

Schlussbericht vom 12.05.2025

zu IGF-Vorhaben Nr. 01IF22608N

Thema

Auslegung und Abnahme von FFZ-Flotten (amrAcceptance)

Berichtszeitraum

01.09.2022 - 31.12.2024

Forschungsvereinigung

Forschungsgemeinschaft Intralogistik/Fördertechnik und Logistiksysteme e.V. – IFL
Lyoner Straße 18
60528 Frankfurt am Main

Forschungseinrichtung(en)

Technische Universität Dresden
Institut für Technische Logistik und Arbeitssysteme
Professur für Technische Logistik
01062 Dresden

Gefördert durch:



aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages



Angaben zur Ergänzung des Schlussberichtes gem. IGF-Leitfaden

IGF-Nr.: 01IF22608N , Kurzthema „amrAcceptance“

1. Verwendung der Zuwendung

- wissenschaftlich-technisches Personal (Einzelansatz A.1 des Finanzierungsplans)
25 PM
- Geräte (Einzelansatz B des Finanzierungsplans)
- entfällt
- Leistungen Dritter (Einzelansatz C des Finanzierungsplans)
-entfällt

2. Darstellung des wissenschaftlich-technischen und wirtschaftlichen Nutzens der

erzielten Ergebnisse insbesondere für KMU sowie ihres innovativen Beitrags und ihrer industriellen Anwendungsmöglichkeiten

Die korrekte Berechnung der erforderlichen Anzahl von Fahrzeugen für ein innerbetriebliches Transportsystem ist Aufgabe der Auslegung und Voraussetzung für die Abnahme eines solchen Systems. Sie gewinnt an Bedeutung mit der zunehmenden Verbreitung von AMR-Systemen in kmU.

Obwohl hierfür seit langem Berechnungsansätze existieren, waren diese in der Industrie kaum bekannt. Zudem sind praktische Umsetzungen oft mangelhaft (meist wg. fehlerhafter Bewertung von Leerfahrten). Durch die systematische Erfassung bekannter Ansätze, ihre Implementation und den Vergleich mit Simulationsrechnungen konnte im Forschungsvorhaben ein Verfahren entwickelt werden,

– mit welchem erstmals Fahrzeuganzahlen mit hinreichender Genauigkeit und in praktikabler Weise (insb. ohne Rückgriff auf eine Simulation) für AMR-Systeme von kmU-typischer Größenordnung ermittelt werden können und

– welches sich für die Umsetzung in einer VDI-Richtlinie anbietet, weil vom Normenwerk diese Fragestellung bislang nicht abgedeckt ist.

Durch umfangreiche Vergleichsrechnungen mit der Simulation wurde sichergestellt, dass das Verfahren die mittlere Fahrzeuganzahl hinreichend genau sowie Ober- und Untergrenzen der Fahrzeuganzahl zuverlässig abschätzt.

Eine bereits vorhandene Infrastruktur zur Datenanalyse wurde im Rahmen des Vorhabens weiterentwickelt. Sie wurde mit/bei den Praxispartnern genutzt und wird inzwischen auch in der Lehre eingesetzt. Dies ist ein zusätzlicher Nebennutzen der Forschungsergebnisse.

3. Zusammenstellung aller Arbeiten, die im Zusammenhang mit dem Vorhaben veröffentlicht wurden oder in Kürze veröffentlicht werden sollen

Es gab/gibt 3 Vorträge auf der VDI-Flurförderzeugtagung (2023), dem ASIM-Symposium (2024) und der ASIM-Fachtagung (2025); ein Beitrag in der Hebezeuge und Fördermittel ist in Vorbereitung.

4. Einschätzung zur Realisierbarkeit des vorgeschlagenen und aktualisierten Transferkonzepts

Die Transfermaßnahmen wurden im geplanten Umfang realisiert und werden so auch weiterverfolgt. Die FE wird eine Umsetzung des Verfahrens in einer VDI-Richtlinie anstreben, ist dabei allerdings auf die Mitwirkung anderer angewiesen.

Die Bearbeitung des Forschungsthemas umfasste drei Arbeitspakete (Verfügbarkeit und Abnahme, Simulation und Emulation, Analytische Berechnungsansätze), welche im Folgenden getrennt diskutiert werden.

Bei allen drei Arbeitspaketen zeigte sich, dass ein AMR-System nicht einfach nur ein verbessertes Fahrerloses Transportsystem (FTS) darstellt. Ihre Autonomie und Flexibilität sind Funktionen, die AMR-Systeme auszeichnen und die mit den derzeit eingesetzten Herangehensweisen, Methoden und Werkzeugen bei der Auslegung und Abnahme von AMR-Systemen nur unzureichend berücksichtigt werden.

AMR

Autonome mobile Roboter (AMR) sind Fahrzeuge, die Lasten selbstständig zwischen zwei Punkten transportieren. Sie sind frei beweglich und können ihren Fahrweg selbst festlegen und sich dabei mittels diverser Sensoren orientieren. AMR unterscheiden sich von den Fahrerlosen Transportfahrzeugen (FTF), die auf vordefinierten Pfaden unterwegs sind und zur Steuerung durch einen Operator Aufträge zugewiesen bekommen oder wiederholt einen bestimmten Fahrkurs abfahren.

AMR ermöglichen eine deutliche Steigerung der Effizienz der intralogistischen Prozesse in Lager oder Produktion. Sie automatisieren Transport- und Logistikprozesse und sorgen so für eine schnellere Bearbeitung von Aufgaben und einen optimierten Warenfluss. Abhängig von den zu transportierenden Gütern gibt es AMR in verschiedenen Bauformen und Größen, sie können für spezielle Transportgüter mit Greifarmen, Aufnahmevorrichtungen usw. ausgestattet sein. (s. Abbildung 1)



Abbildung 1: Bauformen und Anwendungen von AMR (Beispiele)

Verfügbarkeit und Abnahme

Verfügbarkeit im klassischen Sinne gilt beispielsweise für Elemente (Maschinen, Komponenten, Baugruppen, Einzelteile), bei denen sich einfach erkennen lässt, zu welchem Anteil ihrer Einsatzzeit sie tatsächlich nutzbar sind. Störungen, die zu einem Ausfall der Funktion führen, die Instandsetzung oder vorbeugende Wartung und Instandhaltung reduzieren die Verfügbarkeit, was im Allgemeinen zu verringerter Produktivität führt. Wichtig für den klassischen

Verfügbarkeitsbegriff ist dabei die klare Abgrenzung zwischen „nutzbar“ und „nicht nutzbar“ – ohne einen fließenden Übergang zwischen diesen beiden Zuständen.

In der Intralogistik ist der Durchsatz die allgemein anerkannte Leistungskennzahl. Für Fahrzeugsysteme gilt bspw., dass der Durchsatz mit der Verfügbarkeit einzelner Fahrzeuge steigt oder fällt. Dieser Zusammenhang lässt sich analytisch einfach mit Hilfe der vorhandenen Richtlinien bestimmen, z.B. VDI 3423 (Verfügbarkeit von Maschinen und Anlagen), VDI 3581 (Verfügbarkeit von Transport- und Lageranlagen), VDI 3649 (Anwendung der Verfügbarkeitsrechnung für Förder- und Lagersysteme).

VDI 3423 definiert die technische Verfügbarkeit als „prozentualen Anteil der Belegungszeit, für den die Maschine/Anlage ohne technischen Mangel der Produktion zur Verfügung steht.“ Für die Verfügbarkeit allgemein werden neben der technischen Ausfallzeit weitere Zeiten berücksichtigt, z. B. für geplante Instandhaltung, Wartung und Inspektion. Keine Ausfallzeit im Sinne der VDI 3423 bezüglich der Verfügbarkeit sind organisatorische Defizite wie fehlendes Material, fehlende Werkzeuge, mangelnde Schulung von Personal, verzögerte Fehler- bzw. Störungsmeldungen usw.

Mit anderen Worten, aber inhaltlich gleichwertig definiert VDI 3581 die Verfügbarkeit eines Elementes oder eines Teilsystems in einer Transport- oder Lageranlage als „Wahrscheinlichkeit, die betrachteten Einheiten zu einem beliebigen Zeitpunkt während der Betriebszeit in einem ordnungsgemäß funktionierenden Zustand anzutreffen.“

Die Verfügbarkeit wird entweder unter Nutzung von Einsatzzeit T_E und Ausfallzeit T_A

$$\eta_V = \frac{T_E - T_A}{T_E} \quad (1)$$

oder unter Einbeziehung von *Mean Time Between Failure (MTBF)* und *Mean Time To Repair (MTTR)*, also der mittleren störungsfreien Zeit und der mittleren Reparaturdauer berechnet:

$$\eta_V = \frac{MTBF}{MTBF + MTTR} \quad (2)$$

Beide Formeln sind mathematisch gleichwertig: Gleichung (1) ist zur Überprüfung bestehender Anlagen geeignet, weil Messwerte direkt eingesetzt werden können, wohingegen (2) eher für Planungen geeignet ist, bei denen zunächst keine Messwerte vorliegen und deswegen auf Erfahrungswerte orientiert wird (VDI 3649).

Die Verfügbarkeit stellt die Relation zwischen der praktisch nutzbaren zur theoretisch möglichen Leistungsfähigkeit eines Systems dar. Die sogenannte Maschinenverfügbarkeit ist eine Kennzahl zur Quantifizierung der Einsatzbereitschaft einer einzelnen Komponente und basiert auf einem alternierenden Zustandsverhalten instandsetzbarer Komponenten: Der Wechsel zwischen Intakt- und Defektzustand erfolgt durch Ereignisse des Ausfalls und der Instandsetzung (ten Hompel et al., 2011) einer Komponente oder eines Teilsystems in einem binären Modell. Ein einzelnes Fahrzeug könnte damit abgebildet werden, wenn es eindeutige Definitionen darüber gibt, wann ein Fahrzeug als Set vieler Einzelkomponenten als intakt oder defekt gilt – nicht jede einzelne Störung führt unmittelbar zum Ausfall des Fahrzeugs.

Sobald die Betrachtungsebene aber weg vom einzelnen Fahrzeug hin zum *System* mit vielen Fahrzeugen geht, sind diese Richtlinien nicht mehr praktikabel. Schon die binäre Einteilung in intakt oder defekt ist auf ein Fahrzeugsystem nicht übertragbar: Der Ausfall eines Fahrzeugs führt nicht dazu, dass das ganze System nicht mehr arbeitsfähig ist. Selbst wenn das defekte Fahrzeug an zentraler Stelle im Transportsystem steht und die Weiterfahrt der anderen Fahrzeuge kurzzeitig behindert, kann nach Entfernen des defekten Fahrzeugs das Transportsystem weiterarbeiten, ggf. verbunden mit Leistungseinbußen.

Daher wurde neben dem o.g. Normenwerk mit VDI 4486 für die Intralogistik eine Richtlinie entwickelt, die das Konzept der „Leistungsverfügbarkeit“ definiert. Dabei werden *Leistung* und *technische Verfügbarkeit* miteinander verbunden und in Zusammenhang zu den Geschäftsprozessen des Anlagenbetreibers gestellt. Wichtige Funktionen im Rahmen der Geschäftsprozesse sind dann bspw. die Abholung von Material an den Quellen (Lastaufnahme für den Transport) und die Versorgung von Senken (z. B. Arbeitsplätze, Abgabestellen). Die Abläufe sollen möglichst wenig durch Störungen beeinträchtigt werden. Dies ist dann der Fall, wenn alle Abnehmer der logistischen Leistung jederzeit bedarfsgerecht versorgt werden.

Leistung und Verfügbarkeit orientieren sich stets an den Geschäftszielen des Betreibers, z. B. am geforderten Durchsatz eines Transportsystems. Wird dieses Ziel erreicht, bleiben evtl. reduzierte Verfügbarkeiten infolge von Störungen oder Ausfällen *einzelner Fahrzeuge* unberücksichtigt. Diese Sichtweise trägt dem Umstand Rechnung, dass Materialflusssysteme (und zwar Stetigförderer genauso wie Unstetigförderer) zumeist über Redundanzen verfügen, welche dafür sorgen, dass Ausfälle einzelner Komponenten i.d.R. zu einem *Leistungsabfall*, nur selten aber zu einem *Leistungsausfall* führen. Die binäre Sichtweise der Verfügbarkeitsrechnung ist daher nicht angemessen. Das gilt insbesondere, wenn im konkreten Lastfall mit der verfügbaren Restleistung die Geschäftsziele des Betreibers noch erreicht werden.

Hinzu kommt mit den neueren Entwicklungen um AMR-Systeme (v.a. durch ihren Betrieb, eingebettet in Fertigungs- und Transportprozesse des Betreibers), dass eine Vielfalt externer Einflussfaktoren (Layout von Fahrwegen, Personenverkehr, zentrale oder dezentrale Steuerung der Fahrzeuge, Tourenbildung, IT) die Leistung beeinflussen können oder gar Störungen verursachen, die nicht durch den AMR-Hersteller zu vertreten sind. VDI 4486 spricht hier von „Voraussetzungen“, die vom Betreiber zu schaffen sind, damit das System des Herstellers seine Leistung erbringen kann. Die Praxis hat gezeigt, dass die Zuordnung möglicher Abweichungen oder Störungen zu den Verantwortlichen (Betreiber, Hersteller, Steuerungsentwickler u.a.) häufig Herausforderungen mit sich bringt.

Ausfallzeiten einzelner Komponenten sollen wie bisher gemessen werden. Neu ist, dass daraus unter Einbeziehung von Systemeigenschaften wie Redundanzen, Pufferkapazitäten und Leistungsreserven ein Verfügbarkeitskennwert für das System berechnet wird, mit dem die Leistungserbringung (z. B. Transport von angelieferten Paletten in das Hochregallager) bewertet wird und nicht nur die Verfügbarkeit der dafür eingesetzten technischen Mittel, z. B. der Gabelstapler oder der FTF / AMR. Die Bewertung erfolgt entweder

- durch Bestimmung der Anzahl verspätet gelieferter Ladeeinheiten oder
- durch Ermittlung von Wartezeiten, die in nachfolgenden Prozessen anfallen als Folge von Ausfällen / Störungen (z. B. Personal wartet auf zu kommissionierende Artikel).

Zusätzlich wird die Einhaltung der Randbedingungen berücksichtigt: So sind Zeiten mit Stau oder Störungen oder Zeiten für Instandhaltungen, die ursächlich nicht durch das verwendete technische Element entstanden sind und die eine korrekte Leistungserbringung verhindern, keine zulässigen Situationen und dürfen deswegen nicht in die Bewertung einfließen. Es dürfen nur Störungs- bzw. Ausfallzeiten berücksichtigt werden, die während oder als Folge einer vorangegangenen Nutzung der technischen Einheit entstanden sind.

Die Richtlinie VDI 4486 ist in der Branche kaum bekannt. – Gängige Praxis sind die o.g. Richtlinien zur störungszeitbasierten Verfügbarkeitsbetrachtung sowie die VDI 2710/5 (Abnahmeregeln für FTS), wohl wissend, dass es grundlegende funktionale Unterschiede zwischen FTS und AMR gibt. Vor allem Hersteller, die dem bisherigen FTS-Umfeld entstammen, vertreten die Meinung, mit der bekannten und bewährten VDI 2710/5 eine tragbare Lösung für AMR-System zu haben.

Im Forschungsvorhaben war ursprünglich eine Überarbeitung bzw. Ergänzung der VDI 4486 geplant. Zwischenzeitlich – im März 2023 – wurde die VDI-Handlungsempfehlung „Erfolgreiche Projekte in der Logistik“ (sie trägt den Untertitel „Projektrealisierung, *Abnahme und Verfügbarkeit* von logistischen Anlagen“) publiziert. Darin vertrat der VDI FA 301 die Auffassung, dass derzeit kein Bedarf besteht an „einer zusätzlichen Richtlinie, die etwa einzelne bestehende Lücken identifiziert und dazu abschließende Vorgehensweisen definiert.“ Vielmehr „sollen im Rahmen dieser Handlungsempfehlung Überblick und Verständnis vermittelt werden, die in zukünftigen Vorhaben zu einem erfolgreichen und harmonischen Projektverlauf führen sollen.“

Diese Teilaufgabe war ursprünglich entstanden, um für AMR eine qualitativ gleichwertige Richtlinie anzuregen wie VDI 2710/5 für die FTS, die aber speziell die Belange von AMR berücksichtigt. Die Erfahrung in den Unternehmen war zudem darauf fixiert, die Abnahme von AMR-Systemen eng mit der Verfügbarkeit der Geräte zu verbinden. Allen Beteiligten war aber bewusst, dass die Verfügbarkeit einer AMR-Flotte auch von Bedingungen abhängt, die der Betreiber schafft. Dazu zählen u.a. Steuerungsaspekte (und korrekte Umsetzung durch den Entwickler der Steuerungssoftware), Lastprofil (gleichmäßige Lastverteilung oder Schiefast, kontinuierliche Einlastung von Transporteinheiten oder im Pulk) sowie Topologie des Transportsystems (einfache, annähernd lineare Struktur oder starke vernetzt und teils redundant).

Ein weiterer wichtiger Aspekt bei spurgebundenen FTS ist das Thema Konfliktvermeidung bzw. Kollisionskontrolle. Prinzipiell gibt es dieses Thema auch bei den autonomen Robotern, ist aber dort anders gelöst. Bei den AMR ist jedes einzelne Fahrzeug mit verschiedenen Sensoren ausgestattet, mit denen drohende Kollisionen mit statischen oder dynamischen Hindernissen frühzeitig erkannt werden können und das Fahrzeug rechtzeitig ausweichen kann. In (Reith et al., 2020) wird von einem Forschungsprojekt an der Professur für Technische Logistik der TU Dresden berichtet, bei dem es u.a. um den Nutzen von Regeln zur Konfliktvermeidung von selbstständig agierenden Fahrzeuge im operativen Betrieb geht. Die Einschränkung des individuellen Freiheitsgrades eines Fahrzeugs, die bspw. zu längeren Fahrwegen führen kann, wirkt vielfach im System vieler Fahrzeuge leistungssteigernd. Wenn alle Fahrzeuge die gleichen Regeln befolgen (analog zu Verkehrsregeln im Straßenverkehr: Nutzung von Einbahnstraßen, Rechtsfahrgebot, Vorfahrtsregeln an Kreuzungen), reduziert sich die Anzahl der Konflikte im operativen Betrieb, sodass ein besseres Gesamtsystemverhalten (z. B. höherer Durchsatz) erreicht wird. Auch dann, wenn das Befolgen für den Einzelnen zum Nachteil (z. B. längere Strecke) führt. Abschließend wird betont, dass solche definierten Regeln nicht zwangsweise für

das gesamte Streckenlayout gelten müssen, sondern es ausreicht, nur einzelne konfliktträchtige Stellen damit zu entschärfen.

Simulation und Emulation

Es stand zunächst die Aufgabe sich einem Überblick über die Vielfalt von Simulations- und Steuerungskonzepten speziell für AMR zu verschaffen mit dem Hintergrund einer angestrebten Kompatibilität der Konzepte. Dadurch soll die Modellierung von Geräte- und Systemsteuerungen vereinfacht, die Simulation größerer AMR-Flotten beschleunigt und die Übertragung von Steuerungslogik zwischen Simulations- und Produktivsystemen erleichtert werden. Ziel im Forschungsvorhaben war es, dafür Voraussetzungen zu schaffen und die beteiligten Partner zusammenzubringen.

Eine andere Idee bestand auch darin, verschiedene Aspekte und insbesondere auch Vorzüge aus den beiden Domänen der Materialfluss-Simulation und der Robotik-Simulation für die Planung und Dimensionierung zu nutzen. Der Hintergrund war die Überlegung, dass Robotersimulationen schon seit längerer Zeit verwendet werden, um Anwendungsszenarien zu untersuchen und Abläufe zu optimieren. Die Robotik betrachte dabei sehr detaillierte, maschinennahe Aspekte, wie die exakte Steuerung für Antriebe, um bspw. alle Räder bei einer Kurvenfahrt optimal zu drehen oder eine korrekte, positionsgenaue Lastaufnahme/-abgabe zu ermöglichen sowie millimetergenau an Haltestellen zum Anhalten zu kommen. Auch geht es um die Optimierung von Roboterbewegungen, um Interaktion zwischen Mensch und Roboter zu ermöglichen. Insgesamt liegt der Schwerpunkt auf dem Nachweis der Funktionsfähigkeit bzw. der Ermittlung korrekter Parameter und nicht auf einer Leistungsbewertung.

Die Materialfluss-Simulation hingegen ist stärker prozess- und leistungsorientiert: Es werden bestimmte logistische Abläufe und Strategien untersucht wie bspw. die Bereitstellung von Waren zum Transport. Dabei können stochastische Einflüsse wirken, die u.a. zu schwankendem Zeitverhalten führen können. Deshalb sind die Beobachtungen über einen längeren Zeitraum vorzunehmen. Bei der Simulation werden Ereigniszeitpunkte protokolliert, um später daraus charakteristische Kennzahlen wie Wartezeiten, Durchlaufzeiten, Auslastungen, Fahrwege und Fahrzeiten usw. abzuleiten. Ziel der Materialfluss-Simulation ist es häufig zu überprüfen, ob bzw. mit welchen Strategien vorgegebene Soll-Leistungskennzahlen (Durchsatz, Durchlaufzeit) erreicht werden. Die Steuerung auf Maschinenebene wird als gegeben angesehen und lediglich in Form von Parametern (Schaltzeit, Positionierzeit, Beschleunigung usw.) berücksichtigt.

In einer im Rahmen des Forschungsthemas erstellten Studienarbeit wurden aktuelle Lösungsansätze zur Simulation von Fahrzeugsystemen für die *Materialflussplanung* im Allgemeinen und AMR-Systemen im Besonderen analysiert und bewertet. Dabei wurden verschiedene etablierte Simulationssysteme betrachtet. Wie sich zeigte, haben einige bereits AMR-Komponenten integriert (z. B. VisualComponents, Emulate3D, Plant Simulation, Simio, AnyLogic). Allerdings stehen diese Entwicklungen vielfach noch am Anfang. Es sind oft einzelne Funktionen nutzbar, die an bestehende Elemente (Fahrzeuge) angefügt wurden und dann bspw. die Fähigkeit abbilden, dass es keine festen Fahrwege gibt und stattdessen sich AMR innerhalb eines Korridors auf Kacheln frei bewegen und Hindernissen ausweichen können.

Diese Entwicklung zeigt, dass Softwareanbieter inzwischen den Bedarf an AMR-spezifischen Simulationen erkannt haben. Allerdings erscheint die Entwicklung bisher simulationsgetrieben, das heißt es werden neue Funktionen implementiert, die ins Konzept des jeweiligen

Softwareherstellern passen (orientiert sich am *Wie* der Simulation) und nicht ein Gesamtkonzept für eine neue Fahrzeugklasse (*Was* wird simuliert). Letzteres erfordert engen Kontakt zwischen potentiellen Anwendern und Entwicklern. So sind u.a. auch neue Steuerungskonzepte auf Fahrzeugebene notwendig. Bekannte Verfahren wie „Fahre auf kürzestem Weg von A nach B“ inkl. Kollisionskontrolle sind nicht ausreichend im Sinne eines autonomen Verhaltens, vielmehr können AMR mit Kameras und Sensoren die Umgebung wahrnehmen und Routen selbst berechnen. Dabei sind erforderliche Stopps oder Richtungsänderungen vorausschauend vorzunehmen, gleichzeitig muss durch Interaktion mit anderen AMR sichergestellt sein, dass es dabei zu keinen Konflikten bis hin zum Deadlock kommt.

Auch im *Robotik-Umfeld* werden Simulationssysteme eingesetzt. Diese stellen jedoch die Roboter in den Vordergrund und konzentrieren sich auf die Bewegungsabläufe einzelner Komponenten (Greifarme, Antriebseinheit inkl. Räder usw.) oder Einzelprozesse wie eine korrekte Lastaufnahme / Lastübernahme. Das erfolgt mit einer vergleichsweise großen Detailtreue, so dass Gesamtprozesse wie ein Arbeitsspiel extrem aufwendig abzubilden wären. Außerdem erfordern solche Simulationen einen hohen Berechnungsaufwand und sind manchmal kaum schneller als Echtzeit. Simulationen im Robotik-Bereich haben generell einen anderen Fokus als Systemauslegung und Leistungsbestimmung: Es geht dort vor allem um Visualisierung von sich bewegenden AMR oder Teilkomponenten von AMR in einer VR-Umgebung als Planungsunterstützung.

Außerdem ist zu bedenken, dass die Möglichkeiten von Simulationen begrenzt sind, sobald Interaktionen mit Menschen abzubilden sind. Das betrifft nicht nur die aktive Teilnahme am Prozess, sondern auch passives oder störendes Verhalten, wenn bspw. Personen wiederholt den Fahrweg von AMR nutzen und die Fahrzeuge dadurch zum Ausweichen oder gar Anhalten zwingen. Menschliche Reaktionen können so vielfältig sein, so dass nur eingeschränkt verlässliche Aussagen zum Verhalten des technischen Systems abgeleitet werden können. Das gilt sowohl für Simulationen im Bereich der Robotik als auch des Materialflusses.

Sowohl Simulation als auch *Emulation* können verwendet werden, um ein AMR-System virtuell nachzubilden. Während mit der Simulation ein Modell des Systems erstellt wird, um das Verhalten von Gesamtanlage als auch der einzelnen Fahrzeuge anforderungsgerecht nachzubilden, steht Emulation für eine vollständige Imitation der echten Welt z. B. von Ist-Daten und vorhandener Steuerung, um dadurch bestimmte Anwendungsszenarien zu testen.

Emulation setzt voraus, dass es gelingt, das Verhalten von AMR in einem Simulationsmodell abzubilden, um dann das Verhalten sowie die erforderliche Kommunikation untereinander als auch mit dem Leitreechner zu testen. Es gibt verschiedene Simulations-/Emulations-Entwickler mit unterschiedlichen Simulationsparadigmen, so dass das in der Umsetzung momentan schwierig ist. Allerdings gibt es mit der VDA 5050 (Schnittstelle zur Kommunikation zwischen Fahrerlosen Transportfahrzeugen (FTF) und einer Leitsteuerung) eine gute Grundlage, dass sowohl Fahrzeuge unterschiedlicher Hersteller in einem System gemeinsam eingesetzt werden können als auch die Simulationsmodelle mit verschiedenen Instanzen von Fahrzeugklassen passfähig gemacht wird.

In einem von [*SimulateFirst*] vorgestellten Video wurde die Simulation eines AMR-Systems mittels SIMIO gezeigt. U.a. heißt es auf deren Webseite: „AMRs werden als dynamische Entitäten modelliert, die sich in einem definierten Bereich bewegen. Simulationsversuche ermöglichen eine Leistungsbewertung basierend auf der Anzahl der AMRs und bieten Einblicke zur Verbesserung.“

Dabei werden u.a. intelligente Steuerungsansätze verfolgt, um z. B. Kollisionen oder Deadlocks zu vermeiden. Es gibt keinen vorgegebenen Fahrkurse, sondern in einem Raster angeordnete Punkte (Kacheln). Die Bewegung erfolgt, indem jeweils von einem Punkt zu einem benachbarten Punkt in horizontaler, vertikaler oder diagonaler Richtung gefahren wird. Eine übergeordnete Steuerung sorgt dafür, dass die Bewegung insgesamt in Richtung des Zielortes erfolgt, aber nicht zwangsweise auf dem kürzest möglichen Weg. Das schafft zumindest visuell den Eindruck einer AMR-typischen Bewegung mit Umfahrung statischer oder dynamischer Hindernisse. Es sind 7 Fahrzeuge zu sehen, die befahrene Fläche scheint aus dem Größenvergleich zu anderen sichtbaren Objekten kleiner als 100 m² zu sein, also insgesamt ein eher kleines System.

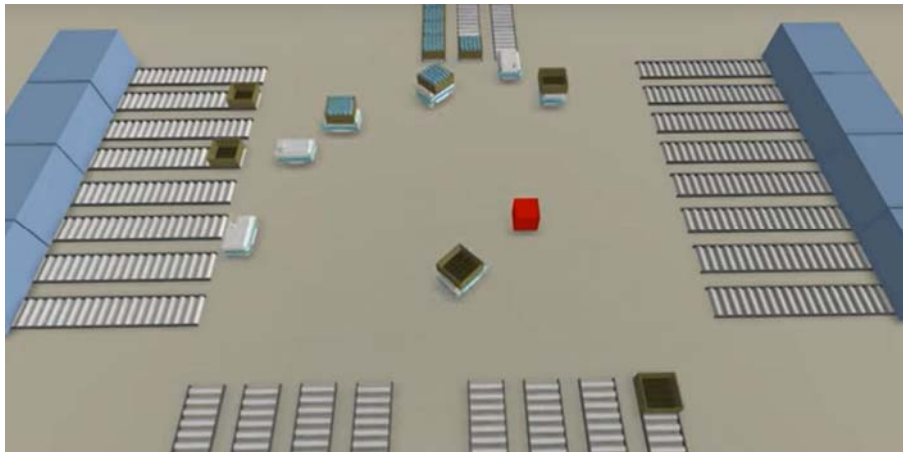


Abbildung 2: Screenshot Simulation von AMR
[Quelle: SimulateFirst, <https://www.youtube.com/watch?v=mSdbUmnryds>]

Im Laufe der Bearbeitung des Arbeitspaketes zu analytischen Ansätzen zur Dimensionierung von Flottengrößen wurde ein eigenes Simulationsmodell entwickelt, das zur Überprüfung der analytischen Ansätze und zur Validierung der Ergebnisse eingesetzt wurde. Die Simulation erfolgt mit AutoMod mittels der Komponente *PathMover* (einem pfadgebundenen Fahrzeugsystem). In der Dokumentation zu AutoMod heißt es sinngemäß: „Ein PathMover im Sinne der AutoMod-Software besteht aus einem oder mehreren Fahrzeugen, die sich entlang eines definierten Pfades bewegen und Lasten von Abhol- zu Lieferorten transportieren. Ein Fahrzeug kann dabei jede Art eines [mobilen Objekts] simulieren, das einer bestimmten Route [...] folgt, z. B. manuell betriebene Gabelstapler oder fahrerlose Transportfahrzeuge. Fahrzeuge können aber auch Personen darstellen, die sich entlang einer vorgegebenen Route bewegen.“

Der Modellansatz dazu ist einfacher als das oben durch SIMIO verwendete Modell und entspricht dafür nicht ganz der durch AMR möglichen Funktionalität. Aber es gibt Festlegungen, mit denen es gelingt, das AMR-Verhalten ausreichend genau abzubilden.

- AMR sind frei beweglich, die Fahrzeuge im Modell aber nicht. Beim Industrie-Einsatz von AMR wird aber ein vorhandenes, meist orthogonales System von Fahrbahnen mit begrenzter Wegbreite und Kurvenradien genutzt. Auch wenn mehrere parallele „Fahrspuren“ vorhanden sind, wird man im Sinne einer Vereinfachung der Steuerung auf möglichst einheitliche Regeln wie „Rechtsfahrgebot“ oder Ein-Richtungsbetrieb orientieren. Soll heißen: am Ende werden in praktischen Anwendungen doch überwiegend pfadgebundene Fahrbewegungen dominieren.
- AMR können Hindernisse erkennen und umfahren. Im Modell geht das nicht. Zwar ist es mit komplizierten Steuerungsregeln möglich, an definierten Stellen des Wegenetzes

bspw. alternative Routen zu finden oder entsprechende Ausweichstellen vorzusehen und proaktiv (vorausschauend) zu nutzen, um Konflikte zu vermeiden. Es ist aber in der Regel nicht möglich, reaktiv auf ein schon eingetretenes Ereignis oder Zustand (z. B. anderes Fahrzeug kommt entgegen) adäquat zu reagieren. Als Alternative sind daher in der Simulation keine bidirektionalen Wege, sondern immer paarweise unidirektionale Wege vorgesehen, sodass Fahrzeuge immer aneinander vorbeifahren können. Im Ausnahmefall kann eine nicht dokumentierte Funktion genutzt werden: Ein entgegenkommendes Fahrzeug bleibt stehen, während das andere Fahrzeug durch dieses hindurch fährt. Das sieht in der Animation seltsam aus, löst auch eine entsprechende Fehlermeldung aus (die ignoriert wird) und bewirkt eine Zusatzzeit (quasi für einmal einem Hindernis auszuweichen). Ansonsten befinden sich Haltestellen in Parkbuchten und behindern dadurch den fließenden Verkehr nicht. Da die Simulation den Fokus auf den Zeitbedarf für komplette Transportaufträge legt und nicht auf Details wie z. B. exakte Fahr- und Lenkbewegungen oder eine Optimierung der Steuerung, sind diese Modellabweichungen für diesen Zweck der Simulation nicht relevant.

Inhalt, Funktion und Ergebnisse des entwickelten Simulationsmodells wird weiter hinten detailliert beschrieben.

Analytische Berechnungsansätze

Stand der Forschung

Erste Berechnungsansätze zur Abschätzung der notwendigen Fahrzeuganzahl für Staplerflotten und FTS wurden in den 1980er und 1990er Jahren publiziert. Die meisten galten eher als grobe Näherung, weil sie eine Reihe von Annahmen voraussetzten oder zu stark vereinfachten und daher kaum weiterverfolgt wurden. Generell bildeten sich zwei mögliche Ansätze für die Berechnung heraus

Kimura (1991), Koo et al. (2005), Rall (1998) u.a. bilden das Fahrzeugsystem als geschlossenes Warteschlangenmodell ab mit einer Bedienstation und einer Warteschlange an jeder Haltestelle und an jeder Verzweigung sowie einer Bedienstation und mehreren Warteschlangen an jeder Zusammenführung und an jeder Kreuzung.

Das Vorgehen ist gekennzeichnet durch schrittweise Erhöhung der Fahrzeuganzahl, um durch größere Transportkapazität (mehr Fahrzeuge) die Anzahl der wartenden Transporteinheiten (TE) vor den Haltestellen zu reduzieren. Andererseits erhöhen zusätzliche Fahrzeuge die Zeitverluste durch die wachsende Wahrscheinlichkeit von Behinderungen zwischen den Fahrzeugen und Staubbildung bis hin zur Blockierung vorgelagerter Streckenabschnitte, was letztendlich den Durchsatz verringert. Es ist durch die Berechnungen abzuwägen, ob ein zusätzliches Fahrzeug insgesamt durchsatzsteigernd oder durchsatzverringern wirkt. Die Berechnungen sind sehr aufwändig und müssen bei zunehmender Fahrzeuganzahl solange wiederholt werden, bis der benötigte Durchsatz erreicht wird und keine Blockierungen auftreten oder eine Durchsatzverringern auftritt. Es sind wissenschaftlich interessante Ansätze, die jedoch für die praktische Anwendung auf Grund des großen Rechenaufwandes ungeeignet sind.

Der andere, überwiegende Anteil der Autoren orientiert sich dagegen an eine Zeitbilanz: Die gesamte Fahrzeugeinsatzzeit, die innerhalb einer Zeitperiode für eine gegebene Transportaufgabe benötigt wird, wird ins Verhältnis zur Länge dieser Zeitperiode gesetzt. So

ergibt sich die erforderliche Fahrzeuganzahl. Dabei wird das Arbeitsspiel in vier Phasen unterteilt: Lastaufnahme, Lastfahrt, Lastabgabe und Leerfahrt. Die drei ersten Phasen können direkt aus der Transportmatrix und der Fahrzeitmatrix abgeleitet werden, während die Leerfahrten erst auf der operativen Ebene (während der Ausführung) exakt bestimmbar sind. In der Planungsphase ist lediglich eine Prognose von Leerfahrten (Relation und Häufigkeit) möglich, um die mittleren Leerfahrzeiten innerhalb eines Arbeitsspiels zu bestimmen. Und genau darin unterscheiden sich die betrachteten fünf analytischen Verfahren, die letztlich ausgewählt und implementiert wurden.

Großeschallau (1984) berechnet einen minimalen Leerfahrtaufwand durch zwei Annahmen: An einer Station ankommende Fahrzeuge werden soweit als möglich für Transporte verwendet, die an dieser Station beginnen (lokaler Ausgleich). Das vermeidet unnötige Leerfahrten. Der verbleibende Fahrzeugüberschuss bzw. Fahrzeugbedarf ist zwischen den anderen Stationen auszugleichen (Leerfahrtausgleich). Dabei werden Leerfahrten angenommen, die von Stationen mit Fahrzeugüberschuss zu den *nächstgelegenen* Stationen mit Fahrzeugbedarf führen. Das sorgt für möglichst kurze Leerfahrten. *Maxwell & Muckstadt (1982)* gehen ähnlich vor, wobei hier die Nettoflüsse pro Station (aus gelieferten und abgeholtene Ladeeinheiten) genutzt werden, um ein klassisches Transportproblem zu formulieren. Die Lösung sind die benötigten Leerfahrten und stimmen mit den Verfahren nach *Großeschallau* überein

Beide Verfahren liefern eine untere Grenze für den Zeitbedarf bzw. die minimal notwendige Fahrzeuganzahl. *Rajotia et al. (1998)* kritisieren dies, weil ein „beladenes Fahrzeug nach der Lieferung und Abgabe seiner Ladung möglicherweise keine andere Ladung vorfindet, die an derselben Station abgeholt werden kann.“ Aus diesem Grunde verzichten sie in ihrem Modell auf den lokalen Ausgleich und kommen so auf deutlich mehr Leerfahrten. Auch *Kuhn (1983)* verzichtet auf den lokalen Ausgleich, verteilt aber die Leerfahrten von jeder Station proportional auf die Fahrzeugbedarfe.

Malmborg et al. (1984) bestimmen eine obere Grenze für die Leerfahrzeit, indem der Leerfahrzeugüberschuss auf die am weitesten entfernten Stationen verteilt wird. *Beisteiner (1983)* stellt zwei Ansätze vor: **(a)** Für jede Fahrt mit Last wird eine gleich lange Leerfahrt angenommen. **(b)** Es erfolgt ein lokaler Ausgleich je Station und die verbleibenden Leerfahrten werden über die mittlere Distanz der Lastfahrten zurückgelegt. Beide Ansätze sind sehr grobe Schätzungen und reagieren empfindlich auf ungünstige Netztopologien. Für die weitere Betrachtung wurde nur die Variante (a) implementiert.

In *Egbelu & Tanchoco (1984)* und *Malmborg (1990)* heißt es sinngemäß, dass ein wie auch immer berechnendes Vorgehen zum Leerfahrtausgleich nicht ausreicht, weil Steuerungsregeln einen nicht zu vernachlässigenden Einfluss auf die Leistung des Systems haben. Das Problem dabei: Die Steuerungsregeln müssten durch eine Formalisierung in eine algorithmisierbare Form gebracht werden, um sie in einer Berechnung anwenden zu können. Das gibt es aber bisher nicht.

Es zeigte sich, dass diese Verfahren trotz ihrer teilweisen Einfachheit durchaus geeignet sind, den Leerfahrtanteil ausreichend genau zu bestimmen. Das Verfahren nach *Großeschallau* liefert eine optimale Lösung unter idealisierten Bedingungen, das Verfahren nach *Malmborg* das Gegenteil, eine extrem schlechte Lösung. Damit ist eine Abschätzung für die untere bzw. obere Grenze der Fahrzeuganzahl gegeben. Da lediglich die Leerfahrzeit den Unterschied ausmacht, kann die maximale Flottengröße höchstens doppelt so groß sein kann wie die als optimal berechnete Größe. Die Leerfahrzeit kann unter optimalen Bedingung Null sein, wenn stets

unmittelbar nach Abgabe der TE sofort und ohne zusätzliche Leerfahrt eine neue aufgenommen werden kann, und sie ist üblicherweise nicht größer als die Lastfahrzeit¹.

Die drei anderen Verfahren verwenden einfache Schätzungen der Leerfahrzeit, ihre Ergebnisse liegen zwischen unterem und oberem Grenzwert und können im Einzelfall durch Änderung der Topologie (Lage der Stationen, Ein- oder Zweirichtungsverkehr, zusätzliche Wegelemente einschließlich zusätzlicher Verzweigungen oder Zusammenführungen) überproportional schwanken. Der Vergleich der Ergebnisse ist beispielhaft in Tabelle 1 zu sehen. Der Unterschied zeigt sich tatsächlich nur in den Leerfahrwegen und -zeiten.

Tabelle 1: Vergleich der analytischen Verfahren zur Bestimmung der Flottengröße (Beispiel)

Heuristik nach	Wege [m]		Fahrzeiten [s]		Übergabezeiten [s]	Gesamtzeit [s]	Fahrzeuganzahl
	Lastfahrt	Leerfahrt	Lastfahrt	Leerfahrt			
Großeschallau (Optimum)	15.410	2.377	15.806	2.486	3.960	22.251	6,2
Rajotia		5.110		5.504		25.270	7,0
Beisteiner		15.410		15.806		35.571	9,9
Kuhn		13.848		14.213		33.978	9,4
Malmborg (Maximum)		21.962		22.358		42.123	11,7

Im betrachteten Beispiel nach Tabelle 1 ergibt sich eine Mindestgröße der Flotte theoretisch von 6,2 und praktisch von 7 Fahrzeugen, um den geforderten Durchsatz zu erbringen. Die maximal erforderliche Fahrzeuganzahl liegt bei 12. Eine sinnvolle Flottengröße wird hiermit auf Werte zwischen 7 und 12 Fahrzeugen eingegrenzt. Eine detaillierte Bewertung der Ergebnisse erfolgt später im Anschluss an die Erläuterungen zum Simulationsmodell

In den analytischen Verfahren sind nur Zeiten mit Aktivität enthalten und *keine Wartezeiten*, d.h. es wird unterstellt, dass sich jedes Fahrzeug ohne zusätzliche Zeitverlust bewegt. Tatsächlich sind jedoch vor allem vor stark frequentierten Elementen (Kreuzungen, Haltestellen) Wartezeiten nicht zu vermeiden, weil diese Bereiche eine begrenzte Kapazität haben. Es kann sich stets nur ein Fahrzeug im jeweiligen Bereich befinden, weitere Fahrzeuge müssen warten. Abbildung 3 zeigt einen solchen Situation beispielhaft. Das gilt auch für AMR, weil in diesem Fall ein anderes AMR im Kreuzungsbereich oder vor der Haltestelle nicht als Hindernis gilt, das umfahren werden kann. Außerdem wird angenommen, dass gerade leer gewordene Fahrzeuge den Haltestellenbereich umgehend verlassen.

¹ Ein überhöhter Leerfahrtanteil könnte z.B. entstehen, wenn wegen Einrichtungsbetrieb die leere Rückfahrt nur über Umwege möglich ist. Ungünstige Transportnetzwerk-Topologien können für solche Extrembeispiele sorgen, sie stellen praktisch aber eher Ausnahmefälle dar.

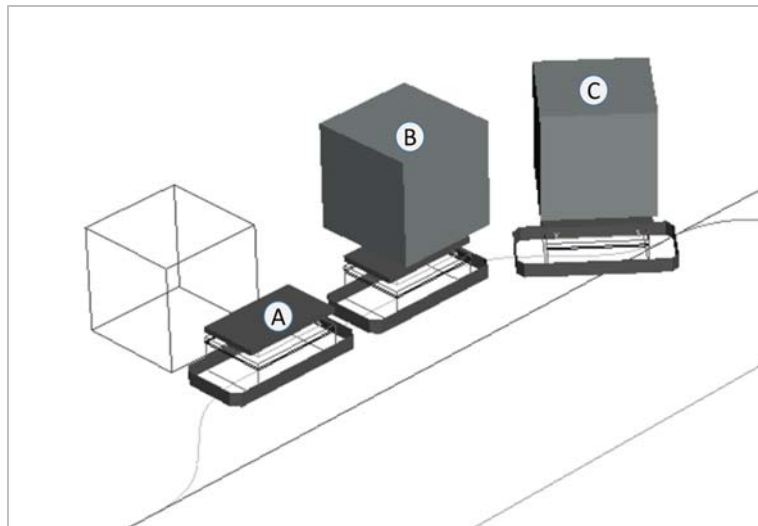


Abbildung 3: Die Fahrzeuge B und C müssen warten, bis Fahrzeug A die Zielhaltestelle verlassen hat

Grundlagen zur Berechnung

Transportauftrag

Transportaufträge (auch als Jobs bezeichnet) sind Aufträge für den Transport einer Transporteinheit (TE) von einer Quelle zu einer Senke. Die Transporteinheiten können dabei Pakete, Behälter, Kleinladungsträger (KLT nach VDA 4500), Europaletten, Gitterboxpaletten bis zu Transportregalen sein (s. Abbildung 1). Für jede Größe und für jedes Gewicht gibt es entsprechende AMR. Die Übergabe der TE erfolgt an Haltestellen des Transportsystems. Die Fahrten erfolgen generell auf Fahrbahnen innerhalb von ausgewiesenen Verkehrsflächen.

Bei AMR sind das jedoch keine fixen, vorgegebenen Wege, sondern sie können sich flexibel den genauen Fahrweg selbst suchen. Dennoch wird es immer nur entlang der ausgewiesenen Verkehrsflächen sein, so dass die in einer Kürzesten-Wege-Matrix definierten Weglängen als realistische Grundlage dienen können. In weniger stark vernetzten Transportsystemen gibt es meist wenig bis keine Alternativen zum kürzesten Weg, stark vernetzte Systeme hingegen haben dagegen oftmals redundant ausgelegte Fahrwege, die sich meist nur minimal in ihrer Länge unterscheiden und vielfach zur Lastbalancierung erforderlich sind. In beiden Fällen ist daher prinzipiell nicht von großen Abweichungen der Fahrweglängen auszugehen. Und das Ausweichen von statischen oder dynamischen Hindernissen, z. B. abgestellten TE, Personen oder entgegenkommenden Fahrzeugen, hat für die Weglänge nur eine untergeordnete Bedeutung.

Transportsystem

Die im folgenden beschriebenen Untersuchungen zur Flottengröße wurden mit verschiedenen Transportnetzen, verschiedenen Lastszenarien und verschiedenen technischen Parametern der AMR getestet und ausgewertet. Es stellten sich bei allen Varianten qualitativ ähnliche Verläufe der untersuchten Kennzahlen, Flottengrößen usw. ein, die numerischen Ergebnisse unterschieden sich natürlich abhängig vom Gesamttransportvolumen, Ausdehnung des Transportsystems und technischen Parametern.

Für die systematische Untersuchung wurde das in Abbildung 4 dargestellte Layout verwendet, unterschiedliche Szenarien entwickelt und durch schrittweise Änderung einzelner Parameter sowohl Berechnungen als auch Simulationen vorgenommen und gegenübergestellt.

Insgesamt sind 12 Haltestellen vorhanden, die sowohl in x- als auch in y-Richtung symmetrisch angeordnet sind. Funktional ist es möglich, dass jede Haltestelle entweder nur eine Quelle, nur eine Senke oder sowohl Quelle als auch Senke sein kann. Die Entscheidung darüber wird in der Transportmatrix festgelegt, in dem bestimmte Matrixelemente besetzt sind oder nicht.

Für jede Haltestelle existiert eine sogenannte Haltebucht, die es anderen Fahrzeugen erlaubt, ohne Zeitverlust an einem haltenden Fahrzeug vorbeizufahren. Außerdem gibt es bei Verwendung der später beschriebenen Steuerungsstrategie C für die Haltestellencluster vier zugeordnete zentrale Parkplätze (P1 bis P4) für leere Fahrzeuge.

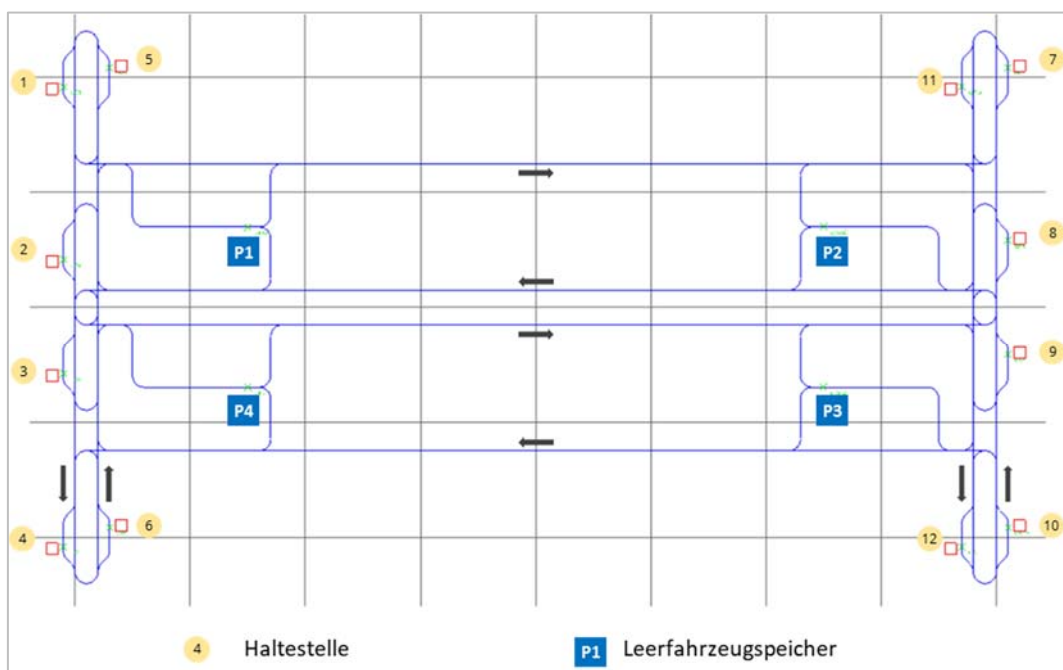


Abbildung 4: Layout des betrachteten Modells und Lage der Haltestellen sowie der Parkplätze

Die Rasterlinien haben einen Abstand von 10 m. Es wird eine Fläche von ca. 80 x 55 m belegt. Die Gesamtlänge aller Transportwege beträgt ca. 660 m. Das abgebildete Layout wurde als maßstäbliche *pathmover*-Komponente mit AutoMod implementiert. Daraus wurden schließlich die Zahlenwerte für die Entfernungsmatrix entnommen (Abbildung 5), so dass Berechnung und Simulation auf identischer Datenbasis erfolgen. Die zum Teil unterschiedlichen Zahlenwerte z. B. von *Sta.1* → *Sta.2* und *Sta.2* → *Sta.1* resultieren daher, dass einzelne Wegabschnitte nur in einer Richtung durchfahren werden dürfen.

	Sta.1	Sta.2	Sta.3	Sta.4	Sta.5	Sta.6	Sta.7	Sta.8	Sta.9	Sta.10	Sta.11	Sta.12
Sta.1	0	15	28	43	14,1	54,1	97,1	109,3	111,3	126,3	108,3	115,1
Sta.2	38,3	0	13	28	27,1	39,1	109,3	95,1	96,3	111,3	120,4	100,1
Sta.3	40,3	25,3	0	15	29,1	26,1	111,3	96,3	97,4	112,4	122,4	101,3
Sta.4	55,3	40,3	38,3	0	44,1	11,1	126,3	111,3	112,4	127,4	137,4	116,3
Sta.5	11,1	26,1	39,1	54,1	0	65,3	108,3	120,4	122,4	137,4	119,4	126,3
Sta.6	44,1	29,1	27,1	14,1	33	0	115,1	100,1	101,3	116,3	126,3	105,1
Sta.7	127,4	112,4	111,3	126,3	116,3	137,4	0	38,3	40,3	55,3	11,1	44,1
Sta.8	112,4	97,4	96,3	111,3	101,3	122,4	15	0	25,3	40,3	26,1	29,1
Sta.9	111,3	96,3	95,1	109,3	100,1	120,4	28	13	0	38,3	39,1	27,1
Sta.10	126,3	111,3	109,3	97,1	115,1	108,3	43	28	15	0	54,1	14,1
Sta.11	116,3	101,3	100,1	115,1	105,1	126,3	14,1	27,1	29,1	44,1	0	33
Sta.12	137,4	122,4	120,4	108,3	126,3	119,4	54,1	39,1	26,1	11,1	65,3	0

Abbildung 5: Entfernungsmatrix (Angaben in m)

Die Transporte erfolgen zwischen den Haltestellen i und j auf einem vordefinierten Verkehrswegenetz und benötigen dafür eine Fahrzeit $t_{F,i,j}$. Diese ist abhängig von der Länge des Fahrweges und von technischen Parametern des eingesetzten Fahrzeugs (Geschwindigkeit, Anfahr- und Bremsbeschleunigung, Schaltzeiten usw.). Unter der Annahme von ausreichend langen Wegen wird auf den Spezialfall der sogen. „Spitzfahrt“ verzichtet. Es gilt daher bei bekannter Weglänge folgende Fahrzeitgleichung:

$$t_{F,i,j} = \frac{s_{i,j}}{v_F} + \frac{v_F}{a_F} + t_0 \quad (3)$$

Dabei ist:

- $s_{i,j}$ Länge des Fahrweges von Haltestelle i nach j [m]
- v_F mittlere Fahrgeschwindigkeit des Fahrzeugs [m/s]
- a_F mittlere Beschleunigung des Fahrzeugs [m/s²]
- t_0 Zeitzuschlag für Kurvenfahrt, Hindernisumfahrung o.ä. [s]

Es wird eine vollständige Fahrzeitmatrix zwischen allen Haltestellen benötigt. Der „Umweg“ über die Entfernungsmatrix resultiert daher, dass sich Entfernungen zwischen markanten Punkten (Haltestellen, Kreuzungen, Verzweigungen, Zusammenführungen) unabhängig vom späteren Transportmittel einfach bestimmen lassen, während die Zeiten, wie aus Gleichung (3) ersichtlich, durch Geschwindigkeit und Beschleunigung des Fahrzeugs beeinflusst werden. Und die Notwendigkeit einer vollständigen Matrix ist für die geplanten Lastfahrten (Fahrzeug mit einer TE beladen von der Quelle zur Senke) offensichtlich, aber auch für die unvermeidlichen Leerfahrten (von der Senke zu einer zu ermittelnden Quelle) wird eine Fahrzeit benötigt, um letztendlich auch hierfür den Zeitaufwand zu bestimmen bzw. entsprechend der für die Heuristik maßgebenden Festlegung (z. B. kürzeste, mittlere oder maximale Fahrzeit) auszuwählen.

Für die Umrechnung der Fahrwege in Fahrzeiten wird in allen untersuchten Szenarien von technisch identischen AMR ausgegangen, d.h. es werden die in Tabelle 2 hinterlegten Fahrzeugparameter zugrunde gelegt:

Tabelle 2: Technische Parameter der AMR für Berechnung und Simulation

v_F	1,0 m/s	mittlere Geschwindigkeit der Fahrzeuge
a_F	0,5 m/s ²	mittlere Anfahr- und Bremsbeschleunigung
$t_{\ddot{U}}$	10,0 m/s	mittlere Lastübernahme-/Lastübergabezeit
t_0	0 s	keine Zeitzuschläge

Eine Variation dieser technischen Parameter wurde bei der Untersuchung nicht vorgenommen, weil damit lediglich der Parameter *Zeit* für die Dauer einer Fahrt angepasst wird, aber keine inhaltlichen oder strukturellen Änderungen im Prozessablauf einhergehen.

Spielzeitberechnung

Die Berechnung von Flottengrößen basiert, wie eingangs erläutert, auf einer Zeitbilanz für die Ausführung eines mittleren Arbeitsspiels. Das Arbeitsspiel umfasst dabei einen geschlossenen Bewegungsablauf eines Fahrzeugs zur Erfüllung einer Transportfunktion und wiederholt sich für jede Fahrt. Das Arbeitsspiel beginnt am aktuellen Standort des Fahrzeugs und umfasst die Leerfahrt zur Quelle, die Lastaufnahme, die Fahrt mit Last zum Zielort (Senke) und endet mit der Gutabgabe. Die Summe der zugehörigen Zeitanteile ergibt die Spielzeit. In den im nächsten Abschnitt dargestellten Steuerungsstrategien B und C fallen zusätzlich auch sogenannte *unechte* Leerfahrten an, die das nicht zielführende sukzessive Weiterrücken von leeren Fahrzeugen bzw. die Fahrt zu einem Parkplatz beinhalten und die deswegen nicht in die Spielzeitbetrachtung einfließen.

Tabelle 3: Heuristiken zur Ermittlung der Leerfahrten

Heuristik nach	Beschreibung	Kommentar
<i>Großeschallau</i> (1984)	in zwei Schritten: 1. lokaler Ausgleich ² von Fahrzeugangebot und -nachfrage und 2. alle verbleibenden Leerfahrten nur zwischen Orten mit minimaler Distanz	bedarfsgerecht bezüglich der Menge, praktisch aber wegen fehlendem Zeitbezug nicht ausreichend, bestimmt untere Grenze
<i>Rajotia et al.</i> (1998)	wie <i>Großeschallau</i> , aber ohne lokalem Ausgleich	bedarfsgerecht, aber nicht optimal, liefert praktisch realistischere Ergebnisse als <i>Großeschallau</i>

² Beim „lokalen Ausgleich“ wird angenommen, dass die innerhalb der Betrachtungszeit an einer Haltestelle ankommenden und leer werdenden Fahrzeuge mengenmäßig mit den an der gleichen Haltestelle benötigten Leerfahrzeugen „verrechnet“ werden. Es wird allgemein kritisiert, dass das Ergebnis eine Unterschätzung der tatsächlichen Zahl der Leerfahrten ist, weil ein Fahrzeug nach Abgabe seiner TE möglicherweise zu diesem Zeitpunkt keine andere TE vorfindet, die an derselben Station abgeholt werden kann. Insbesondere bei kleinen Transportmengen ist die Wahrscheinlichkeit gering, dass Anlieferung und Abholung zeitlich zusammenfallen.

<i>Beisteiner (1982)</i>	je Lastfahrt eine identische Leerfahrt in umgekehrter Richtung	Passend bei Pendel- oder Shuttlebetrieb, im Allgemeinen aber nicht realistisch und nur korrekt bei bidirektionalen Wegen, einfach in der Anwendung
<i>Kuhn (1983)</i>	Leerfahrten von allen Senken anteilig zu allen Quellen	bedarfsgerecht bezüglich der Menge, ohne Zeitbezug und ohne jegliche Optimierung
<i>Malmborg et al. (1984)</i>	alle Leerfahrten von den Senken führen zum am weitesten entfernten Quellort, beachtet werden nur Leerfahrzeugangebote, aber nicht die tatsächlichen Fahrzeugbedarfe	nicht am Bedarf orientiert, dafür alles zur entferntesten Quelle, ungünstigste Lösung bestimmt obere Grenze der Flottengröße

Zeiten für Gutaufnahme und -abgabe sind bauartabhängig, können aber als konstant für alle Szenarien angenommen werden. Fahrzeiten hingegen sind abhängig vom gefahrenen Weg und sind pro Transportrelation zu bestimmen. Für Lastfahrten sind je Quelle-Ziel-Relation die Anzahl der Fahrten und die Länge des Weges bekannt (Transportmatrix), während Leerfahrten zunächst nicht bekannt sind, Anzahl und Dauer aber mittels verschiedener Heuristiken prognostiziert werden können. Eine knappe Übersicht der betrachteten Heuristiken enthält Tabelle 3.

Die Berechnung des gesamten Zeitbedarfs für alle geforderten Transportspiele erfolgt als Summation der Zeiten aller Last- und Leerfahrten sowie der Zeiten für Gutaufnahme und Gutabgabe:

$$t_{Ges} = t_{Last} + t_{Leer} + t_{\text{übergabe}} \quad (4)$$

wobei für die einzelnen Summanden gilt

$$t_{Last} = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n \lambda_{ij}^{Last} \cdot t_{ij} \quad (5)$$

$$t_{Leer} = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n \lambda_{ij}^{Leer} \cdot t_{ij} \quad (6)$$

$$t_{\text{übergabe}} = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n \lambda_{ij}^{Last} \cdot (t_{Auf} + t_{Ab}) \quad (7)$$

bzw. nach Einsetzen von (5), (6) und (7) in Gleichung (4)

$$t_{Ges} = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n \lambda_{ij}^{Last} \cdot (t_{ij} + t_{Auf} + t_{Ab}) + \lambda_{ij}^{Leer} \cdot t_{ij} \quad (8)$$

Es gilt:

- λ_{ij}^{Last} Anzahl (Last-)Fahrten von i nach j
- λ_{ij}^{Leer} Anzahl der Leerfahrten von i nach j
- t_{ij} Fahrzeit von i nach j
- t_{Auf} Zeit für Gutaufnahme
- t_{Ab} Zeit für Gutabgabe

Üblicherweise werden Durchsätze in Anzahl Fahrten pro Stunde angegeben, d.h. die Bezugsperiode ist 3600 s.

Die berechnete Gesamtzeit wird ins Verhältnis zur Länge der Bezugsperiode gesetzt und ergibt damit die notwendige Fahrzeuganzahl. Für praktische Anwendungen wird das Ergebnis zusätzlich mit zwei Nutzungsgraden korrigiert: Die Fahrzeugverfügbarkeit η_V reduziert die Bezugsperiode um Zeiten der Nichtverfügbarkeit (für Wartung, Inspektion, Instandhaltung und Störungen), die geplanten Auslastung η_A berücksichtigt nicht in der Berechnung einfließende Behinderungszeiten oder technisch bedingte Wartezeiten sowie eine Pufferzeit, um stochastischen Schwankungen im Transportaufkommen entgegenzuwirken. (Für den Vergleich zwischen analytischen Verfahren und Simulationsergebnissen wird aber auf diese Korrektur verzichtet.)

$$n_{Fzg} = \frac{t_{Ges}}{3600} \cdot \frac{1}{\eta_V} \cdot \frac{1}{\eta_A} \quad (9)$$

Betrachtete Szenarien

Die Szenarien sind hypothetische Annahmen für Materialströme zwischen den Haltestellen, die nicht auf einem realen Produktions- oder Distributionssystem basieren. Haltestellen können funktional als Quelle, Senke oder beides betrieben werden.

Zwecks Vergleichbarkeit werden je Szenario 198 Transportaufträge/h betrachtet. Die Zahl rührt daher, dass im ersten untersuchten Szenario (Szenario 4) von jeder der 12 Stationen zu alle anderen 11 Stationen genau 1,5 TE/h transportiert werden sollen. Ein „schönerer“ Wert von bspw. 200 Transporten/h ergibt je Relation 1,515151 Transporte/h und führte auf Grund von Rundungsfehlern immer wieder zu systematischen Abweichungen zwischen simulierten und berechneten Ergebnissen.

In den Szenarien 1 bis 3 sind Quellen und Senken räumlich getrennt. In Szenario 1 erfolgen Transporte ausschließlich in horizontaler³ Richtung von links nach rechts, d.h. Leerfahrzeuge entstehen immer auf der rechten Seite und fahren leer zum nächsten Auftrag nach links. In Szenario 2 sind Quellen und Senken sowohl auf der rechten als auch der linken Seite. Die Lastfahrten sind im Mittel genauso lang wie in Szenario 1, aber die Leerfahrten verkürzen sich, weil neue Jobs auf beiden Seiten warten und Leerfahrzeug wegen der Kürzesten-Wege-Strategie in den meisten Fällen auf der gleichen Seite bleiben.

Getrennte Quellen und Senken gibt es auch in Szenario 3. Transporte erfolgen hier sowohl in horizontaler als auch in vertikaler Richtung, so dass auch Lastfahrten im Mittel kürzer werden.

Die Szenarien 4, 5 und 6 heben die Trennung der Haltestellen in Quellen und Senken auf und erlauben Transporte zwischen allen Haltestellen. Szenario 4 nimmt dabei an, dass jede der Relationen gleich häufig genutzt werden soll, während in Szenario 5 die „inneren“ Haltestellen (5, 6, 11 und 12) doppelt so viel wie die „äußeren“ versenden und entsprechend auch doppelt so viel dort ankommen soll. In Szenario 6 ergeben zufällig angenommene Transporte zwischen einzelnen Haltestellen eine ungleichmäßige Häufigkeit je Transportrelation.

Ergebnisse der analytischen Verfahren

In der nachfolgenden Übersicht (Tabelle 5) sind die Ergebnisse der Berechnungen für die untersuchten Szenarien dargestellt. Mit den fünf verwendeten heuristischen Verfahren wird die Flottengröße auf einen möglichen Bereich eingegrenzt. Es zeigt sich, dass die Verfahren unterschiedliche Herangehensweisen besitzen und damit verschieden Aspekte priorisieren: eine minimale Flottengröße, bei der der Durchsatz gerade erreicht wird, eine maximale Flottengröße als obere Abschätzung, eine Flottengröße mit ausreichend Reserven bei sich ändernden Anforderungen. Es sollte im Ermessen des Anwenders bzw. des Planers liegen, welcher Aspekt dabei für ihn wichtig ist.

³ „Horizontal“ und „vertikal“ bezieht sich in diesem Kontext auf das Layout und bedeutet auf der Zeichnung die Fahrt von links nach rechts oder umgekehrt („horizontal“) bzw. von oben nach unten oder umgekehrt („vertikal“).

Tabelle 5: Ergebnisse Szenarien (Analytische Berechnung)

Heuristik nach	Wege [m]		Anzahl Leer-fahrten	Fahrzeiten [s]		Über-gabe-zeit [s]	Gesamt-zeit [s]	Fzg-anzahl [Stck]
	Last-fahrt	Leer-fahrt		Last-fahrt	Leer-fahrt			
Großeschallau (Optimum)	21.308	108	198,0	21.704	8.283	48.581	13,5	
Rajotia	21.308	108	198,0	21.704	8.283	48.581	13,5	
Beisteiner	22.521	114	198,0	22.917	8.283	49.794	13,8	
Kuhn	22.521	114	198,0	22.917	8.283	49.794	13,8	
Malmborg (Maximum)	23.100	117	198,0	23.496	8.283	50.373	14,0	

Heuristik nach	Wege [m]		Anzahl Leer-fahrten	Fahrzeiten [s]		Über-gabe-zeit [s]	Gesamt-zeit [s]	Fzg-anzahl [Stck]
	Last-fahrt	Leer-fahrt		Last-fahrt	Leer-fahrt			
Großeschallau (Optimum)	7.887	40	198,0	8.283	28.160	7,8		
Rajotia	7.887	40	198,0	8.283	28.160	7,8		
Beisteiner	15.521	78	198,0	15.917	35.794	9,9		
Kuhn	15.521	78	198,0	15.917	35.794	9,9		
Malmborg (Maximum)	23.156	117	198,0	23.552	43.429	12,1		

Heuristik nach	Wege [m]		Anzahl Leer-fahrten	Fahrzeiten [s]		Über-gabe-zeit [s]	Gesamt-zeit [s]	Fzg-anzahl [Stck]
	Last-fahrt	Leer-fahrt		Last-fahrt	Leer-fahrt			
Großeschallau (Optimum)	7.887	40	198,0	8.283	28.160	7,8		
Rajotia	7.887	40	198,0	8.283	28.160	7,8		
Beisteiner	15.521	78	198,0	15.917	35.794	9,9		
Kuhn	15.521	78	198,0	15.917	35.794	9,9		
Malmborg (Maximum)	23.156	117	198,0	23.552	43.429	12,1		

Heuristik nach	Wege [m]		Anzahl Leer-fahrten	Fahrzeiten [s]		Über-gabe-zeit [s]	Gesamt-zeit [s]	Fzg-anzahl [Stck]
	Last-fahrt	Leer-fahrt		Last-fahrt	Leer-fahrt			
Großeschallau (Optimum)	0	k.A.	0,0	0	19.606	5,4		
Rajotia	3.379	17	198,0	3.775	23.381	6,5		
Beisteiner	15.250	77	198,0	15.646	35.252	9,8		
Kuhn	13.979	77	181,5	14.342	33.948	9,4		
Malmborg (Maximum)	23.113	117	198,0	23.509	43.115	12,0		

Heuristik nach	Wege [m]		Anzahl Leer-fahrten	Fahrzeiten [s]		Über-gabe-zeit [s]	Gesamt-zeit [s]	Fzg-anzahl [Stck]
	Last-fahrt	Leer-fahrt		Last-fahrt	Leer-fahrt			
Großeschallau (Optimum)	0	k.A.	0,0	0	20.019	5,6		
Rajotia	6.047	31	198,0	6.443	26.462	7,4		
Beisteiner	15.663	79	198,0	16.059	36.077	10,0		
Kuhn	14.176	79	179,8	14.536	34.554	9,6		
Malmborg (Maximum)	23.571	119	198,0	23.967	43.985	12,2		

Heuristik nach	Wege [m]		Anzahl Leer-fahrten	Fahrzeiten [s]		Über-gabe-zeit [s]	Gesamt-zeit [s]	Fzg-anzahl [Stck]
	Last-fahrt	Leer-fahrt		Last-fahrt	Leer-fahrt			
Großeschallau (Optimum)	2.377	44	54,5	2.486	22.251	6,2		
Rajotia	5.110	26	197,0	5.504	25.270	7,0		
Beisteiner	15.103	76	198,0	15.806	35.264	9,8		
Kuhn	13.848	76	182,6	14.213	33.978	9,4		
Malmborg (Maximum)	21.962	111	198,0	22.358	42.123	11,7		

Beim Blick auf Tabelle 5 fällt auf, dass jede Heuristik bei den einzelnen Szenarien zu tendenziell ähnlichen Ergebnissen kommt. Eine Ausnahme bildet Szenario 1, bei dem eine ausgeprägte Schiefast vorliegt: Quellen und Senken sind getrennt, alle Lastfahrten führen von links nach rechts, die Leerfahrten dementsprechend in der Gegenrichtung von rechts nach links. Es ergeben sich somit die längsten Leerfahrten überhaupt und daher der größte Zeitbedarf pro Transportspiel. Die Ergebnisse der Heuristiken unterscheiden sich nur minimal.

Auch Szenario 2 und 3 besitzen getrennte Quellen und Senken, allerdings nicht mehr nur einem bestimmten Bereich zuordenbar. Damit reduzieren sich in beiden Fällen die Leerfahrten erheblich, weil dann die Kürzeste-Wege-Strategie zum Tragen kommt. Während in Szenario 2 die Lastfahrten im Mittel gleich lang sind wie in Szenario 1, wird durch die geänderte Zuordnung

von Quellen und Senken bei ansonsten gleicher Betriebsweise der Leerfahrweg kürzer. In Szenario 3 verkürzt sich zusätzlich auch der Lastfahrweg, weil nur die Hälfte der Lastfahrten über die langen horizontalen Verbindungsstrecken führt und die andere Hälfte lediglich die kurzen vertikalen Wege benutzt.

In den Szenarien 1 bis 3 sorgt die Trennung der Funktionalität der Haltestellen in Quellen und Senken dafür, dass der Aspekt „lokaler Ausgleich“ für das Leerfahrtmanagement keine Rolle spielt (erkennbar am Vergleich der Heuristiken nach *Großeschallau* und *Rajotia*, die identische Ergebnisse sowohl zu den Leerfahrten als auch zu den Fahrzeuganzahlen liefern).

In den Szenarien 4 bis 6 können alle Haltestellen sowohl Quelle als auch Senke sein. Und wenn die Transporte ausgeglichen sind (Szenario 4 und 5), d.h. an allen Haltestellen genauso viel leere Fahrzeuge benötigt werden, wie auch beladen ankommen, sind bei rein mengenmäßiger Betrachtung keine Leerfahrten erforderlich. Das ist jedenfalls das Ergebnis nach dem lokalen Ausgleich bei *Großeschallau*. Realistisch ist aber ein asynchrones Eintreffen von Transportgütern und leeren Fahrzeugen, so dass abweichend von der Modellannahme trotzdem ein Bedarf an Leerfahrten entsteht.

Während die Szenarien 1 bis 5 auf idealisierten Transportmatrizen basieren, um mögliche Einflussgrößen herauszuarbeiten, verwendet Szenario 6 ein realistischeres Transportaufkommen über zufällig ausgewählte Relationen und mit zufälliger Häufigkeit, Hauptsache es sind wegen der Vergleichbarkeit wieder 198 Transporte pro Stunde. Das zahlenmäßige Ergebnis wird davon aber nicht beeinflusst, die ermittelten Fahrzeuganzahlen variieren für jede Heuristik zwischen den Szenarien 4 bis 6 nur minimal.

Steuerungsstrategien

Steuerungsstrategien sind Methoden und Techniken, die eingesetzt werden, um Systeme effektiv zu leiten und zu kontrollieren. Im konkreten Fall geht es um Strategien für das Verhalten der Fahrzeuge:

- für die Auftragszuweisung (welches Fahrzeug übernimmt welchen Transport) im Fall
 - ein neuer Transportauftrag wird erzeugt und benötigt ein leeres Fahrzeug zum Transport. Es ist aus der Liste der freien Fahrzeuge eine Auswahl zu treffen
 - ein Fahrzeug sucht nach Abgabe einer TE einen neuen Job. In dem Fall wird die Liste der Quellorte nach TE durchsucht, denen noch keinem Job zugewiesen wurde.
- für das Verhalten nach Abgabe der TE, wenn kein neuer Job gefunden wurde.

Steuerungsstrategien können in die Simulation eingebunden werden, um ein bestimmtes Verhalten abzubilden und dabei deren Wirkung auf die Simulationsergebnisse zu ermitteln. In den analytischen Verfahren können derartige Effekte kaum effektiv berücksichtigt werden: man müsste die streng formalisierte Zusammenhänge zwischen den Strategien und ihren Auswirkungen auf Kennzahlen wie Häufigkeit von Leerfahrten, DLZ, Leer- und Lastfahrzeiten usw. als Input bereits kennen.

Strategien für die Auftragszuweisung

Für die Auftragszuweisung wird häufig die Kürzeste-Wege-Strategie verwendet, um die Verbindung zwischen einem Fahrzeug und einer TE basierend auf der minimalen Entfernung oder Fahrzeit herzustellen. Im Einzelfall kann das jedoch dazu führen, dass im Layout ungünstig gelegene, nur durch lange Fahrwege erreichbare Quellorte mit dieser Strategie benachteiligt werden und sehr lange auf ein Leerfahrzeug warten müssen. Der Nachteil verschwindet allerdings, wenn mehr Fahrzeuge zum Einsatz kommen.

Um langen Wartezeiten der TE zu begegnen, kann als Alternative bspw. die Strategie FIFO (First-In-First-Out) zum Einsatz kommen, bei der Transportaufträge in der Reihenfolge ihres Entstehens und unabhängig von der Erreichbarkeit abgearbeitet werden mit dem Ziel, die maximalen Wartezeiten der TE auf ein leeres Fahrzeug zu begrenzen. Es führt allerdings nur zum Teil zum gewünschten Ergebnis: Tatsächlich entfallen die extrem großen Wartezeiten auf das leere Fahrzeug. Aber da sich FIFO nicht an kurzen Fahrwege orientiert, werden die Leerfahrten insgesamt länger, u.a. auch dadurch, dass Leerfahrzeuge an Haltestellen mit wartenden TE teilweise vorbeifahren, weil entsprechend FIFO zuerst eine andere TE abgeholt werden muss. Leerfahrzeuge erreichen im Mittel die zugewiesene Haltestelle später, was die *durchschnittlichen* Wartezeiten verlängert. Und: Es ist möglich, dass die Transportkapazität, die für die Kürzeste-Wege-Strategie ermittelt wurde, dann nicht mehr ausreicht und zusätzliche Fahrzeuge benötigt werden.

Die FIFO-Strategie ist nur sinnvoll als Ergänzung anwendbar, z. B. um kurzfristig Schiefasten im zeitlichen Transportbedarf an einzelnen Haltestellen zu begegnen und vor allem bereits lange wartende TE zu priorisieren. Im Folgenden wird daher stets die Zuordnung zwischen Aufträgen und Fahrzeugen mit der Kürzesten-Wege-Strategie vorgenommen.

Strategien für das Verhalten nach Abgabe der Transporteinheit

Nach Abgabe der TE stellt sich der weitere Ablauf wie folgt dar:

1. Am Standort des Fahrzeugs (=diese Haltestelle) befindet sich eine TE zur Abholung, die bisher noch keinem Fahrzeug zugewiesen wurde und die daher als nächster Job dem Fahrzeug zugewiesen wird (das entspricht dem „lokalen Ausgleich“: ankommende Fahrzeuge können ohne Leerfahrt einen neuen Transportauftrag übernehmen).
2. Es gibt an **mindestens einer anderen Haltestelle** eine TE, die noch keinem Fahrzeug zugewiesen wurde. Gibt es genau eine Haltestelle, kann das Fahrzeug diesen Job übernehmen, gibt es dagegen mehrere Haltestellen, wird die Zuordnung auf Grund des kürzesten Weges bestimmt. Das führt in beiden Fällen zu einer „echten“ Leerfahrt zum nächsten Quellort.
3. Es gibt momentan keine Transportaufträge. In diesem Fall wird eine Strategie gebraucht, die das weitere Vorgehen definiert.

Es werden drei Basisformen für mögliche Strategien betrachtet:

Strategie A: Das leere Fahrzeug verbleibt am aktuellen Ort, bis es einem neuen Transportauftrag zugeordnet werden kann. Es versperrt damit die erneute Nutzung der Haltestelle zur Abgabe von TEs durch andere Fahrzeuge. Für AMR ist dies kein Hindernis im üblichen Sinne, dass umfahren werden kann.

Strategie B: Das leere Fahrzeug fährt zu einer temporären Parkposition. Das ist in der Regel die als nächstes erreichbare Haltstelle oder Verzweigung. Dort wiederholt sich der beschriebene Ablauf, d.h. es wird erneut geprüft, ob infolge der zeitlichen Änderung inzwischen an dieser Stelle (Punkt 1) oder einer anderen (Punkt 2) eine TE zur Abholung bereitsteht. Falls dies nicht der Fall ist, wird wiederum weitergefahren. Das führt schließlich dazu, dass sich leere Fahrzeuge permanent in Bewegung befinden, aber im Falle einer neuen TE in kurzer Zeit vor Ort sein können. Das Vorrücken zu einer vermutlich günstiger gelegenen Parkposition wird als *unechte* Leerfahrt bezeichnet und separat ausgewertet.

Strategie C: Es gibt einen oder mehrere Leerfahrzeugspeicher als „Parkplätze“ abseits des Fahrkurses, wo leere Fahrzeuge bis zum nächsten Einsatz warten können. Auch Fahrten dahin sind *unechte* Leerfahrten, während Abruf und Fahrt zur Haltstelle als echte Leerfahrt gelten.

In der Praxis werden diese Basisformen meist kombiniert angewendet, um ihre Effizienz zu verbessern. So bleiben z. B. Fahrzeuge an der Zielhaltstelle stehen (Strategie A). Sobald sich aber ein weiteres Fahrzeug nähert, wird das wartende Fahrzeug „weggeschickt“ entweder zu einem Parkplatz (C) oder nur zur nächsten Kreuzung (B).

Simulationsmodell

Zur Simulation wurde ein generisches AutoMod-Modell entwickelt. Es umfasst zum einen allgemeine Methoden zu Schnittstellen (Dateninput, Konsolidierung und Ausgabe von Simulationsergebnissen) und zum anderen funktionale Prozessdefinitionen zur Durchführung der Simulation (Modellinitialisierung, Generieren von Transportaufträgen und Ausführen der Fahrzeugbewegungen). Letzteres ist der Kern der Simulation, wobei die Fahrzeuge während ihrer Fahrt permanent Prozess- bzw. Ereignisdaten sammeln, die am Ende komprimiert und als Kennzahlen ausgegeben werden. Bestandteil der Fahrzeugbewegung ist auch die Umsetzung der definierten Steuerungsregeln, insbesondere für die Zuordnung Transportauftrag – Fahrzeug sowie für das Verhalten der Leerfahrzeuge nach Lastabgabe.

Für die Verwendung des Modells ist ein maßstäbliches Layout des Wegenetzes mit allen Fahrwegen und der Lage der Haltestellen erforderlich (AutoMod). Die einzelnen simulierten Szenarien können alle Haltestellen oder nur einen Teil davon verwenden und somit unterschiedliche Anwendungsfälle berücksichtigen. Die Details dazu sind extern in der Transportmatrix zum jeweiligen Lastszenario zur Verfügung zu stellen. Die weiteren Inputdaten sind ebenfalls extern in einer zweiten Datei bereitzustellen. Mit beiden wird die Verbindung zwischen generischem Modell und Lastszenario vorgenommen.

Das Modell ist auf derzeit maximal 50 identische Fahrzeuge ausgelegt, kann aber (nach Änderung am Quellcode) beliebig erweitert werden. Die genaue Zahl der eingesetzten Fahrzeuge hingegen wird ebenso wie die technischen Parameter (Geschwindigkeit, Beschleunigung sowie Zeit für Aufgabe und Abgabe einer Transporteinheit) über die Inputdaten festgelegt. Zum Simulationsstart werden die Fahrzeuge reihum initial auf die Haltestellen verteilt. Zusätzlich wurden die technischen Parameter entsprechend Tabelle 2 festgelegt.

Der Vorteil der Simulation gegenüber einem analytischen Modell besteht darin, dass in einem Simulationslauf gleichzeitig eine Vielzahl von Daten erfasst und separat ausgewertet oder abgeleitet werden können, z.B. Wartezeiten von TE bis zur Lastaufnahme, oder *Durchlaufzeiten* der einzelnen TE. Die verwendeten analytischen Modelle auf der Basis der Zeitbedarfe können das nicht. Dafür müssten die komplexeren, aber schwer anzuwendenden Warteschlangenmodelle angewandt werden. Eine andere interessierende Kennzahl aus der

Simulation ist der *mittlere Gesamtfahrweg pro Fahrzeug und Zeitintervall* (siehe Abbildung 12), mit dem eine quantifizierbare Aufwandsbetrachtung unterstützt wird. Das numerische Ergebnis gilt zwar stets nur für den konkreten Einsatzfall, aber die tendenziellen Verläufe gelten qualitativ auch bei anderen untersuchten Beispielen.

Ergebnisse eines Simulationslaufs

Die Ergebnisse jedes Simulationslaufs werden in einer Outputdatei im CSV-Format abgelegt und entsprechend einer Namenskonvention benannt. Die Ausgabe im CSV-Format erlaubt es, einfach strukturierte Daten in Textform zu speichern und mit gängigen Office-Tools (Excel) zu öffnen und weiter zu verarbeiten.

Inhaltlich werden die folgenden Informationen aus der Simulation abgelegt:

- die vollständige Entfernungsmatrix aus dem Layout des AutoMod-Modells
- tabellarische Übersicht je Quelle:
 - o mittlere und maximale Wartezeiten der TE
 - o mittlere und maximale Warteschlangenlängen der TE vor den Quellen
 - o minimale und maximale Durchlaufzeiten
- als Matrix die Anzahl der durchgeführten Lastfahrten (IST-Werte)
- als Matrix die Anzahl der durchgeführten Leerfahrten (IST-Werte)
- komprimierte Kennzahlen für alle Fahrzeuge, wie bspw. mittlere Fahrzeiten / Fahrwege getrennt nach Last- und Leerfahrten, die mittlere Wartezeit bzw. Parkzeit der Fahrzeuge sowie die gesamte pro Fahrzeug zurückgelegte Fahrstrecke pro Stunde

Zusätzlich besteht über eine skriptbasierte Steuerung die Möglichkeit, Serien von Simulationsläufen mit schrittweise wachsenden Fahrzeuganzahlen vorzunehmen und die o.g. Kennzahlen zusätzlich in einer separaten Datei für eine graphische Auswertung in standardisierter Form zu speichern (Beispiel siehe Abbildung 8).

Einfluss der Fahrzeuganzahl auf Kenngrößen

Zunächst wird der Vergleich zwischen analytisch berechneten Flottengrößen und simulativ ermittelten Ergebnissen anhand von Szenario 4 vorgenommen (alle Haltestellen sind sowohl Quelle als auch Senke). Bei anderen Szenarien konnten qualitativ ähnliche Ergebnisse beobachtet werden. Der Vergleich zwischen den Szenarien erfolgt dann im nächsten Abschnitt.

Nach der analytischen Betrachtung (s. Tabelle 5) liegt die berechnete Flottengröße zwischen theoretisch 5,4 (praktisch 6) und 12. Zum Vergleich wurden für die Simulation die obere Grenze auf 18 Fahrzeuge erhöht, im ersten betrachteten Fall sogar auf 39, um die Auswirkung von zu vielen Fahrzeugen aufzuzeigen.

Der Durchsatz konnte nur mit der berechneten Minimalzahl von 6 Fahrzeugen nicht erfüllt werden, die Differenz ist allerdings gering und beträgt ca. 1% vom Soll-Durchsatz. Auch nach oben hin mit 39 Fahrzeugen konnte der Solldurchsatz erreicht werden, obwohl zwischenzeitlich die Gefahr eines Deadlocks bestand (siehe Abbildung 14). Die vielen Fahrzeuge sorgen dafür, dass trotzdem alle TE zum Zielort gebracht werden können.

Allerdings gibt es erhebliche Qualitätsunterschiede bei einer anderen Kenngröße: der Durchlaufzeit der TE. Die geringste DLZ wird bei 9 bis 13 Fahrzeugen erreicht, das entspricht dem mittleren bis oberen Bereich der analytisch ermittelten Fahrzeuganzahlen. Liegt die Fahrzeuganzahl darunter, gibt es zum jeweiligen Zeitpunkt für einen Transportbedarf teilweise keine Leerfahrzeuge, die TE muss länger auf ein Fahrzeug warten. Ist hingegen die Fahrzeuganzahl größer als die berechnete obere Grenze, steigen die gegenseitigen Behinderungen stark an, was die Beweglichkeit der Fahrzeuge einschränkt. Es führt zu einer Erhöhung der mittleren Lastfahrzeit, abhängig vom Layout manchmal auch der Leerfahrzeit. Gleichzeitig steigt speziell bei Strategie A die Parkzeit, d.h. die leergewordenen Fahrzeuge verweilen länger am Abgabeort der TE und behindern dadurch andere Fahrzeuge, ihre Zielhaltestellen anzufahren. Beides erhöht die DLZ erheblich (siehe Abbildung 6).

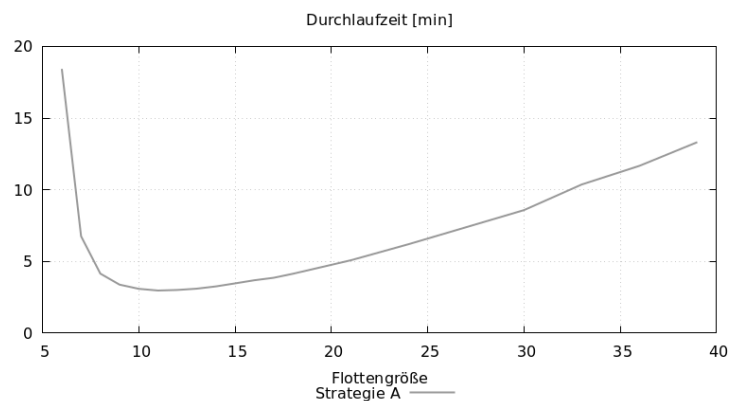


Abbildung 6: Abhängigkeit der DLZ von der Fahrzeuganzahl

Vergleich der Strategien

Strategien für die Auftragszuweisung (Fahrzeug sucht Transportauftrag)

Nach der Gutabgabe wird für das leergewordene Fahrzeug der nächste Transportauftrag gesucht. Steht am aktuellen Ort eine TE bereit, dann wird diese selektiert. Dann ist keine Leerfahrt notwendig (lokaler Ausgleich). Ansonsten wird häufig mit der Kürzesten-Wege-Strategie der nächstgelegene Ort mit Transportbedarf ausgewählt, so dass kurze Leerfahrten entstehen. Nachteilig aber kann hierbei werden, dass bei niedriger Transportkapazität (wenig Fahrzeuge) die weit entfernten Haltestellen nur selten angefahren werden können und die dort ankommenden TE lange Wartezeiten in Kauf nehmen müssen.

Die Alternative ist, die am längsten wartenden TE zu bevorzugen (FIFO). Aber auch das führt bei geringer Fahrzeuganzahl zur Verlängerung der Leerfahrten (sowohl Fahrweg als auch Fahrzeit, siehe Abbildung 7), weil nahe gelegene Haltestellen vielfach ignoriert werden (müssen), wenn sie noch nicht lange genug warten. Bei zunehmender Fahrzeuganzahl geht dieser Unterschied verloren, weil dann meist mehr Fahrzeuge als wartende TE vorhanden sind und keine Entscheidung mehr fällig wird. Bei allen anderen betrachteten Kennzahlen gibt es keine nennenswerten Veränderungen.

Ergebnis: Da es kaum relevante Unterschiede gibt, wurden die weiteren Untersuchungen mit der Kürzesten-Wege-Strategie durchgeführt.

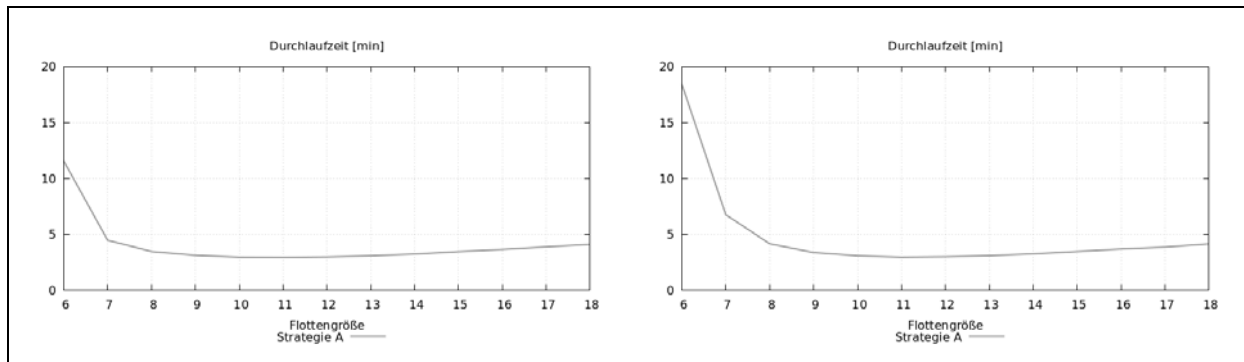


Abbildung 7: Vergleich Mittlere Wartezeit von TE an der Quelle bis zum Eintreffen eines Leerfahrzeugs bei den Kürzesten-Wege-Strategie (links) und bei FIFO (rechts)

Strategien für das Verhalten nach Abgabe der Transporteinheit

Nach Abgabe der TE am Zielort wird das weitere Verhalten durch eine der oben beschriebenen Strategien A, B oder C festgelegt. Bleibt die Suche nach dem nächsten Transportauftrag erfolglos, ist zu entscheiden, was mit dem leeren Fahrzeug geschehen soll. Dazu wurden drei relativ triviale Strategien untersucht.

Strategie A

Fahrzeuge verbleiben an Ort und Stelle und blockieren damit nach der Gutabgabe die Haltestelle, sodass andere Fahrzeuge nicht an die Haltestelle heranfahren können. Da das Layout an jeder Haltestelle sogen. Haltebuchten verwendet, sind keine Fahrzeuge betroffen, die lediglich vorbeifahren wollen.⁴

Es entstehen Wartezeiten für beladene, aber auch leere Fahrzeuge, die zu dieser Haltestelle wollen und davor warten müssen. Bei zunehmender Fahrzeuganzahl führt dies zu einem Überangebot an Fahrzeugen und damit zu längeren Lastfahrzeiten trotz gleich langer Lastfahrwege (Abbildung 8). Die Leerfahrzeiten und die Leerfahrwege verhalten sich synchron zueinander und wachsen zunächst auch, um nach Erreichen eines Maximums (etwa mit der berechneten Obergrenze für die Fahrzeuganzahl) wieder geringfügig zu sinken. Die Zeitdauer zwischen Ankunft an einer Haltestelle und der Weiterfahrt wird separat ausgewertet und heißt Parkzeit. Die Parkzeit steigt leicht und stetig an.

Die Anzahl der Leerfahrten haben einen ähnlichen Verlauf wie die mittleren Leerfahrten, also ansteigend bis zu einem Maximum und anschließend gering sinkend. Durch die Zunahme parkender Leerfahrzeuge an den Zielhaltestellen nimmt die Wahrscheinlichkeit zu, dass neu

⁴ Das gilt zumindest bis zu einem bestimmten Sättigungsgrad mit Fahrzeugen. Ab einer bestimmten Fahrzeugdichte nehmen die Behinderungen so stark zu, dass selbst Haltebuchten nicht mehr ausreichen, um alle Fahrzeuge blockierfrei bewegen zu können. Dann sind aber auch die Transportmengen für das Transportsystem so groß, dass die Verwendung von Fahrzeugen generell in Frage gestellt werden muss. Vielfach sind dann andere intralogistische System wie Stetigförderer zu bevorzugen.

Mit den eingangs beschriebenen bedienungstheoretischen Berechnungsansätzen als geschlossenes Warteschlangenmodell könnten solche Situationen (auf Grund der Blockierungen) auch analytisch erkannt werden.

ankommende TEs sofort eines der parkenden Fahrzeuge in Beschlag nehmen, so dass keine Leerfahrt erforderlich wird.

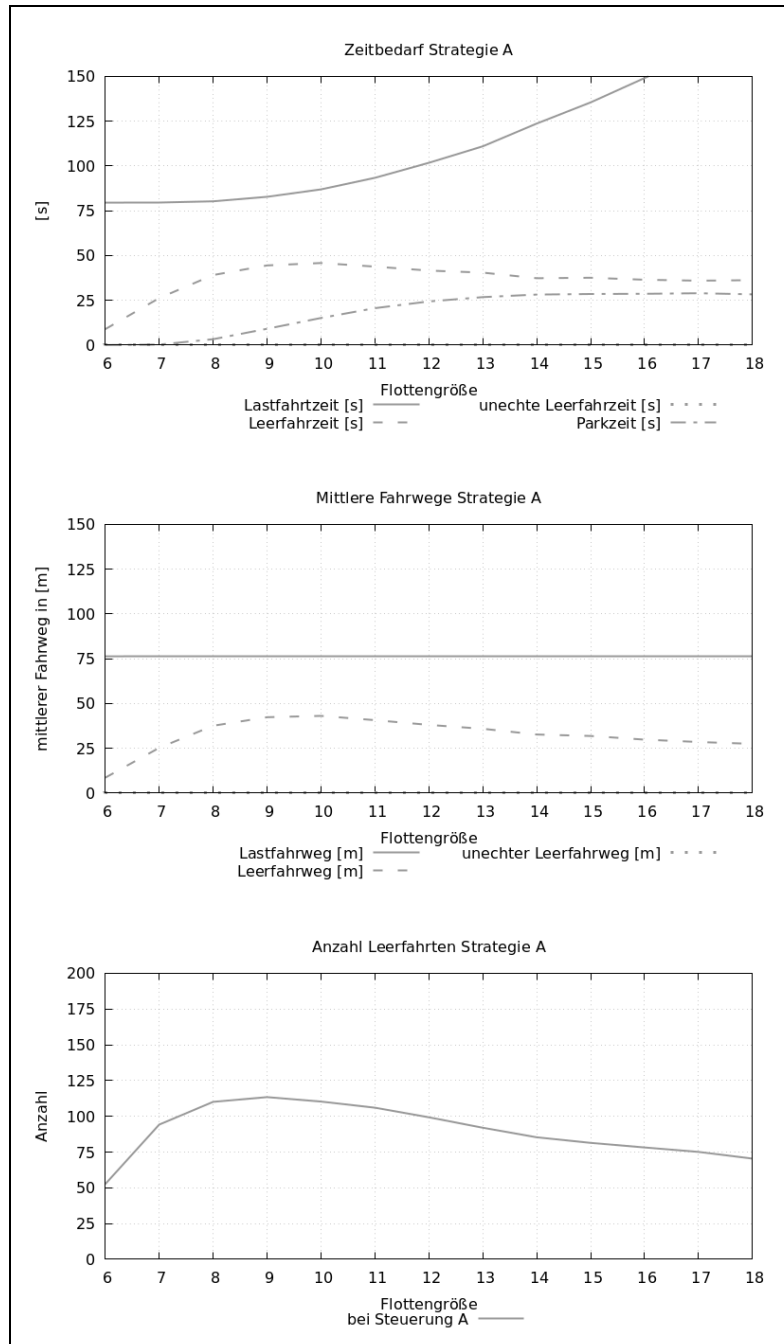


Abbildung 8: Mittlerer Zeitbedarf, mittlere Fahrweglänge und Anzahl an Leerfahrten bei Strategie A

Strategie B

Strategie B und C hingegen sorgen dafür, dass die Haltestelle nach Abgabe der TE für nachfolgende Fahrzeuge sofort wieder nutzbar wird. Im Fall von Strategie B sind nach der Gutabgabe die leeren Fahrzeuge permanent in Bewegung. Es gibt keine Parkzeit, stattdessen eine spezielle Form von Leerfahrt. Diese Form der Leerfahrt wird als *unecht* bezeichnet, weil sie

nicht dem ursprünglichen Zweck einer Leerfahrt dient, von der aktuellen Position zur Quelle des nächsten Transportauftrags zu gelangen, sondern lediglich ein Weiterrücken bewirken, um nachfolgende Fahrzeuge nicht zu behindern.

Die unechten Leerfahrten steigen mit der Flottengröße an: sowohl die mittleren Weglängen als auch die mittleren Fahrzeiten steigen deutlich an. Die echten Leerfahrten hingegen werden mit zunehmender Flottengröße geringfügig kürzer und beanspruchen weniger Zeit, weil zunehmend mehr leere Fahrzeuge in Bewegung sind und damit bei Transportbedarf bereits näher an der potentiellen Haltestelle unterwegs sind.

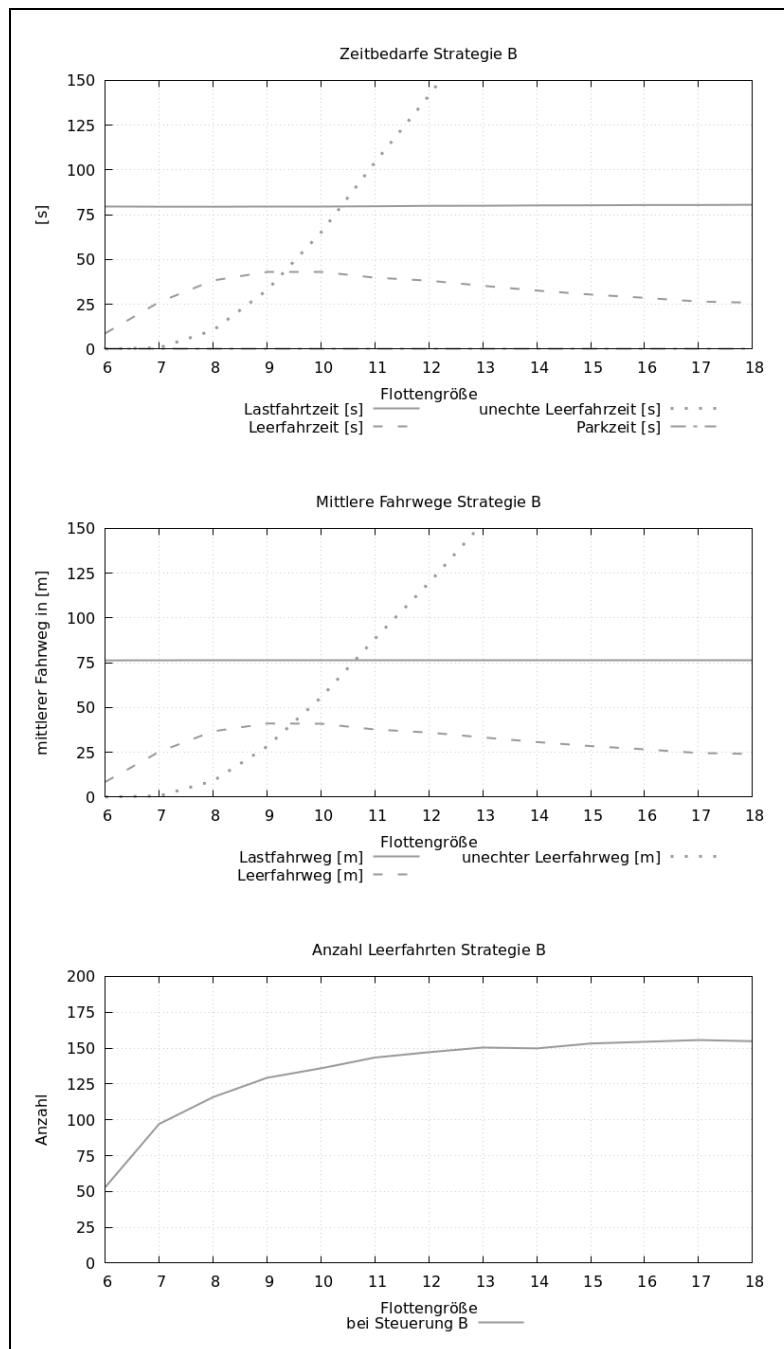


Abbildung 9: Mittlerer Zeitbedarf, mittlere Fahrweglänge und Anzahl an Leerfahrten bei Strategie B

In der Summe sind echte und unechte Leerfahrten länger als in Strategie A, die mittleren Lastfahrwege und die mittlere Lastfahrzeit bleiben dagegen unverändert.

Die Zahl der Leerfahrten steigt geringfügig, weil Leerfahrzeuge nicht mehr an den Haltestellen warten, sondern weiterfahren und dabei den lokalen Ausgleich vermeiden.

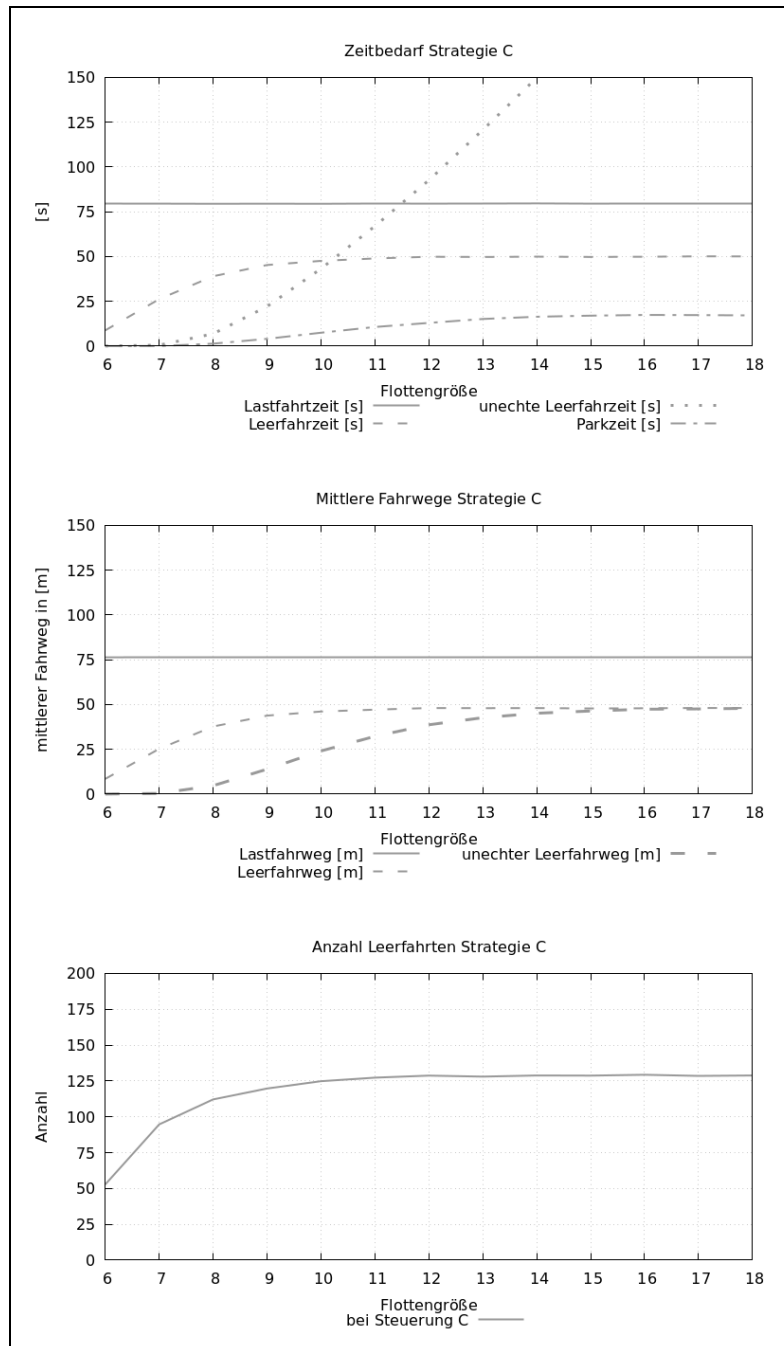


Abbildung 10: Mittlerer Zeitbedarf, mittlere Fahrweglänge und Anzahl an Leerfahrten bei Strategie C

Strategie C

Hier wird ein (oder mehrere kleinere) Parkplätze verwendet, um leere Fahrzeuge ohne Auftrag temporär aus dem Fahrkurs zu entfernen. Voraussetzung ist, dass diese sich möglichst zentral im Transportsystem befinden und damit eine gute Erreichbarkeit von allen Haltestellen besitzen,

sodass nur geringe zusätzliche unechte Leerfahrten zum Parkplatz entstehen. (Anmerkung: Der Versuch, die Parkplätze auch abseits des Transportsystems anzuordnen, brachte qualitativ kein anderes Ergebnis. Es verlängern sich lediglich die echten und/oder unechten Leerfahrten und damit die zugehörigen Zeiten)

Abbildung 10 zeigt die Ergebnisse für Strategie C. Diese ist günstiger als Strategie B. Dennoch steigen auch hier bei größeren Fahrzeugzahlen die unechten Leerfahrten nahezu linear, allerdings weniger stark als bei Steuerung B.

Eine neu ankommende TE signalisiert einen Transportbedarf, der nahezu immer durch ein Leerfahrzeug vom Parkplatz erfüllt werden kann. Nur wenn ein anderes Leerfahrzeug genau zur selben Zeit einen neuen Job sucht und näher an der Haltestelle liegt, wird dieses selektiert, ansonsten immer das vom Parkplatz. Das führt dazu, dass der Parkplatz häufiger frequentiert wird, aber meist nur mit kurzer Aufenthaltsdauer. Abbildung 11 zeigt, dass bis zu 70% der Leerfahrten nicht direkt zu einem neuen Auftrag führen, sondern zuerst zum Parkplatz. Die Zeit zwischen Eintreffen und Verlassen des Parkplatzes bezeichnet die Parkdauer, und sie wächst zwar mit Zunahme der Fahrzeuge im Transportsystem, liegt aber selbst bei 18 Fahrzeugen im Mittel noch immer unter einer Minute.

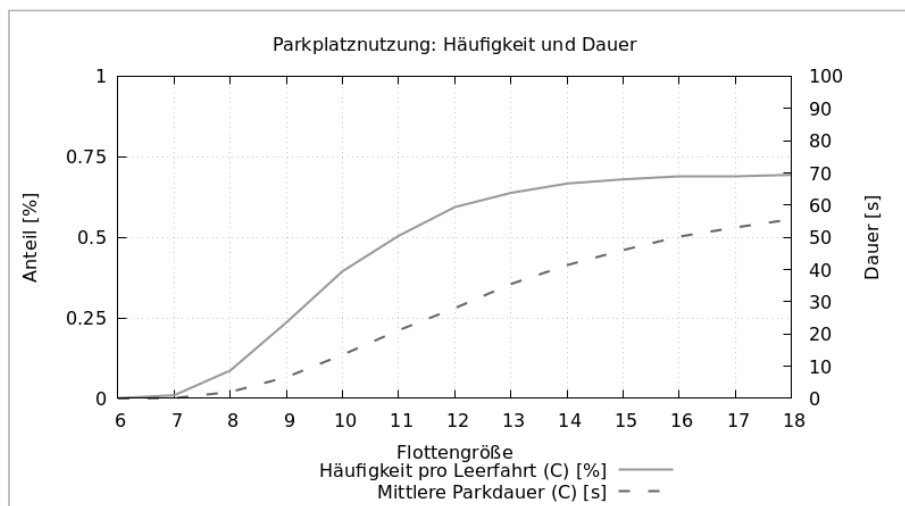


Abbildung 11: Häufigkeit und Nutzungsdauer des Parkplatzes

Die mittleren Lastfahrwege werden ebenso wie die Lastfahrzeit nicht durch die Flottengröße beeinflusst.

Alle Strategien führen bei zunehmender Fahrzeuganzahl zu Reduzierungen der Auftrags-Durchlaufzeit (Abbildung 12). Die größte Wirkung erreicht dabei Strategie B, die bis zu ca. 10% kürzere Durchlaufzeiten gegenüber Strategie A erzielt. Der Vorteil wird jedoch zu Lasten einer geringeren Effizienz der Fahrzeuge erreicht. Betrachtet man bspw. den mittleren zurückgelegten Fahrweg pro Fahrzeug als Aufwandskennzahl, so wird ein Unterschied von bis zu 1000m pro Fahrzeug und Stunde sichtbar. Oder anders formuliert: Strategie B verursacht bis zu 50% Mehraufwand infolge längerer Fahrwege.

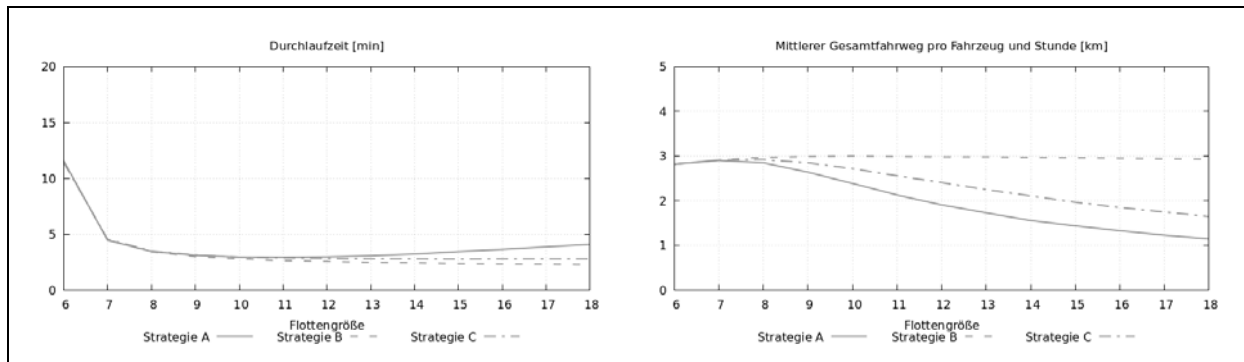


Abbildung 12: Vergleich der Strategien bezüglich Durchlaufzeit und Gesamtfahrtweg

Insgesamt kann eingeschätzt werden, dass die Strategien B und C im Dauerbetrieb keine wirkliche Verbesserung gegenüber Strategie A bringen: Bei minimaler Fahrzeuganzahl sind die Fahrzeuge am höchsten ausgelastet, so dass Blockierungen der Haltestellen kaum ins Gewicht fallen. Bei größeren Fahrzeuganzahlen lassen sich die DLZ durch alle Strategien in ähnlicher Weise verbessern, wobei aber die Effizienz der Fahrzeuge sinkt. A führt zu wachsender Behinderung der Erreichbarkeit der Haltestellen, wodurch Parkzeiten (des behindernden Fahrzeugs) und längere Lastfahrzeiten (der behinderten Fahrzeuge) entstehen. B und C umgehen dieses Problem durch zusätzliche Leerfahrten bzw. die Nutzung eines externen Parkplatzes.

Strategien B und C haben aber durchaus ihre Berechtigung als kurzzeitige Strategie, um bspw. im Störfall bestimmte Situationen an den Haltestellen aufzulösen. Darüber hinaus ist Strategie C bei mittelfristig stark schwankendem Transportaufkommen sinnvoll anwendbar, z. B. wenn in der Nachtschicht keine Warenanlieferungen erfolgen oder generell Fahrzeuge wegen des geringen Transportaufkommens nicht benötigt werden, können diese aus dem regulären Betrieb genommen und auf einem Parkplatz abgestellt werden.

Resümee

Die im vorigen Abschnitt beschriebenen Ergebnisse beschränkten sich auf Szenario 4 und konnten qualitativ in gleicher Weise auch bei allen anderen Szenarien beobachtet werden. Es konnten jedoch auch Unterschiede insbesondere numerischer Art beim Vergleich zwischen den Szenarien festgestellt werden, die in diesem Abschnitt diskutiert werden sollen.

Es zeigte sich, dass die untersuchten analytischen Verfahren trotz ihrer Einfachheit durchaus geeignet sind, den Leerfahrtanteil ausreichend genau zu bestimmen. Eines der Verfahren liefert eine optimale Lösung unter idealisierten Bedingungen, ein weiteres das Gegenteil, eine extrem schlechte Lösung. Diese beiden dienen für eine Abschätzung für die untere bzw. obere Grenze der Fahrzeuganzahl. Da lediglich die Leerfahrtzeit den Unterschied bei den Berechnungen ausmacht, kann eine sinnvolle obere Grenze für die Flottengröße höchstens doppelt so groß sein kann wie die als optimal berechnete Größe: Die Leerfahrtzeit ist unter optimalen Bedingung Null,

wenn stets unmittelbar nach Abgabe der TE sofort ohne zusätzliche Leerfahrt eine neue aufgenommen werden kann, und sie ist üblicherweise nicht größer als die Lastfahrzeit⁵.

Die drei anderen Verfahren verwenden einfache Schätzungen der Leerfahrzeit, ihre Ergebnisse liegen zwischen unterem und oberem Grenzwert.

Der Vergleich zwischen Analytik (Tabelle 5) und Simulation (Abbildung 9) liefert für die Flottengröße eine sehr gute Übereinstimmung. Die fünf betrachteten analytischen Verfahren liefern zwar am Ende bis zu fünf verschiedene Ergebnisse, doch diese liegen numerisch nicht so sehr weit auseinander. Im Folgenden sollen, neben dem rein analytischen Ansatz, weitere Aspekte diskutiert werden, die maßgeblich die tatsächlich erforderliche Flottengröße beeinflussen.

Anhand der Kennzahl *Durchlaufzeit* (Abbildung 12) wird bspw. ersichtlich, dass die minimale berechnete Flottengröße nur auf Kosten einer großen Durchlaufzeit (Ursache: lange Wartezeiten der TE auf ein Fahrzeug an der Quelle) realisiert werden kann. Und spätestens mit Erreichen der berechneten maximalen Flottengröße bringen zusätzliche Fahrzeuge keinen weiteren Vorteil. Im Gegenteil steigt bei der als Strategie A bezeichneten Steuerungsvariante die Durchlaufzeit wieder leicht an. Im Vergleich dazu werden leere Fahrzeuge ohne neuen Transportauftrag in Strategie B sukzessive zum nächstgelegenen Entscheidungspunkt (z.B. Haltestelle oder Verzweigung) bzw. in Strategie C zu einem zentralen "Parkplatz" geschickt. Es wird erkennbar, dass insbesondere Strategie B sehr ineffizient ist, weil dadurch leere Fahrzeuge permanent bewegt werden und deshalb der Aufwand (hier als *Gesamtfahrweg pro Fahrzeug* gemessen) unabhängig von der Fahrzeuganzahl konstant bleibt. Dafür ist die Reaktionszeit bei neu eintreffenden Transportaufträgen geringer, da Fahrzeuge in aller Regel schon „auf Suche“ sind.

Strategie C versucht weitgehend, Ineffizienz zu vermeiden, indem temporär nicht benötigte Fahrzeuge auf den zentralen Parkplatz gebracht werden und dadurch das Transportsystem zu entlasten.

Mit den verwendeten Berechnungsverfahren wird die Flottengröße auf einen möglichen Bereich eingegrenzt. Es zeigt sich, dass die Verfahren unterschiedliche Herangehensweisen priorisieren und dafür optimale Ergebnisse liefern: die minimale Flottengröße, bei der der Durchsatz gerade erreicht wird, eine maximale Flottengröße als obere Abschätzung, eine Flottengröße mit geringer mittlerer Durchlaufzeit oder eine Fahrzeuganzahl (inkl. Strategie), bei der Reaktionszeiten auf neue Transportaufträge minimal sind. Es sollte im Ermessen des Anwenders bzw. des Planers liegen, welcher Aspekt dabei für ihn wichtig ist. Überraschenderweise hat sich gezeigt, dass die berechnete Obergrenze vielfach tatsächlich eine praktische Relevanz hat: Zusätzliche Fahrzeuge oberhalb dieser Grenze bringen nicht nur keinen Nutzen, sondern verschlechtern die Effizienz des Fahrzeugsystems durch Behinderung anderer Fahrzeuge, zunehmende Stillstandzeiten sowie Änderungen der erforderlichen Leerfahrten hin zu längeren Fahrwegen.

Manchmal steht aber auch das Thema Redundanz im Fokus, weil der Ausfall eines Fahrzeugs nicht zu einer Leistungsreduzierung führen darf. Im Falle einer Störung müssen entweder die übrigen Fahrzeuge ausreichend Leistungsreserven haben, um die Störung auszugleichen, oder

⁵ Ein überhöhter Leerfahrtanteil könnte z.B. entstehen, wenn wegen Einrichtungsbetrieb die leere Rückfahrt nur über Umwege möglich ist. Ungünstige Transportnetzwerk-Topologien können für solche Extrembeispiele sorgen, sie stellen praktisch aber eher Ausnahmefälle dar.

es sind zusätzliche Fahrzeuge vorzuhalten, die normalerweise nicht im regulären Betrieb verwendet werden.

Ein Zuviel an Fahrzeugen ist auch in der Simulation im ersten Moment nicht als auffällig oder fehlerhaft dimensioniert erkennbar. Erst ein genauer Blick auf die Kennzahlen zeigt, dass die Effizienz jedes einzelnen Fahrzeugs abnimmt, wenn mehr Fahrzeuge zum Einsatz kommen: Fahrzeiten mit und ohne Last steigen langsam an, es kommt zu immer größer werdenden Wartezeiten aus verschiedenen Gründen. Letztlich ist jedes Fahrzeug zu einem immer geringeren Zeitanteil produktiv (also mit Last in Bewegung) unterwegs. Aber ist ein Fahrzeug dann tatsächlich noch *produktiv*, wenn es einen großen Teil der Zeit damit verbringt, mit Last im Stau zu warten?

Bei der Simulation eines vollkommen überdimensionierten Systems mit etwa der vierfachen Anzahl an Fahrzeugen gegenüber der zuvor berechneten Obergrenze ist vielfach nur noch Stop and Go möglich (Im gesamten in Abbildung 13 dargestellten System beträgt die Fahrzeugdichte ca. 12 Fahrzeuge pro 100 m Fahrbahn, im dargestellten Ausschnitt etwa 30). Die Erwartung, dass dadurch auch der Durchsatz erheblich reduziert wird, traf allerdings nicht ein. Es sind so viele Fahrzeuge unterwegs, dass trotzdem jeder Transportauftrag in kürzester Zeit erfüllt werden kann. Zum Problem entwickelt sich nicht der Durchsatz, sondern die Durchlaufzeit. Wegen der effektiv geringen Fahrgeschwindigkeit dauert es deutlich länger, bis das Ziel erreicht wird.

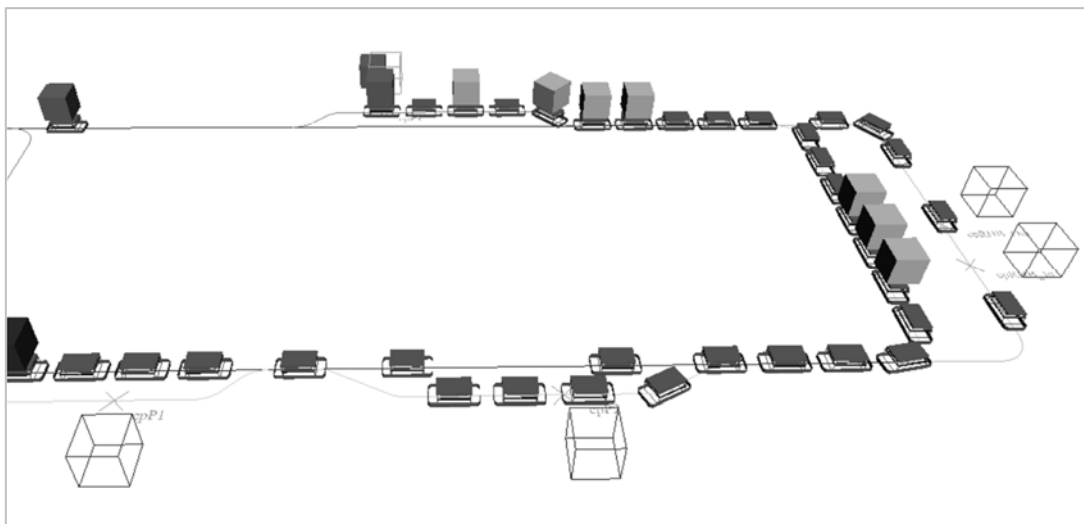


Abbildung 13: System mit zu vielen Fahrzeugen - Fahrten sind nur noch im Stop and Go-Modus möglich

Konflikte in *Kreuzungsbereichen* haben keinen relevanten Einfluss, solange die Fahrzeuganzahl gering ist. Im betrachteten Beispiel (Abbildung 4) liegt die Fahrzeugdichte zwischen ein und zwei Fahrzeugen pro 100 m Fahrstrecke. Die Konfliktwahrscheinlichkeit, dass zwei Fahrzeuge zur gleichen Zeit eine Kreuzung passieren wollen und eines von beiden warten muss, ist relativ gering. Und die Dauer des Konflikts (das ist die Zeit, die eines der beiden Fahrzeuge warten muss) ist auf das Zurücklegen eines bestimmten Fahrweges durch das andere Fahrzeug (z.B. dreifache Fahrzeuglänge zum Passieren der Kreuzung) bis zur Freigabe der Kreuzung begrenzt. Das sind üblicherweise nur wenige Sekunden.

Diese Annahme gilt zumindest solange, wie sich die Fahrzeuge noch relativ gut bewegen können. Steigt hingegen die Fahrzeuganzahl stark an, wird auch die Beweglichkeit eingeschränkt und

Kreuzungen länger blockiert. Leere und beladene Fahrzeug behindern sich dann so sehr, dass es zum Stop and Go kommt mit einer deadlock-Gefahr.

Eine analytische Abschätzung der Wahrscheinlichkeit von Behinderungen ist hingegen schwierig, weil zum einen die Topologie des Fahrweglayouts und zum anderen die geplanten oder tatsächlich genutzten Materialflüsse keine Verallgemeinerung erlauben, wie häufig es generell zu Konflikten an bestimmten Kreuzungen kommen kann. Auch Abhängigkeiten von der Fahrzeugdichte sind nicht exakt erkennbar. Im Gesamtsystem des in Abbildung 14 dargestellten Ausschnitts sind 39 Fahrzeugen im Einsatz, d.h. bei ca. 640 m Fahrbahnlänge beträgt die Fahrzeugdichte etwa 6. Das ist an sich ausreichend, stehen doch damit jedem Fahrzeug im Mittel 16 m Fahrbahn zur Verfügung. Im dargestellten Ausschnitt befinden sich jedoch knapp die Hälfte aller Fahrzeuge (19 Stück) auf einer Länge von ca. 50 m (Fahrzeugdichte 38), und nur eins davon ist noch frei manövrierbar. Nach einiger Zeit hatte sich der Knoten im Simulationsmodell aber wieder aufgelöst, um wenig später erneut und an anderer Stelle sichtbar zu werden. Das bedeutet, das Problem entsteht nicht infolge permanenter Überlastung einzelner Bereiche, sondern wird zeitlich und räumlich begrenzt durch stochastische Effekte im gesamten Transportsystem ausgelöst.

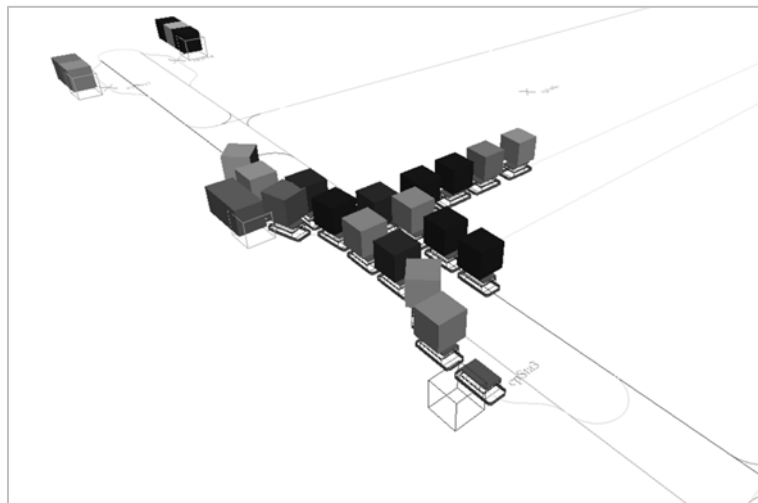


Abbildung 14: Nicht bloß Stop and Go, sondern fast schon ein Deadlock

Abbildung 15 zeigt hierzu exemplarisch die Häufigkeitsverteilung der Zeitdauer, während der sich ein Fahrzeug bewegt. Kurze Abschnitte von wenigen Sekunden machen dabei einen erheblichen Anteil der Zeit aus. Sie entstehen bspw. durch den Stop and Go Betrieb vor Kreuzungen oder Haltestellen und sorgen dafür, dass die effektive Fahrgeschwindigkeit sinkt. Daneben gibt es (abhängig vom Layout des Transportsystems) auch immer längere Wegabschnitte, die ohne Zwischenstopp befahren werden und die die größeren Zeitdauern repräsentieren.

Während Abbildung 15 Bezug nimmt auf alle Fahrbewegungen zwischen allen Haltestellen, zeigt Abbildung 16 nur für genau eine Relation (z. B. zwischen Haltestelle A und B) auf der x-Achse (unten) die Transportzeit (= Fahrzeit + Wartezeit) und oben den Fahrzeitanteil (= Fahrzeit / (Fahrzeit + Wartezeit)). Demnach liegt die Transportzeit überwiegend zwischen 420 und 450 s, wobei der Fahrzeitanteil zwischen 80% und 90% liegt. Die fehlenden Fahrzeitanteile entfallen auf Wartezeiten. Über Ursachen von Wartezeiten gibt es aber keine Auskunft.

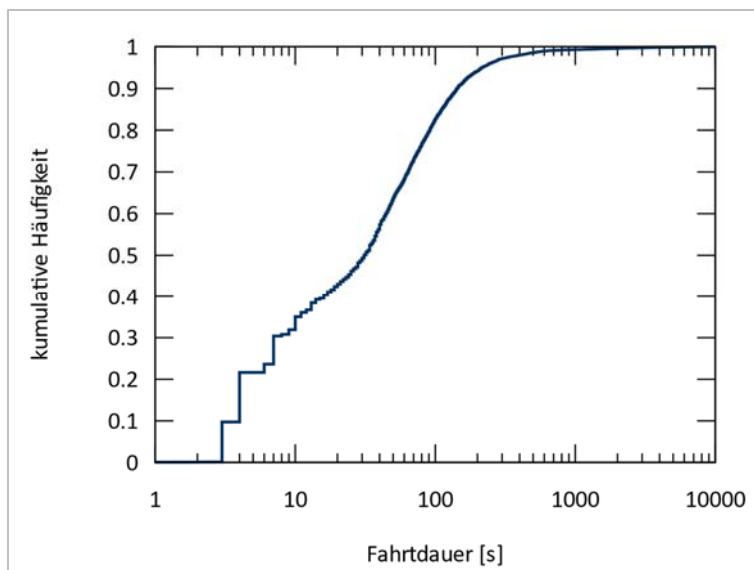


Abbildung 15: Empirische Verteilung Fahrtdauer (der Zeit zwischen zwei Stillständen)

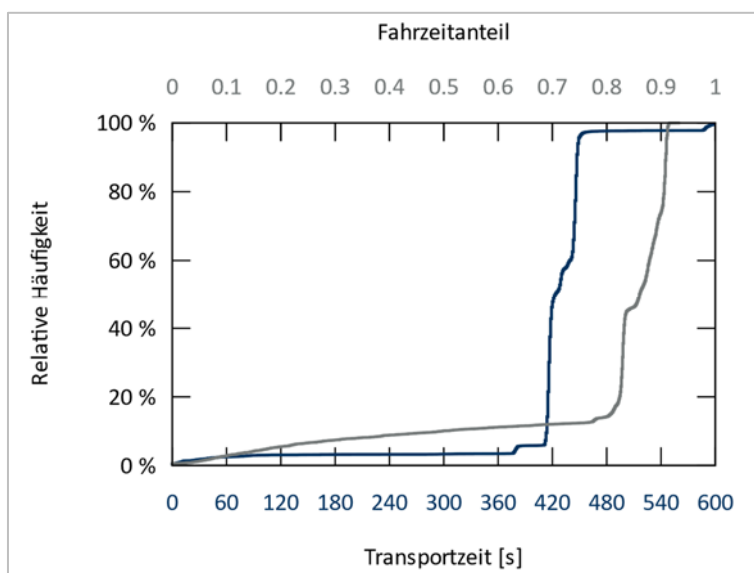


Abbildung 16: Empirische Verteilung der Fahrzeit auf einer Relation und des Fahrzeitanteils (der Rest sind Wartezeiten)

Anmerkung: Die Abbildung 15 und Abbildung 16 sind nicht das Ergebnis von Simulationen, sondern basieren auf Realdaten, die mit Hilfe einer skriptbasierten Datenanalyse ausgewertet wurden.

Haltestellen sollten nur von den Fahrzeugen angefahren werden, die dort TE anliefern oder abholen. In klassischen FTS-Systemen verwendet man dazu Haltebuchten, so dass Fahrzeuge, die den Bereich lediglich passieren, ohne Stopp an den haltenden Fahrzeugen vorbeifahren können. Dieses Konzept wurde auch in den Simulationen benutzt. Interessant ist hier die *Wartezeit der Fahrzeuge* vor der Haltestelle, die als Verlustzeit die Einsatzzeit der Fahrzeuge reduziert. Mittels eines M/D/1-Bedienmodells kann diese Wartezeit näherungsweise bestimmt werden (siehe Tabelle 6). Dabei ist die Ankunftsrate λ_j die Zahl der an Haltestelle j ankommenden oder abfahrenden Fahrzeuge pro Zeiteinheit. Diese sind identisch mit den j beginnenden oder endenden Transporte laut Transportmatrix. Die andere Größe ist die mittlere Bedienzeit $E(t_{b,j})$,

die die Zeit für die Lastaufnahme bzw. –abgabe sowie die Zeit für einen Fahrzeugwechsel umfasst.

Tabelle 6: Mittlere Wartezeit je Fahrzeug vor einer Haltestelle [in s]

Ankunftsrate λ_j [Fzg/h]	Mittlere Bedienzeit $E(t_{b,j})$ [s] (Zeit Lastaufnahme bzw. Lastabgabe und Zeit für Fahrzeugwechsel)									
	2	4	6	8	10	12	14	16	18	20
20	0,01	0,05	0,10	0,19	0,29	0,43	0,59	0,78	1,00	1,25
40	0,02	0,09	0,21	0,39	0,63	0,92	1,29	1,73	2,25	2,86
60	0,03	0,14	0,33	0,62	1,00	1,50	2,13	2,91	3,86	5,00
80	0,05	0,20	0,46	0,86	1,43	2,18	3,16	4,41	6,00	8,00
100	0,06	0,25	0,60	1,14	1,92	3,00	4,45	6,40	9,00	12,50
120	0,07	0,31	0,75	1,45	2,50	4,00	6,13	9,14	13,50	20,00
140	0,08	0,37	0,91	1,81	3,18	5,25	8,37	13,18	21,00	35,00
160	0,10	0,43	1,09	2,21	4,00	6,86	11,53	19,69	36,00	80,00

Andererseits ist auch die *Wartezeit der TE* bis zur Beladung (also wie lange muss eine TE im Mittel bis zur Abholung warten) für die Durchlaufzeit von Interesse. Diese lässt sich allerdings analytisch nicht ermitteln, weil neben der Anzahl ankommender TE vor allem Steuerungsaspekte an verschiedenen Stellen des Transportsystems diese maßgeblich beeinflussen. Dabei sind z. B. Regeln definiert für die Zuweisung von Fahrzeugen zu Transporteinheiten sowie Festlegungen zur Reihenfolge bzw. Priorität der Abfertigung an Haltestellen oder Kreuzungen ankommenden Fahrzeuge.

Unterschiedliche *Lastszenarien* haben großen Einfluss. Sind bspw. zwischen allen Haltestellen TE zu liefern, kann theoretisch der Fall eintreten, dass gar keine Leerfahrten notwendig werden, weil direkt am Zielort wieder eine TE auf Abholung wartet. Realistisch ist das aber nicht, vielmehr stellt sich ein asynchrones Eintreffen von TE und leeren Fahrzeugen ein, so dass trotz ausgeglichener Mengenbilanz teilweise Leerfahrten notwendig werden. Die berechnete untere Grenze für die Fahrzeuganzahl, die genau diesen Best-Case berücksichtigt, ist aber in diesem Fall generell zu optimistisch.

In einem anderen Szenario besteht eine Schiefast, weil sich alle Quellen in einem Teil der Produktionshalle (z.B. Lager) befinden und alle Senken auf der gegenüberliegenden Seite. Dadurch werden alle Lastfahrten vom Lager zu Produktion führen, die Leerfahrten ausschließlich in die Gegenrichtung, was dadurch eine recht zuverlässige Abschätzung der Leerfahrten erlaubt: Im Mittel sind Leerfahrten etwa genau so lang wie die Lastfahrten. In diesem Fall liegen die Ergebnisse zur Flottengröße der fünf Analyseverfahren eng beieinander, während bei einer eher gleichmäßigen Lastverteilung sich unterer und oberer Grenzwert, wie weiter oben erläutert, maximal bis zu einem Faktor 2 unterscheiden können.

Die *Dynamik des Auftragsstroms* kann sich in unterschiedlicher Form darstellen. Bei längerfristigen Schwankungen der Transportanzahl z. B. mit Spitzenlasten in der Frühschicht (weil nur da Wareneingang und Warenausgang arbeiten) und Normallast in der sonstigen Zeit sind zwei Szenarien zu rechnen mit unterschiedlichen Transportmatrizen. Erfolgen die Schwankungen in kürzeren Zeitabständen, kann eine mittlere Last mit unterschiedlicher Taktung in der Simulation genutzt werden. Den Übergang zwischen diesen beiden Sichtweisen illustriert

Abbildung 17. Die Schwankungen im Aufkommen der Transportaufträge folgen hier offensichtlich dem Schichtrhythmus. Mit der Annahme eines Poissonstroms (exponentialverteilte Ankunftsabstände) kann eine starke Ungleichmäßigkeit des Zeitabstandes zwischen dem Entstehen von Transportaufträgen berücksichtigt werden (was zwar nicht zum dargestellten Sachverhalt in Abbildung 17 führt, aber letztlich die gleichen Auswirkungen hat), während bei konstanten Zeitabständen die Ankunftsprozesse regelmäßiger erfolgen, was typisch ist für automatisierte oder getaktete Prozesse. Relevante Auswirkungen auf die analytischen Ergebnisse beschränken sich jedoch auf die *Durchlaufzeiten*: Bei Fahrzeuganzahlen nahe des berechneten unteren Grenzwerts führen die damit verbundenen hohen Fahrzeugauslastungen bei unregelmäßigen Ankünften von TE zu teils längeren Wartezeiten auf ein Fahrzeug. Mit steigenden Fahrzeuganzahlen vergrößert sich aber die Transportkapazität, wodurch diese Unterschiede verschwinden. Die Lastfahrten selbst werden dadurch nicht beeinflusst.

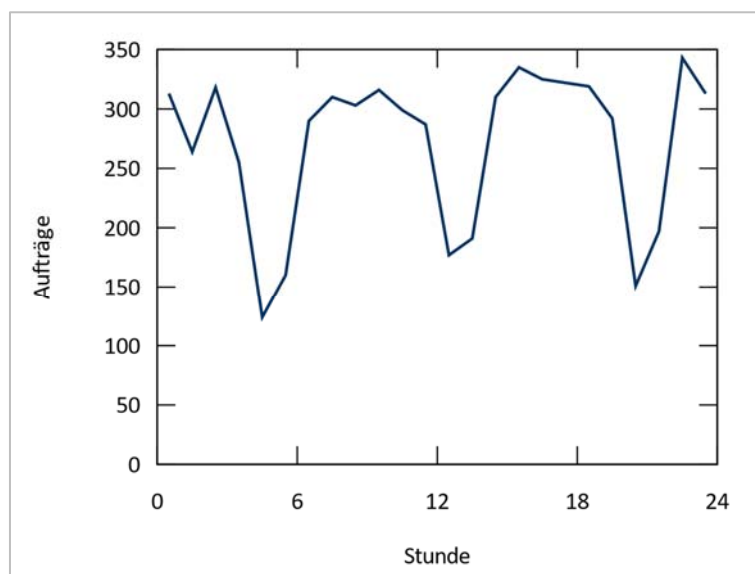


Abbildung 17: Tagesgang des Transportauftragsaufkommens

Das gilt allerdings nur bis etwa zum berechneten oberen Grenzwert für die Flottengröße. Werden schließlich immer mehr Fahrzeuge eingesetzt, bewirkt die damit verbundene wachsende Behinderung der Fahrzeuge längere Lastfahrzeiten (Abbildung 18) und damit auch wachsende Durchlaufzeiten.

Die Durchlaufzeit hat ein Minimum knapp unterhalb der analytisch bestimmten Obergrenze für die Fahrzeuganzahl. Mit mehr Fahrzeugen wächst die Durchlaufzeit wieder an (siehe Abbildung 6). Eine Verringerung des erzielbaren Durchsatzes des Transportsystems (wie z. B. in *Arnold&Furmans, S327* dargestellt) konnte hingegen nicht beobachtet werden. Der Fall tritt offensichtlich erst dann ein, wenn die Fahrzeuge so stark in ihrer Beweglichkeit eingeschränkt sind, dass es zum Deadlock kommt.

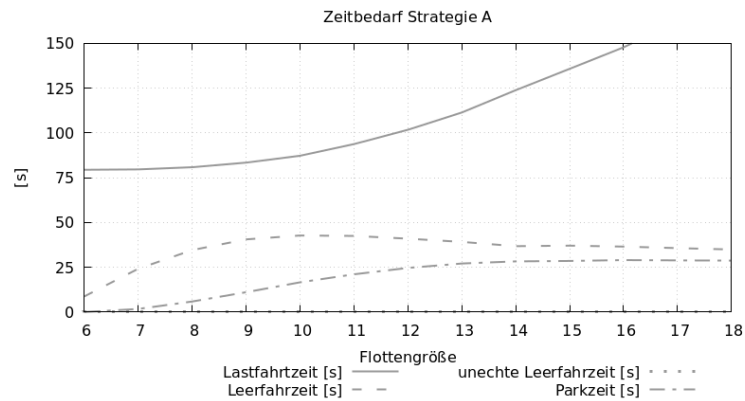


Abbildung 18: Vor allem die Lastfahrzeiten wachsen kontinuierlich bei größeren Fahrzeuganzahlen. Darunter fallen zunehmend auch Situationen, an denen es zu "Fast-Deadlocks" kommt, die sich nur langsam auflösen. Leerfahrzeiten und Parkzeiten pegeln sich auf eine feste Größe ein.

Die Genauigkeit der analytisch ermittelten Kennzahlen wird durch die Simulation bestätigt, wenn man bestimmte Unsicherheiten angemessen bewertet. Beide werden in der Untersuchung als ungestört und 100% verfügbar betrachtet. Für die praktische Anwendung ist eine Korrektur wie in Gleichung (9) empfehlenswert, um zum einen die Einsatzzeit der AMR über die Verfügbarkeit η_V zu reduzieren und zum anderen über die Auslastbarkeit η_A einen Zeitpuffer für die Auswirkungen von stochastischen Schwankungen einzuplanen.

Der große Nachteil des Ganzen: Einmalig muss für das Transportsystem eine vollständig ausgefüllte Entfernungsmatrix erstellt werden (Abbildung 19). Der Aufwand dafür ist nicht unerheblich

The screenshot shows an Excel spreadsheet with a distance matrix. The rows and columns are labeled with station identifiers: H1, H2, H3, H4, H5, H6, H7, H8, H9, H10, H11, H12, V1, V2, V3, V4, V5, V6, V7, V8, V9, V10, V11, V12. The matrix is symmetric, with the diagonal elements being 0.0. The values represent distances between stations, with some cells highlighted in green. The spreadsheet interface includes standard Excel menus and toolbars.

Abbildung 19: Entfernungsmatrix mit 552 Elementen (alle Entfernungen zwischen 24 Haltestellen)

Literatur

- Arnold, Dieter und Kai Furmans. 2019. Materialfluss in Logistiksystemen. Springer Vieweg. 7. Auflage.
- Beisteiner, Franz. 1983. Strategies for the employment of vehicles in an automated guided transportation system. *Proceedings of 2nd International Conference on Automated Guided Vehicle Systems*, Stuttgart, Germany.
- Egbelu, Pius J. and Jose M. A. Tanchoco. 1984. Characterization of automatic guided vehicle dispatching rules. In: *International Journal of Production Research.*, 22 (3) (1984), pp. 359-374, <https://doi.org/10.1080/00207548408942459>
- Fottner, Johannes; Galka, Stefan; Habenicht, Sebastian; Klenk, Eva; Meinhardt, Ingolf und Thorsten Schmidt. 2022. Planung von innerbetrieblichen Transportsystemen. Springer Vieweg. <https://doi.org/10.1007/978-3-662-63973-3>
- Großeschallau, Werner. 1984. Materialflußrechnung: Modelle und Verfahren zur Analyse und Berechnung von Materialflußsystemen. Dissertation, Dortmund.
- Kimura, Toshikazu. 1991. Approximating the Mean Waiting Time in the GI/G/s Queue. *Journal of the Operations Reserch Society of Japan*. Vol. 34, No. 2, pp. 173–186.
- Koo, Pyung-Hoi; Jang, Jaejin Jang and Jungdae Suh. 2005. Estimation of Part Waiting Time and Fleet Sizing in AGV Systems. In: *The International Journal of Flexible Manufacturing Systems*. 16, 211–228.
- Kuhn, Axel 1983. Efficient planning of AGVS by analytical methods. *Proceedings of the 2nd International Conference on Automated Guided Vehicle Systems*. pp. 1-10.
- Malmborg, Charles.J. & Y. Shen. 1984. Heuristic dispatching models for multi-vehicle materials handling systems. *Applied Mathematical Modelling*. 18, 124-133
- Malmborg, Charles. J. 1990. A model for the design of zone control automated guided vehicle systems. *International Journal of Production Research*. Vol 28 (10), 1741 - 1758.
- Maxwell, William Laughlin and John Anthony Muckstadt. 1982. Design of Automatic Guided Vehicle Systems. In *IIE Transactions*. 14, 114-124. <https://doi.org/10.1080/05695558208975046>
- Rajotia, S.; Shanker, K. and J. L. Batra. 1998. Determination of optimal AGV fleet size for an FMS. *International Journal of Production Research*. Vol 36:5, pp 1177-1198. <https://doi.org/10.1080/002075498193273>
- Rall, Bernd. 1998. Analyse und Dimensionierung von Materialflusssystemen mittels geschlossener Warteschlangennetze. *Wissenschaftliche Berichte des Institutes für Fördertechnik und Logistiksysteme der Universität Karlsruhe*. Vol. 46, Dissertation.
- Reith, Karl-Benedikt; Rank, Sebastian und Thorsten Schmidt. 2020. Regeln gesucht – Konfliktvermeidung bei spurungebundenen Fahrerlosen Transportfahrzeugen. In: *Technische Logistik – Sonderpublikation Flurförderzeuge (2020)*, S. 10–13

ten Hompel, Michael; Sadowsky, Volker; Jung, Eike-Niklas und Christian Mosblech. 2011. Verfügbarkeit und Leistung? Synthese zweier Kennwerte für die anforderungsgerechte Planung intralogistischer Systeme. In: *Logistics Journal Proceedings (Nov 2011)*. https://doi.org/10.2195/LJ_proc_tenhempel_de_201108_01

VDI 2710 Blatt 5: Abnahmeregeln für Fahrerlose Transportsysteme (FTS). Berlin: Beuth-Verlag, 2013

VDI 3649: Anwendung der Verfügbarkeitsrechnung für Förder- und Lagersysteme. Berlin: Beuth-Verlag, 1992

VDI 4486: Zuverlässigkeit in der Intralogistik. Leistungsverfügbarkeit. Berlin: Beuth-Verlag, 2012

SimulateFirst: <https://simulatefirst.com/de/simulation-logistik-transport-warehouse.html> (letzter Abruf am 04.04.2025)

Verzeichnis der Abkürzungen:

AGV	Automated Guided Vehicle
AMR	Autonome mobile Roboter
DLZ	Durchlaufzeit
FIFO	First-In-First-Out
FTF	Fahrerloses Transportfahrzeug (engl. AGV)
FTS	Fahrerloses Transportsystem
KLT	Kleinladungsträger
TE	Transporteinheit
VDI	Verein Deutscher Ingenieure

Verwendung der Zuwendung

Arbeitspaket (AP)	Verwendung der Zuwendung
AP 1: Verfügbarkeit und Abnahme	6 PM
AP 2: Simulation und Emulation	8 PM
AP 3: Analytische Berechnungsansätze	11 PM
Summe	25 PM

Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit

Die durchgeführten Arbeiten leisten einen angemessenen Beitrag zum Forschungsvorhaben amrAcceptance. 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.

Wissenschaftlich-technischer und wirtschaftlicher Nutzen der erzielten Ergebnisse

Primäres Ergebnis des Forschungsvorhabens ist die gesicherte und mit belastbaren Argumenten hinterfütterte Erkenntnis, dass die klassische Verfügbarkeitsrechnung *keine* Methodik bereithält, um die Verfügbarkeit von AMR-Systemen angemessen zu bewerten. Dies rechtfertigt die Wahl alternativer Ansätze und es versetzt Hersteller wie Betreiber in die Lage, für die Abnahme von AMR-Systemen Vereinbarungen zu treffen, welche den Einsatzbedingungen von AMR besser Rechnung tragen und einen tatsächlich fairen Interessenausgleich zwischen allen Beteiligten ermöglichen. Die zuvor in der Branche wenig bekannte VDI 4486 definiert hierzu einen geeigneten methodischen Zugang und die neue VDI-Handlungsempfehlung zur „Projektrealisierung, Abnahme und Verfügbarkeit von logistischen Anlagen“ beschreibt hierzu geeignete Vorgehensmodelle. Vor allem für kmU verbessert sich durch einen Rückgriff darauf die Verhandlungsposition, denn sie können bei der Vereinbarung von Abnahmekriterien nun sachgerecht und damit weniger defensiv agieren.

Für die Auslegung von AMR-Systemen wurden alle bislang publizierten Berechnungsansätze erfasst und hinsichtlich ihrer Eignung für praktische Planungsaufgabenstellungen bewertet. Anhand von Vergleichsrechnungen untereinander und gegenüber der Simulation konnte gezeigt werden, dass ausgewählte Berechnungsverfahren insb. für Systeme von kmU-typischer Größenordnung (bis zu niedriger zweistelliger Fahrzeuganzahl) absolut ausreichend sind: Der

Aufwand für ihre Parametrierung bleibt überschaubar und inhärente Unsicherheiten in der Datenbasis haben keinen größeren Einfluss auf die Genauigkeit der Berechnungsergebnisse, als es bei der Simulation der Fall wäre. Simulationen sind bei kmU-typischen Einsatzfällen i.d.R. zu aufwendig, somit verfügen kmU nun erstmals über eine abgesicherte, begründbare und nachvollziehbare Methodik zur Ermittlung der erforderlichen Fahrzeuganzahl. Die beispielhafte Excel-Implementation haben die Projektpartner als verständlich und nachnutzbar bewertet. Sie eignet sich als Ausgangspunkt für den Entwurf einer entsprechenden VDI-Richtlinie und erlaubt damit einen Lückenschluss im Normenwerk.

Für die Datenanalyse wurde eine bestehende Skript-Infrastruktur weiterentwickelt, im Forschungsvorhaben zur Analyse von Transportauftragsdaten genutzt und dabei gemeinsam mit den Projektpartnern getestet. Diese Infrastruktur stützt sich ausschließlich auf ausgereifte FLOSS-Lösungen, die auch im industriellen Umfeld gut zugänglich sind. Damit steht eine extrem leistungsfähige und (auch für die Bearbeitung anderer Aufgabenstellungen) sehr gut nachnutzbare Datenanalyse-Infrastruktur zur Verfügung. Mit zwei Projektpartnern ist eine weitere Zusammenarbeit verabredet. Daher besteht auch die Aussicht, dass künftig noch Abschätzungen zur Wirkung stochastischer Einflussfaktoren in Transportsystemen gewonnen werden können, die im abgeschlossenen Forschungsvorhaben mangels Verfügbarkeit geeigneter Datensätze nicht mit der angestrebten Genauigkeit getroffen werden konnten.

Fortschreibung des Plans zum Ergebnistransfer in die Wirtschaft

Geplante spezifische Transfermaßnahmen während der Projektlaufzeit

Maßnahme	Ziel, Ort, Rahmen	Umsetzung
Projektbegleitender Ausschuss	ausführliche und fortlaufende Diskussion zu Vorgehen und Zwischenergebnissen	14.02.2023 06.03.2024
Ansprache weiterer Unternehmen	die Zusammenarbeit mit Unternehmen ist nicht auf den projektbegleitenden Ausschuss beschränkt; weitere Kontakte über die VDMA-Fachabteilung oder direkt bei Messebesuch, Tagungen	s.u.
Publikationen	in Fachzeitschriften mit Breitenwirkung in der Wirtschaft, bspw. sowie ggf. in wissenschaftlichen Zeitschriften, bspw.	Beitrag für „Hebezeuge und Fördermittel“ in Vorb. Beitrag für Logistics Journal in Vorb.

Maßnahme	Ziel, Ort, Rahmen	Umsetzung
Vorträge	auf nationalen und internationalen Tagungen zusätzlich:	22. VDI Flurförderzeugtagung (09/2023) ASIM-Symposium „Simulationstechnik“ Beitrag eingereicht und präsentiert (06.09.2024) Vortrag auf 38. Sitzung des Wissenschaftlichen Beirats der IFL (03.09.2024)
Lehre	Forschungsergebnisse in folgenden Lehrveranstaltungen integriert: <ul style="list-style-type: none"> • AP 1: Systeme der Intralogistik • AP 2: Simulationsgestützte Systemoptimierung • AP 3: Analytische Verfahren 	wie geplant und zusätzlich: <ul style="list-style-type: none"> • AP 3: integriert in LV Materialflussrechnung • AP 2/3: neue LV Datenanalyse
Qualifikation	Teilaspekte des Forschungsvorhabens können im Rahmen von Diplomarbeiten untersucht werden	Teilaspekte zu AP2 und AP3 wurden bearbeitet in <ul style="list-style-type: none"> ○ 1 Studienarbeit und ○ 2 Diplomarbeiten
Messeteilnahme	Insbes. LogiMAT 2023 und 2024, direkte Ansprache weiterer Aussteller auf der Messe	✓
Erprobung	der im Forschungsvorhaben entwickelten Methoden im Rahmen von Projekten der PA-Mitglieder	✓
Internet	dauerhafte Präsentation des Forschungsvorhabens sowie Bereitstellung der Publikation und des Abschlussberichts auf der Website des Antragstellers	alle relevanten Dokumente dauerhaft verfügbar unter https://tud.link/s4dg1d oder der Website https://tud.link/85dceg

Mit folgenden Unternehmen gab es einen intensiven Austausch, zumeist erstreckte er sich über mehrere Monate. Der Schwerpunkt lag dabei auf der Bereitstellung von Transportsystemdaten:

- Crown: Stefan Hannemann: 01/2023-09/2024: Bereitstellung von Daten
- Kion: Bergemann, Hinckeldeyn: 01/2023-12/2024: Datenanalyse und Simulation
- Dematic: Michael Kreutzmeier: 03-04/2024: Bereitstellung von Daten

- waku: Splittgerber, Billaudelle: 03-07/2024: Berechnung und Bereitstellung von Daten
- Navitec: Hannah Alander: 03-06/2024: Berechnung und Datenanalyse
- *movizon*: Sandra Goltzsche: 03-07/2024: Bereitstellung von Daten
- Knapp: Gregor Schubert-Lebernegg: 03-04/2024: Datenanalyse und Simulation
- Logivations: Sören Merting: 03-05/2024: Bereitstellung von Daten
- IFD: Kay Erkmann: 03-06/2024: Bereitstellung von Daten
- PowerFleet: Heinz Rothman: 03/2024: Bereitstellung von Daten
- Schäfer: Hirschmann, Schumacher: 03-04/2024: Datenanalyse und Simulation
- Elokon: Pablo Maderholz: 09/2023: Bereitstellung von Daten
- *MobileEasykey*: Volker Quirin: 09/2023-06/2024: Bereitstellung von Daten
- Logisnext: Niels Hanssen: 09/2023: Berechnung und Normung
- Safelog: Lipgens, Lechler, Reicheicher: 03/2023-06/2024: Berechnung und Normung
- Grenzebach: Philipp Marb: 03-08/2023: Austausch zur Normenentwicklung
- BoschRexroth: Mark Grötzinger: 01/2023-06/2024: Austausch zu Berechnungsansätzen
- Synaos: Philipp Schäfers: 03/2023: Austausch zu Simulation und Emulation

Die bereitgestellten Daten sollten im AP 3 die Grundlage für die Bestimmung von Korrekturfaktoren bilden. Bis auf zwei Unternehmen (*movizon* und *MobileEasykey*) waren es allerdings durchgängig Vorbehalte des Datenschutzes, die eine Bereitstellung von Daten für das Forschungsvorhaben verhinderten. Zum einen lag das daran, dass die Unternehmen in ihren IT-Systemen keine eigenen Daten, sondern vielmehr Daten Dritter (ihrer Kunden) verwalteten (denen wiederum der Bezug zum Forschungsvorhaben fehlte). Zum anderen lag es daran, dass zeitlich hochauflösende Transportsystemdaten theoretisch Rückschlüsse auf Arbeitsprozesse und involvierte Mitarbeiter erlaubt hätten.

Diese grundsätzliche Problematik wurde bereits in einem frühen Stadium der Projektbearbeitung deutlich; nach den intensiven Vorkontakten mit einer Reihe von Unternehmen im Rahmen der Antragstellung (Interviews mit späteren PA-Mitgliedern) waren Widerstände in diesem Umfang allerdings nicht zu erwarten. Die direkten Bemühungen der FE um Unternehmenskontakte wurden nachdrücklich unterstützt durch die FV (IFL) und den VDMA, allerdings konnten auch auf diesem Wege bestehende Vorbehalte des Datenschutzes nicht ausgeräumt werden.

Aus diesem Grund ist der Umfang der erbrachten und abgerechneten vAW hinter den geplanten Zahlen zurückgeblieben: Die geplanten Aufwendungen wären erst entstanden, wenn Daten in größerem Umfang aus den IT-Systemen abgezogen und pseudonymisiert worden wären. Bei den Abstimmungen mit den Unternehmen im Vorfeld (bspw. zu Art, Umfang und Herkunft der benötigten Daten und zum Abschluss von Vertraulichkeitsvereinbarungen) handelte es sich noch nicht um vAW im engeren Sinne (auch wenn die Aufwände z.T. nicht unerheblich waren), daher wurde in diesem Stadium auf die Erfassung von Nachweisen verzichtet.

Geplante spezifische Transfermaßnahme nach Abschluss des Vorhabens

Maßnahme	Ziel, Ort, Rahmen	Umsetzung
Richtlinienarbeit	Beteiligung an der Überarbeitung der VDI 4486	lt. Aussage vom Vorsitzenden VDI FA301 ist derzeit keine Überarbeitung vorgesehen
Richtlinienarbeit	Beteiligung am Entwurf einer neuen Richtlinie zur Auslegung von Fahrzeugsystemen	geplant
Messeteilnahme	direkte Ansprache von Ausstellern der LogiMAT, insb. mit dem Ziel einer Einbindung in die Richtlinienarbeit	Erfolgt im März 2025
Vorträge	Ausrichtung der 21. ASIM-Fachtagung mit Workshop zur Datenanalyse	geplant am 24.09.2025