertiefen die Inhalte und Ergebnisse der einzelnen Arbeitsteilpakete.

#### **ATP 1.1: Literaturrecherche zu Ansätzen des Pedestrian-Flows, der Schwarmalgorithmik und künstlichen Intelligenz und deren Selektierung nach grundsätzlicher Anwendbarkeit**

Ziel dieses Arbeitspakets war das Identifizieren geeigneter Ansätze, um den Grad der Autonomie bei AMR ex ante zu beschränken bzw. geeignete Ansätze zur Selbstorganisation zu identifizieren. Hierzu wurde eine umfangreiche Literaturrecherche mit Fokus auf die Bereiche „Routenplanung“, „Schwarmverhalten“ und „Flottenmanagement“ freinavigierender Fahrzeuge durchgeführt. Neben Algorithmen aus den Bereichen Fahrerloser Transportsysteme in der Intralogistik und der mobilen Robotik allgemein, wurde auch nach geeigneten Ansätzen aus den Bereichen Pedestrian-Flow, Schwarmalgorithmik, Straßenverkehr und künstlicher Intelligenz recherchiert, die auf die Problemstellung übertragen werden können. Dabei wurden Online-Datenbanken, Webseiten und Suchmaschinen, wie beispielsweise „Web of Science“, „science direct“, „IEEE“, „google scholar“, „dblp“, etc. durchsucht. Zusätzlich wurden die Präsenzbestände und das Onlineangebot der Sächsischen Landes- und Universitätsbibliothek (SLUB) genutzt.

Im Summe konnte ein umfassendes Bild zum Stand der Technik erarbeitet werden. Es wurde eine Vielzahl unterschiedlicher Ansätze identifiziert, die jedoch größtenteils nicht ohne Weiteres auf die konkrete Problemstellung übertragbar waren. In den folgenden Absätzen werden die wichtigsten Erkenntnisse zusammenfassend dargestellt.

Ansätze zur Streckenwahl freinavigierender, autonomer Fahrzeuge basieren in der Regel auf einer Zweiteilung (vgl. z. B. De Ryck u. a. 2020, Tang u. a. 2018, Zhang und Liu-Henke 2020, Gasparetto u. a. 2015, Pandey u. a. 2017, Čáp u. a. 2016). Wie auch in den genannten Quellen nachzuvollziehen, herrscht Uneinigkeit über die Benennung der Teilaspekte. Um Verwirrungen zu vermeiden, werden sie im Folgenden als globale Routenplanung (englisch: global route planning) sowie lokale Routenplanung (englisch: local route planning) bezeichnet.

### **Globale Routenplanung**

Die globale Routenplanung bezeichnet dabei den Prozess der Wahl einer Strecke zu einem gegebenen Ziel vor Fahrtantritt. In den meisten Ansätzen wird eine Planung basierend auf statischen Informationen über die Umgebung durchgeführt, also basierend auf der aktuellen Fahrzeugposition, dem gewünschten Ziel und statischen Hindernissen im Layout. Viele Ansätze der globalen Routenplanung fußen dabei auf der Erstellung eines temporären Graphen, der das verfügbare Layout abbildet/erfasst und auf dem anschließend der kürzeste Weg zum Ziel berechnet werden kann. Im Folgenden werden beispielhaft einige Ansätze zur globalen Routenplanung beschrieben.

- „Rapidly Exploring Random Trees“ bauen sich ausgehend eines Startpunkts sukzessive auf und tasten so das gesamte verfügbare Layout ab (siehe Abbildung 2 links). Dabei gibt es auch Ansätze, bei denen zwei „Bäume“ (einer vom Start- und einer vom Zielpunkt) gleichzeitig das Layout erkunden (siehe Abbildung 2 rechts, vgl. z. B. LaValle 1998, Naderi u. a. 2015).
- Bei Ansätzen der „Cell Decomposition“ wird ein vorgegebenes Layout in kleinere Zellen, z. B. Dreiecke unterteilt und anschließend benachbarte Zellen miteinander verbunden. So entsteht ein zusammenhängender Graph, der das gesamte Layout erfasst (siehe Abbildung 3, vgl. z. B. LaValle 2006, Abbadi und Přenosil 2015)
- Mit dem Ziel, die zugängliche Fläche mit einem möglichst dichten Graphennetz zu erfassen, erstellen „Probabilistic Roadmaps“ zufällige Punkte im Raum. Benachbarte Punkte werden miteinander verbunden, woraus sich die Probabilistic Roadmap ergibt (vgl. z. B. Kavraki u. a. 1996, Sudhakara u. a. 2017).
- Die Methode des „State Lattice“ erstellt im Vorfeld ein gleichmäßiges Raster an Punkten und verbindet diese in einem sich wiederholenden Muster so, dass die entstehenden Pfade von Fahrzeugen problemlos nachgefahren werden können. Es findet also bereits in dieser Phase eine Beachtung der Fahrzeuggeometrien bzw. konkreter Bewegungen statt (siehe Abbildung 4, vgl. z. B. Pivtoraiko u. a. 2009, Krnjak u. a. 2015).
- Beispiele für weitere Ansätze sind Voronoi-Diagrams (vgl. z. B. Al Dahhan und Schmidt 2020) und Visibility Graphs (vgl. z. B. Janet u. a.1995).

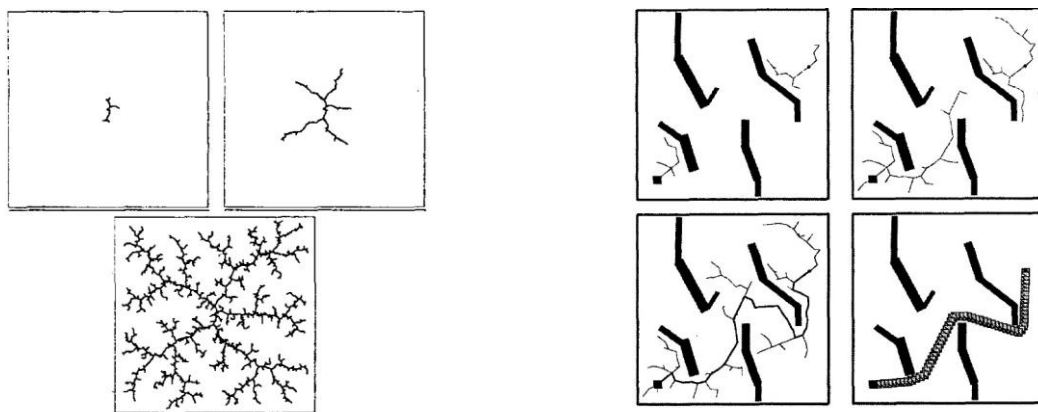


Abbildung 2: Beispiele für „Rapidly Exploring Random Trees“ nach Kuffner und LaValle (2000)

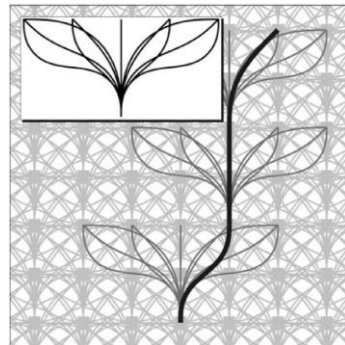
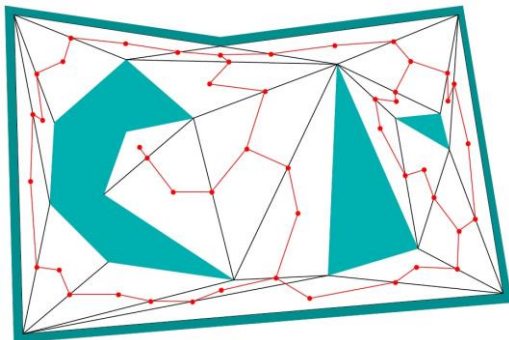


Abbildung 3: „Cell Decomposition“ nach LaValle (2006)    Abbildung 4: „State Lattice“ nach Pivtoraiko u.a.(2009)

Basierend auf den erstellten Graphen, die mehr oder weniger dicht das gesamte Layout abbilden, wird anschließend mit Hilfe von „Path Search Algorithmen“ ein konkreter Pfad zum Ziel generiert (vgl. z. B. Dijkstra 1959, Floyd 1962, Warshall 1962, Hart u. a. 1968). Als Zielkriterium dient dabei in der Regel eine Minimierung der Weglänge. Folglich ist das Ergebnis der globalen Routenplanung eine Route zum Ziel, die oft sehr nahe am physisch kürzesten Weg liegt. Zusätzlich müssen dynamische Hindernisse (insbesondere andere Fahrzeuge) Beachtung finden. Hierfür werden Verfahren der lokalen Routenplanung angewandt – nachfolgend werden die wichtigsten beschrieben.

### **Lokale Routenplanung**

Die lokale Routenplanung bezeichnet das Abfahren der geplanten globalen Route unter Beachtung dynamischer Hindernisse, wie z. B. anderer Fahrzeuge im Layout.

Ein typischer Ansatz zur lokalen Routenplanung ist beispielsweise die Potenzialfeldmethode, die auf dem Prinzip des Zusammenwirkens bzw. Überlagerns unterschiedlicher Kräfte beruht. So übt das Ziel bzw. der nächste zu erreichende Wegpunkt eine anziehende Wirkung auf ein Fahrzeug aus. Statische sowie dynamische Hindernisse wirken abstoßend. Eine Überlagerung der anziehenden und abstoßenden Einzelkräfte ergibt dynamisch die aktuelle Fahrtrichtung für ein freinavigierendes Fahrzeug. Beispielhaft sei auf Tang u. a. (2018) und Orozco-Rosas u. a. (2019) verwiesen.

Eine ähnliche Idee verfolgt das sog. „social-force-model“ nach Helbing und Molnár (1995), das Bewegungen von Fußgängern als eine Überlagerung von Kräften darstellt. Dieses Konzept wurde von Bähr u. a. (2013) auf das Gebiet der Fahrerlosen Transportsysteme übertragen.

Im Gegensatz zum bereits beschriebenen, rein lokalen Ausweichen, gibt es auch Ansätze mit größerem Planungshorizont. Bei „Path Coordination“ werden auf den global definierten Pfaden lediglich die Geschwindigkeiten der Fahrzeuge angepasst (vgl. LaValle 2006, Parker 2009) und somit Konflikte vermieden. Bei „Prioritized Planning“ müssen niedrigpriorisierte Fahrzeuge (oder Aufträge) ihre Routen an höherpriorisierte Fahrzeuge anpassen. Es wird somit sequentiell geplant (vgl. Parker 2009, Demasure u. a. 2016).

Um Konflikte schnell lösen zu können bzw. gar nicht erst entstehen zu lassen, sind auch statische, vordefinierte Konzepte aus dem Bereich des Straßenverkehrs übertragbar, wie z. B. Einbahnstraßen, Kreisverkehre, Rechtsverkehr. Auch Konzepte mit einzelnen Bereichen eines Layouts, in denen Geschwindigkeitsrestriktionen herrschen sind bereits im Einsatz. Beispielsweise definiert Scholz (2019) sogenannte „high-ways“.

Auch aus dem Bereich des Maschinellen Lernens, insbesondere aus dem Teilgebiet des „Reinforcement Learnings“, konnten Ansätze zur lokalen Routenplanung identifiziert werden. Beim Reinforcement Learning lernt ein Agent anhand einer komplexen Umgebung via „trial and error“. Im Konkreten werden nach jeder durchgeführten Entscheidung die Auswirkungen auf die Umgebung untersucht, bewertet und dem Agenten mitgeteilt. Der Agent wird für vorteilhaftes Verhalten belohnt und für nicht vorteilhaftes Verhalten bestraft. Theoretisch sollte sich somit im Laufe der Zeit vorteilhaftes Verhalten durchsetzen. Beispiele in denen ein vorteilhaftes „Verhalten“ einzelner Fahrzeuge mittels Reinforcement Learnings erreicht werden soll, finden sich in Kamoshida und Kazama (2017), Min u. a. (1999) sowie Hoshino und Uchida (2017).

### ***Erkenntnisse für das Forschungsprojekt***

Die Idee des Forschungsprojekts bestand in der Reduzierung der Komplexität des Routings durch ein a priori definiertes Regelwerk. In Hinblick auf die übliche Zweiteilung des Routings in globale und lokale Routenplanung, wurde insbesondere die globale Routenplanung als möglicher Ansatzpunkt für ein statisches Regelwerk identifiziert.

Anstelle autonom agierender Fahrzeuge, die standardmäßig den kürzest möglichen Weg auswählen und lokal ausweichen bzw. nach Fahrtantritt bei möglichen Konflikten bilateral verhandeln, sollten statische Regeln vorteilhafte, globale Routen vorgeben. Die Routen sind dann zwar bezogen auf die zurückgelegte Distanz und das einzelne Fahrzeug in den meisten Fällen nicht mehr ideal, es wird also das „User Equilibrium“ verlassen. Wenn jedoch die Regeln richtig erstellt werden und wenn alle ansonsten autonomen Fahrzeuge diese Regeln beachten, wird die Wahrscheinlichkeit für Routingkonflikte und somit auch die tatsächliche Anzahl dieser verringert.

Im Transportsystem findet somit eine Verschiebung vom Nutzergleichgewicht hin zum Systemoptimum statt. Bei einem optimal erstellten Regelwerk werden die längeren Fahrstrecken durch die geringere Anzahl an Konflikten – und somit weniger zeitaufwändige Ausweichvorgänge – gerechtfertigt. Das erstellte Regelwerk soll dabei folgende Kriterien erfüllen:

- Es soll weitestgehend im Vorfeld (a priori) erstellt werden können. Dadurch fallen – zumindest bezogen auf das Regelwerk – während des Produktivbetriebs keine zusätzlichen intensiven Rechenzeiten mehr an
- Es soll an eine bestimmte Anzahl Fahrzeuge angepasst werden können.
- Es soll an ein bestimmtes Layout angepasst/maßgeschneidert werden können.
- Es soll nicht in Konflikt stehen mit anderen, etablierten Ansätzen zur lokalen Routenplanung. Im Idealfall können die vordefinierten Regeln kombiniert mit anderen Ansätzen angewandt werden können.

Da das Regelwerk nur die Wahrscheinlichkeit der Konflikte a priori verringern kann (ein tatsächliches Verringern wäre nur durch zentrale Abstimmung bzw. dezentrales Verhandeln im Live-Betrieb möglich), ist eine nachgelagerte lokale Routenplanung immer noch nötig. Diese dient nach wie vor dazu, die geplante globale Route abzufahren und auf unvorhergesehene Hindernisse zu reagieren.

Bei einem dezentralen Routing folgen somit Fahrzeuge individuell den definierten Regeln und die Systemperformanz wird gesteigert. Aber auch in Kombination mit zentralen Ansätzen, die bereits vor Fahrtantritt die Routen aller Fahrzeuge aufeinander abstimmen und einen



konfliktfreien Plan errechnen, können vordefinierte Regeln helfen: Sie reduzieren die Freiheitsgrade und somit die Komplexität und können somit dabei helfen, die Rechenzeit zu reduzieren und schneller zu einer zulässigen Routenplanung zu gelangen.

## **ATP 1.2: Bestandsaufnahme und Analyse der Unternehmen des PA zu aktuellen Steuerungsansätzen für Fahrzeugschwärme und deren Defizite**

Im Laufe des Projekts wurde in mehreren persönlichen und virtuellen Treffen des projektbegleitenden Ausschusses die aktuelle Situation bei unterschiedlichen Unternehmen diskutiert. Ergänzend dazu wurden auch mehrere Telefonate mit Experten einzelner Unternehmen geführt. Somit konnte ein umfangreiches Bild der Praxissituation erarbeitet werden und inhaltlich ins Projekt eingehen.

Die im Antrag beschriebenen Probleme der häufig auftretenden Behinderungen bei einem Schwarm autonomer, freinavigierender Fahrzeuge, konnte bestätigt werden. Es wurde außerdem deutlich, dass aktuelle Ansätze aus der Forschung zum Routing und zur Konfliktvermeidung bei den meisten Unternehmen noch keinen Einzug gefunden haben. Bevorzugt werden im Augenblick noch verhältnismäßig einfache, aber bereits gut bekannte und einfach nachvollziehbare Ansätze zum Routing bzw. zur Konfliktvermeidung verwendet. Diese Ansätze kommen häufig aus dem Bereich spurgebundener Fahrzeuge. Grundsätzlich lässt sich festhalten, dass die technischen Möglichkeiten oft weiter sind als die Strategien zur Organisation der Fahrzeugflotten.

Zusätzlich wurde offensichtlich, dass in der Realität oft sehr spezifische Anforderungen die Anwendung neu entwickelter Algorithmen zum Routing erschweren. Beispielsweise sind Unternehmen in der Halbleiterindustrie mit teilweise sehr strikten, räumlichen Restriktionen und aus Sicht des Routings sehr unvorteilhaften Layouts konfrontiert, wie z. B. Engstellen, sehr lange Sackgassen sowie einige wenige Verbindungsgänge mit folglich hohem Verkehrsaufkommen. Dies führt dazu, dass die auftretenden Konflikte bei spurungebundene Fahrzeugen häufig eine sehr große Auswirkung auf die Performanz der gesamten Flotte haben. Vordefinierte Regeln zur Konfliktvermeidung sind insbesondere in solchen Layouts von großer Bedeutung.

Des Weiteren wurde diskutiert, wie und ob für die Praxis zwar relevante Herausforderungen (wie beispielsweise der Brandschutz, unvorhergesehene Hindernisse im Routing oder ein Routing in Bereichen, wo sich auch Menschen aufhalten), die aber die eigentliche Problemstellung des Forschungsprojekts nur am Rande tangieren, trotzdem im Projekt Beachtung finden sollten. Eine wichtige Erkenntnis für den weiteren Projektverlauf war die grobe Definition von zu analysierenden Szenarien (z. B. für die spätere Simulationsstudie). In diesem Zusammenhang war es beispielsweise der Wunsch mehrerer Mitglieder des projektbegleitenden Ausschusses, den Fokus des Projekts auf die konkrete Methodik zur Erstellung der a priori-Regeln zu legen, anstatt im übermäßigen Maße einzelne (wenn auch ggf. große) Fallbeispiele zu analysieren und zu diskutieren.

Auch die Definition konkreter Performanzindikatoren, also nach welchen Kriterien sich vordefinierte Regeln oder ein dynamisches Transportsystem bewerten lassen, wurde ausführlich diskutiert. Die Ergebnisse und Erkenntnisse der Bestandsaufnahme bei

Unternehmen des projektbegleitenden Ausschusses finden sich inhaltlich insbesondere im Entwurf eigener Ansätze (ATP 1.3) wieder.

### **ATP 1.3: Adaption der Ansätze auf die Problemstellung und ggf.**

#### **Entwicklung neuartiger Steuerungsansätze**

Basierend auf den Erkenntnissen aus ATP 1.1 und ATP 1.2, wurden im Zuge dieses Arbeitsteilpakets zwei Konzepte entwickelt, die a priori die Anzahl der Konflikte für autonome, freinavigierende Transportfahrzeuge in der Intralogistik reduzieren sollen: das sog. Lane-Konzept sowie eine auf ROS (Robot Operating System) basierte Integration dynamischer Hindernisse in die globale Pfadplanung. Beide Konzepte werden im Folgenden vorgestellt.

#### ***Lane-Konzept (vgl. Reith u. a. 2021b)***

Das Lane-Konzept kann als eine Weiterentwicklung der Idee der Verkehrsregeln bzw. als eine Analogie zu vordefinierten Roadmaps für freinavigierende Fahrzeuge verstanden werden. Allerdings wird der Freiheitsgrad freinavigierender Fahrzeuge nicht so sehr einschränkt, wie bei einer tatsächlichen Spurführung. Eine Lane wurde definiert als eine gerichtete, flächige Verbindung („Schlauch“/ „Korridor“) zwischen einem fest definierten Startpunkt und einem fest definierten Zielpunkt, wobei die Breite einer Lane typischerweise der Breite eines Fahrzeugs inkl. Sicherheitsabstand entspricht. Der Verlauf einer Lane ist durch eine Sequenz an Wegpunkten gekennzeichnet. Eine Menge von (ggf. aufeinander abgestimmter) Lanes wird im Folgenden als Lane-Map bezeichnet – in Analogie zum Begriff der Roadmap für spurgebundene Fahrzeuge. Eine vorteilhafte Lane-Map wird a priori berechnet (Idee der vordefinierten Regeln).

Ein Fahrzeug, das eine bestimmte Strecke (definiert durch konkrete Start- und Zielpunkte) zu fahren hat, wählt in der Phase der globalen Routenplanung die entsprechend vordefinierte Lane als grundsätzlich zu fahrende Route aus – anstatt einer Wahl des kürzesten Weges berechnet z. B. nach RRT (siehe ATP 1.1).

Zwei Minimalbeispiele für Lane-Maps in unterschiedlichen Layouts können Abbildung 5 entnommen werden. Da sich aufeinander abgestimmte Lanes weiterhin flächig überschneiden, sind Routing-Konflikte zwischen mehreren Fahrzeugen durch das schlichte Folgen der Lanes nicht ausgeschlossen. Entstehende Konflikte müssen dann weiterhin durch eine beliebige, nachgelagerte Strategie der lokalen Routenplanung identifiziert und aufgelöst werden, wie z. B. durch eine Potenzialfeldmethode. Entscheidend ist jedoch, dass der Verlauf der Lane initial eine Lösung für die globale Routenplanung darstellt, welche ohne weitere Abstimmung oder Vorausplanung bereits die Wahrscheinlichkeit von Routing-Konflikten zwischen Fahrzeugen reduziert. Dies wurde u. a. durch die Experimente in AP 3 bestätigt.

Durch eine a priori-Definition und somit Abstimmung des Verlaufs aller Lanes im System, sollen insbesondere die Längen und Überschneidungen von Lanes (und somit die Fahrzeiten und Wahrscheinlichkeiten von Konflikten) minimiert werden. Eine Verteilung aller Lanes auf die insgesamt zur Verfügung stehende Fläche geschieht implizit und reduziert die Fahrzeugdichte

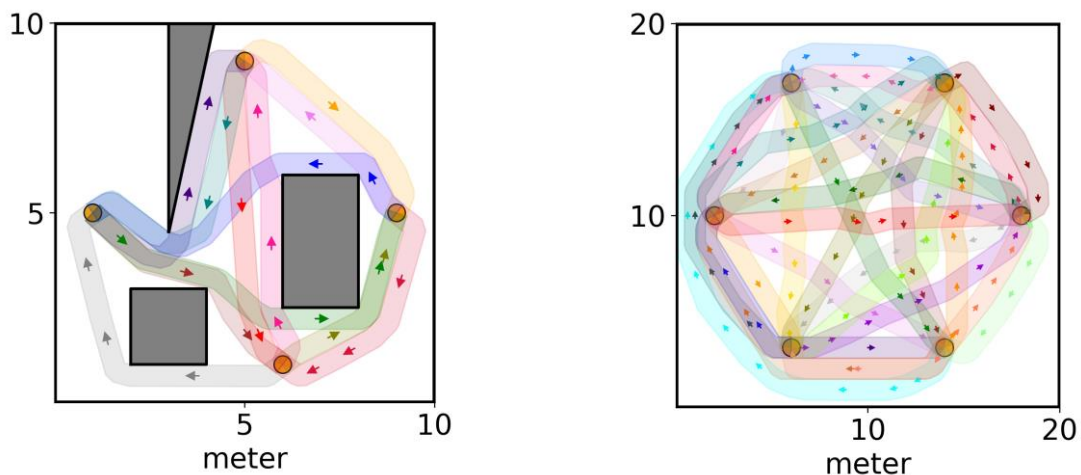


Abbildung 5: Zwei Minimalbeispiele für Lane-Maps (bunt) zwischen mehreren Start- und Zielpunkten (orange Punkte) in einem Layout mit statischen Hindernisse (links) und in einer freien Fläche (rechts).

an kritischen Punkten und somit die Wahrscheinlichkeit für Konflikte im Betrieb. Lanes verbinden dabei die Vorteile geordneter Bewegungsrichtungen aller Fahrzeuge (wie ebenfalls z. B. durch eine statische Roadmap) mit dem Freiheitsgrad der Fahrzeuge, die gesamte Fläche zu befahren und lokal zu reagieren.

Das Erstellen der statischen Lane-Map a priori führt zu konkreten Vorteilen für den Live-Betrieb. Einerseits fallen für die globale Routenplanung keine aufwändigen Rechenzeiten an. Es wird lediglich die entsprechende Lane mit ihren Wegpunkten ausgewählt. Der Großteil der Rechenzeit zur Erstellung einer Lane findet zu einem weniger kritischen Zeitpunkt statt. Zusätzlich kann das Lane-Konzept für die globale Routenplanung mit jedem weiteren Algorithmus zur lokalen Routenplanung kombiniert werden. Eine Lane kann dabei als vernünftige Startlösung gesehen werden, die bereits Konflikte stark reduziert. Basierend darauf können beliebige weitere (etablierte) Algorithmen aufsetzen.

Zusammengefasst führt eine optimierte Lane-Map dazu, dass alle Fahrzeuge standardmäßig erstmal eine globale Route zum Ziel wählen, die nicht so weit vom kürzesten Weg entfernt ist und trotzdem eine geringe Konfliktwahrscheinlichkeit aufweist – ohne konkrete Positionen, Ziele und Routen anderer Fahrzeuge zu kennen. Das Fahren entlang einer Lane führt für ein Fahrzeug erstmal zu einem Umweg im Vergleich zum kürzesten Weg. Mit der Perspektive auf die gesamte Flotte ergibt sich jedoch eine vorteilhafte Lösung im Sinne eines organisierten Verhaltens aller Fahrzeuge. Es werden individuelle Nachteile einzelner Fahrzeuge gezielt in Kauf genommen, um insgesamt näher ans Gesamtoptimum zu kommen.

Im Folgenden werden erst unterschiedliche Kennzahlen zur Bewertung einer Lane-Map vorgestellt und anschließend zwei Methoden (mathematische Optimierung und Heuristik) zur Erstellung einer Lane-Map für ein beliebiges Layout. Der Nachweis über Vor- und Nachteile von Lane-Maps findet im Zuge der Experimente von AP 3 statt.

### **Bewertung einer Lane-Map**

Um eine vorteilhafte Lane-Map erstellen zu können, ist es eine zentrale Voraussetzung eine konkrete Lane-Map bewertbar und somit verschiedene Lane-Maps vergleichbar zu machen. Hierfür werden im Folgenden zwei unterschiedliche Arten von Indikatoren definiert: statische und dynamische Performanzindikatoren. Statische Indikatoren lassen sich schnell anhand der statischen Lane-Map errechnen und geben eine erste grobe Einschätzung. Diese sind

insbesondere bei der Erstellung der Lane-Map entscheidend. Dynamische Indikatoren leiten sich bei Anwendung der Lane-Map (Realbetrieb, Simulation) von der Performanz des dynamischen Transportsystems ab. Die Berechnung der dynamischen Indikatoren ist damit deutlich aufwändiger, sie haben jedoch auch eine deutlich höhere Aussagekraft. Eine starke Korrelation zwischen statischen und dynamischen Indikatoren wurde ebenfalls im Zuge der Experimente in AP 3 nachgewiesen.

### Statische Performanzindikatoren

Wie bereits beschrieben, wird eine Lane-Map a priori erstellt, wobei insbesondere zwei statische Kriterien zu optimieren sind:

- Die Minimierung der Länge aller Lanes im System (und damit insgesamt kurze Fahrstrecken).
- Die Minimierung der flächigen Überschneidungen/Überlagerungen aller Lanes (und damit insgesamt geringe Wahrscheinlichkeit von Konflikten, vgl. AP 3). Dabei ist es insbesondere entscheidend, dass bei der Bewertung flächiger Überschneidungen zwischen zwei Lanes auch die Richtung der sich überschneidenden Lanes beachtet wird. Die Überschneidung zweier gleich (oder ähnlich) gerichteter Lanes wiegt dabei deutlich weniger schwer, als die Überschneidung zweier entgegengesetzt gerichteter Lanes (siehe Abbildung 6). Da die Richtung der Lanes mit einbezogen wird, wird in diesem Zusammenhang immer der Begriff der „gewichteten Überlagerung“ bzw. „gewichteten Überschneidung“ verwendet.

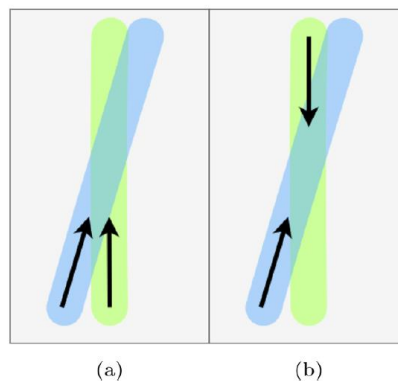


Abbildung 6: Überschneidung zweier Lanes unter (a) einem spitzen Winkel und (b) einem stumpfen Winkel nach Reith u. a. (2021b)

Beide Ziele stehen normalerweise im Konflikt zueinander: Es ist nicht möglich, eine Lane-Map mit minimalen Wegen bei minimaler Überschneidung aller Lanes zu erstellen. Deshalb ist es entscheidend, wie die beiden Kriterien in Relation zueinander gewichtet werden. Dadurch wird beispielsweise bestimmt, wie viel längere Wegstrecke für die Vermeidung einer gewissen Überlagerung bei der Erstellung einer Lane-Map in Kauf genommen wird. Dabei wird die Relation zwischen den beiden Gewichten im Folgenden durch den Parameter R definiert:

$$R = \frac{\text{Gewichtung Laenge}}{\text{Gewichtung flaechige Ueberlagerung}}$$

Ein niedriges R führt zu einer Lane-Map mit eher längeren Wegen, bei starker Minimierung von Überschneidungen der einzelnen Lanes, während ein hoher Wert von R eher zu kurzen Lanes mit vielen Überlagerungen führt. Das konkret beste Verhältnis beider Kriterien zueinander ist abhängig von Layout sowie insbesondere der Fahrzeuganzahl und wurde im Rahmen von AP 3 näher untersucht. Beide statischen Indikatoren (Länge und gewichtete Überlagerung) gehen gewichtet nach R in den sog. (statischen) Gesamtwert einer Lane-Map ein.

## **Dynamische Performanzindikatoren**

Folgende dynamische Performanzindikatoren wurden im Zusammenhang mit Lanes definiert und für die Experimente in AP 3 herangezogen:

- Anzahl abgeschlossener Fahrten: Die Anzahl der insgesamt abgeschlossenen Fahrten errechnet sich aus der Summe der durchgeführten Fahrten zwischen einem Start- und einem Zielpunkt über alle Fahrzeuge in einem bestimmten Zeitraum. Da die Fahrzeugflotte homogen ist, ist eine weitere Unterscheidung der Transporte nach einzelnen Fahrzeugen nicht von Nutzen.
- Stauindex (englisch: Congestion Index): Der Stauindex ist ein Maß, wie sehr sich die verschiedenen Fahrzeuge gegenseitig blockieren bzw. welcher Zeitanteil auf Staus zurückzuführen ist. Dieser errechnet sich aus dem Quotienten der durchschnittlichen Transportzeit auf einer konkreten Verbindung und der minimal möglichen Transportzeit auf dieser Verbindung. Die minimal mögliche Transportzeit ergibt sich in Experimenten mit nur einem Fahrzeug. (vgl. Kim u. a. 1993)
- Distanzindex (englisch: Distance Index): In Analogie zum Stauindex, wird beim Distanzindex der Anteil an Zeit berechnet, der auf das Zurücklegen der Distanz zum Ziel zurückzuführen ist. Dabei wird die durchschnittliche Transportzeit auf einer Verbindung ins Verhältnis zur minimalmöglichen Transportzeit auf der Verbindung gesetzt.
- Verzögerungsindex (englisch: Total Delay Index): Der Verzögerungsindex ist die Addition aus Distanzindex und Stauindex und gibt Auskunft über zusätzlich benötigte Zeit im Vergleich zum theoretischen Minimum. Dazu wird die durchschnittliche Fahrzeit auf einer Verbindung (Lane) ins Verhältnis gesetzt zur Fahrzeit bei Verwendung der Luftlinie.

## **Methode 1 zur Erstellung einer Lane-Map: mathematische Optimierung**

Im Folgenden wird ein mathematisches Modell beschrieben, das zur Erstellung einer Lane-Map für ein beliebiges Layout verwendet werden kann:

### **Mengen**

P Menge aller diskreten Punkte im Layout.

LP Menge aller Loadpoints (=Quellen/Senken) im Layout, wobei  $LP \ll P$  gilt.

### **Koeffizienten**

$c_{ij}$  Länge zwischen den beiden Punkten  $i \in P$  und  $j \in P$ . Wenn eine direkte Verbindung nicht möglich ist:  $c_{ij} = \infty$ .

$w_{ijuv}$  gewichtete Überlagerung zweier Lane Segmente (von  $i \in P$  nach  $j \in P$  und von  $u \in P$  nach  $v \in P$ )

$\lambda_\mu, \lambda_\theta$  Faktoren, um die Zielkriterien relativ zueinander zu gewichten.

### **Entscheidungsvariable**

$x_{ijsd} \in \{0,1\}$  Zeigt an, ob die Lane von  $s \in LP$  nach  $d \in LP$  ein Teilstück von Wegpunkt  $i \in P$  nach  $j \in P$  besitzt.

## Nebenbedingungen

$$(1) \sum_{j \in P} x_{sjsd} = 1 \quad \forall s \in LP, \forall d \in LP \text{ with } s \neq d$$

$$(2) \sum_{i \in P} x_{idsd} = 1 \quad \forall s \in LP, \forall d \in LP \text{ with } s \neq d$$

$$(3) x_{iisd} = 0 \quad \forall i \in P, \forall s \in LP, \forall d \in LP$$

$$(4) x_{disd} = 0 \quad \forall i \in P, \forall s \in LP, \forall d \in LP$$

$$(5) \sum_{i \in P} x_{ijsd} - \sum_{i \in P} x_{jisd} = 0 \quad \forall s \in LP, \forall d \in LP, \forall j \in P \text{ with } s \neq d, j \neq d$$

## Zielfunktion

$$(6) \lambda_{\mu} * \sum_{i \in P} \sum_{j \in P} \sum_{s \in LP} \sum_{d \in LP} c_{ij} * x_{ijsd} +$$

$$(7) + \lambda_{\theta} \sum_{p \in P} \sum_{q \in P} \sum_{r \in P} \sum_{t \in P} (w_{pqrt} * \sum_{s \in LP} \sum_{d \in LP} x_{pqsd} * \sum_{s \in LP} \sum_{d \in LP} x_{rtsd}) \rightarrow \min$$

Nebenbedingung (1) legt fest, dass jeder Loadpoint (= Quelle bzw. Senke) nur genau eine ausgehende Lane zu jedem anderen Loadpoint im Layout hat. Nebenbedingung (2) definiert, dass jeder Loadpoint entsprechend auch genau eine eingehende Lane von jedem anderen Loadpoint hat. Nebenbedingung (3) bestimmt, dass ein Teilstück einer Lane immer zwischen zwei unterschiedlichen Punkten im Layout verläuft. Nebenbedingung (4) legt fest, dass Lanes immer in ihrem jeweiligen Zielpunkt (Loadpoint) enden. Nebenbedingung (5) bestimmt, dass jeder einzelne Punkt im Layout exakt dieselbe Anzahl an eingehenden und ausgehenden Lanes aufweist.

Die zu minimierende Zielfunktion zur Erstellung einer optimalen Lane-Map besteht aus zwei Teilen: (6) der Summe der Länge aller Teilstücke aller Lanes sowie (7) der Summe der gewichteten Überlagerung von immer genau zwei Teilstücken. Beide Teile werden relativ zueinander gewichtet, wobei gilt:  $R = \frac{\lambda_{\mu}}{\lambda_{\theta}}$  (siehe statische Performanzindikatoren).

Das aufgestellte Modell wurde erfolgreich auf trivial kleine Problemstellungen angewandt. Bei größer werdenden (realistischen) Layouts offenbarten sich Einschränkungen, die im Folgenden kurz erläutert werden.

- Bei Betrachtung der Entscheidungsvariable  $x$ , kann die Größe des Lösungsraums auf  $2^{n_P^2 n_{LP}^2}$  geschätzt werden, wobei  $n_P$  die Anzahl der möglichen, diskreten Wegpunkte im System und  $n_{LP}$  die Anzahl der Loadpoints im System darstellen. Auch wenn die Mehrheit der Lösungen entweder unzulässig (verstößt gegen mindestens eine Nebenbedingung) oder nutzlos (z. B. unendlicher Zielfunktionswert, da Lanes über statische Hindernisse laufen) sind, ist dies schon ein erster Indikator für die Komplexität

des Problems und das Anwachsen der Problemgröße mit einer steigenden Anzahl diskreter Punkte im Layout.

- Ein weiterer, wichtiger Indikator ist die Anzahl der Parameter, die im Vorfeld einer Optimierung festgelegt werden müssen. Die Anzahl beträgt  $n_p^2$  für  $c$  sowie  $n_p^4$  für  $w$ .

Für ein besseres Verständnis werden im Folgenden die Anzahl der Lösungen sowie die benötigte Anzahl der Parameter für ein einfaches Beispielszenario bestimmt: Angenommen sei eine freie, quadratische Fläche von 10 Metern Kantenlänge mit vier Loadpoints sowie eine Grid-Größe von 50 cm (also insgesamt 441 diskrete Wegpunkte). Dieses minimale Layout führt bereits zu  $2^{3111696}$  unterschiedlichen Lösungen an Lane-Maps. Auch wenn ein Großteil der Lösungen verworfen werden kann, so ist der Rechenaufwand zur Erreichung einer vernünftigen Lösung hoch. Hinzu kommt die nur schwer bzw. praktisch nicht handhabbare Anzahl an Parametern, die im Vorfeld der Optimierung berechnet und gespeichert werden müssen:  $3,78 \cdot 10^{10}$ .

Zusammengefasst lässt sich bereits durch diese vereinfachten, theoretischen Betrachtungen feststellen, dass aufgrund der enorm großen Lösungs- und Parameteranzahl mit Hilfe des mathematischen Modells nur trivial kleine Problemstellungen optimal gelöst werden können. Im Kontext von Systemen realistischer Größe führte dies zur Erkenntnis der Notwendigkeit der Entwicklung alternativer Methoden zur Erstellung von Lane-Maps.

### **Methode 2 zur Erstellung einer Lane-Map: Heuristik basierend auf einer „Variable Neighborhood Search“**

Aufgrund der hohen Komplexität bei der Erstellung einer Lane-Map (siehe Methode 1), wurde für Methode 2 auf eine Kombination aus einzelnen problemspezifischen (Teil-)Heuristiken und einer übergeordneten Metaheuristik gesetzt. Die grundsätzliche Struktur der Problemstellung führt dazu, dass der Einsatz einer sog. trajectory-based Metaheuristik vorteilhaft ist. Diese sucht im Lösungsraum sowohl vertiefend lokal, als auch in unterschiedlichen Nachbarschaften nach der optimalen Lösung (vgl. Blum und Roli 2003).

Die grundlegende Idee der Heuristik beruht auf einer sog. „Variable Neighborhood Search“ (VNS, vgl. Mladenović und Hansen 1997, Hansen und Mladenović 2019), die den Lösungsraum aller möglichen Lane-Maps untersucht. Die VNS ist dabei eine Kombination aus

- der Suche innerhalb einer „Nachbarschaft“ im Lösungsraum – also dem Finden lokaler Optima durch kleinere Veränderungen und
- dem Wechseln der „Nachbarschaft“ im Lösungsraum, um ggf. ein besseres lokales oder im Idealfall das globale Optimum zu finden.

Übertragen auf das Lane-Konzept besteht die grobe Idee der Heuristik darin, sukzessive neue Lanes in eine bestehende Lane-Map einzufügen (Wechsel der Nachbarschaft) bzw. einzelne Lanes mit gänzlich anderem Verlauf zu betrachten. Anschließend kann die Lane-Map inkl. der neu eingefügten/ausgerichteten Lane aufeinander abgestimmt werden (Suche innerhalb einer Nachbarschaft).

Der Verlauf einer Lane ist dabei grundsätzlich durch eine Sequenz an Wegpunkten eindeutig beschrieben. Um die statischen Performanzindikatoren (Länge und Überlagerung) zu verbessern, können die Wegpunkte einer Lane verschoben werden, neue Wegpunkte eingefügt oder bestehende Wegpunkte entfernt werden. Die Heuristik nutzt dazu insgesamt fünf

problemspezifische (Teil-)Heuristiken, deren grundsätzliche Ideen und deren Abläufe in den folgenden Unterkapiteln jeweils kurz beschrieben und an Minimalbeispielen verdeutlicht werden.

### **Verschiebung von Wegpunkten (lokale Optimierung)**

Die grundsätzliche Idee der Teilheuristik „Verschiebung von Wegpunkten“ besteht darin, alle Lanes nacheinander zu überprüfen, ob eine Verschiebung von einzelnen oder mehreren Wegpunkten zu einer Verbesserung der Zielfunktion (Längen, gewichtete Überschneidungen) für die gesamte Lane-Map führt. Insgesamt werden Wegpunkte soweit verschoben, bis eine weitere Verschiebung zu keiner weiteren Verbesserung führt, also ein lokales Optimum erreicht ist.

Abbildung 7 zeigt das Verschieben von Wegpunkten einer Lane anhand eines Minimalbeispiels. Im linken Bild liegen zwei gegenläufige Lanes zwischen zwei Loadpoints exakt aufeinander. Rot eingezeichnet sind die jeweiligen Wegpunkte. Im rechten Bild wurden die bestehenden Wegpunkte der blauen Lane so verschoben, dass die Zielfunktion verbessert wurde. Während die Weglänge der blauen Lane zunimmt, wird insbesondere die flächige Überlagerung der beiden Lanes deutlich reduziert. Bei der Lösung dieses Minimalbeispiels handelt es sich offensichtlich noch nicht um das Optimum. Weitere Verbesserungen werden durch die folgenden Teilheuristiken erreicht.

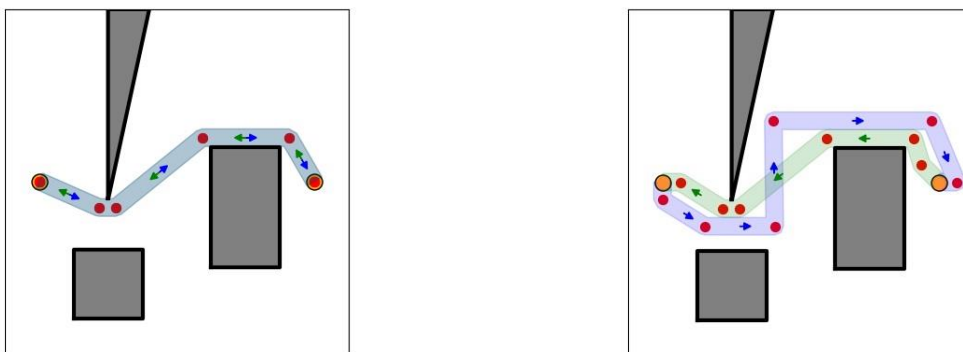


Abbildung 7: Beispiel für das einfache Verschieben von Wegpunkten (vgl. Reith u. a. 2021c)

### **Auflösen von Überlagerungen (lokale Optimierung)**

Die grundsätzliche Idee der Teilheuristik „Auflösung von Überlagerungen“ besteht darin, unnötige Überlagerungen von Lanes zu identifizieren und diese aufzulösen.

Abbildung 8 zeigt eine typische Vorgehensweise für das Auflösen von Überschneidungen zwischen zwei Lanes anhand eines Minimalbeispiels. In einem ersten Schritt werden flächige Überlagerungen zweier Lanes identifiziert. Anschließend werden die Teilstücke der sich überlagernden Lanes, die zwischen der Überschneidung und einem gemeinsamen Start- oder Zielpunkt liegen, vertauscht. In einem letzten Schritt kann die Überschneidung mit der bereits beschriebenen Teilheuristik „Verschiebung von Wegpunkten“ final aufgelöst werden. Das Ergebnis ist in Abbildung 8 im rechten Bild dargestellt. Die Lösung für dieses Minimalbeispiel liegt dabei nahe am Optimum aus minimaler Weglänge und Überlagerung.



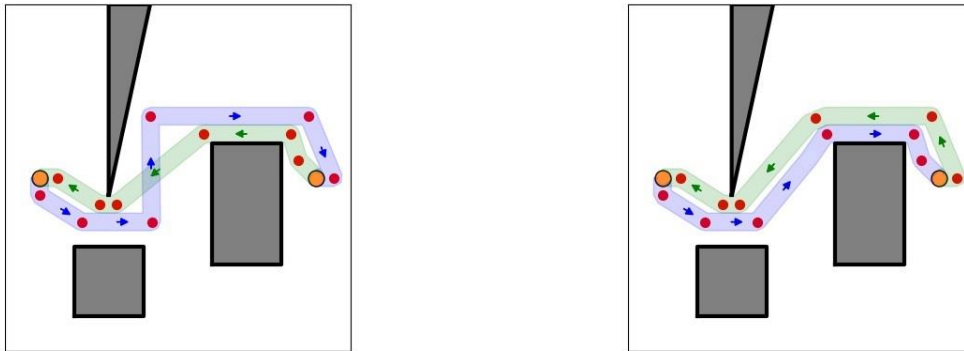


Abbildung 8: Beispiel für das Auflösen von Überschneidungen (vgl. Reith u. a. 2021c)

### **Einfügen neuer Wegpunkte bzw. Entfernen nutzloser Wegpunkte (lokale Optimierung)**

Das „Einfügen neuer Wegpunkte“ ermöglicht eine Feinabstimmung einzelner Lanes. Hierdurch kann der Verlauf einzelner Lanes besser an die Umgebung wie z. B. benachbarte Lanes oder statische Hindernisse angepasst werden. Abbildung 9 stellt dies in einem Minimalbeispiel dar. Durch zusätzliche Wegpunkte können im Lane-Verlauf Kurven (anstatt Ecken) erzeugt sowie die Distanz der Lanes weiter verringert werden.

Nicht beachtete Wegpunkte haben keinen Einfluss auf den Lane-Verlauf, liegen also genau auf einer Linie zwischen ihren benachbarten Wegpunkten. Die Entfernung solcher Wegpunkte bringt keine Verbesserung der Zielfunktion mit sich, verhindert allerdings ein unnötiges Wachsen der Problemkomplexität.

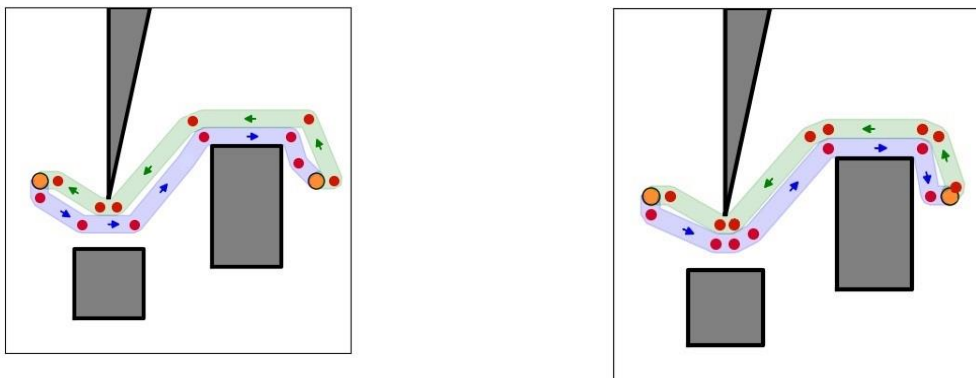


Abbildung 9: Beispiel für das Einfügen von neuen Wegpunkten (vgl. Reith u. a. 2021c)

### **Vertauschen von Lane-Richtungen (lokale Optimierung)**

Beim „Vertauschen von Lane-Richtungen“ wird die Vorteilhaftigkeit des Vertauschens zweier entgegengesetzt verlaufender Lanes (von Loadpoint A nach Loadpoint B und von B nach A) geprüft. Dabei wird eine Verbesserung des Zielfunktionswertes nicht durch eine Verringerung der Distanz erreicht, sondern durch die Reduzierung der Überlagerungen zweier Lanes.

### **Neukonstruktion von Lanes (Wechsel der Nachbarschaft)**

Bei der „Neukonstruktion von Lanes“ werden nicht nur die einzelnen Wegpunkte der Lanes in ihrer Nachbarschaft verschoben, sondern eine Lane aus der Lane-Map entfernt und mit neuem Verlauf eingefügt. Dadurch können lokale Minima im Lösungsraum verlassen werden, die mit den anderen Teilheuristiken nicht verlassen werden können. Der Effekt der Teilheuristik ist beispielhaft in Abbildung 10 dargestellt, wobei die grüne Lane entfernt und mit neuem Verlauf eingesetzt wurde. Obwohl die grüne Lane mit neuem Verlauf länger ist, konnte über die

gesamte Lane-Map gesehen eine Verbesserung der Zielfunktion erreicht werden, da es zu weniger Überschneidungen im Zentrum des Layouts kommt.

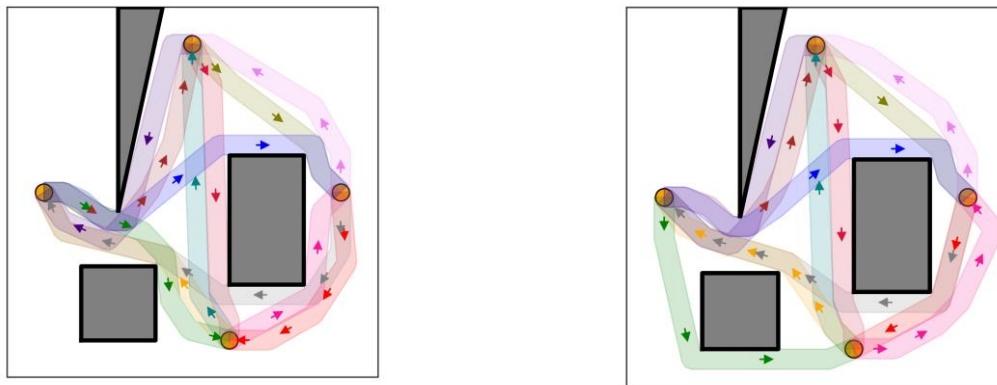


Abbildung 10: Beispiel für die Neukonstruktion einer Lane (vgl. Reith u. a. 2021c)

### **Integration dynamischer Hindernisse in die globale Pfadplanung in ROS**

Neben dem Lane-Konzept wurde in diesem ATP eine weitere Methode entwickelt, um die Konfliktwahrscheinlichkeit freinavigierender Transportfahrzeuge in der Intralogistik zu reduzieren. In Hinblick auf die Feldexperimente in AP 3 wurde diese Methode nahe am Marktstandard ROS (Robot Operating System) entwickelt.

Die Pfadplanung eines mobilen Roboters wird in ROS von zwei Ebenen der Umgebung beeinflusst: der lokalen und der globalen Karte. Eine typische Zweiteilung, die auch bei ähnlichen Ansätzen in der Literatur oft verwendet wird (vgl. ATP 1.1). Die globale Karte enthält alle statischen Hindernisse und befahrbare Flächen im bekannten Umfeld (generiert z. B. mittels SLAM), die lokale Karte wird durch die Informationen von aktiven Sensoren (z. B. LIDAR) erstellt. Dynamische Objekte, die im Erfassungsbereich der lokalen Karte auftreten, werden zwar von der Navigation als Hindernis erkannt, allerdings ist die Detektionsweite – abhängig vom Sensor – meist auf wenige Meter begrenzt.

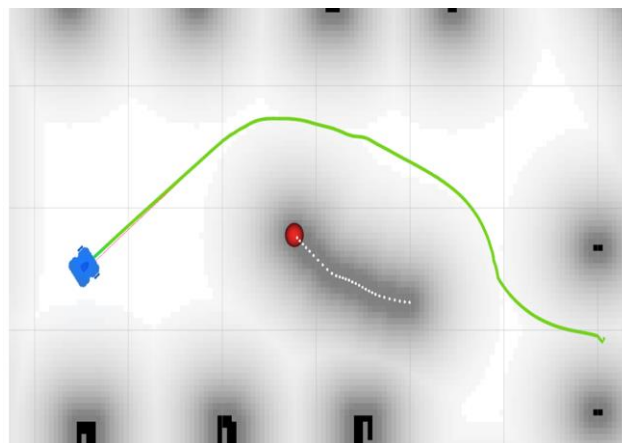


Abbildung 11: Zusammenspiel aus lokalem und globalem Routing. Schwarz: statische Hindernisse; Blau: Turtlebot; roter Kreis: dynamisches Hindernis mit geplanter Route; Graustufen: globale Karte; Grüne Linie: geplante globale Route; rote Linie: lokale Route

Ergebnis dieser Entwicklung ist ein ROS-Paket, welches die Position dynamischer Objekte auch in der globalen Karte darstellen und somit auch für die globale Pfadplanung und prospektive Kollisionsvermeidung nutzen kann, indem bspw. auch eine prognostizierte oder eine berechnete Pfadplanung dieser Objekte berücksichtigt werden. Die Funktionsweise dieses Ansatzes kann Abbildung 11 entnommen werden, wo die globale Karte (Graustufen) nicht nur

kreisförmig um die statischen Hindernisse (schwarz) angepasst wurde, sondern auch entlang der geplanten Routen des dynamischen Hindernisses. Die errechnete globale Route weicht der Route des anderen Fahrzeuges aus, wodurch ein Konflikt gar nicht erst entsteht.

Als dynamische Objekte kommen alle Objekte in Frage, deren Position in der Umgebung flexibel aber detektierbar ist, wie z. B. Menschen an kollaborativen Arbeitsplätzen, Transport/Lagerbehälter, genauso aber auch andere Fahrzeuge.

#### **ATP 1.4: Identifikation und Erprobung von KI-Programmbibliotheken**

Zur Wahl einer vorteilhaften Route in der Phase der globalen Pfadplanung, wurde im Bereich der „Künstlichen Intelligenz“ insbesondere die Methode des Reinforcement Learning (RL) als vielversprechend eingeschätzt. RL bildet eine Menge an Methoden im Bereich des maschinellen Lernens (ML) ab, die zur Verhaltensoptimierung eines sog. Agenten dienen.

Der grundlegende Ablauf von RL ist in Abbildung 12 dargestellt. Hierbei werden von dem Agenten eine Reihe an Entscheidungen, sog. „actions“ abgefragt. Die Entscheidungen basieren dabei in der Regel auf Informationen des Agenten über die den aktuellen Zustand der Umgebung („state“ bzw. „Environment“). Die „action“ des Agenten geht in die Umgebung ein und wird durch einen sog. „reward“ bewertet. Über dieses Feedback werden im Anschluss Optimierungen durchgeführt, um die Entscheidungsfindung hinsichtlich des zeitlich gewichteten rewards zu verbessern. Die Entscheidungen des Agenten werden hinsichtlich einer Wahrscheinlichkeitsfunktion erzeugt - der sog. „policy“. Die zugehörige „Policyfunktion“ ist abhängig vom aktuellen Zustand bzw. von Beobachtungen des Agenten sowie von Modellparametern der „Policyfunktion“ selbst. Während der Trainingsphase des RL-Algorithmus werden die Modellparameter angepasst, um das Verhalten des Agenten zu optimieren. (vgl. Sutton und Barto 2018)

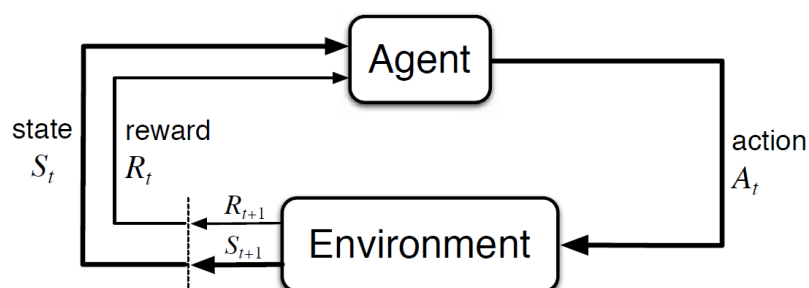


Abbildung 12: schematische Darstellung der Interaktion zwischen Agent und Umgebung nach Sutton und Barto (2018)

Um RL performant umzusetzen, kann auf eine Vielzahl bereits etablierter Programmbibliotheken zurückgegriffen werden. Diese bieten bereits eine Vielzahl implementierter und aufeinander abgestimmter Funktionen sowie standardisierte Schnittstellen und verringern den Implementierungsaufwand daher enorm. Um die beste bzw. geeignetste Programmbibliothek auszuwählen, wurden im Rahmen dieses Arbeitsteilpakets eine Vielzahl an Bibliotheken verglichen und anhand verschiedener Kriterien bewertet.

Die wichtigsten Kriterien waren dabei unter anderem

- die Aktualität des Frameworks, bzw. regelmäßige Updates,
- die Einstiegshürde, z. B. das Vorhandensein einer guten Dokumentation und nachvollziehbarer Tutorials,
- der Umfang der Bibliothek, also wie viele bzw. welche RL-Algorithmen sind implementiert

- sowie die Möglichkeit der Einbeziehung einer Vielzahl an Agenten.

Neben den genannten Kriterien wurde als wichtigstes Kriterium zur Bewertung einer Bibliothek eine gute Kombinierbarkeit mit dem für das Projekt implementierten Simulator (vgl. ATP 2.1) und damit eine gute Anwendbarkeit auf die Problemstellung festgelegt.

In einem ersten Auswahlschritt wurde eine Nutzwertanalyse durchgeführt, in der folgende RL-Programmibliotheken grob miteinander verglichen wurden: Google Dopamine, Torch, TRFL, Tensorforce, TF-Agents, RLLib, Coach, SLM-Lab, Surreal, Simple RL, MAgentm

Als nächstes wurden die nach der Nutzwertanalyse vielversprechendsten Bibliotheken – nämlich Torch und RLLib (vgl. Moritz u. a. 2018) – für eine prototypenhafte Implementierung und Kombination mit dem Simulator herangezogen. Die finale Entscheidung fiel zugunsten von RLLib. Zusätzlich wurde auf eine Verknüpfung zum Weights & Bias Projekt nach Biewald (2020) sowie auf eine Hyperparameter-Optimierung mittels „Tune“ gesetzt.

### **ATP 1.5: Adaption und Anpassung von KI-Algorithmen sowie die Entwicklung geeigneter Metriken zur Bewertung der Systemperformance im Rahmen selbstlernender Systeme**

Der entwickelte und im folgenden beschriebene Ansatz des RL bezieht sich auf die globale Routenplanung (siehe ATP 1.1), also auf die grobe Streckenwahl eines Fahrzeugs vor Fahrtantritt. Dabei sind dem Fahrzeug zur Entscheidungsfindung in der globalen Routenplanung mindestens die aktuelle eigene Position, das gewünschte Ziel und das statische Layout bekannt. Die Wahl einer konkreten Route (aus einem Pool an möglichen vordefinierten Routen) bei Fahrtantritt soll mittels RL getroffen werden. Dazu muss einerseits eine Vielzahl alternativer Routen vom Startpunkt zum gewünschten Ziel bekannt sein, andererseits soll das Fahrzeug hier auch eine geeignete (im Idealfall natürlich die beste) Route auswählen, weshalb in einem Lernprozess über einen längeren Zeitraum Erfahrungen gesammelt und ausgewertet werden sollen. Beide Teile (die Erstellung alternativer Routen sowie der Ablauf des Lernprozesses) werden im Folgenden beschrieben.

Da durch das RL konkrete Routen in verschiedenen Situationen ausgewählt und bewertet werden, müssen diese Routen auch im Vorfeld bekannt und unveränderlich vorliegen. Es werden deshalb für alle möglichen Kombinationen aus Start- und Zielpunkt eine fest definierte Anzahl unterschiedlicher Routen berechnet. Diese können auf Basis einer automatisiert erstellten Roadmap errechnet werden. Hierbei eignen sich beispielsweise Verfahren wie Cell Decomposition, Probabilistic Roadmaps oder Visibility Graph (s. ATP 1.1). Ungeeignet sind dagegen Verfahren, die lediglich eine einzige Verbindung, nämlich den annähernd kürzesten Weg, suchen, wie beispielsweise Rapidly Exploring Random Trees.

Basierend auf dieser Roadmap kann nun auf Basis eines bestimmten Start- und Zielpunkts eine Vielzahl möglicher Verbindungen berechnet werden. Grundsätzlich ist bei großen Roadmaps natürlich eine fast unendliche Anzahl an Routen denkbar, weshalb Kriterien definiert wurden, welche die Routen zu erfüllen haben, um in den Pool aufgenommen zu werden bzw. KO-Kriterien, die dafür sorgen, dass Routen nicht aufgenommen werden. Das wichtigste Kriterium bezieht sich dabei auf die Länge der Route. Um unsinnige Routen zu verhindern, soll eine Route nur einen bestimmten Anteil (z. B. 30%) länger sein, als die kürzeste gefundene Route zwischen Start und Ziel. Für das RL ist es nötig, für alle Start-Ziel-Verbindungen die gleiche Anzahl an alternativen Routen zu haben. Die konkrete Anzahl stellt dabei einen layout- und

anwendungsfallspezifischen Kompromiss dar: zu viele Routen führen zu einer hohen Komplexität im Lernprozess und damit einer langen Lerndauer. Zu wenig Routen verringern die Fähigkeit des gesamten Ansatzes zur Auswahl der geeigneten Route.

Falls nötig, können alle vordefinierten Routen auch im Vorfeld nachbearbeitet werden, z. B. in einzelne Wegpunkte zerlegt und damit weiter gekürzt werden. Die Auswahl unterschiedlicher Routen wird anhand eines Minimalbeispiels in Abbildung 13 dargestellt. Die zugrundeliegende Roadmap zum Finden unterschiedlicher Routen ist dünn gepunktet eingezeichnet. Grundsätzlich sind für die gezeigte Start-Ziel-Verbindung zehn annähernd gleich lange, kürzeste Routen möglich. Nach der Nachbearbeitung sind die zwei kürzesten gefundenen Routen dick eingezeichnet.

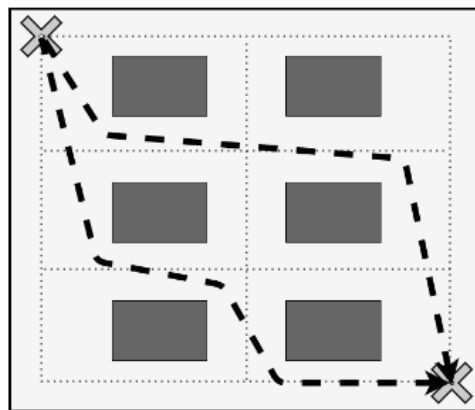


Abbildung 13: Beispiel zur Auswahl unterschiedlicher Routen zwischen einem fest vorgegebenen Start- und Zielpunkt (vgl. Reith u. a. 2021a)

Nachdem im Vorfeld statische Routen errechnet wurden, wird im zweiten Schritt des RL-Ansatzes innerhalb der Simulation ein Lernprozess angestoßen. Dabei wird von allen Fahrzeugen im Modul der globalen Routenplanung eine Route situationsabhängig ausgewählt. Die Streckenwahl vor Fahrtantritt kann theoretisch basierend auf unterschiedlichen Informationen (aktueller Systemzustand) getroffen werden:

- dem Fahrzeug sind nur die eigene Position und das Ziel bekannt (keine dynamischen Informationen)
- dem Fahrzeug sind eigene Position, Ziel und die Positionen der anderen Fahrzeuge im System bekannt
- dem Fahrzeug sind eigene Position, Ziel und die Ziele der anderen Fahrzeuge bekannt
- dem Fahrzeug sind eigene Position, Ziel und die Positionen und Ziele der anderen Fahrzeuge bekannt.

Die ausgewählte Route wird anschließend gefahren und die Fahrt nach Abschluss bewertet. Dies geschieht einerseits anhand der konkreten Fahrzeit, die minimiert werden soll. Andererseits wird eine Evaluierung anhand der Anzahl der Routing-Konflikte mit anderen Fahrzeugen bzw. der Zeit, die durch solche Konflikte verloren wurde, durchgeführt. Die Bewertungskriterien ermöglichen einen Vergleich unterschiedlicher Routen, in Abhängigkeit der konkreten Situation in der die Entscheidung für eine Route getroffen wurde. Als Ergebnis des Lernprozesses sollen vorteilhafte Entscheidungen in der globalen Routenplanung (Routenauswahl) wiederholt werden, während die Wahl nachteiliger Routen nicht mehr passieren soll. Der detaillierte Ablauf des Lernprozesses mit Hilfe des entwickelten Simulationstools ist im Zuge von ATP 2.2 beschrieben.

## **AP 2 Aufbau Experimentierumgebung**

Das grundsätzliche Ziel dieses Arbeitspakets war der Aufbau von Experimentierumgebungen, mittels deren die in AP 1 entwickelten Konzepte in unterschiedlichen Szenarien getestet und bewertet werden können. Dabei wurde zum einen eine virtuelle Experimentierumgebung (Simulationsmodell) aufgebaut (ATP 2.1). Anschließend wurden die entwickelten Ansätze im Simulationsmodell implementiert (ATP 2.2.). Zusätzlich zur virtuellen Experimentierumgebung wurden physische Roboter für Feldexperimente vorbereitet und in einem eigens erstellten Versuchsfeld in Betrieb genommen (ATP 2.3 und 2.4).

### **ATP 2.1: Aufbau Simulationsmodell allgemein**

Grundsätzlich konnten im Zusammenhang mit der Simulation von Fahrzeugsystemen zwei große Forschungsbereiche identifiziert werden: Logistics/Manufacturing sowie mobile Robotik (vgl. Demasure u. a. 2016). Dabei betrachten beide Bereiche jeweils unterschiedliche Aspekte des gleichen Systems und müssen deshalb als sich ergänzend aufgefasst werden.

Die mobile Robotik hat insbesondere einen starken Fokus auf das Fahrzeug bzw. das exakte Fahrzeugverhalten. Dabei werden u.a. (steuerungs-)technische Aspekte sowie die Fahrzeugkinematik im Detail betrachtet. Entsprechende Analysen fokussieren beispielsweise auf die exakte Trajektorienplanung der Fahrzeuge. In typischen Simulationsmodellen wird das Fahrzeugverhalten in bestimmten Situationen oft sehr detailliert nachgebildet. Es werden Umgebungseinflüsse und Sensorik modelliert, sodass sich das Modell oft bereits nahe an einer Emulation befindet. Da der Fokus in der Regel nicht auf logistischen Einflüssen liegt, müssen diese oft eigens implementiert werden. Zusätzlich sind diese Modelle in der Regel nicht in der Lage (da ursprünglich nicht dafür gemacht), deutlich schneller als in Echtzeit zu simulieren.

Im Gegensatz dazu betrachtet der Bereich Logistics/Manufacturing das Fahrzeugsystem oft nur als notwendigen Teil eines größeren Produktions-, Kommissionierungssystems oder Lagers. Das Transportsystem wird hier oft als Mittel zum Zweck analysiert und wird in der Regel in entsprechenden Simulationen deutlich abstrahierter dargestellt. Der Fokus liegt dabei oft auf wirtschaftlichen und logistischen Kennzahlen, wie Transportzeiten oder dem Systemdurchsatz. Insbesondere das Fahrzeugverhalten wird hierbei oft nur stark abstrahiert dargestellt. Typische Einsatzszenarien dieser Simulationsmodelle sind beispielsweise die Sensitivitätsanalyse verschiedener Systemparameter zur Systemplanung. Durch die abstrahierte Darstellung der einzelnen Fahrzeuge, kann in der Regel eine deutlich schnellere Simulationsgeschwindigkeit erreicht werden, was große Simulationsstudien überhaupt erst möglich macht. Andererseits können insbesondere freinavigierende Fahrzeuge oft nur wenig detailliert abgebildet werden. Historisch betrachtet unterstützen zahlreiche Simulationstools des Bereichs Logistics/Manufacturing nur die Modellierung spurgebundener Fahrzeugsysteme. Es ist in der Regel umständlich, ein exaktes Fahrzeugverhalten (insbesondere bei freinavigierenden, autonomen Fahrzeugen) ausreichend detailliert nachzubilden

Mit etablierten Simulationstools war die Simulation freinavigierender, autonomer Transportfahrzeuge nach den sich im Projekt ergebenden Anforderungen nicht ohne weiteres möglich. Es wurde deshalb beschlossen, im Rahmen des Projekts einen eigenen Simulator zu entwickeln. Dieser hat einen Fokus auf die für das Projekt relevanten Aspekte und ermöglichte somit eine Kombination aus hoher Performanz, bei gleichzeitig ausreichendem Detaillierungsgrad sowie einen Fokus auf logistischen Gesichtspunkten. (vgl. Reith u. a. 2021a)

Für den Aufbau des eigenen Simulators wurde der auf *python* basierende, ereignisdiskrete Simulationsframework *simpy* ausgewählt (vgl. Matloff 2008). Mit Hilfe von *simpy* war es möglich einen geeigneten Kompromiss zwischen detaillierter Modellierung des Verhaltens freinavigierender Fahrzeuge einerseits und einer hohen Simulationsgeschwindigkeit andererseits zu erhalten. Abbildung 14 zeigt den grundsätzlichen, modularen Aufbau des Simulators inkl. Umgebung zum Starten und Auswerten von Simulationsexperimenten. Damit in den Experimenten einzelne Algorithmen (z. B. die globale Routenplanung) einfach und schnell ausgetauscht werden konnten, wurde insbesondere auf einen modularen Aufbau mit standardisierten Schnittstellen zwischen den einzelnen Modulen geachtet. Die Motivation für die Erstellung eines eigenen Simulators, der grundsätzliche Aufbau sowie ein Beispiel für eine Anwendung wurden bereits in Reith u. a. (2021a) ausführlich beschrieben.

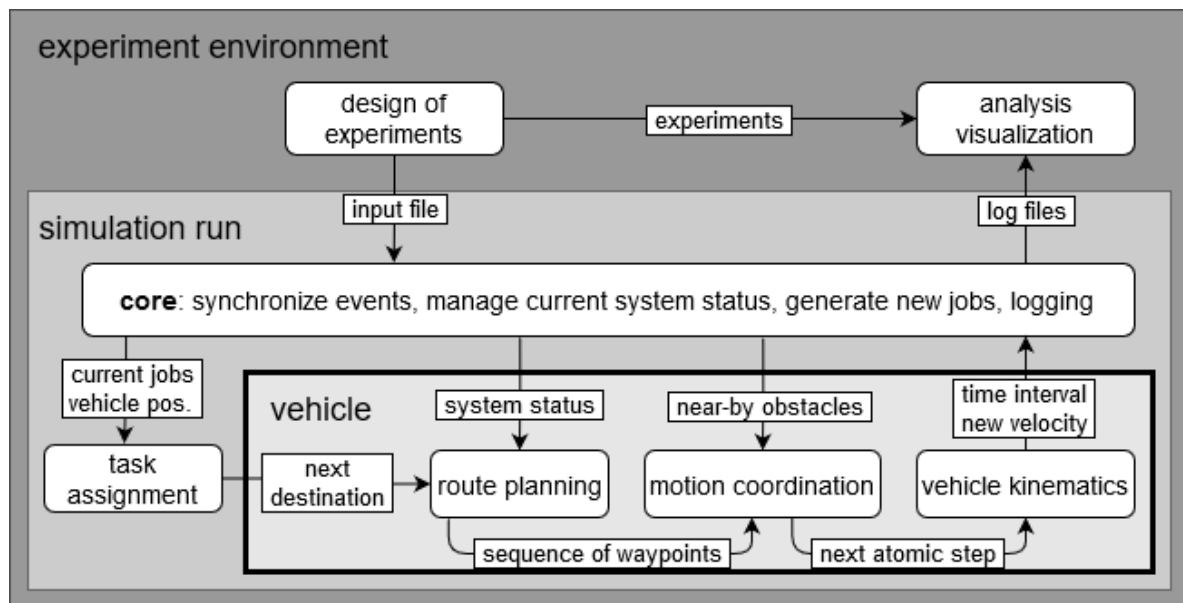


Abbildung 14: grundsätzlicher modularer Aufbau des Simulators sowie Schnittstellen zwischen den einzelnen Modulen (vgl. Reith u. a. 2021a)

Der zentrale Bestandteil des Simulators ist ein auf *simpy* basierender Simulationskern („core“), der alle Ereignisse (insb. die Fahrzeuge) synchron hält, neue Transportaufträge erzeugt sowie den Simulationslauf für spätere Auswertungen und Visualisierungen detailliert protokolliert (log-files) und speichert.

Basierend auf dem aktuellen Systemstatus (insbesondere Fahrzeugpositionen und Transportaufträge), verteilt das Auftragszuordnungs-Modul („task assignment“) einzelne Transportaufträge an bestimmte Fahrzeuge, bzw. teilt einem freien Fahrzeug den nächsten Transportauftrag zu. Dadurch haben alle Fahrzeuge immer ein nächstes Ziel („next destination“).

Im Gegensatz zur Auftragsvergabe, die zentral für alle Fahrzeuge geregelt wird, werden die Module zur globalen Routenplanung („route planning“), lokalen Routenplanung („motion coordination“) und zum Fahrzeugverhalten („vehicle kinematics“) von jedem Fahrzeug individuell ausgeführt.

Analog zur Systematisierung in der Literatur (vgl. ATP 1.1) ist das „route planning“-Modul verantwortlich für die Berechnung/Auswahl einer konkreten Route, basierend auf statischen

Informationen. Wichtigste Information ist dabei das vom „task assignment“-Modul vorgegebene Ziel. Die ausgewählte Route wird anschließend in eine Abfolge konkreter Wegpunkte überführt.

Das „motion coordination“-Modul ist verantwortlich für die atomaren Fahrzeugbewegungen zwischen den einzelnen Wegpunkten, wobei insbesondere auf eine Kollisionsvermeidung mit lokalen statischen und dynamischen Hindernissen geachtet wird. Folglich ist der aktuelle Zustand im System und insbesondere in der nahen Umgebung eines Fahrzeugs eine wichtige Information für die Berechnung der nächsten Fahrzeugbewegungen. Das Ergebnis ist dabei eine Abfolge von atomaren Schritten.

Das „vehicle kinematics“-Modul überführt einen atomaren Schritt in ein konkretes Zeitintervall sowie eine konkrete Fahrzeuggeschwindigkeit. Beide Größen errechnen sich dabei aus dem nächsten, geplanten Schritt, der aktuellen Geschwindigkeit des Fahrzeugs, notwendigen Kurven, dem Beschleunigungs- und Bremsverhalten, etc. Insbesondere das Zeitintervall wird an den Simulationskern zurückgegeben und dazu genutzt, die Bewegungen aller Fahrzeuge synchron zu halten.

Die vom Simulationskern gespeicherten Protokolldateien („log-files“) beinhalten die Aufträge, detaillierte Fahr- bzw. Transportzeiten, ausgewählten globale Routen sowie atomaren Positionsdaten aller Fahrzeuge über die gesamte Simulationszeit und werden im *json*-Format abgespeichert. Es ist somit möglich, eine nachträgliche Analyse des Simulationslaufes durchzuführen. Ebenfalls können die gespeicherten Positionsdaten im Nachgang für eine Visualisierung des gesamten Simulationslaufs verwendet werden.

## **ATP 2.2: Implementierung der Steuerungsstrategien in die Simulations- bzw. Emulationsmodelle**

Wie in ATP 2.1. beschrieben, wurde das Simulationsmodell so aufgebaut, dass für die einzelnen Module (z. B. route planning oder motion coordination) beliebige Steuerungsstrategien einfach ausgetauscht werden können. Aufgabe dieses Arbeitspakets war es, für das Forschungsprojekt bzw. die Experimente relevante Steuerungsstrategien zu implementieren und im Simulationsmodell zu integrieren. Im Folgenden werden die implementierten Steuerungsstrategien für die einzelnen Module beschrieben.

### ***Auftragszuordnung (task assignment)***

Die Zuordnung von Aufträgen auf Fahrzeuge war nicht primärer Bestandteil des Forschungsprojekts. Trotzdem müssen natürlich Fahraufträge für die Fahrzeugflotte generiert werden bzw. eine Auftragszuordnung (task assignment) der einzelnen Fahrzeuge stattfinden. Da insbesondere in der Auswertung später keine Verfälschung der untersuchten Größen durch die Auftragszuordnung stattfinden sollte, wurden unendlich viele Transportaufträge im System angenommen. Bei Abschluss einer Fahrt (eines Transports) wählt das implementierte Task-Assignment-Modul zufällig ein nächstes Ziel aus – somit sind die Fahrzeuge dauerhaft unterwegs und – sofern nicht anders geregelt – werden alle Start-Ziel-Kombinationen gleich häufig befahren. Bei der Auswertung der Experimente wurde dabei nicht auf Kenngrößen wie Durchsatz, Wartezeiten etc. geachtet, die auch stark von der Auftragszuordnung abhängen. Stattdessen standen insbesondere Größen wie „Anzahl abgeschlossener Fahrten“, „Fahrzeiten je Start-Ziel-Relation“ sowie Verzögerung durch Konflikte („Stauzeiten“) im Fokus (siehe dynamische Performanzindikatoren in ATP 1.3).



### **Globale Routenplanung (route planning)**

Die globale Routenplanung war der zentrale Untersuchungsgegenstand der Experimente in AP 3 bzw. des gesamten Forschungsprojekts. Basierend auf einer Literaturrecherche wurden in AP 1 insgesamt zwei neue Ansätze für die globale Routenplanung entwickelt, die in diesem AP zu implementieren sind: Das Lane-Konzept (siehe ATP 1.3) sowie der Reinforcement-Learning (RL) Ansatz (siehe ATP 1.5). Die Verbindung beider Ansätze mit dem Simulationsmodell wird im Folgenden beschrieben.

Die Lanes werden auf Basis statischer Layout-Informationen im Vorfeld einer Anwendung erstellt und die zugehörigen Wegpunkte im *json*-Format gespeichert. Zu Beginn eines Simulationslaufes wird die relevante Datei mit den Wegpunkten eingelesen. Jedes Mal, wenn in der Simulation ein Fahrzeug ein neues Ziel bekommt und die globale Routenplanung zur Bestimmung der Wegpunkte zum Ziel anwendet, werden die Wegpunkte der entsprechenden Lane (abhängig von Start- und Zielpunkt) als zugehörige Wegpunkte geladen und ausgeführt. Dabei muss ein Wegpunkt in der Simulation nicht exakt erreicht oder überfahren werden, damit es nicht zu Konflikten bzw. sogar Staus an den einzelnen Wegpunkten kommt. Es reicht, wenn das entsprechende Fahrzeug seine Wegpunkte mit einer gewissen Toleranz erreicht und somit dem Verlauf der Lane grob folgt. Lokale Abweichungen, aufgrund von Konflikten mit anderen Fahrzeugen, sind ohnehin jederzeit möglich (siehe lokale Routenplanung).

Der schematische Aufbau der Implementierung des RL Ansatzes im route-planning-Modul kann Abbildung 15 entnommen werden.

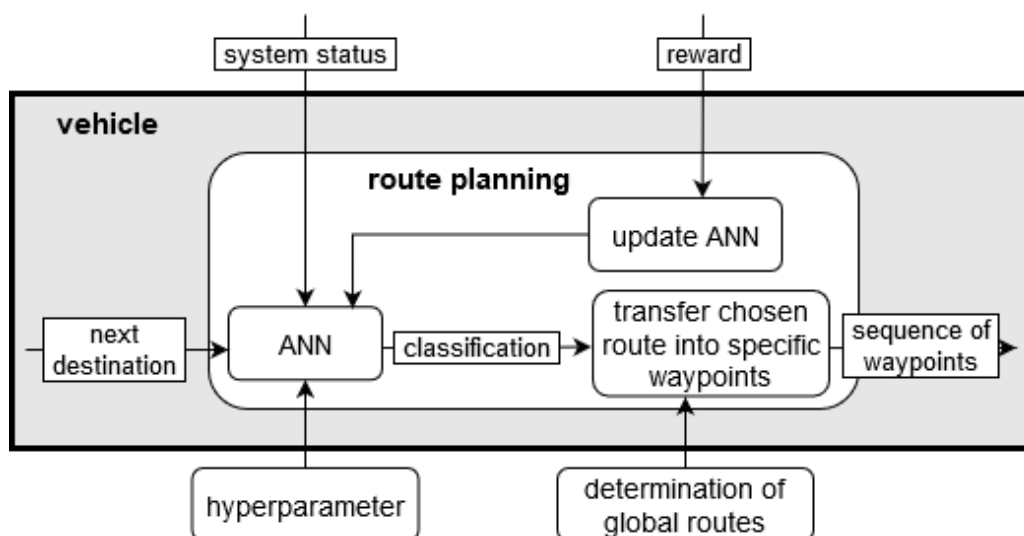


Abbildung 15: Kopplung zwischen dem RL-Ansatz und dem Simulationsmodell nach Reith u. a. (2021)

Vor Simulationsstart werden mögliche globale Routen zwischen unterschiedlichen verschiedenen Start- und Zielpunkten berechnet („determination of global routes“). Dies ist ausführlich in Kapitel 1.5 beschrieben. Während der Simulation ist der Ausgangspunkt für die globale Routenplanung das Vorhandensein eines nächsten Zieles für ein bestimmtes Fahrzeug (bestimmt durch das task-assignment-Modul). Ein künstliches neuronales Netz (englisch: „Artificial Neural Network“ – ANN) errechnet dabei eine konkrete Zahl, die exakt einer vordefinierten Route zum Ziel entspricht („classification problem“). Hyperparameter im Zusammenhang mit der Anwendung neuronaler Netze, wie beispielsweise die Anzahl der Layer und Neuronen des neuronalen Netzes, können im Vorfeld festgelegt werden. Im nächsten Schritt wird auf Basis der ANN-Ergebnisse eine konkrete Route (bzw. die entsprechenden

Wegpunkte – „sequence of waypoints“) ausgewählt und von dem Fahrzeug ausgeführt. Das Fahrzeug fährt also entlang der festgelegten Sequenz an Wegpunkten und vermeidet lokale Konflikte mit anderen Fahrzeugen (siehe motion coordination). Nach Abschluss der Fahrt wird ein sog. „reward“ errechnet, der dazu dient die konkrete Entscheidung zu bewerten. Basierend auf der Bewertung wird eine Anpassung der Gewichte („update ANN“) des neuronalen Netzes vorgenommen („Lernphase“), sodass in Zukunft vorteilhafte Entscheidungen wiederholt getroffen werden, bzw. nachteilige Entscheidungen vermieden werden. (vgl. Reith u. a. 2021a)

### ***Lokale Routenplanung (motion coordination)***

Die lokale Routenplanung, also die Berechnungen detaillierter Bewegungen einzelner Fahrzeuge sowie die Abstimmung der Bewegungen zwischen mehreren Fahrzeugen zur Konfliktvermeidung bzw. -auflösung (siehe ATP 1.1), war nicht der Schwerpunkt des Forschungsprojekts. Trotzdem musste zur Durchführung der Experimente eine Strategie für die lokale Routenplanung implementiert werden. Dabei sollte die implementierte Strategie einerseits ein realistisches Fahrzeugverhalten darstellen, andererseits sollte die lokale Routenplanung eine möglichst gleichbleibende Performanz liefern, sodass die Ergebnisse nicht zu sehr beeinflusst werden und die Auswirkungen der globalen Routenplanung bzw. Streckenwahl eindeutig bewertet werden konnte. Insgesamt wurden im Simulationsmodell zwei unterschiedliche Ansätze für das motion-coordination-Modul implementiert: ein Kräftemodell, basierend auf dem „social-force“-Ansatz sowie ein eigens entwickelter „Default“-Ansatz. Beide werden im Folgenden beschrieben.

Für das Kräftemodell errechnet jedes Fahrzeug zu jedem Zeitpunkt seinen nächsten Bewegungsvektor anhand mehrerer Einflussfaktoren. Statische Hindernisse sowie andere Fahrzeuge wirken abstoßend. Dabei hängt die Stärke einer Abstoßung an der Entfernung des Fahrzeugs zum Hindernis: Ein Hindernis wirkt stärker abstoßend, je geringer der Abstand. Das jeweilige (Zwischen-)Ziel wirkt anziehend. Außerdem besteht eine anhaltende Kraft entlang der aktuellen Bewegungsrichtung, die dazu führt, dass das Fahrzeug nicht sprunghaft seine Bewegung ändern kann. Aus der Summe der sich überlagernden Kräfte (anziehend wie abstoßend) inkl. deren jeweiliger Intensität, lässt sich an einem bestimmten räumlichen Punkt und zu jedem Zeitpunkt die nächste Bewegung eines Fahrzeugs berechnen.

Beim sog. „Default“-Ansatz untersuchen Fahrzeuge ihre lokale Umgebung nach statischen und dynamischen Hindernissen. Basierend auf Informationen über die Umgebung bestimmen Fahrzeuge iterativ ihren nächsten Bewegungsvektor vordefinierter Länge, der a) nicht zur Kollision mit einem anderen Fahrzeug führt, b) die aktuelle Bewegungsrichtung so wenig wie möglich ändert und c) möglichst die Entfernung zum nächsten (Zwischen)Zielpunkt verkürzt. Eine schematische Darstellung des Ansatzes anhand eines Minimalbeispiels kann Abbildung 16 entnommen werden.

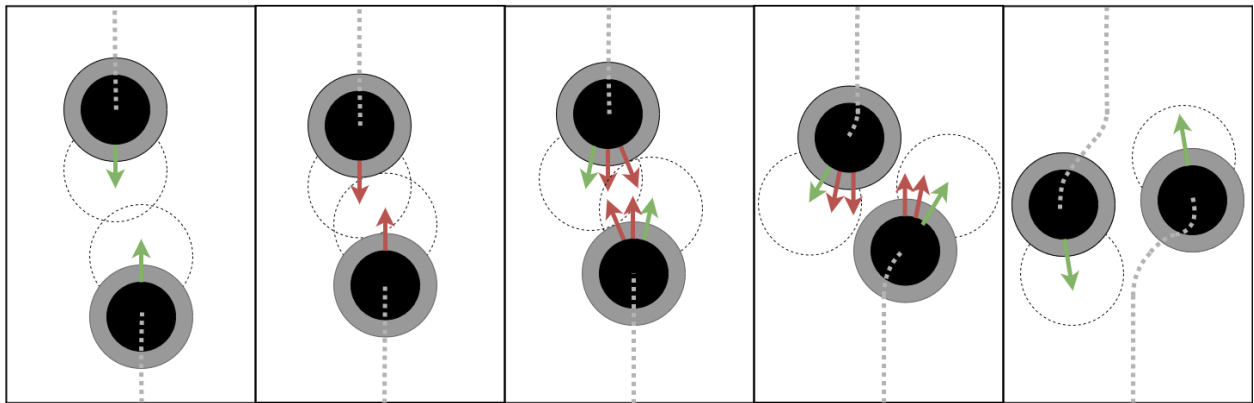


Abbildung 16: Zwei Fahrzeuge bewegen sich anhand des Default-Ansatzes zur lokalen Routenplanung („motion coordination“).

### ATP 2.3: Programmierung der physischen Roboter

Die Softwareumgebung ROS gilt als de-facto Standard zur Entwicklung für Roboteranwendungen, da darin eine Vielzahl von Softwarebibliotheken und -werkzeugen sowie Kommunikationspipelines einzelner funktionaler Einheiten, aber auch Emulation separater eigenständiger Systeme zur Verfügung gestellt werden. Einerseits basieren diese Komponenten auf industriell etablierten Algorithmen, andererseits bietet die modulare Open-Source Struktur umfangreich dokumentierte Schnittstellen zur Entwicklung und Anpassung individueller Problemfelder.

Das Ziel eines typischen Einsatzes von ROS besteht darin, realistische Abstraktionen aller Hardwarekomponenten der beteiligten Systemkomponenten zu erzeugen, inklusive einer Integration von Modellen zur Verzerrung von Signalen (z. B. Gauss-Rauschen bei Messungen mittels LiDAR).

Ein oft verwendetes System, welches vollständig in ROS emuliert, aber auch physisch erworben werden kann, ist der „Turtlebot“ der Firma „Robotis“, von denen der Forschungseinrichtung mehrere Fahrzeuge für Experimente zur Verfügung standen. Mit der emulierten Versuchsumgebung der Turtlebots werden eine Vielzahl von ROS-Paketen angeboten, wie z. B.

- SLAM (Simultaneous Localization and Mapping) – zur Erstellung von Umgebungskarten (vgl. Durrant-Whyte und Bailey 2006)
- AMCL (Advanced Monte Carlo Localization) – zur Lokalisierung innerhalb einer Karte (vgl. Dellaert u. a. 1999);
- DWA (Dynamic Window Approach) – zur Generierung von Navigationspfaden (vgl. Fox u. a. 1997);
- Gazebo – zur 3-dimensionalen Darstellung der Emulation (vgl. Koenig und Howard 2004).

Eine Emulation wird dabei üblicherweise in Echtzeit durchgeführt, d.h. der zeitliche Ablauf der emulierten Bewegung entspricht dem realen Pendant. Für eine umfangreiche Simulation verschiedener Szenarien, auch unabhängig der Echtzeit, ist es möglich den quasi-Zeitverlauf zu erhöhen. Jedoch ist das Verhältnis aus Anzahl der simulierten Roboter und der Echtzeit-Faktor abhängig von der verwendeten Hardwareleistung des ROS-Kern-Rechners (siehe Abbildung 17).

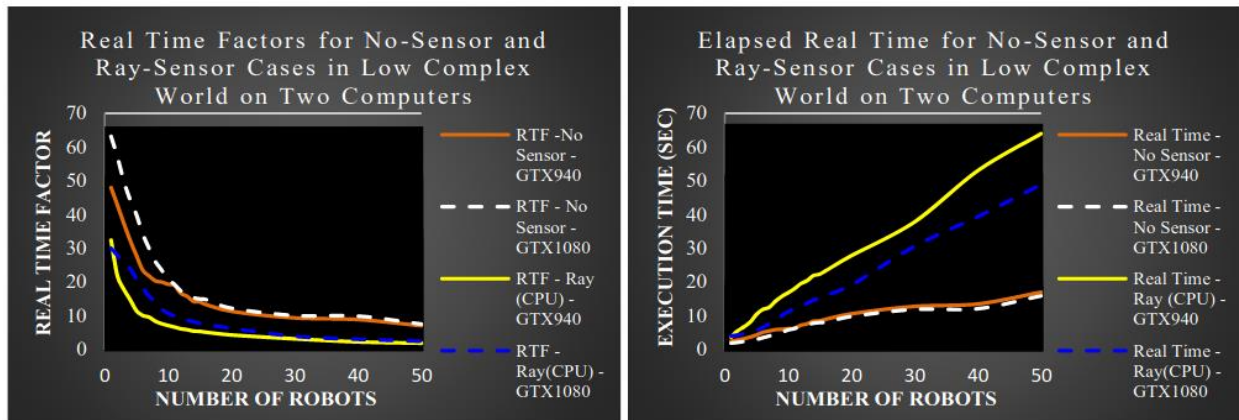


Abbildung 17: Verhältnis zwischen Anzahl der emulierten Turtlebots und dem möglichen Echtzeit-Faktor (links), und Ausführungszeit (rechts), je nach verwendeter Grafikkarte. (vgl. Saglam und Papelis 2020)

Als Fazit lässt sich festhalten, dass mit der Emulationsumgebung zwar einzelne zeitunabhängige Emulationen größerer Fahrzeugflotten durchgeführt werden können, eine größere Studie jedoch zu zeitintensiv ist.

#### **ATP 2.4: Inbetriebnahme des physischen Fahrzeugschwarms, d.h. insbesondere die Implementierung von Datenschnittstellen und Kommunikationsstandards**

In diesem Arbeitspaket wurde eine Fahrzeugflotte, bestehend aus mehreren Turtlebots, in Betrieb genommen. Hierzu wurden die folgenden Untersuchungen und Implementierungen auf Basis von ROS bzw. der Turtlebots durchgeführt.

Die Kommunikation zwischen einzelnen Komponenten in ROS wird über sogenannte „Nodes“ realisiert. Eine Node führt Berechnungen aus und ist über eine eindeutige Bezeichnung abrufbar, um Ergebnisse abzufragen oder Eingaben zu liefern. Dieses Prinzip erfolgt über eine zentrale Einheit innerhalb eines Netzwerks, worin auch weitere Recheneinheiten integriert sein können. Jeder Turtlebot verfügte über die gleichen Komponenten und auch Implementierungen. Aus diesem Grund mussten Namensräume fahrzeugspezifisch, also pro Turtlebot, definiert werden, wodurch die inhärenten Nodes im gesamten ROS-Netz adressiert werden konnten. Als Resultat dieser Untersuchung entstand ein ROS-Paket, welches dazu in der Lage ist, mehrere Turtlebots in einem System zu emulieren und dabei auch jeder Einheit eine beliebige Liste an Wegpunkten zu kommunizieren. Diese Liste kann in zufälliger Reihenfolge und auch als Wiederholung vermittelt werden. Ebenso wurde das ROS-Paket für reale Turtlebot Einheiten verwendet.

In einer ersten Untersuchung wurde das native Verhalten ermittelt, wenn zwei Turtlebots sich einander gegenüberstehen und jeweils den Startpunkt des anderen Turtlebots als Zielpunkt erhalten (siehe Abbildung 18). Beide Einheiten entwickelten zwar Ausweichstrategien (jeweils Pfad in blau und lila), diese waren jedoch weitestgehend identisch. Die globale Pfadplanung war abhängig von der lokalen Ausrichtung der Turtlebots. Waren diese in die gleiche Richtung orientiert, lässt sich der Konflikt vermeiden.

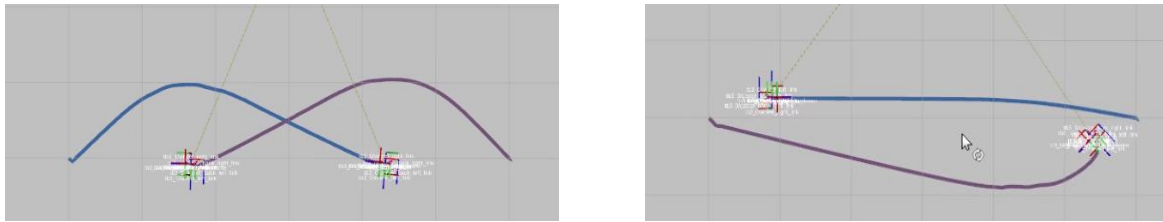


Abbildung 18: Fahrzeugtrajektorien beim Einsatz von zwei Turtlebots

Analog zu den Emulationen wurde eine Umgebung für Feldexperimente geschaffen und die Versuche mit ähnlichem Ergebnis wiederholt (Abbildung 19).

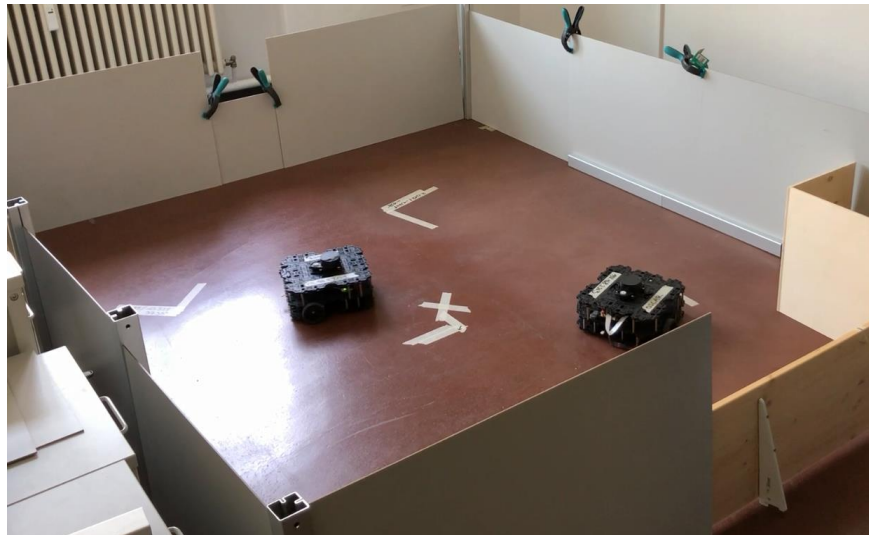


Abbildung 19: Umgebung für die Feldexperimente

Grundsätzlich war es möglich mit den Turtlebots Feldexperimente durchzuführen. Jedoch ergab sich eine praktische Herausforderung: Turtlebots waren nicht in der Lage, sich in voller Breite wahrzunehmen (Abbildung 20). Dies führt dazu, dass die Fahrzeuge in regelmäßigen Abständen miteinander kollidierten.

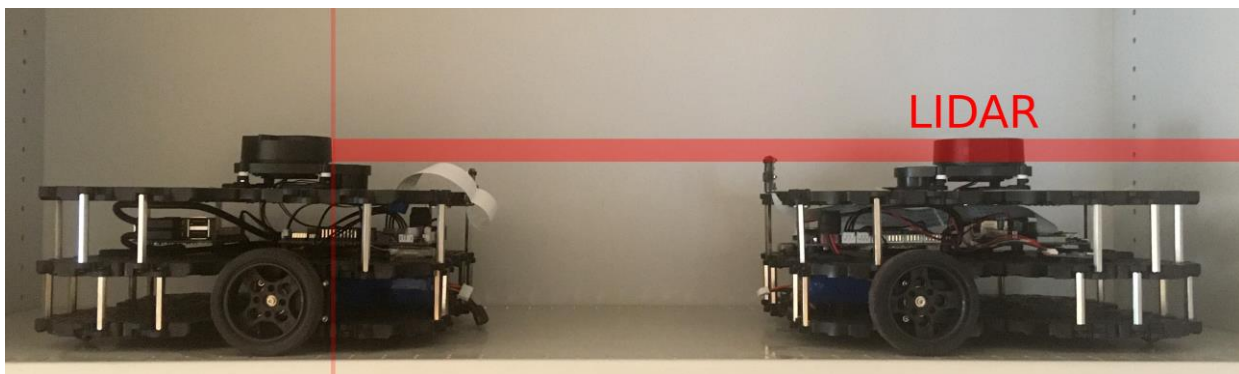


Abbildung 20: gegenseitige Wahrnehmung der Turtlebots via LIDAR

Lösungen, wie ein allgemein höherer Sicherheitsabstand zu allen Hindernissen im Layout, führten zwar dazu, dass keine Kollisionen zwischen zwei Fahrzeugen mehr auftraten, führten aber auch zu eigentlich unnötigen Ungenauigkeiten im Routing. Die Ergebnisse von Feldexperimenten, insbesondere mit einer Vielzahl an Fahrzeugen, können deshalb nur als eingeschränkt valide betrachtet werden.

### **AP 3 Evaluierung durch Simulation und Feldexperimente**

Das grundsätzliche Ziel dieses Arbeitspakets war die Durchführung von Simulationsstudien und Feldexperimente im Kontext der erarbeiteten Konzepte zur globalen Routenplanung freinavigierender Transportsysteme. Aus den vorangegangenen Arbeitspaketen der Identifikation und Entwicklung von Fahr- und Ausweichstrategien sowie der Aufbau verschiedener Experimentumgebungen ergaben sich dabei drei grundlegende Gruppen an Experimenten:

- Die Evaluierung der Machbarkeit bzw. Performanz des „Reinforcement Learning-Ansatzes“ (ATP 1.4, ATP 1.5) mit dem erstellten Simulationsmodell (ATP 2.1, ATP 2.2)
- Die Evaluierung des ROS-Ansatzes zur Einbeziehung dynamischer Hindernisse in die globale Pfadplanung (ATP 1.3) mit den physischen Robotern (ATP 2.3, ATP 2.4)
- Die Evaluierung von Stärken und Schwächen des Lane-Konzepts (ATP 1.3) mit dem erstellten Simulationsmodell (ATP 2.1, ATP 2.2)

In Vorstudien wurden die Potenziale der einzelnen Strategien bereits vor Durchführung der Hauptexperimente grob abgeschätzt, sodass der Fokus der Hauptexperimente auf den vielversprechendsten Ansatz gelegt werden konnte. Hier zeigte sich, dass insbesondere das Lane-Konzept zu einem vorteilhaften Verhalten unterschiedlich großer Flotte von Transportfahrzeugen für beliebige Layouts führte. Der Fokus der Experimente und der folgenden Kapitel liegt deshalb auf dem entwickelten Lane-Konzept. Design of Experiments (ATP 3.1), zugrundeliegendes Datenmodell (ATP 3.2), Durchführung (ATP 3.3) sowie die Auswertung und kritische Reflexion der Ergebnisse (ATP 3.4) werden im Folgenden ausführlich beschrieben.

Die Erkenntnisse aus den Vorstudien zum Einsatz von Reinforcement Learning sowie der Einbeziehung dynamischer Hindernisse in die globale Pfadplanung bei ROS, lieferten außerdem wichtige Ergänzungen zur Übertragbarkeit der Ansätze auf die Praxis und werden ebenfalls in AP 4 diskutiert.

#### **ATP 3.1: Entwicklung des Design of Experiments**

Ziel des Design of Experiments in diesem Arbeitspaket war insbesondere die Formulierung konkreter Hypothesen, deren Untersuchung Potenziale und Risiken des Lane-Konzepts aufzeigen. Diese Hypothesen liefern die Grundlagen für die Experimente im Zuge von ATP 3.3. Zusätzlich zu den Hypothesen wurden im Design of Experiments die Experimentbedingungen möglichst genau festgelegt.

##### ***Hypothesen***

1. Die Heuristik ist in der Lage, die statischen Performanzindikatoren für ein beliebiges Layout zu verbessern.
2. Eine gute Lane-Map (identifizierbar durch gute statische Performanzindikatoren) führt direkt zu einer besseren Leistung des Transportsystems (beurteilbar durch gute dynamische Performanzindikatoren).
3. Das Verhältnis der beiden statischen Performanzindikatoren ermöglicht es, eine Lane-Map zu erstellen, die exakt an eine bestimmte Flottengröße angepasst ist.

Mit Hilfe von Hypothese 1 sollte untersucht werden, ob die entwickelte Heuristik (ATP 1.3) grundsätzlich in der Lage ist, eine Lane-Map für ein beliebiges Layout zu erstellen. Dies wurde

insbesondere anhand der Entwicklung der beiden statischen Performanzindikatoren Länge und gewichtete Überlagerung gemessen, die durch die Heuristik optimiert werden sollen.

Als nächstes sollte mit Hilfe von Hypothese 2 gezeigt werden, dass eine starke Korrelation zwischen statischen und dynamischen Performanzindikatoren vorliegt, d.h. eine Lane-Map die nach statischen Kriterien als gut bewertet wurde (und auch nach diesen erstellt wurde), führt auch in der Simulation freinavigierender Fahrzeuge zu guten Ergebnissen. Dies konnte mittels dynamischer Performanzindikatoren, wie z. B. der Fahrzeit oder dem insgesamt erreichbaren Durchsatz bewertet werden.

Die sich ergebende Lane-Map ist stark abhängig von der relativen Gewichtung der beiden statischen Indikatoren Länge und Überlagerung – also soll eher eine Lane-Map mit langen Lanes und wenig Überlagerung oder mit kurzen Lanes und hoher flächiger Überlagerung erstellt werden. Bei der Untersuchung von Hypothese 3 sollte diese relative Gewichtung ins Verhältnis zur späteren Flottengröße gesetzt werden. Die Idee war, dass mit Hilfe der richtigen Wahl der relativen Zielkriteriengewichtung, eine Lane-Map auf eine bestimmte Flottengröße hin „maßgeschneidert“ werden kann. Hier liegt die Vermutung nahe, dass kurze Lanes mit hoher Überschneidung eher für kleinere Flottengrößen geeignet sind, während längere Lanes bei geringerer Überschneidung eher für große Flotten einzusetzen sind. Diese Vermutung sollte in Experimenten überprüft und quantitativ bewertet werden.

### ***Ereignisdiskrete Simulation***

Nach Law (2013) sind folgende statistischen Größen für die Simulationsstudie festzulegen: die Aufwärmphase, die Länge eines Simulationslaufs sowie die Anzahl der statistisch notwendigen Wiederholungen je Eingabeparameterkonstellation.

Die Länge eines einzelnen Simulationslaufs wurde so festgelegt, dass auch seltene Ereignisse (z. B. Konflikte und Staus an bestimmten Stellen) auftreten. Die Aufwärmphase wurde mit Hilfe von „Welch’s graphical method“ festgelegt. Schlussendlich wurde mit Hilfe von Arnold und Furmans (2009) – Formel 3.88 die Anzahl der notwendigen Wiederholungen für ein konkretes Set an Eingangsparametern für alle dynamischen Performanzindikatoren bestimmt. Hierbei wurden insgesamt 40 unterschiedliche Konstellationen an Eingangsparametern bzw. Lane-Maps 100-mal wiederholt, um ein „wahres Ergebnis“ der Mittelwerte und Standardabweichungen zu erhalten. Bei einer Abweichung von höchstens 5% und einem Konfidenzintervall von 97%, ist für alle Konstellationen eine Wiederholung von zehn Mal ausreichend, was für alle weiteren Simulationsexperimente festgelegt wurde.

## **Untersuchte Layouts**

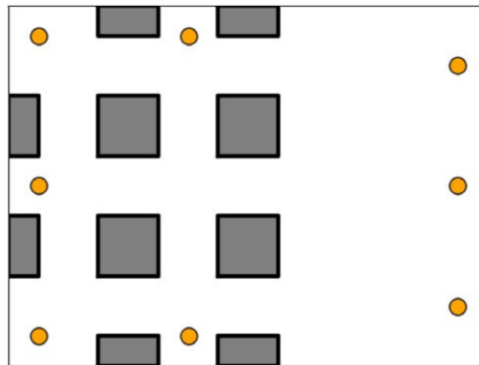


Abbildung 21: Beispiel für ein typisches Layout für die Experimente. Orange Punkte: Loadpoints zwischen denen Transporte stattfinden.

Um eine fundierte Einschätzung zu allgemeinen Vor- und Nachteilen des Lane-Konzepts sowie der Heuristik zur Erstellung einer Lane-Map zu erhalten, sollte eine möglichst große Bandbreite an in Experimenten untersuchter Layouts verwendet werden.

Neben einfachen Standardlayouts (wie z. B. „Schachbrettmuster“, Kreisverkehr) wurden gezielt „extreme“ Layouts entworfen, die dann wiederum Rückschlüsse auf die Grenzen des entwickelten Ansatzes zulassen. Hierbei wurde festgelegt, dass Layouts für freinavigierende Transportfahrzeuge sich im Routing grundsätzlich in zwei Eigenschaften unterscheiden können:

- Der vorhandene Platz: von einerseits großen freien Flächen bis hin zu engen Gängen andererseits.
- Das Vorhandensein bzw. das Nichtvorhandensein alternativer Routen und Engstellen zwischen Start- und Zielpositionen.

Durch die Kombination unterschiedlicher Ausprägungen der beiden Merkmale, konnte eine Bandbreite an Standardlayouts erstellt werden, die in den Experimenten untersucht wurden. Zusätzlich zu den Standardlayouts wurde auch darauf geachtet, dass praxisnahe Gegebenheiten untersucht wurden. Hierzu wurden typische Layouts für Fahrerlose Transportsysteme in der Intralogistik entworfen. Beispielfhaft kann Abbildung 21 ein typisches Layout für einen Wareneingang entnommen werden. Dieses Layout verbindet die Charakteristika einer freien Fläche mit alternativen Engstellen und engen „Gängen“.

## **Lokale Routenplanung**

Obwohl in den Experimenten die globale Routenplanung untersucht wurde, musste für die Simulation trotzdem eine Strategie für die lokale Routenplanung der Fahrzeuge implementiert werden – also wie verhalten sich Fahrzeuge zwischen den Wegpunkten der Lanes bzw. wie werden lokale Konflikte aufgelöst. Wie bereits erwähnt, ist die globale Streckenwahl mittels Lanes prinzipiell mit jedem weiteren Ansatz zur lokalen Routenplanung kombinierbar. Um die Erkenntnisse der Experimente jedoch nicht allzu sehr zu verfälschen, wurde auf eine eher schlichte Strategie für die lokale Routenplanung gesetzt, die für alle Experimente gleich besteht.

Im Zuge von ATP 2.1 wurden verschiedene mögliche Strategien erarbeitet und im Zuge von ATP 2.2 implementiert. Am vielversprechendsten, im Hinblick auf die Experimente, war der in Abbildung 16 dargestellte Ansatz für die lokale Routenplanung, der sog. „Default“-Ansatz. In Voruntersuchungen wurde festgestellt, dass trotzdem vereinzelt Konfliktsituationen entstehen,



die von dieser Strategie nicht aufgelöst werden können. Dies geschah insbesondere, wenn mehrere Fahrzeuge gleichzeitig in Engstellen aufeinandertreffen. Um die Auswirkung solcher Deadlocks zu begrenzen, wurde für die Simulationsexperimente zusätzlich eine Strategie zur „deadlock detection“ und „deadlock resolution“ implementiert.

### **ATP 3.2: Entwicklung Datenmodell (Aufbereitung, Speicherung)**

Zur statistisch fundierten Untersuchung der in ATP 3.1 aufgestellten Hypothesen, waren insgesamt mehrere zehntausend Simulationsläufe durchzuführen, um alle Kombination an Eingangsparametern abzudecken. Ein durchdachtes Datenmodell war entscheidend, um Rohdaten mit möglichst wenig Speicherplatz abzuspeichern, nachträglich bestimmte Simulationsläufe zu visualisieren, einen schnellen Zugriff auf einzelne Ergebnisse zu ermöglichen und auch nachträgliche Auswertungen über Gruppen von Simulationsläufen zu ermöglichen. Im Rahmen dieses Teilpakets wurde ein Datenmodell entwickelt, das alle genannten Voraussetzungen erfüllt.

Der wichtigste Aspekt des Datenmodells war dabei die Trennung von Rohdaten („log files“ der Fahrzeuge inkl. Positionsdaten) und Ergebnisdaten, die sich aus den Rohdaten ergeben. Mit Hilfe der Rohdaten konnte ein gesamter Simulationslauf bzw. das gesamte Feldexperiment bis ins Detail nachträglich reproduziert und auch visualisiert werden. Jeder Simulationslauf und somit auch die entsprechenden Rohdaten und Ergebnisse waren dabei durch eine eindeutige ID identifizierbar. Um Speicherplatz und Rechenzeit zu sparen, fand eine Ergebnisauswertung nicht gezwungenermaßen im Anschluss an jeden Simulationslauf statt, sondern erst, wenn die konkreten Ergebnisse für eine bestimmte, versuchsübergreifende Auswertung benötigt wurden.

Die verschiedenen Auswerteskripte suchten sich – je nach gewünschter Auswertung – aus der Gesamtmenge an Rohdaten bzw. Ergebnissen die dazu passenden Simulationsläufe, berechneten und aggregierten die Ergebnisse und gaben entsprechende Diagramme und Tabellen aus.

### **ATP 3.3: Durchführung nach Design of Experiment**

Die Simulationsexperimente wurden zum einen am *Zentrum für Informationsdienste und Hochleistungsrechnen der TU Dresden* durchgeführt. Andererseits wurde ein Laborrechner für Simulationen der Professur für Technische Logistik verwendet. Insgesamt wurden Experimente analog zum Design of Experiments in einem Zeitraum von mehreren Monaten durchgeführt.

In einem ersten Schritt wurden für alle Layouts zahlreiche Lane-Maps erstellt, insbesondere basierend auf unterschiedlich gewichteten statischen Performanzindikatoren (unterschiedliche Werte von R). Da die Lane-Maps iterativ erstellt werden, wurden auch die Startlösung bzw. Zwischenergebnisse (noch nicht fertig optimierte Lane-Maps) gespeichert.

Basierend auf den erstellten Lane-Maps, konnten dann in einem zweiten Schritt Simulationsexperimente durchgeführt werden. Hierfür wurden alle Zwischenergebnisse der Lane-Maps und finalen Lane-Maps mit unterschiedlichen Flottengrößen simuliert. Außerdem wurden für jedes Layout Benchmarks (alle Fahrzeuge nutzen den kürzest möglichen Weg) simuliert. Für alle Simulationsläufe wurden im Anschluss die dynamischen Performanz-Kriterien errechnet sowie alle „log-files“ abgespeichert, sodass jeder Lauf vollständig reproduzierbar war.

### ATP 3.4: Auswertung und kritische Reflexion der Ergebnisse

Im Folgenden werden die Erkenntnisse zum Lane-Konzept zu den vier in ATP 3.1 formulierten Hypothesen vorgestellt. Um den Rahmen dieses Berichts nicht zu sprengen, werden teilweise nur die Ergebnisse einzelner Layouts präsentiert, die dabei jedoch immer repräsentativ sind und stellvertretend für die Ergebnisse auf Basis einer Vielzahl an untersuchten Layouts und Szenarien stehen.

#### Hypothese 1

Mit Hilfe von Hypothese 1 sollte untersucht werden, ob die beschriebene Heuristik zur Erstellung einer Lane-Map (ATP 1.3) grundsätzlich in der Lage ist, die statischen beiden Performanzindikatoren (Länge, gewichtete Überlagerung) bzw. den statischen Gesamtwert zu senken. Dies soll hier beispielhaft anhand eines komplett leeren Layouts mit kreisförmig angeordneten Loadpoints aufgezeigt werden. Für die grundsätzliche Überprüfung der Hypothese waren jedoch weniger die konkreten Zahlen dieses Fallbeispiels, als mehr die grundsätzliche Entwicklung der Indikatoren im Laufe der Heuristik Iterationen ausschlaggebend.

Als Startlösung nimmt die Heuristik einen Extremfall einer Lane-Map an, bei der alle Lanes auf direkter Verbindung zwischen Start- und Zielpunkten liegen. Die Lanes sind also so kurz wie möglich. Die flächige Überlagerung ist allerdings sehr groß – quasi maximal. Im Laufe der Heuristik-Iterationen sollte die Überlagerung folglich stark sinken, während die Länge der Lanes (leicht) zunehmend sollte. Die genaue Ausprägung zwischen den beiden Effekten ist insbesondere abhängig von der gewählten Relation  $R$ , also ob der Fokus eher auf kurzen Wegen oder der Vermeidung von Überlagerungen liegt. Abbildung 22 zeigt die Entwicklung der beiden statischen Performanzindikatoren im Laufe der Heuristik Iterationen für unterschiedliche Werte von  $R$  (0, 10, 20, ...). Ergänzend dazu, gibt Tabelle 1 für dieses Layout die quantitativen Zahlenwerte und die Verbesserung der finalen Lane-Map im Vergleich zur Startlösung an.

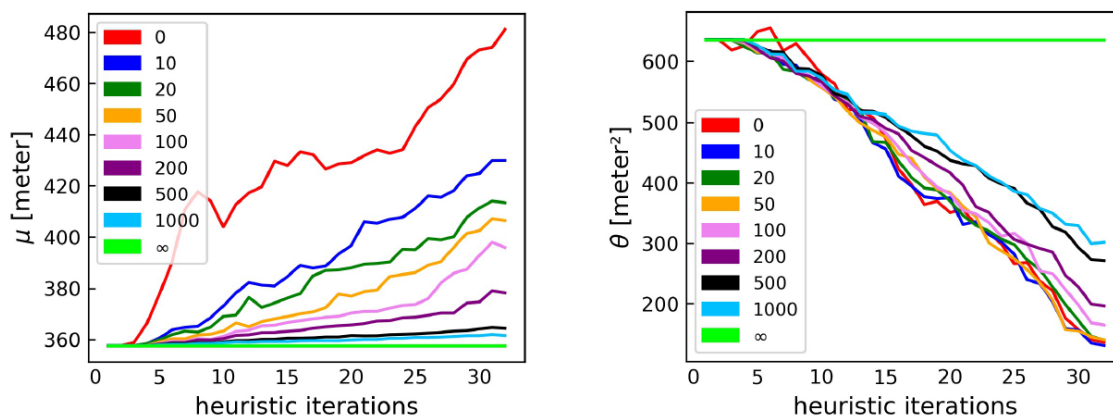


Abbildung 22: Veränderung der beiden statischen Performanzindikatoren Länge (links) und gewichtete Überlagerung (rechts) über die Heuristik Iterationen in Abhängigkeit von unterschiedlich gewichteten Zielkriterien  $R$  (Farben). Dabei ist  $R=0$  ein maximaler Fokus auf die Vermeidung von Überlagerung und  $R=\infty$  ein maximaler Fokus auf die Reduzierung der Länge.

Zusammenfassend ist zu erkennen, dass die Heuristik die gewichtete Überlagerung deutlich verringert, während die Gesamtlänge sich verschlechtert. Der Effekt auf den statischen Gesamtwert der Lösung ist positiv. Einzige Ausnahme ist die extreme Relation  $R=\infty$ , bei der die Startlösung bereits die ideale Lösung (mit minimalen Weglängen) darstellt. Ähnliche Verbesserungsquoten konnten auch für alle anderen untersuchten Layouts erreicht werden.

Zum besseren Verständnis zeigt Abbildung 23 drei finale Lane-Maps für das Flächenlayout, die mit unterschiedlichen Werten von  $R$  erstellt wurden ( $R = \infty$ ,  $R = 200$ ,  $R = 10$ ).

Tabelle 1: Vergleich zwischen Startlösung (0) und Ergebnis (1) in Bezug auf die gesamte Länge der Lanes ( $L$ ) und die gewichtete Überlagerung der Lanes ( $wA$ ), sowie das Verhältnis der statischen Performanzindikatoren ( $S_1/S_2$ ) bei unterschiedlicher Gewichtung der beiden statischen Performanzindikatoren  $R$ .

$R$ ( $L:wA$ )	$L_0$ [cm]	$wA_0$ [cm <sup>2</sup> ]	$L_1$ [cm]	$wA_1$ [cm <sup>2</sup> ]	$S_1/S_2$
<b>0 (0:1)</b>	358 E2	635 E4	481 E2	136 E4	21,4%
<b>10 (10:1)</b>	358 E2	635 E4	430 E2	131 E4	25,9%
<b>20 (20:1)</b>	358 E2	635 E4	413 E2	140 E4	31,5%
<b>50 (50:1)</b>	358 E2	635 E4	407 E2	140 E4	42,2%
<b>100 (100:1)</b>	358 E2	635 E4	396 E2	165 E4	56,5%
<b>200 (200:1)</b>	358 E2	635 E4	378 E2	196 E4	70,5%
<b>500 (500:1)</b>	358 E2	635 E4	364 E2	271 E4	86,4%
<b>1000 (1000:1)</b>	358 E2	635 E4	362 E2	302 E4	93%
$\infty$ ( <b>1:0</b> )	358 E2	635 E4	358 E2	635 E4	100%

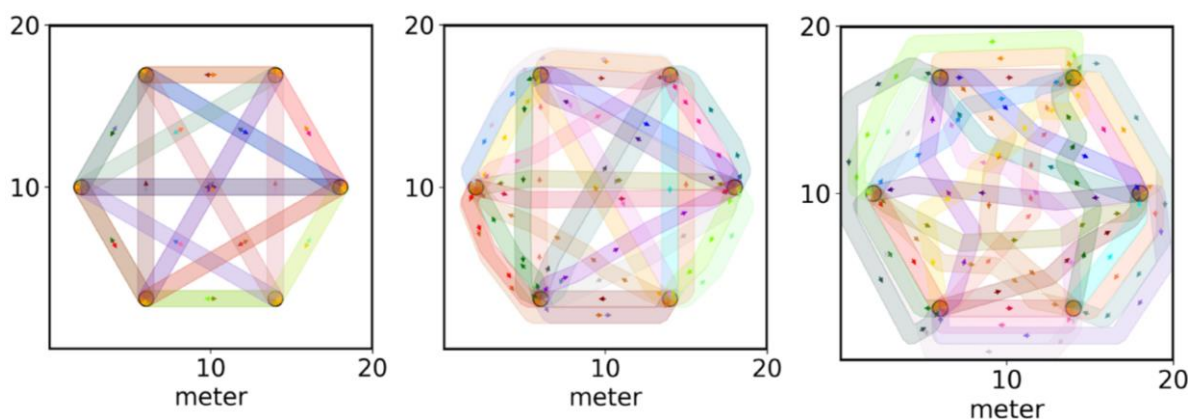


Abbildung 23: Drei beispielhafte Lane-Maps erstellt mit den Relationen  $R = \infty$  (links),  $R = 200$  (Mitte) und  $R = 10$  (rechts)

### Hypothese 2

Mit Hypothese 2 sollte getestet werden, ob eine bessere Lane-Map (bewertet nach statischen Indikatoren) auch gleichzeitig zu einer besseren Leistung des Transportsystems führt – also konkret auch zu besseren dynamischen Indikatoren. Hierzu wurde ein Transportsystem auf Basis von Startlösung, Zwischenergebnissen sowie Endergebnis der Lane-Maps simuliert und basierend auf den Simulationsergebnissen die dynamischen Performanzindikatoren berechnet. Anschließend wurde untersucht, ob sich zwischen statischen und dynamischen Indikatoren eine eindeutige Korrelation feststellen lässt, bzw. wie stark die Korrelation ist.

Als geeigneter Koeffizient wurde der Rangkorrelationskoeffizient nach Spearman (1987) bestimmt. Dieser gibt an, wie gut der Zusammenhang durch eine monotone Funktion beschrieben werden kann. Der Spearman Koeffizient nimmt Werte zwischen -1 und 1 an, wobei +1 für eine perfekt positive Rangkorrelation steht (monoton steigende Funktion) und -1 für eine perfekt negative Rangkorrelation (monoton sinkende Funktion). Im Gegensatz zum bekannten Korrelationskoeffizienten nach Paerson (1895), wird bei der Berechnung eines Rangkorrelationskoeffizienten erstmal keine Annahme eines linearen Zusammenhangs unterstellt.

Im Folgenden wird die Rangkorrelation zwischen gewichteter Überlagerung und dem Stauindex, zwischen Länge und dem Distanzindex sowie zwischen dem statischen Gesamtwert und der Anzahl an Transporten aufgezeigt.

### Rangkorrelation zwischen Überlagerung und Stauindex

Tabelle 2 gibt für das beschriebene Flächenlayout den Spearman-Korrelationskoeffizienten zwischen der statischen, gewichteten Überschneidung aller Lanes und dem Stauindex für unterschiedliche Lane-Maps (Koeffizienten von R) und unterschiedliche Flottengrößen (1-15) an. In fast allen Fällen konnte eine sehr stark positive Rangkorrelation ausgemacht werden. Eine Verringerung der gewichteten Überlagerung, wie von der Heuristik sukzessive erreicht wird (s. Experiment zu Hypothese 1), führte bei Anwendung der Lane-Map für ein Transportsystem also unmittelbar zu weniger Zeitverlusten durch Behinderungen zwischen verschiedenen Fahrzeugen. Bei Szenarien mit einem einzigen Fahrzeug ist der Stauindex immer konstant 1, weshalb in diesen Fällen keine sinnvolle Korrelation berechnet werden konnte. Eine Korrelation für die Lane-Maps mit  $R=\infty$  konnte ebenfalls nicht sinnvoll berechnet werden, da es bei diesen Lane-Maps zwischen Startlösung, Zwischenlösungen und Endergebnis praktisch keinen Unterschied gibt: Von den Fahrzeugen werden immer die kürzesten Lanes gefahren.

Tabelle 2: Spearman-Korrelationskoeffizient zwischen gewichteten Überschneidung aller Lanes (statischer Index) und dem Stauindex (dynamischer Index) in Abhängigkeit von R und der Anzahl der Fahrzeuge (1-15)

R	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
0		90	98	98	98	98	98	98	99	99	98	99	99	99	99
10		96	97	99	100	99	99	99	99	99	99	100	99	99	100
20		99	100	100	98	99	100	100	100	100	100	100	100	100	100
50		92	99	99	99	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100
100		89	99	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	99	100
200		96	93	99	97	98	99	99	99	99	100	100	100	100	100
500		89	93	99	95	98	98	99	99	99	99	99	99	99	99
1000		90	92	91	98	99	99	99	99	98	98	99	98	98	98
$\infty$	not sensible														

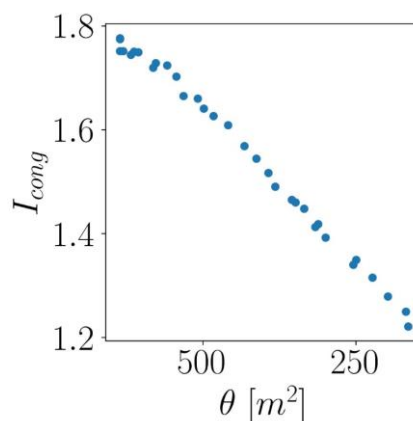


Abbildung 24: beispielhafter Zusammenhang aus gewichteter Überlagerung und Stauindex ( $I_{cong}$ ) für  $R= 100$  und 9 Fahrzeuge

Zur besseren Verdeutlichung der zugrundeliegenden Ergebnisse, zeigt Abbildung 24 beispielhaft die konkrete Verteilung der Werte, die hinter dem Rangkorrelationskoeffizienten für den Fall  $R=100$  und einer Flottengröße von 9 Fahrzeugen steht. Die invertierte Abszisse stellt dabei die Fläche gewichtete Überschneidung dar, die im Laufe der heuristischen Iterationen von ca.  $600\ m^2$  auf ca.  $200\ m^2$  gesenkt wird. Die Ordinate stellt den entsprechenden Stauindex dar, der von ca. 1.8 auf ca. 1.2 sinkt.

### Rangkorrelation zwischen Länge und Distanzindex

Analog zum vorigen Abschnitt, stellt Tabelle 3 die Korrelation zwischen der Länge aller Lanes und dem Distanzindex für das beschriebene Flächenlayout dar. Auch hier waren sehr starke Korrelationen für alle Lane-Maps (verschiedene Werte von R) und Flottengrößen (1-15) nachweisbar, d.h. längere Lanes führten auch direkt zu einer längeren Zeit verursacht durch die Fahrdistanz.

Tabelle 3: Spearman-Korrelationskoeffizient zwischen der Länge aller Lanes (statischer Index) und dem Distanzindex (dynamischer Index) in Abhängigkeit von R und der Anzahl der Fahrzeuge (1-15)

R	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
0	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
10	99	100	100	100	100	99	99	100	100	100	100	99	100	100	100
20	99	99	99	99	99	99	99	99	99	99	99	99	99	99	99
50	99	99	99	99	99	99	99	99	99	99	99	99	99	99	99
100	99	99	99	99	99	99	99	99	99	99	99	99	99	99	99
200	99	100	99	99	99	99	100	100	99	99	99	99	99	99	99
500	88	89	88	89	88	88	88	89	89	89	89	89	89	89	87
1000	78	81	80	79	80	80	80	80	81	80	81	81	81	80	80
$\infty$	not sensible														

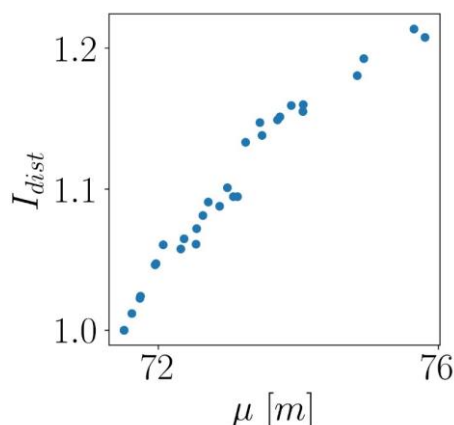


Abbildung 25: beispielhafter Zusammenhang aus Länge und Distanzindex ( $I_{dist}$ ) für  $R=200$  und 7 Fahrzeuge

Beispielhaft werden die konkreten Werte hinter einer Korrelation in Abbildung 25 dargestellt. Die Gesamtlänge der Lanes steigt im Laufe der Heuristik von ca. 72 m auf ca. 76 m, während der Distanzindex ( $I_{dist}$ ) von 1 auf ca. 1.2 steigt.

### Rangkorrelation zwischen statischem Gesamtwert und der Gesamtanzahl an Fahrten

Während die beiden vorangegangenen Analysen (Korrelation zwischen Überlagerung und Stauindex sowie Korrelation zwischen Länge und Distanzindex) noch relativ erwartbare Ergebnisse lieferten, ist der Zusammenhang zwischen dem statischen Gesamtwert einer Lane-Map (Kombination aus gewichteter Überlagerung und Distanz) und der Anzahl an insgesamt erreichbaren Fahrten innerhalb eines bestimmten Zeitraums (Durchsatz) nicht mehr ganz so naheliegend.

Die Rangkorrelation zwischen beiden Größen für das Flächenlayout, in Abhängigkeit verschiedener Lane-Maps (Werte von R) und Flottengrößen, ist in Tabelle 4 dargestellt. Dabei bedeutet -100 eine perfekte, negative Korrelation, d.h. ein niedriger statischer Gesamtwert (wie

er im Laufe der Heuristik angestrebt wird) führt analog zu steigenden Transportzahlen. Umgekehrt bedeutet eine stark positive Korrelation, dass eine nach statischen Maßstäben gute Lane-Map zu einer niedrigeren Anzahl an Transporten führt.

Tabelle 4: Rangkorrelationskoeffizient zwischen statischem Gesamtwert und Anzahl Fahrten nach Spearman in Abhängigkeit unterschiedlicher Lane-Maps (R) sowie der Flottengröße (1-15)

R	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
0	96	91	88	90	88	71	61	26	-2	-39	-63	-74	-85	-84	-89
10	99	93	93	97	87	66	2	-69	-88	-92	-94	-95	-94	-94	-95
20	99	99	99	96	69	-24	-74	-87	-88	-93	-93	-94	-95	-94	-95
50	99	92	95	79	48	-46	-84	-92	-96	-96	-97	-96	-97	-97	-98
100	99	86	86	53	-49	-76	-82	-85	-88	-87	-91	-95	-96	-94	-97
200	99	92	86	13	-77	-87	-91	-93	-95	-96	-97	-99	-97	-96	-95
500	86	-27	-89	-96	-95	-96	-97	-96	-99	-93	-97	-96	-98	-95	-94
1000	62	-84	-93	-92	-97	-97	-97	-97	-97	-96	-97	-97	-95	-94	-92
$\infty$	not sensible														

Grundsätzlich kann in Tabelle 4 eine Zweiteilung der Korrelation festgestellt werden. Für eher geringe Flottengrößen besteht eher ein stark positiver Zusammenhang, also je besser eine Lane-Map nach statischen Kriterien bewertet wird, desto niedriger ist der erreichbare Durchsatz oder anders ausgedrückt: Die Heuristik verschlechtert das Ergebnis sogar. Umgekehrt besteht für große Flottengrößen ein stark negativer Zusammenhang – eine statisch gut bewertete Lane-Map führt auch äquivalent zu einem hohen Durchsatz. Die Flottengröße bei welcher der Wechsel zwischen einer positiven auf eine negative Korrelation stattfindet ist dabei abhängig von R. Eine Lane-Map basierend auf einem kleinen Wert für R (z. B. R=10), führt erst ab 8 Fahrzeugen zu einem vorteilhaften Zusammenhang. Dagegen ist eine Lane-Map basierend auf großen Werten für R (z. B. R= 500) bereits bei drei Fahrzeugen vorteilhaft.

Grundsätzlich kann hier festgehalten werden, dass für die meisten Konstellationen ein vorteilhafter Zusammenhang aus statischem Gesamtwert sowie Anzahl Transporte besteht. Ein sehr ähnliches Bild ergibt sich auch für den Zusammenhang aus statischem Gesamtwert und dem Verzögerungsindex. Jedoch sollte eine generierte Lane-Map nicht als pauschal vorteilhaft für jede Anzahl an Fahrzeugen betrachtet werden.

Experiment 3 beleuchtete diesen Zusammenhang mit quantitativen Ergebnissen (nicht nur mit einer Rangkorrelation) und geht der Frage nach, ob man basierend auf diesen Unterschieden in der Qualität der Lane-Maps auch eine Lane-Map gezielt für eine Flottengröße maßschneidern kann.

## Fazit

Ähnliche Zusammenhänge, wie die hier beispielhaft für das beschriebene Flächenlayout dargestellten, lassen sich für alle Layouts, dynamischen Indikatoren, Flottengrößen und Werte von R finden. Es kann somit gefolgert werden, dass in den meisten Fällen eine bessere Lane-Map immer auch zu einem performanteren Transportsystem führt. Trotzdem sind einzelne Lane-Maps bzw. Werte von R für bestimmte Konstellationen besser geeignet als andere. Ein Zusammenhang, der im nächsten Experiment klarer beleuchtet wurde.

Abbildung 26 zeigt zusammenfassend die Entwicklungen der vier definierten dynamischen Indikatoren in Abhängigkeit vom statischen Gesamtwert (S) für das Flächenlayout, basierend auf R=100 und simuliert mit 9 Fahrzeugen. Experiment 1 hat bereits gezeigt, dass die Heuristik

ausgehend von einer Startlösung die Länge der Lanes erhöht, während die Überlagerungen reduziert werden. Durch die in Experiment 2 nachgewiesenen Korrelationen kommt es dazu, dass der Distanzindex ( $I_{dist}$ ) kontinuierlich steigt, während der Stauindex ( $I_{cong}$ ) entsprechend sinkt. Für die im Beispiel gewählten Parameter ( $R=100$  und  $f=9$ ) kann ein eindeutig vorteilhafter Zusammenhang zwischen der Anzahl an Transporten und dem statischen Gesamtwert festgestellt werden (Tabelle 4). Folglich nimmt die Anzahl an Transporten ( $I_{trip}$ ) zu, während der Verzögerungsindex ( $I_{delay}$ ) kontinuierlich abnimmt.

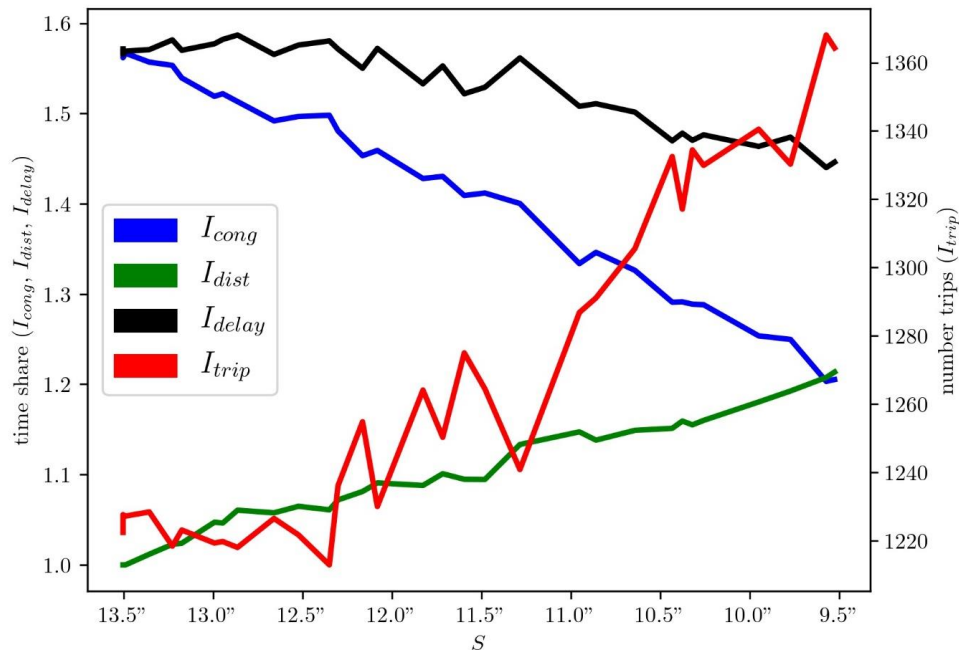


Abbildung 26: Zusammenfassende Darstellung der Entwicklung der vier dynamischen Indikatoren ( $I_{cong}$ ,  $I_{dist}$ ,  $I_{delay}$ ,  $I_{trip}$ ) in Abhängigkeit vom statischen Score (S), für ein Flächenlayout mit  $R = 100$  und 9 Fahrzeugen

### Hypothese 3

Grundsätzlich erstellt die Heuristik eine Lane-Map für ein gegebenes Layout und eine bestimmte Relation der Zielkriterien (R). Nachdem Experiment 2 aufzeigte, dass dies je nach Layout, R-Wert und Flottengröße zu unterschiedlich guten dynamischen Performanzindikatoren führt, sollte mit Experiment 3 überprüft werden, ob mit der richtigen Wahl der Parameter eine Lane-Map auch gezielt an konkretes Szenario – also ein Layout und eine Flottengröße – angepasst werden kann. Dabei bietet sich insbesondere das Verhältnis der beiden statischen Performanzindikatoren R (Länge aller Lanes, Überlagerung aller Lanes) als zentrale Stellschraube an, während die Flottengröße in aller Regel bekannt sein sollte. Im Gegensatz zu Experiment 2 wurden in Experiment 3 nicht allgemeine Korrelationen zwischen statischen und dynamischen Indikatoren untersucht, sondern die konkret erreichbare (maximale) Leistung des Transportsystems.

Die Idee ist dabei folgende: Ein starker Fokus auf die Reduzierung der Länge von Lanes (also große Werte von R) ergibt kurze Lanes mit einem hohen Maß an Überschneidungen – was potenziell vorteilhaft für kleinere Fahrzeugflotten ist. Eine starke Gewichtung auf die Minimierung flächiger Überschneidungen und dabei insb. Überschneiden gegenläufiger Lanes (eher kleine Werte von R), ist potenziell vorteilhaft für eher größere Flotten. Grundsätzlich sollte es deshalb möglich sein, in Abhängigkeit der Flottengröße den geeigneten Wert für R zu

definieren und somit für ein bestimmtes Layout eine auf die Flottengröße maßgeschneiderte Lane-Map zu erstellen.

Um dies zu untersuchen, wurden für alle relevanten Layouts Lane-Maps mit unterschiedlichen Werten von R generiert und jede Lane-Map mit unterschiedlichen Fahrzeuganzahlen simuliert. Die sich ergebenden Zusammenhänge werden im Folgenden an zwei repräsentativen Beispielen verdeutlicht.

**Beispiel 1**

Tabelle 5 zeigt den erreichbaren Gesamtdurchsatz für ein fabrikähnliches Layout in Abhängigkeit von R und der Flottengröße (1-10 Fahrzeuge). In Ergänzung zur Tabelle ist in Abbildung 27 ein dreidimensionaler Plot mit den entsprechenden Werten abgebildet, wobei der beste Wert je Flottengröße immer rot markiert ist.

Tabelle 5: Beispiel 1 – Anzahl Transporte in Abhängigkeit von Lane-Map (R) und Flottengröße (1-10) für ein fabrikähnliches Layout.

	R f	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Layout 3	0	66	130	189	245	298	346	394	440	472	512
	10	69	132	197	251	306	354	403	440	484	515
	20	68	132	193	251	304	356	400	444	485	518
	50	73	142	207	267	325	379	426	473	520	556
	100	76	146	210	271	326	372	418	459	500	535
	200	76	146	211	270	327	376	423	460	492	524
	500	86	160	219	276	324	362	396	424	461	479
	1000	92	161	210	255	280	310	329	354	379	404
	∞	94	158	198	232	251	281	306	320	348	363

Für eine Flottengröße von eins führt die extreme Relation der Zielkriterien ( $R=\infty$ ) – also Lanes entlang der kürzesten Verbindung – zu den meisten Transporten. Aber bereits ab zwei Fahrzeugen erreicht die Lane-Map basierend auf  $R=1000$  den höchsten Durchsatz. Diese Entwicklung setzt sich weiter fort, bis für die maximale Flottengröße von 10 Fahrzeugen die Lane-Map basierend auf  $R=50$  zur besten Performanz führt. Der Zusammenhang zwischen der Flottengröße und der besten Lane-Map ist ebenfalls durch die roten Säulen in Abbildung 27 verdeutlicht.

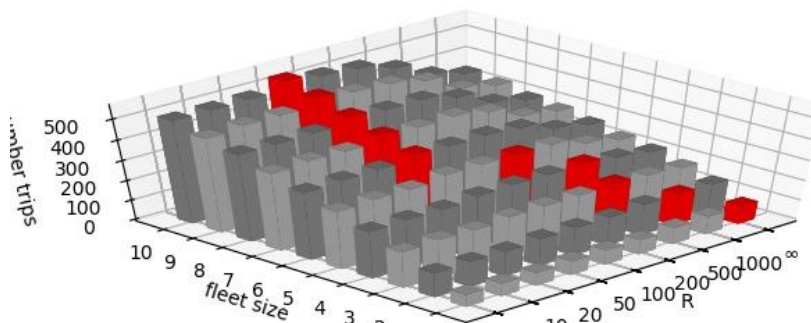


Abbildung 27: Beispiel 1 – Anzahl Transporte (number trips) in Abhängigkeit der Flottengröße (fleet size) und der Lane-Map (R). Der beste Werte je Flottengröße ist rot markiert.



## Beispiel 2

Tabelle 6: Beispiel 2 – Anzahl Transporte in Abhängigkeit der Lane-Map (R) und Flottengröße (1-15) für ein fabrikähnliches Layout

R f	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
0	119	233	343	450	557	655	749	842	928	1007	1094	1161	1236	1296	1367
10	125	246	362	475	583	683	782	871	960	1040	1122	1183	1242	1318	1343
20	125	247	364	470	576	671	766	844	934	1003	1072	1123	1189	1250	1297
50	132	254	378	491	600	697	798	884	949	1038	1096	1162	1212	1274	1294
100	145	290	426	549	671	786	892	981	1067	1150	1222	1274	1314	1383	1407
200	157	307	450	576	696	805	908	981	1074	1146	1207	1240	1298	1318	1379
500	180	346	495	618	735	841	942	983	1067	1108	1136	1155	1224	1258	1263
1000	200	373	530	648	764	846	907	970	1019	1043	1085	1132	1153	1197	1239
$\infty$	207	366	502	598	678	740	789	836	889	929	965	995	1013	1041	1064

Ein weiteres Beispiel mit einem größeren fabrikähnlichen Layout führt zu einem ähnlichen Zusammenhang. Die erreichbaren Transporte in Abhängigkeit von R und unterschiedlichen Flottengrößen (1-15) sind in Tabelle 6 gelistet und in Abbildung 28 visualisiert. Auch hier ist erkennbar: je größer die Flottengröße, desto kleiner sollten die Werte von R sein.

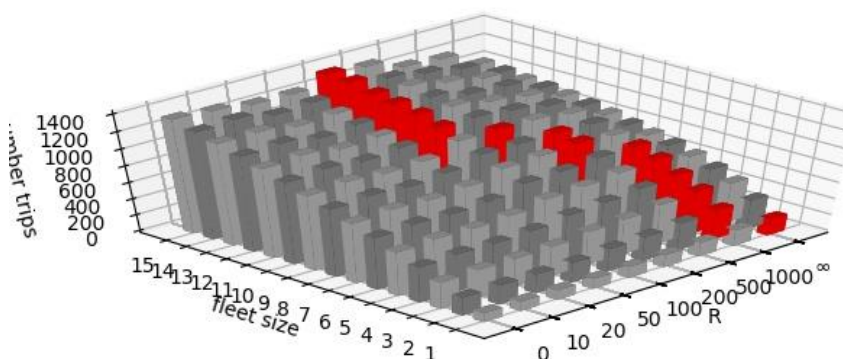


Abbildung 28: Beispiel 2 – Anzahl Transporte (number trips) in Abhängigkeit der Flottengröße (fleet size) und der Lane-Map (R). Der beste Werte je Flottengröße ist rot markiert.

## Fazit

Mit der richtigen Wahl von R kann eine Lane-Map gezielt an ein Layout sowie eine bestimmte Anzahl an Fahrzeugen angepasst werden. Dabei ist die Wahl des kürzesten Weges (Lane-Map basierend auf  $R=\infty$ ) in allen getesteten Layouts nur für eine Flottengröße von eins am besten. Je größer die Flottengröße, desto mehr ergeben Umwege Sinn. Im Vergleich zur schlechtesten Lane-Map, kann die Wahl der besten Lane-Map dabei durchaus zu Verbesserungen zwischen 15% und 20% führen – in einzelnen Fällen sogar noch deutlich mehr.

Es kann jedoch kein Zusammenhang zwischen Flottengröße und R, losgelöst vom konkreten Layout, bestimmt werden – es muss also das Zusammenspiel aller drei Größen gleichzeitig betrachtet werden.

## **AP 4 Ableitung des Regelwerks**

Das grundsätzliche Ziel dieses Arbeitspakets war die Ableitung allgemeingültiger Aussagen und Vorgehensweisen zum organisierten Routing freinavigierender Transportfahrzeuge aus der Auswertung der Experimente. Hierzu wurden die wichtigsten Ergebnisse zu Lane-Konzept, Reinforcement Learning und der Einbeziehung dynamischer Hindernisse in die lokale Routenplanung in ROS aggregiert dargestellt (ATP 4.1) sowie Allgemeingültiges formuliert (ATP 4.2).

### **ATP 4.1: Aggregation der Ergebnisse**

#### ***Das Lane-Konzept***

Grundsätzlich ist die für das Lane-Konzept erstellte Heuristik in der Lage, für alle getesteten Layouts eine Lane-Map zu erstellen und die statischen Performanzindikatoren (also Länge und gewichtete Überlagerung) sowie den statischen Gesamtwert zu senken. Da die Heuristik mit einer trivialen Startlösung startet (minimale Wege und praktisch maximale Überschneidungen), ist die Verbesserung des statischen Gesamtwertes umso höher, je stärker das relative Gewicht auf der Minderung der Überlagerung liegt.

Die dynamischen Performanzindikatoren (Stauindex, Distanzindex, Verzögerungsindex und erreichbare Anzahl an Fahrten) für eine konkrete Lane-Map können nur mittels Simulation festgestellt werden. Dabei zeigt sich, dass in der Regel sehr hohe Korrelationen zwischen den statischen und dynamischen Indikatoren bestehen, d.h. eine nach statischen Kriterien optimierte Lane-Map kann auch als vorteilhaft für das Transportsystem gewertet werden.

Trotzdem gilt dieser Zusammenhang nicht pauschal für alle Konstellationen. Insbesondere das relative Verhältnis der Zielkriterien (R) muss nach der Fahrzeuganzahl ausgerichtet werden, da hier die Ergebnisse stark schwanken. Grundsätzlich lässt sich für alle Layouts festhalten, dass hohe Werte von R, z. B.  $R=1000$ , zu einer besseren Lane-Map für kleinere Fahrzeugflotten führen, während kleinere Werte von R, z. B.  $R=20$ , eher zu besseren Lane-Maps für größere Flotten führen. Mit den Werten dazwischen kann entsprechend abgestuft werden. Folglich sollte nicht eine einzige Lane-Map für ein bestimmtes Layout erstellt werden. Stattdessen sollte eine Lane-Map abhängig („maßgeschneidert“) sein von Layout und Flottengröße.

Auch wenn die Heuristik für jedes Layout eine nach statischen Indikatoren vorteilhafte Lane-Map erstellen kann, so hat die Untersuchung der dynamischen Indikatoren aufgezeigt, dass das Ergebnis nicht bei jedem Layout gleich vorteilhaft ist. Insbesondere bei Layouts mit viel freier Fläche oder Gängen, in denen mindestens zwei nebeneinanderliegende Spuren möglich sind, kann das Lane-Konzept seine Stärken ausspielen. Schwächen wurden hingegen in Layouts mit wenig freier Fläche sowie bei einspurigen Gängen identifiziert.

Ein Vergleich der globalen Streckenwahl zu „Benchmarks“ ist nur eingeschränkt sinnvoll, da das Lane-Konzept als offline berechnete Ergänzung zu anderen (online) Ansätzen betrachtet werden kann – und eben nicht als alleinstehende Alternative. Beispielsweise bei dezentralen Ansätzen können die globalen Routen via Lanes bestimmt werden und das lokale Konfliktauflösen geschieht durch die Potenzialfeldmethode. Bei zentralen Ansätzen können die Lanes beispielsweise als erste Startlösung betrachtet werden, von denen aus weiter abgestimmt/optimiert werden kann. Zusätzlich kann die globale Streckenwahl ohnehin nie losgelöst von der lokalen Routenplanung betrachtet werden.

Nichtsdestotrotz kann in den Experimenten der Vergleich mit einer relativ schlichten Strategie zur globalen Routenplanung gezogen werden: mit der Wahl des kürzesten Weges. Diese entspricht nämlich genau einer Lane-Map erstellt mit  $R=\infty$ . So zeigen die Experimente, dass eine Lane-Map der einfachen Benchmark Strategie praktisch in allen Layouts und bei allen Flottengrößen größer 1 überlegen ist. Nur bei einem einzigen Fahrzeug und somit in Szenarien ohne mögliche Konflikte, ist die pauschale Wahl des kürzesten Weges die bessere Alternative.

### ***Reinforcement Learning***

Der Ansatz der Streckenwahl mittels RL zeigte für kleinere Layouts vielversprechende Ergebnisse: Vorteilhafte Routen wurden gehäuft gewählt, was zu einer Verringerung der Routingkonflikte führte. Jedoch konnte insbesondere für realistische, große Layout- und Flottengrößen keine Verbesserungen zu einfachen Benchmark-Strategien (z. B. pauschale Wahl des kürzesten Weges) erreicht werden bzw. war die Lernzeit unverhältnismäßig lange.

Auch im Rahmen der Feldstudien mit den hauseigenen Robotern wurden Vorstudien durchgeführt. Hier stellte sich leider heraus, dass die Laborfahrzeuge unerwartet große Probleme beim Einsatz mehrerer Fahrzeuge auf engem Raum haben. Die Erkenntnisse der Feldexperimente sind somit nur teilweise generalisierbar und auf die Wirklichkeit von FTS in der Intralogistik übertragbar. Auch führte eine schwankende Positioniergenauigkeit der Fahrzeuge zu einer schlechten Wiederholgenauigkeit und somit zu stark schwankenden Ergebnissen im Einsatz. Die Erkenntnisse über die Probleme der Laborfahrzeuge auf engem Raum wurden ebenfalls im Rahmen einer Studienarbeit („Vorbereitung eines Demonstrators zur Einsatzplanung von FTS“) bestätigt. Trotzdem lieferten die Feldexperimente in Ergänzung zu den Simulationsexperimenten ein wichtiges Bild zu möglichen Problemen bei Übertragung der Erkenntnisse auf die Praxis.

### ***Integration dynamischer Objekte in die globale Routenplanung bei ROS***

Dynamische Objekte können die Routenplanung eines mobilen Roboters durch die Übermittlung von Position oder die intendierte Route beeinflussen. In einem Experiment wurde untersucht, wie sich Risiken einer Kollision bezüglich beider Möglichkeiten bei Integration in die Routenplanung des mobilen Roboters verändern.

Als Metrik wurde der Abstand zwischen den Positionen von Objekt und Roboter (vgl. Abbildung 29) einerseits mit Einbindung der geplanten Route (grün), andererseits nur unter Berücksichtigung der Position des Objektes (grau) entlang der Zeit gemessen. Das Ergebnis zeigt, dass die Abstände in beiden Situationen weitestgehend übereinstimmten, allerdings bei den Zeitpunkten  $s = 133$  und  $s = 160$  die Distanz zwischen Objekt und Roboter ( $\sim 0,5$  m bzw.  $\sim 1,5$  m) mit der Integration des Pfades des dynamischen Objektes deutlich größer war. Zu diesen Zeitpunkten wurde durch den Einfluss der Routenplanung die Kollisionsgefahr zwischen mobilem Roboter und dynamischen Objekt verringert.

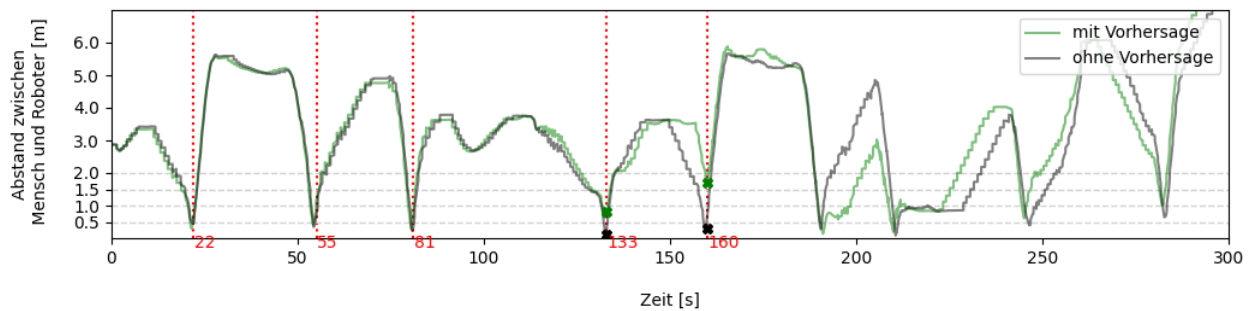


Abbildung 29: Veränderung des Abstandes zwischen dynamischen Objekt und Roboter während eines Versuchsablaufes. Im Unterschied zur Situation, in der nur die Position des Objektes (grau) in die Routenplanung einfluss, konnten bei Beachtung der Bewegungsprognose (grün) an zwei Zeitpunkten ( $s = 133$  und  $s = 160$ ) mögliche Kollisionen prospektiv unterbunden werden. (vgl. Scherstjanoi u. a. 2021)

## ATP 4.2: Formulierung allgemeingültiger Regeln

Ziel dieses Arbeitspakets war ursprünglich die Formulierung möglichst allgemeingültiger, statischer Regeln für die globale Streckenwahl zum performanten Betrieb einer Flotte autonomer, freinavigierender Transportfahrzeuge. Dabei deutete sich bereits im Projektverlauf relativ schnell an, dass keine einfachen statischen und gleichzeitig allgemeingültigen Regeln formulierbar sind. Eine Streckenwahl, welche eine geringe Konfliktwahrscheinlichkeit mit einem möglichst kurzen Weg vereint ist zu sehr abhängig von Größen wie Layout, Flottengröße, Fahrzeugkinematik oder Art und Anzahl der durchzuführenden Transporte.

Trotzdem treten erstaunlich klare Zusammenhänge auf, die in deutliche Handlungsempfehlungen analog des entwickelten Lane-Konzepts überführt werden können. Anstatt eines statischen oder leicht veränderlichen Regelwerks wurde im Forschungsprojekt eine Methode erstellt, die ein angepasstes Regelwerk für jedes denkbare Layout sowie eine Flottengröße ermöglicht.

Folgende klaren Regeln können im Zusammenhang mit dem Lane-Konzept festgehalten werden:

- Die Wahl der globalen Strecke beeinflusst die Performanz einer Fahrzeugflotte.
- Zwei wichtige Kriterien bei der globalen Routenplanung sind die Reduzierung der Länge der Strecke und die Reduzierung der Konfliktwahrscheinlichkeit.
- Bei einer typischerweise rein statisch durchgeführten Betrachtung der globalen Routenwahl sind beide Ziele in der Regel gegensätzlich: um eine Reduzierung der Konfliktwahrscheinlichkeit zu erreichen, muss die Länge der Strecke zunehmen bzw. um die Strecke zu kürzen, nimmt die Konfliktwahrscheinlichkeit zu.
- Die Einführung a priori definierter Verkehrsregeln für die globale Streckenwahl führt zu einer Verbesserung der Transportsystemleistung, im Sinne von weniger Konflikten, kürzeren Fahrzeiten sowie höherem Durchsatz.
- Das im Forschungsprojekt beschriebene Lane-Konzept bietet eine Möglichkeit, automatisiert für beliebige Layouts Fahrkorridore und abgestimmte Vorzugsfahrrichtungen für alle Transportstrecken zu ermitteln.
- Dabei wird die Konfliktwahrscheinlichkeit a priori deutlich gesenkt, während die durchschnittlichen Distanzen oft nur geringfügig zunehmen.
- Eine Lane-Map kann über die Wahl der richtigen Gewichtung zwischen „Länge der Lanes“ und „Reduzierung der Überlagerung der Lanes“ exakt für eine bestimmte Flottengröße maßgeschneidert werden.

- Dabei sind kurze Strecken mit erhöhter Konfliktwahrscheinlichkeit vorteilhaft für kleinere Flotten, während längere Strecken mit niedrigerer Konfliktwahrscheinlichkeit vorteilhaft für größere Flotten sind.
- Über die Gewichtung der einzelnen Lanes bei der Erstellung der Lane-Map kann implizit ein beliebiger Materialfluss abgebildet werden.
- Die richtige Gewichtung für eine bestimmte Flottengröße in einem Layout, kann nur mittels Simulation und Berechnung dynamischer Performanzindikatoren ermittelt werden.
- Allgemeingültige Regeln lassen sich auch nicht für eine bestimmte Fahrzeugdichte ableiten. Einflussgrößen wie Layout, Fahrzeugkinematik und Materialfluss dürfen nicht einfach vernachlässigt werden.

## **AP 5 Dissemination und Dokumentation**

Die Dokumentation des Projektverlaufs und der Projektergebnisse im Rahmen von AP 5 fand parallel und fortwährend zur restlichen Projektbearbeitung statt. Zuvorderst wurden drei Zwischenberichte (2019, 2020, 2021) und der vorliegende Abschlussbericht angefertigt.

Eine ausführliche Auflistung aller Transfermaßnahmen (Dissemination) findet sich in Tabelle 8. Insbesondere wurden zahlreiche Publikationen (sowohl wissenschaftliche Journals als auch Zeitschriften mit Breitenwirkung in der Wirtschaft) zum Projektablauf und zu den zentralen Projektergebnissen erstellt und publiziert sowie Vorträge auf Fachkonferenzen gehalten. Im Rahmen der Arbeit wurden zahlreiche wissenschaftliche, studentische Arbeiten erstellt. Zusätzlich gingen die Ergebnisse in Vorlesungen ein. Zentrale Implementierungen wurden auf *Repositorien* bereitgestellt. Außerdem fanden im Projektzeitraum zahlreiche bilaterale Firmenkontakte und insgesamt vier Sitzungen des projektbegleitenden Ausschusses statt.

## **Darstellung des wissenschaftlich-technischen und wirtschaftlichen Nutzens der erzielten Ergebnisse insbesondere für KMU sowie ihres innovativen Beitrags und ihrer industriellen Anwendungsmöglichkeiten**

Im Zusammenhang des Forschungsvorhabens SVAT wurden verschiedene Konzepte zur Konfliktvermeidung freinavigierender Transportfahrzeuge in der Intralogistik beschrieben und der vielversprechendste und am besten konfigurierbare Ansatz – das Lane-Konzept – im Detail analysiert.

Bei Anwendung des Lane-Konzepts auf die globale Routenplanung einer Flotte freinavigierender Transportfahrzeuge, ist mit einer deutlich reduzierten Anzahl an Konflikten zwischen den freinavigierenden, autonomen Fahrzeugen zu rechnen, was zu geringen Stauzeiten und somit kürzeren Fahrzeiten führt. In letzter Konsequenz kann für die Transportfahrzeuge somit mit geringeren Fahrzeiten, Zugriffzeiten und einem höheren Durchsatz gerechnet werden.

Grundsätzlich können Lanes für beliebige Layouts erstellt werden und lassen sich sogar an Flottengröße und zugrundeliegenden Transportfluss anpassen. Das beschriebene Verfahren ist mit etablierten Ansätzen zur lokalen Routenplanung (Konfliktauflösung, Deadlock-Vermeidung, etc.) kombinierbar. Trotzdem ist kein zusätzlicher Berechnungs- und Abstimmungsaufwand während des produktiven Betriebs nötig, da die Berechnungen der Lane-Map vorher erfolgen. Im Hauptteil dieses Berichts wurden Konzept, Anwendungsmöglichkeiten sowie Vorteile detailliert dargelegt.

KmU können von den Ergebnissen des Forschungsprojekts in drei verschiedenen Rollen profitieren: als Anwender, Hersteller und Berater.

### **KmU als Anwender**

Fahrerlose Transportsysteme für den innerbetrieblichen Transport sind insbesondere für kmU im Allgemeinen eine vorteilhafte Lösung. Die wichtigsten Gründe hierfür sind:

- Skalierbarkeit: Durch die Anzahl der Fahrzeuge kann ein Transportsystem genau an die Transportaufgabe angepasst werden.
- Flexibilität: Ein FTS ist für beliebige Transportaufgaben bzw. Lasten geeignet. Grundsätzlich sind die Fahrzeuge in allen Layouts einsetzbar.
- Kostengünstige Anschaffung: Im Verhältnis zu alternativen Transportsysteme, sind FTS als kostengünstig einzuschätzen, insbesondere da keine Personalkosten anfallen und sie 24/7 einsetzbar sind.

Mit autonomen, freinavigierenden AMR wird aktuell (und in den kommenden Jahren) eine technisch neue Generation dieser Systeme auf den Markt kommen. Jedoch sind bisher die Einstiegshürden (insbesondere für kmU) relativ hoch, weshalb aktuell nur wenig größere Flotten von AMR für den innerbetrieblichen Transport im Einsatz sind.

Die im Forschungsprojekt erarbeiteten Konzepte mit den genannten Vorteilen, unterstützen insbesondere kmU diese Einstiegshürden zu senken – kmU haben die Möglichkeit, leichter am neuesten Stand der Technik teilzuhaben. Insbesondere die Erkenntnis, dass das Lane-Konzept

an beliebige Layouts, Materialflüsse und Flottengrößen angepasst werden kann, ist für kmU vorteilhaft, da diese in der Regel sehr heterogene Layouts und Materialflüsse aufweisen.

### **KmU als Hersteller**

Im Gegensatz zu klassischen Stapler- oder Routenzugherstellern, sind Hersteller autonomer Transportplattformen freinavigierender Fahrzeuge oft hochspezialisierte kmU, die bis dato den Fokus ihrer Entwicklungsarbeiten meistens auf technische Aspekte ihrer Fahrzeuge legten. Die Herausforderungen der Entwicklung einer (übergeordneten) Schwarmsteuerung sahen kmU bisher meist nicht als ihre Kernkompetenz und zugleich fehlten die Ressourcen bzw. zusätzliche Förderung, diese zu bewältigen.

Der direkte wirtschaftliche Nutzen durch das Forschungsvorhaben besteht demnach in der Erweiterung des Portfolios kleiner Fahrzeuganbieter über die Entwicklung und Bereitstellung der reinen Technik/des Fahrzeugs hinaus. Das Lane-Konzept ist ein einfacher Steuerungsansatz, der mit bisheriger Fahrzeug- bzw. Flottensteuerung kompatibel ist. Damit können kmU sich ggf. sogar als Systemlieferant am Markt etablieren.

### **KmU als Berater**

Berater für die Planung, Steuerung und Dimensionierung von Fahrzeugsystemen sind häufig spezialisierte kmU (wie auch im projektbegleitenden Ausschuss). Mit den Ergebnissen dieses Forschungsprojekts wird diesen ein praktisches Vorgehensmodell bereitgestellt, mit dessen Hilfe kundenindividuell neue Systeme effizient geplant und dimensioniert sowie bestehende Systeme verbessert werden können.

## Verwendung der Zuwendung

Die Verwendung der Zuwendung entfiel ausschließlich auf Personalkosten. Eine Beschaffung von Ausrüstung und Technik war nicht vorgesehen und auch nicht nötig. Eine Aufschlüsselung der Personalkosten auf die beiden Forschungsstellen (Professur für Technische Logistik – TL bzw. Professur für Arbeitswissenschaften – AW) sowie nach den fünf Arbeitspaketen des Projekts findet sich in Tabelle 7.

*Tabelle 7: Aufschlüsselung der Zuwendungen nach den Forschungsstellen sowie Arbeitspaketen*

Zeitraum	Verwendung der Zuwendung	
	FST1: TL	FST2: AWS
<b>2019</b>	3,55 PM	3 PM
<b>2020</b>	12 PM	12 PM
<b>2021</b>	9,13 PM	3 PM
<b>2022</b>	3 PM	0 PM
<b>Gesamt</b>	<b>27,68 PM</b>	<b>18 PM</b>



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

Die durchgeführten Arbeiten leisteten einen angemessenen Beitrag zum Forschungsvorhaben. Sie waren in Inhalt und Umfang ein notwendiger Teilschritt zur Erreichung des geplanten Forschungsziels.

Die durchgeführten Forschungsarbeiten sowie die dafür aufgewendeten Ressourcen waren notwendig und angemessen, um die Ziele der Arbeitspakete des Forschungsprojektes zu erreichen. Die Ergebnisse des Forschungsprojektes entsprachen den Erwartungen des Projektantrags.

## Plan zum Ergebnistransfer in die Wirtschaft

Während der gesamten Projektlaufzeit wurde der intensive Kontakt mit den Mitgliedern des Projektbegleitenden Ausschusses gepflegt. Neben den zentralen Sitzungen des Projektbegleitenden Ausschusses lag der Schwerpunkt auf bilateralem Austausch über persönliche Gespräche und fernmündliche Kommunikation.

Zusätzlich liefert Tabelle 8 eine Übersicht zum Stand unterschiedlichster Transfermaßnahmen während der Projektbearbeitung und nach Projektabschluss. Ein neuer Projektantrag zu einem Folgeprojekt, das insbesondere noch vorhandene Hürden bei der Umsetzung des entwickelten Lane-Konzepts bei kmU abbauen soll, ist zeitnah geplant.

Tabelle 8: Transfermaßnahmen

Maßnahme	Beschreibung	Zeitraum
Projektbegleitender Ausschuss	1. Sitzung des PA: Einführung Projekt, Vorstellung Arbeitspakete, Vorstellung Forschungseinrichtungen, Diskussion Schwerpunkte	27.11.2019
Projektbegleitender Ausschuss	2. Sitzung des PA: Ergebnisse Literaturrecherche, Abstimmung PA Mitglieder, Vorstellung der ausgewählten Algorithmen für das weitere Projekt, Präsentation Simulationsmodell	04.05.2020
Projektbegleitender Ausschuss	3. Sitzung des PA: Vorstellung Lane-Konzept, Vorstellung Reinforcement Learning Ansatz, erste Simulationsexperimente + Ergebnisse, weiterer Plan für Feldexperimente	02.12.2020
Projektbegleitender Ausschuss	4. Sitzung des PA: Zusammenfassung Projekt, Motivation, Ergebnisse Literaturrecherche, Entwickelte Konzepte, Experimente (Simulation und Feldexperimente), Fazit und Ergebnisse, Abschlussdiskussion, mögliche Fortsetzung	23.5. 2022
Internetpräsentation	<a href="https://tu-dresden.de/ing/maschinenwesen/itla/tl/forschung/projekte/svat">https://tu-dresden.de/ing/maschinenwesen/itla/tl/forschung/projekte/svat</a>	Seit 06/2021
Bereitstellung Implementierungen	Bereitstellung implementierter ROS Paketen in einem online Repository: <a href="https://gitlab.hrz.tu-chemnitz.de/edscher--tu-dresden.de/svat">https://gitlab.hrz.tu-chemnitz.de/edscher--tu-dresden.de/svat</a>	Seit 01/2022

Maßnahme	Beschreibung	Zeitraum
Öffentliche Vorträge	Vorstellung der grundlegenden Projektidee und erster Lösungsmethoden auf dem 16. Fachkolloquium der WGTL in Hamburg	01.10.2020
	Vorstellung der Bewegungsvorhersage auf dem 67. Frühjahrskongress der Gesellschaft für Arbeitswissenschaft	03.03.2021
	Vorstellung zu Konfliktvermeidung im Kontext der Halbleiterindustrie auf der 1st virtual European Advanced Process Control and Manufacturing Conference (apc m)	13.04.2021
	Vorstellung des entwickelten Simulators auf der 19. Fachtagung für Simulation in Produktion und Logistik (ASIM)	15.09.2021
Publikationen	„Regeln gesucht - Konfliktvermeidung bei spurungebundenen Fahrerlosen Transportfahrzeugen“. In: Hebezeuge Fördermitteln: Flurförderzeuge Sonderpublikation, 2020. (Reith u. a. 2020a)	
	„An Approach to Decentralized Conflict Avoidance for Transportation Vehicles with Path-Free Navigation“. In: Logistics Journal Proceedings. (Reith u. a. 2020b)	
	„A modular, discrete-event simulation framework for modelling free ranging transportation vehicles in intralogistics“. In: Simulation in Produktion und Logistik, 2021 (Reith u. a. 2021a)	<i>fortlaufend im Projekt</i>
	„Conflict-minimal routing for free-ranging transportation vehicles in in-house logistics based on an a-priori lane design“. In: Journal of manufacturing systems, 2021 (Reith u. a. 2021b)	
	„Conflict Avoidance Strategies for Automated Guided Vehicles in Semiconductor Fabrication Facilities“. In: 1st Virtual European Advanced Process Control and Manufacturing Conference (apc m) (Reith u. a. 2021c)	
	“Vorhersage von menschlichen Arbeitsbewegungen zur Verringerung des Kollisionsrisikos bei kollaborativer Arbeit mit mobilen Robotern“. 67. Frühjahrskongress der Gesellschaft für Arbeitswissenschaft (Scherstjanoi u. a. 2021)	
Beratung von Unternehmen	In Kombination zu den Sitzungen des pbA wurden fortlaufend im Projekt zahlreiche bilaterale Gespräche geführt, bei denen Erkenntnisse kommuniziert und Ergebnisse analysiert wurden.	<i>fortlaufend im Projekt</i>

Maßnahme	Beschreibung	Zeitraum
Wissenschaftl. Qualifikation	Dissertation über das Thema des Flottenmanagements bzw. der Konfliktvermeidung bei spurungebundenen, autonomen Transportfahrzeugen in der Intralogistik	<i>Gepante Abgabe 2023</i>
Übernahme der Ergebnisse in die Lehre	Verbreitung der Erkenntnisse durch Absolventen der TU Dresden.	fortlaufend im Projekt
Übernahme der Ergebnisse in die Lehre	<p>Im Rahmen des Projekts wurden von Studenten folgende Projekt- bzw. Abschlussarbeiten angefertigt:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Evaluierung von Simulationstools zur Modellierung frei navigierender, autonomer Transportfahrzeuge in der Intralogistik</li> <li>• Validierung künstlicher, neuronaler Netze als Ersatzmodelle für ereignisdiskrete Simulationen am Beispiel von Warteschlangensystemen</li> <li>• Dezentrale Steuerungsansätze für autonome Transportsysteme</li> <li>• Bewertung der Routen spurungebundener fahrerloser Transportfahrzeuge in der Intralogistik</li> <li>• Automatische Generierung eines Graphen in einem Flächenlayout</li> <li>• Vergleich etablierter Simulationstools mit dem Simulationsframework simpy</li> <li>• Maschinelles Lernen in der Logistik</li> <li>• Systematisierung Fahrerloser Transportsysteme</li> <li>• Referenzprobleme für die Steuerung Fahrerloser Transportsysteme</li> <li>• Vorbereitung eines Demonstrators zur Einsatzplanung von FTS</li> <li>• Kategorisierung der Begriffe „Scheduling“, „Routing“ und „Dispatching“</li> <li>• Erstellung und Bewertung eines Algorithmus zur Generierung alternativer, globaler Routen für freinavigierende, autonome Transportfahrzeuge in der Intralogistik</li> </ul> <p>Die erarbeiteten Inhalte fanden Eingang in folgende Vorlesungsreihen und Übungen:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Logistics Lab</li> <li>• Materialflussplanung</li> <li>• Materialflussrechnung</li> </ul>	<i>fortlaufend im Projekt</i>

## Literatur

Abbadi, Ahmad, and Václav Přenosil. "Safe path planning using cell decomposition approximation." *Distance Learning, Simulation and Communication* 8 (2015): 1-6.

Al-Dahhan, M. R. H., & Schmidt, K. W. (2020). Voronoi boundary visibility for efficient path planning. *IEEE Access*, 8, 134764-134781.

Antakly, D., Loiseau, J. J., & Abbou, R. (2017). A temporised conflict-free routing policy for AGVs. *IFAC-PapersOnLine*, 50(1), 11169-11174.

Arnold, D., & Furmans, K. (2009). *Materialfluss in Logistiksystemen* (Vol. 6). Berlin: Springer.

Bähr, M., Donner, R. V., & Seidel, T. (2013). A pedestrian dynamics based approach to autonomous movement control of automatic guided vehicles. In *Robust Manufacturing Control* (S. 175-187). Springer, Berlin, Heidelberg.

Biewald, L. (2020). Experiment tracking with weights and biases. *Software available from wandb.com*, 2, 233.

Blum, C., & Roli, A. (2003). Metaheuristics in combinatorial optimization: Overview and conceptual comparison. *ACM computing surveys (CSUR)*, 35(3), 268-308.

Čáp, M., Gregoire, J., & Frazzoli, E. (2016, October). Provably safe and deadlock-free execution of multi-robot plans under delaying disturbances. In *2016 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS)* (S. 5113-5118). IEEE.

Dellaert, F., Fox, D., Burgard, W., & Thrun, S. (1999, May). Monte carlo localization for mobile robots. In *Proceedings 1999 IEEE international conference on robotics and automation (Cat. No. 99CH36288C)* (Vol. 2, S. 1322-1328). IEEE.

Demesure, G., Defoort, M., Bekrar, A., Trentesaux, D., & Djemai, M. (2016). Navigation scheme with priority-based scheduling of mobile agents: Application to AGV-based flexible manufacturing system. *Journal of Intelligent & Robotic Systems*, 82(3), 495-512.

De Ryck, M., Versteyhe, M., & Debrouwere, F. (2020). Automated guided vehicle systems, state-of-the-art control algorithms and techniques. *Journal of Manufacturing Systems*, 54, 152-173.

Dijkstra, E. W. (1959). A note on two problems in connexion with graphs. *Numerische Mathematik*, 1(1), 269-271.

Duinkerken, M. B., Ottjes, J. A., & Lodewijks, G. (2006, December). Comparison of routing strategies for AGV systems using simulation. In *Proceedings of the 2006 winter simulation conference* (S. 1523-1530). IEEE.

Durrant-Whyte, H., & Bailey, T. (2006). Simultaneous localization and mapping: part I. *IEEE robotics & automation magazine*, 13(2), 99-110.

Floyd, R. W. (1962). Algorithm 97: shortest path. *Communications of the ACM*, 5(6), 345.

Fox, D., Burgard, W., & Thrun, S. (1997). The dynamic window approach to collision avoidance. *IEEE Robotics & Automation Magazine*, 4(1), 23-33.

Fragapane, G., De Koster, R., Sgarbossa, F., & Strandhagen, J. O. (2021). Planning and control of autonomous mobile robots for intralogistics: Literature review and research agenda. *European Journal of Operational Research*, 294(2), 405-426.

Gasparetto, A., Boscaroli, P., Lanzutti, A., & Vidoni, R. (2015). Path planning and trajectory planning algorithms: A general overview. *Motion and operation planning of robotic systems*, 3-27.

Hansen, P., Mladenović, N., Brimberg, J., & Pérez, J. A. M. (2019). Variable neighborhood search. In *Handbook of metaheuristics* (S. 57-97). Springer, Cham.

Hart, P. E., Nilsson, N. J., & Raphael, B. (1968). A formal basis for the heuristic determination of minimum cost paths. *IEEE transactions on Systems Science and Cybernetics*, 4(2), 100-107.

Helbing, D., & Molnar, P. (1995). Social force model for pedestrian dynamics. *Physical review E*, 51(5), 4282.

Hoshino, S., & Uchida, K. (2017). Interactive motion planning for mobile robot navigation in dynamic environments. *Journal of Advanced Computational Intelligence and Intelligent Informatics*, 21(4), 667-674.

Janet, J. A., Luo, R. C., & Kay, M. G. (1995, May). The essential visibility graph: An approach to global motion planning for autonomous mobile robots. In *Proceedings of 1995 IEEE international conference on robotics and automation* (Vol. 2, S. 1958-1963). IEEE.

Koenig, N., & Howard, A. (2004, September). Design and use paradigms for gazebo, an open-source multi-robot simulator. In *2004 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS)(IEEE Cat. No. 04CH37566)* (Vol. 3, S. 2149-2154). IEEE.

Kuffner, J. J., & LaValle, S. M. (2000, April). RRT-connect: An efficient approach to single-query path planning. In *Proceedings 2000 ICRA. Millennium Conference. IEEE International Conference on Robotics and Automation. Symposia Proceedings (Cat. No. 00CH37065)* (Vol. 2, S. 995-1001). IEEE.

LaValle, S. M. (1998). Rapidly-exploring random trees: A new tool for path planning.

LaValle, Steven M. *Planning algorithms*. Cambridge university press, 2006.

Law, A. M., Kelton, W. D., & Kelton, W. D. (2013). *Simulation modeling and analysis* (Vol. 3). New York: Mcgraw-hill.

Kamoshida, R., & Kazama, Y. (2017, July). Acquisition of automated guided vehicle route planning policy using deep reinforcement learning. In *2017 6th IEEE International Conference on Advanced Logistics and Transport (ICALT)* (S. 1-6). IEEE.

Kavraki, L. E., Svestka, P., Latombe, J. C., & Overmars, M. H. (1996). Probabilistic roadmaps for path planning in high-dimensional configuration spaces. *IEEE transactions on Robotics and Automation*, 12(4), 566-580.

Kim, C. W., & Tanchocoj, J. M. A. (1993). Operational control of a bidirectional automated guided vehicle system. *THE INTERNATIONAL JOURNAL OF PRODUCTION RESEARCH*, 31(9), 2123-2138.

Krnjak, A., Draganjac, I., Bogdan, S., Petrović, T., Miklić, D., & Kovačić, Z. (2015, May). Decentralized control of free ranging AGVs in warehouse environments. In *2015 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA)* (S. 2034-2041). IEEE.

Matloff, N. (2008). Introduction to discrete-event simulation and the simpy language. *Davis, CA. Dept of Computer Science. University of California at Davis. Retrieved on August, 2(2009), 1-33.*

Min, T. W., Zhe, L., Yin, H. K., Hiang, G. C., & Yong, L. K. (1999, November). A rules and communication based multiple robots transportation system. In *Proceedings 1999 IEEE International Symposium on Computational Intelligence in Robotics and Automation. CIRA'99 (Cat. No. 99EX375)* (S. 180-186). IEEE.

Mladenović, N., & Hansen, P. (1997). Variable neighborhood search. *Computers & operations research*, 24(11), 1097-1100.

Moritz, P., Nishihara, R., Wang, S., Tumanov, A., Liaw, R., Liang, E., ... & Stoica, I. (2018). Ray: A distributed framework for emerging {AI} applications. In *13th USENIX Symposium on Operating Systems Design and Implementation (OSDI 18)* (S. 561-577).

Naderi, K., Rajamäki, J., & Hämäläinen, P. (2015, November). RT-RRT\* a real-time path planning algorithm based on RRT. In *Proceedings of the 8th ACM SIGGRAPH Conference on Motion in Games* (S. 113-118).

Orozco-Rosas, U., Montiel, O., & Sepúlveda, R. (2019). Mobile robot path planning using membrane evolutionary artificial potential field. *Applied Soft Computing*, 77, 236-251.

Pandey, A., Pandey, S., & Parhi, D. R. (2017). Mobile robot navigation and obstacle avoidance techniques: A review. *Int Rob Auto J*, 2(3), 00022.

Parker, L. E. (2009). Path planning and motion coordination in multiple mobile robot teams. *Encyclopedia of complexity and system science*, 5783-5800.

Pearson, K. "Notes on Regression and Inheritance in the Case of Two Parents Proceedings of the Royal Society of London, 58, 240-242." *K Pearson* (1895).

Pivtoraiko, M., Knepper, R. A., & Kelly, A. (2009). Differentially constrained mobile robot motion planning in state lattices. *Journal of Field Robotics*, 26(3), 308-333.

Reith, K.-B., Rank, S., & Schmidt, T. (2020a). „Regeln gesucht - Konfliktvermeidung bei spurungebundenen Fahrerlosen Transportfahrzeugen“. In: Hebezeuge Fördermitteln: Flurförderzeuge Sonderpublikation, 2020.

Reith, K.-B., Rank, S., & Schmidt, T. (2020b). „An Approach to Decentralized Conflict Avoidance for Transportation Vehicles with Path-Free Navigation“. In: Logistics Journal Proceedings.

Reith, K.-B., Rank, S., & Schmidt, T. (2021a). A modular, discrete-event simulation framework for modelling free ranging transportation vehicles in intralogistics. Simulation in Produktion und Logistik 2021: Erlangen, 15.-17. September 2021, 113.

Reith, K. B., Rank, S., & Schmidt, T. (2021b). Conflict-minimal routing for free-ranging transportation vehicles in in-house logistics based on an a-priori lane design. *Journal of Manufacturing Systems*, 61, 97-111.

Reith, K.-B., Rank, S., & Schmidt, T. (2021c). „Conflict Avoidance Strategies for Automated Guided Vehicles in Semiconductor Fabrication Facilities“. In: 1st Virtual European Advanced Process Control and Manufacturing Conference (apc|m)

Scherstjanoi, E., Schmidt, M., & Schmauder, M. (2021). „Vorhersage von menschlichen Arbeitsbewegungen zur Verringerung des Kollisionsrisikos bei kollaborativer Arbeit mit mobilen Robotern“. 67. Frühjahreskongress der Gesellschaft für Arbeitswissenschaft (GfA).

Scholz, M. (2019). *Intralogistics Execution System mit integrierten autonomen, servicebasierten Transportentitäten*. FAU University Press.

Sheffi, Y. (1984): *Urban transportation networks: equilibrium analysis with mathematical programming methods*. Englewood Cliffs, N.J: Prentice-Hall.

Spearman, Charles. "The proof and measurement of association between two things." *The American journal of psychology* 100.3/4 (1987): 441-471.

Sudhakara, P., Ganapathy, V., & Sundaran, K. (2017, August). Probabilistic roadmaps-spline based trajectory planning for wheeled mobile robot. In *2017 International Conference on Energy, Communication, Data Analytics and Soft Computing (ICECDS)* (S. 3579-3583). IEEE.

Sutton, R. S., & Barto, A. G. (2018). *Reinforcement learning: An introduction*. MIT press.

Tang, X., Zhou, T., Yu, J., Wang, J., & Su, Y. (2018, December). An improved fusion algorithm of path planning for automated guided vehicle in storage system. In *2018 IEEE 4th International Conference on Computer and Communications (ICCC)* (S. 510-514). IEEE.



Warshall, S. (1962). A theorem on boolean matrices. *Journal of the ACM (JACM)*, 9(1), 11-12.

Xin, J., Negenborn, R. R., Corman, F., & Lodewijks, G. (2015). Control of interacting machines in automated container terminals using a sequential planning approach for collision avoidance. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 60, 377-396.

Zhang, J., & Liu-Henke, X. (2020) Konfliktfreie, selbstoptimierte Trajektorienplanung für ein fahrerloses Transportfahrzeug zur Durchführung des autonomen Gütertransportes im Produktionsumfeld.