

Schlussbericht vom 30.04.2022

zu IGF-Vorhaben Nr. 20959 N

Thema

PlaKAT - innerbetriebliche Transportmittel

Berichtszeitraum

01.01.2020 - 28.02.2022

Forschungsvereinigung

Forschungsgemeinschaft Intralogistik/Fördertechnik und Logistiksysteme (iFL) e.V.

Forschungseinrichtung(en)

Technische Universität München, Lehrstuhl für Fördertechnik Materialfluss Logistik (fml)

Gefördert durch:

Inhaltsverzeichnis

Inhaltsverzeichnis	I
1 Einleitung	5
1.1 Wissenschaftliche, technische und wirtschaftliche Problemstellung	5
1.2 Forschungsziel	6
1.3 Vorgehensweise und Lösungsweg	7
2 Grundlagen zur Planung innerbetrieblicher Transportsysteme	9
2.1 Grundlagen der innerbetrieblichen Transportsysteme	9
2.1.1 Begrifflichkeiten	9
2.1.2 Quelle-Senke-Relationen	10
2.2 Analyse und Strukturierung der relevanten Transportmittel	11
2.2.1 Fahrerlose Transportsysteme	12
2.2.2 Stapler	13
2.2.3 Routenzugsysteme	14
2.3 Analyse verschiedener Ansätze zur Leistungsberechnung der Transportmittel	17
2.3.1 Einflussfaktoren auf die notwendige Flottengröße	17
2.3.2 Analytische Bestimmung der notwendigen Flottengröße	24
2.3.3 Planung und Leistungsberechnung von Routenzugsystemen	29
2.3.4 Vergleichende Ansätze	32
3 Entwicklung eines Planungsvorgehens für Transportsysteme mit verschiedenen Transportmitteltypen	35
3.1 Entwurf des Planungsvorgehens	35
3.2 Analytisches Modell zur Berechnung der Flottengröße	36
3.2.1 Dimensionierung der einzelnen Transportmitteltypen	38
3.2.2 Berechnung der erforderlichen Zeit zur Durchführung der Aufträge	39
3.3 Simulative Bewertung der Lösungen	39
3.3.1 Verifikation der Lösungsalternative und Anpassung des Problems	39
3.3.2 Divergenz des Planungsvorgehens	40
4 Mathematische Modellierung und Formalisierung der Eingangsdaten	41
4.1 Modellierung der Layoutdaten	41

4.2	Modellierung des Transportaufkommens	41
4.3	Modellierung der Fahrzeuge	42
4.4	Modellierung der Restriktionen	43
4.4.1	Restriktionen zwischen Transportmitteln und Layout	43
4.4.2	Restriktionen zwischen Transportmitteln und Transportaufträgen	43
4.5	Zusammenfassung der Modellierung und Formalisierung der Eingangsdaten	44
5	Modellierung und Implementierung des Simulationsmodells	45
5.1	Modellierung der Layoutbausteine	45
5.1.1	Baustein Kreuzung	45
5.1.2	Baustein Fahrzeugpool	46
5.1.3	Baustein Quelle	46
5.1.4	Baustein Senke	46
5.2	Modellierung der Steuerungsprozesse	47
5.2.1	Auftragszuweisung	47
5.2.2	Routing	48
5.2.3	Lastübergabe	48
5.3	Implementierung des Simulationsmodells	49
5.3.1	Datenmanagement	49
5.3.2	Layout	50
5.3.3	Steuerung	50
5.3.4	Statistik	50
5.4	Validierung des Simulationsmodells	53
6	Implementierung eines Softwaredemonstrators zur Planung innerbetrieblicher Transportsysteme	55
6.1	Aufbau des Demonstrators	55
6.2	Benutzeroberfläche zur Dateneingabe	56
6.2.1	Reiter „Allgemeine Daten“	56
6.2.2	Reiter „Layout“	57
6.2.3	Reiter „Fahrzeuge“	59
6.2.4	Reiter „Materialfluss“	60
6.2.5	Reiter „Berechnung“	61
6.3	Validierung des simulationsbasierten Planungsvorgehens durch Anwendung in Beispielszenarien	63
6.3.1	Fallbeispiel 1: Fahrerloses Transportsystem	63

6.3.2 Fallbeispiel 2: Routenzugsystem	64
6.3.3 Fallbeispiel 3: Heterogenes Transportsystem	65
7 Zusammenfassung der Forschungsergebnisse und Ausblick	67
7.1 Zusammenfassung	67
7.2 Ausblick	68
7.3 Nutzen und industrielle Anwendungsmöglichkeiten	69
7.4 Verwendung der zugewendeten Mittel	69
7.5 Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit	71
7.6 Ergebnistransfer in die Wirtschaft	71
7.6.1 Spezifische Transfermaßnahmen während der Projektlaufzeit	71
7.6.1 Spezifische Transfermaßnahmen nach der Projektlaufzeit	74
7.6.2 Einschätzung zur Realisierbarkeit des Transferkonzepts	75
7.7 Durchführende Forschungsstelle	76
7.8 Förderhinweis	76
8 Verzeichnis der Veröffentlichungen	77
9 Verzeichnis der studentischen Arbeiten	79
Literaturverzeichnis	81
Abbildungsverzeichnis	85
Tabellenverzeichnis	87
Anhang A Eingangsdatenstruktur	A-1

1 Einleitung

Um die wirtschaftlichen, sozialen und politischen Herausforderungen der Logistik zu bewältigen, müssen logistische Netzwerke performant und zuverlässig sein sowie eine hohe Qualität aufweisen, während gleichzeitig Flexibilität und der Umgang mit Komplexität gefordert werden [Han-2013]. Innerbetriebliche Transportsysteme stehen hierbei im Vordergrund, denn der wirtschaftliche Erfolg eines Unternehmens ist damit verbunden, wie effizient und kosteneffektiv der Materialfluss zwischen Produktion und Lager erfolgt [VDI-2689]. Somit sind solche Systeme für den reibungslosen Produktionsablauf entscheidend.

1.1 Wissenschaftliche, technische und wirtschaftliche Problemstellung

Für eine anforderungsgerechte und gleichzeitig kostengünstige Gestaltung des Transportsystems müssen die drei Bestandteile Transporteinheit, Transportprozess und Transportmittel festgelegt werden (siehe Abbildung 1-1).

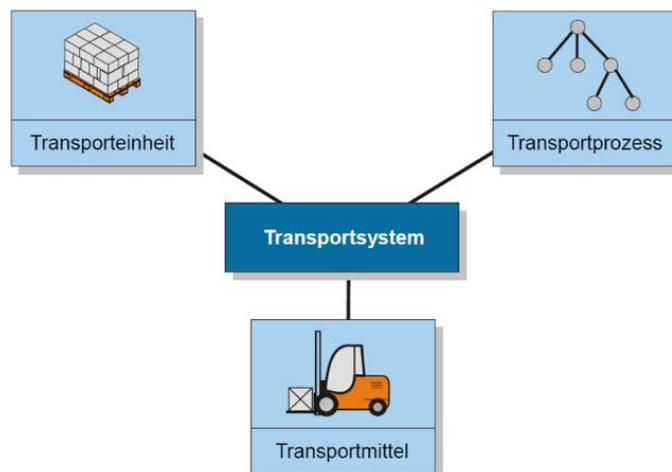


Abbildung 1-1: Bestandteile eines Transportsystems

Für die zahlreichen Kombinationen aus Transporteinheiten und Transportprozessen stehen verschiedene Transportmittel zur Auswahl. In diesem Forschungsprojekt liegt der Fokus auf drei weitverbreiteten Transportmitteln: Fahrerlose Transportfahrzeuge, Routenzüge und Stapler. Im Gegensatz zu stationärer Fördertechnik sind solche Systeme freiverfahrbar und benötigen somit keine feste Installation, wodurch eine gemeinsame Nutzung des Wegenetzes ermöglicht wird. Die Höhe der Investition für ein

solches Transportsystem ergibt sich durch die Art und die Anzahl der eingesetzten Fahrzeuge. Darüber hinaus soll die notwendige Infrastruktur wie die Ladetechnik oder das Leitsystem berücksichtigt werden. Im aktuellen Stand der Forschung und Technik finden sich keine geeigneten systemvergleichenden Ansätze, sodass vergleichbare Zahlen nicht zuverlässig zu ermitteln sind. Demzufolge ist der Planungsprozess mit Unsicherheiten verbunden und kann dazu führen, dass nicht anforderungsgerechte bzw. unwirtschaftliche Alternativen gewählt werden.

Die Planungsphase besteht aus zwei Arbeitsschritten, die mehrfach wiederholt werden. Zunächst erfolgt die Erstellung unterschiedlicher Planungsalternativen für die Materialversorgung, welche anschließend auf Ihre Eignungen untersucht werden. Im zweiten Schritt werden die entwickelten Alternativen, im Wesentlichen hinsichtlich monetärer Kriterien, bewertet. Hierbei soll allerdings die termingerechte Durchführung der geforderten Transportaufgaben sichergestellt werden [Lie-2017].

Bei Routenzugsystemen muss die technische Ausführung bestimmt werden, da diese z. B. durch die Art und Anzahl der Anhänger auch den Prozess beeinflusst. Weitere Aspekte wie die Routenführung und der Fahrplan sind außerdem auszuarbeiten. Für FTF müssen hingegen Lösungen für andere Problemstellungen wie das Störungsmanagement oder die Auftragsvergabe erarbeitet werden. Zuletzt werden spezielle Staplerleitsysteme für typische Optimierungsprobleme bei der Steuerung eingesetzt.

Aufgrund der unterschiedlichen Aspekte, die bei den Transportmitteln jeweils im Vordergrund stehen, unterscheiden sich die entsprechenden Planungsansätze in Methodik und zu Grunde liegenden Annahmen. Darauf basierend lassen sich die verschiedenen Systeme nur bedingt vergleichen. Dies führt zu Unsicherheiten bei der Planung und letztlich dazu, suboptimale bzw. nicht anforderungsgerechte Lösungen zu wählen.

1.2 Forschungsziel

Ziel des Forschungsprojekts *PlaKAT – PlanungsKompass zur Auswahl innerbetrieblicher Transportsysteme* ist daher die Entwicklung eines ganzheitlichen Ansatzes für die vergleichende Dimensionierung und Bewertung von Transportsystemen, die die Transportmitteltypen Routenzug, FTF und Stapler oder eine Kombination daraus nutzen. Dieser Ansatz soll den Planern solcher Systeme simulativ dabei helfen, eine möglichst optimale Lösung unter den vorhandenen Randbedingungen (vgl. Abbildung 1-2) zu ermitteln.

Die Anwendung des Planungsansatzes ermöglicht somit die Erstellung sinnvoller Systemkonfigurationen bereits in den früheren Phasen der Planung. Dabei sollen sowohl die Zusammensetzung der Transportmittelflotte als auch die Zuweisung zu den definierten Aufträgen festgelegt werden. Da sich der Planungsansatz hierzu auf eine Simulation stützt, kann ein Leistungsnachweis des Transportsystems gegeben werden, in dem auch dynamische Einflüsse berücksichtigt werden.

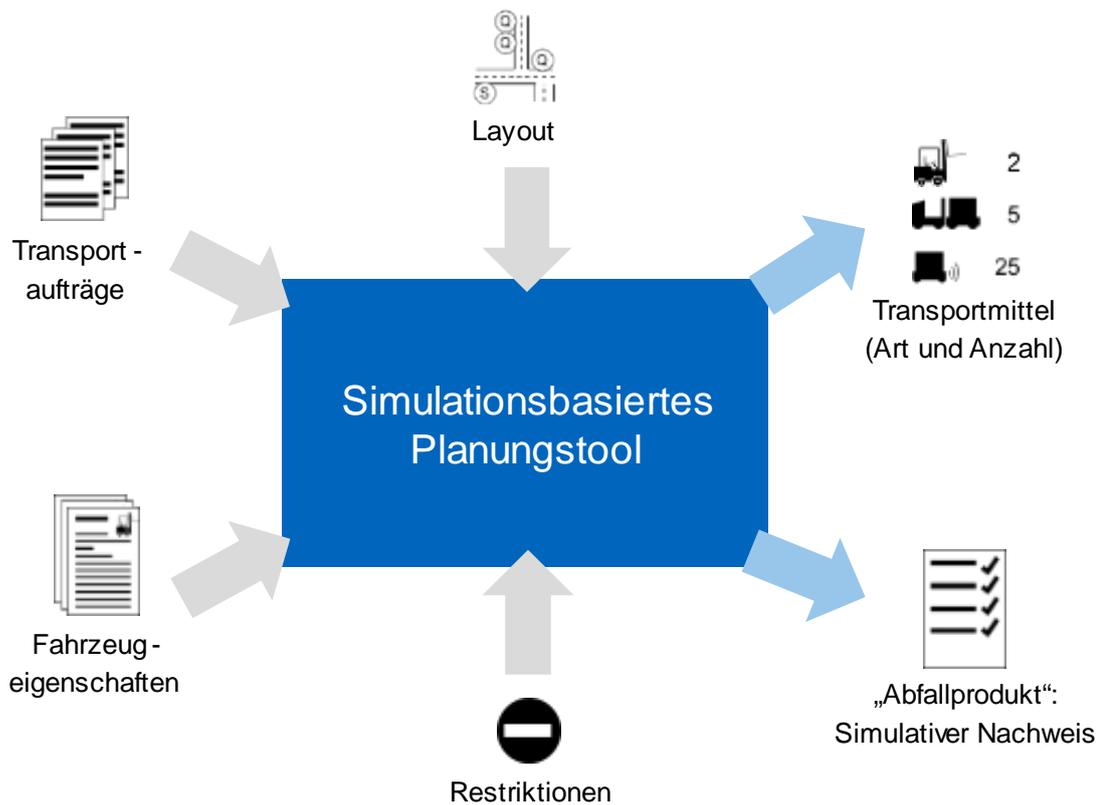


Abbildung 1-2: Vision des Forschungsvorhabens

Eine weitere Einsatzmöglichkeit des Planungskompasses besteht darin, eventuelle Engpässe bei bestehenden Systemen durch Änderungen der Randbedingungen, wie die Verteilung der Transportaufträge über die verschiedenen Quellen und Senken oder das Layout gegenüber der initialen Situation, zu identifizieren.

1.3 Vorgehensweise und Lösungsweg

Die Vorgehensweise in diesem Projekt beruht im Wesentlichen auf den Arbeitspaketen (AP), die im Forschungsantrag definiert wurden (siehe Tabelle 1-1).

Tabelle 1-1: Zuordnung der Arbeitspakete zu den Kapiteln des Schlussberichts

Kapitel	Arbeitspaket
Kapitel 2	AP1: Analyse und Strukturierung von relevanten Transportmitteln
	AP2: Analyse verschiedener Ansätze zur Leistungsberechnung und Auswahl von Transportmitteln
Kapitel 3	AP3: Entwicklung eines simulationsbasierten Planungsvorgehens für die Auswahl innerbetrieblicher Transportmittel
Kapitel 4	AP4: Mathematische Modellierung des Quellen- und Senkenverhaltens sowie des Layouts
Kapitel 5	AP5: Modellierung und Implementierung des Simulationsmodells
Kapitel 6	AP6: Demonstratorische Umsetzung des Simulationstools und Anwendung an Beispielszenarien

Kapitel 2 umfasst die Ziele der Arbeitspakete 1 und 2. Hierbei werden zuerst die Transportmittel hinsichtlich der für Transportaufgaben relevanten Eigenschaften und Prozesse strukturiert. Im zweiten Schritt wird eine Analyse verschiedener Methoden zur Leistungsermittlung der betrachteten Transportmittel durchgeführt.

In Kapitel 3 wird das Konzept des simulationsbasierten Planungsvorgehens beschrieben. Die darauf basierende Vorgehensweise besteht aus zwei Stufen, welche anschließend erläutert werden.

Kapitel 4 befasst sich mit der Modellierung der Eingangsdaten. Hierbei wird die zugrundeliegende generische Struktur beschrieben.

In Kapitel 5 wird zuerst die Modellierung der Layoutbausteine sowie der Steuerungsprozesse erläutert. Anschließend erfolgt eine Beschreibung der Implementierung des darauf basierenden Simulationsmodells.

In Kapitel 6 wird der entstandene Softwaredemonstrator vorgestellt. Dieser nutzt eine Benutzeroberfläche, die die Anwender durch die einzelnen Schritte der Planung führt. Anschließend erfolgt die Validierung des Planungsvorgehens durch Anwendung in drei Beispielszenarien aus der Praxis.

2 Grundlagen zur Planung innerbetrieblicher Transportsysteme

Dieses Kapitel umfasst die für dieses Projekt relevanten Grundlagen zur Planung innerbetrieblicher Transportsysteme.

2.1 Grundlagen der innerbetrieblichen Transportsysteme

In diesem Abschnitt erfolgt eine Definition der Begrifflichkeiten der innerbetrieblichen Transportsysteme sowie eine Klassifizierung der zugrundeliegenden Quelle-Senke-Relationen.

2.1.1 Begrifflichkeiten

Die primäre Aufgabe des innerbetrieblichen Transportes ist die Raumüberbrückung zwischen dem Transportursprung (Quelle) und dem Transportziel (Senke) [Mar-2014, S. 98]. Zur Bewältigung dieser Aufgabe werden Transportsysteme eingesetzt. Diese bestehen aus den drei Komponenten:

- Transporteinheit (auch Fördereinheit, Ladeeinheit),
- Transportmittel (auch Fördermittel) und
- Transportprozess.

Eine Transporteinheit setzt sich aus einem oder mehreren Ladehilfsmitteln sowie aus einem oder mehreren Transportgütern zusammen. Häufig eingesetzte Ladehilfsmittel sind Paletten und Gitterboxen mit standardisierten Grundflächen, sogenannte Großladungsträger (GLTs) oder kleinere Behälter mit ebenso standardisierten Grundflächen, sogenannte Kleinladungsträger (KLTs). Ladehilfsmittel dienen zur Bildung uniformer logistischer Einheiten und schaffen somit die Voraussetzung für eine Mechanisierung und Automatisierung im Materialfluss. Darüber hinaus stellen sie eine Transportfähigkeit her und erfüllen eine Schutzfunktion der zu transportierenden Güter. Zu beachten ist, dass einzelne Fördergüter auch ohne Ladehilfsmittel eine Transporteinheit darstellen können.

Der Transportprozess setzt sich aus der Organisation sowie der Steuerung zusammen. Die Transportorganisation umfasst sämtliche dispositiven sowie kontrollierenden Tätigkeiten, während sich die Transportsteuerung mit der Verarbeitung von Informationen zur Planung und Durchführung von Transporten auseinandersetzt.

2.1.2 Quelle-Senke-Relationen

Dem Transportsystem können verschiedenen Quelle-Senke-Relationen zugrunde liegen. Die Abbildung 2-1 gibt diese Relationen wieder, wobei zwischen Pendelverkehr und Sammeltransporten unterschieden wird. Grundsätzlich werden bei einem Pendelverkehr eine oder mehrere Transporteinheiten transportiert, welche an derselben Quelle aufgenommen und an derselben Senke abgegeben werden. Bei einem Sammeltransport hingegen werden zur gleichen Zeit mehrere Transporteinheiten befördert, welche an verschiedenen Quellen aufgenommen und an verschiedenen Senken abgegeben werden.

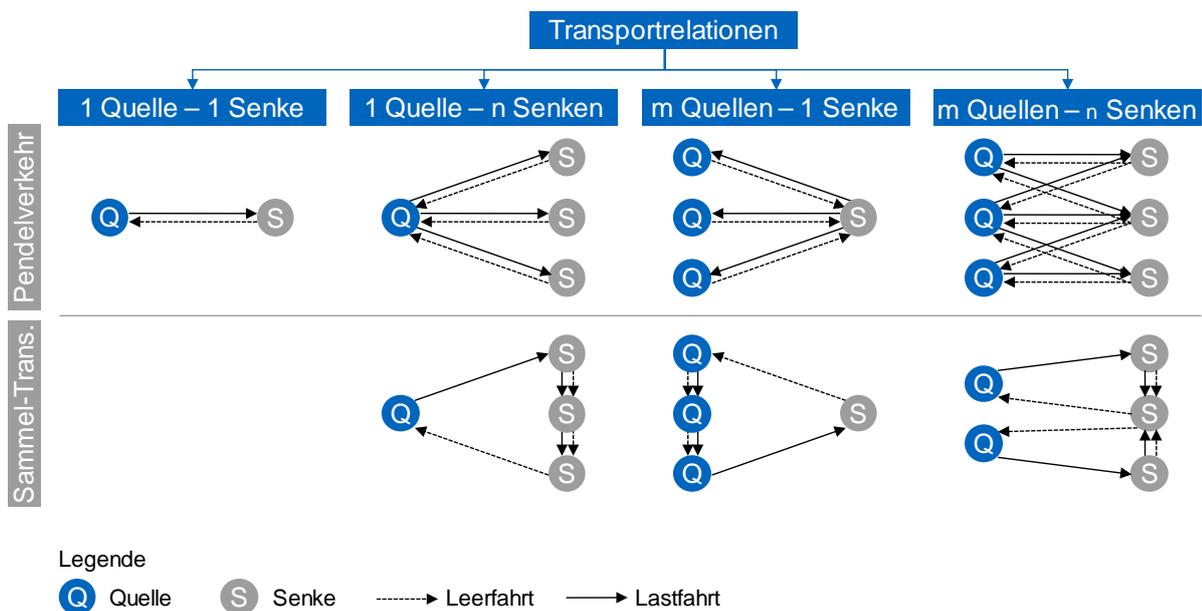


Abbildung 2-1: Quelle-Senke-Relationen

Klassifiziert nach der Anzahl der Quellen und Senken ergeben sich vier verschiedene Transportrelationen. Bei der einfachsten Relation sind Transporteinheiten zwischen einer Quelle sowie einer Senke zu transportieren. Ein Beispiel hierfür ist die Beladung eines LKWs aus dem Warenausgang. Bei der zweiten Transportrelation werden – wie beispielsweise in der Produktionsversorgung – aus einem zentralen Lager mehrere Senken (Produktionsstätten) von einer Quelle versorgt. Bei der dritten Transportrelation werden hingegen Transporte von mehreren Quellen zu einer Senke durchgeführt. Ein Beispiel hierfür ist die Produktionsentsorgung, bei welcher die Fertigerzeugnisse von mehreren Montagestationen zu einem Fertigwarenlager transportiert werden. Die vierte Relation stellt ein komplexes Transportnetzwerk dar, bei welchem Transporte zwischen mehreren Quellen sowie mehreren Senken durchgeführt werden. Ein Beispiel hierfür ist die kombinierte Produktionsver- und -entsorgung.

2.2 Analyse und Strukturierung der relevanten Transportmittel

Im Rahmen des Forschungsprojektes werden Transportsysteme mit drei verschiedenen, un stetigen Transportmitteln aus dem Bereich der Flurförderzeuge (FFZ) betrachtet. Unter dem Begriff Flurförderzeuge werden alle auf dem Boden, nicht auf Schienen fahrenden Fördermittel verstanden. Flurförderzeuge werden im innerbetrieblichen Transport zum Befördern, Ziehen, Schieben, Heben, Stapeln oder In-Regale-Einlagern von Lasten aller Art eingesetzt. Sie sind fahrerlos, mitgängergeführt oder von einem Fahrer bedient, der auf dem Flurförderzeug oder einem Fahrerplatz sitzt oder steht [VDI-3586]. Flurförderzeuge lassen sich nach unterschiedlichsten Kriterien kategorisieren. Die Tabelle 2-1 nimmt eine Kategorisierung anhand der Bauform und des Einsatzzweckes nach der VDI-Richtlinie 3586 vor. Dabei wird zunächst unterschieden, ob die Flurförderzeuge über eine Hubeinrichtung verfügen und ob die Flurförderzeuge technisch in der Lage sind, Transporteinheiten zu stapeln.

Tabelle 2-1: Kategorisierung von Flurförderzeugen nach Bauform und Einsatzzweck [VDI-3586]

	Kategorie	Typ	Beschreibung	Ausprägungen	
Bauform	FFZ ohne Hubeinrichtung	Schlepper	FFZ mit Kraftantrieb zum Ziehen oder Schieben anderer Fahrzeuge.	<ul style="list-style-type: none"> - Ein-Achs-Schlepper - Zwei-Achs-Schlepper - Sattel-Schlepper 	
		Wagen	FFZ, die ihre Last auf einer nicht hebbaren Plattform oder auf einem nicht hebbaren Lastträger befördern.	<ul style="list-style-type: none"> - Plattformwagen - Transittroller 	
	FFZ mit Hubeinrichtung	Hubwagen	FFZ, die mit einer Plattform, einer Gabel oder einem anderen Lastträger ausgerüstet sind und mit dem die Last auf eine Höhe gehoben werden, die für deren Beförderung ausreicht.	<ul style="list-style-type: none"> - (Gabel-)Hubwagen - Gabelhubwagen - Portalhubwagen 	
	Stapelnde FFZ	Stapler	Stapler	FFZ mit Plattform, Gabeln oder einem anderen Lastträger, die Lasten bis zu einer ausreichenden Höhe anheben können, um sie zu stapeln oder in Regale einzusetzen.	<ul style="list-style-type: none"> - (Gabel-)Hochhubwagen - Spreizenstapler - (geländegängige) Gabelstapler
			Schubstapler	FFZ mit Radarmen, bei denen die Last durch Ausschieben des Hubgerüsts oder des Lastträgers in eine freitragende Position außerhalb der Radarme gebracht werden kann.	<ul style="list-style-type: none"> - Schubmaststapler - Schubgabelstapler - Vierwege- / Mehrwegestapler - Seitenstapler
			Dreiseitenstapler	FFZ, mit denen Lasten zu beiden Seiten quer und in Fahrtrichtung eingestapelt oder entnommen werden können.	<ul style="list-style-type: none"> - Schwenkgabel-Dreiseitenstapler - C-Gabel-Dreiseitenstapler - Schwenkmast-Dreiseitenstapler
			Sonstige	Weitere stapelnde Flurförderzeuge, die unter bisherigen Kategorien nicht erfasst wurden.	<ul style="list-style-type: none"> - Quergabelstapler - Portalstapler - Stapler mit veränderl. Reichweite - Kommissionierer

Ein Fahrerloses Transportsystem (FTS) ist im Wesentlichen durch die automatisiert verfahrenen Fahrzeuge charakterisiert. Im Gegensatz dazu werden im Forschungsprojekt unter dem Begriff „Stapler“ von einem Fahrer bediente Flurförderzeuge

verstanden. Sowohl die Fahrerlosen Transportfahrzeuge als auch die Stapler können unterschiedliche Bauformen annehmen. Ein Routenzug setzt sich aus einem Schlepper und einem oder mehreren Anhängern (Wagen) zusammen. Zu beachten ist, dass Routenzüge sowohl automatisiert als auch durch Fahrer betrieben werden können. Eine nähere Beschreibung der drei betrachteten Transportsysteme sowie weiterführende Definitionen erfolgen in den folgenden Abschnitten.

2.2.1 Fahrerlose Transportsysteme

FTS sind innerbetriebliche, flurgebundene Fördersysteme mit automatisch gesteuerten Fahrerlosen Transportfahrzeugen, deren primäre Aufgabe der Materialtransport, nicht aber der Personentransport ist [VDI-2510].

Die wesentlichen Bestandteile eines FTS sind:

- ein oder mehrere FTF,
- eine Leitsteuerung,
- ein Navigationssystem,
- sowie Einrichtungen zur Datenübertragung [VDI-2510].

Ein FTF ist ein flurgebundenes Fördermittel mit eigenem Fahrtrieb, welches automatisch gesteuert und berührungslos geführt werden kann. Es existieren unterschiedliche Bauformen von FTF, wobei sich die FTF hinsichtlich der Gestaltung der Lastaufnahme grundsätzlich in lastziehende sowie lasttragende Fahrzeuge einteilen lassen [VDI-2510]. Ullrich klassifiziert FTF in folgende Kategorien:

Tabelle 2-2: FTF-Kategorien nach [Ull-2014]

	Typ	Transporteinheit
FTF-Typen	Gabelhub-FTF	Palette
	Huckepack-FTF	Palette
	Schlepper	Anhänger
	Unterfahrt-FTF	Rollcontainer
	Montage-FTF	Montageobjekte
	Schwerlast-FTF	Rollen, Colis
	Mini-FTF	KLT
	People-Mover	Personen
	Diesel-FTF	diverse
	Sonder-FTF	diverse

Das Ziel der Leitsteuerung ist die Koordination der Fahrzeuge sowie die Integration des FTS in die innerbetrieblichen Abläufe. Die Aufgabe der Navigation ist das Führen eines Fahrzeuges von einem Startort zu einem Zielort auf einem bestimmten Weg. Der Informationsaustausch zwischen der Leitsteuerung, dem FTF sowie sonstigen stationären Einrichtungen erfolgt über Datenübertragungssysteme. Zu übermitteln sind beispielsweise Fahraufträge, Fahrzeugpositionen und Fahrzeugzustände.

Als Argumente für den Einsatz von FTS werden, sofern die Wirtschaftlichkeit gegeben ist, unter anderem eine produktivitätssteigernde Transparenz der Prozesse, eine hohe Verfügbarkeit und Zuverlässigkeit, geringe Infrastrukturmaßnahmen, eine hohe Transparenz des Fördergeschehens sowie positive Innen- und Außenwirkungen auf die Belegschaft und Kunden genannt [Ull-2014, S. 36f.].

FTS werden in unterschiedlichen Branchen zur Produktionsversorgung, Lagerung und Kommissionierung sowohl im Indoor- als auch im Outdoor-Bereich eingesetzt [Ull-2014, S. 17ff.].

Gemäß der VDI-Richtlinie 2710 eignen sich FTS für den Materialtransport in Transportnetzwerken, welche sowohl nach dem Taxiprinzip als auch nach dem linearen oder verzweigten Fließprinzip betrieben werden. Beim Taxiprinzip werden die Stationen auch Quellen und Senken genannt. Die Quelle stellt den Start und die Senke das Ziel eines Transportes dar. Die Quellen und Senken können fest oder wahlfrei miteinander verknüpft werden. Das Fließlinienprinzip beinhaltet hingegen mehrere Stationen, die das Fördergut nacheinander durchläuft.

2.2.2 Stapler

Ein Stapler ist ein flurgebundenes Förderzeug mit eigenem Hub- und Fahrwerk, welches von einem Fahrer bedient und gesteuert wird. Das Hubwerk besteht aus einem hydraulischen Antrieb und einem Hubgerüst, an dessen unterem Ende ein Lastaufnahmemittel angebracht ist, und dient zum Heben und Senken von Lasten, um sie aufeinander zu stapeln oder in Regalen einzulagern. Die Vielzahl von Lastaufnahmemitteltypen ermöglicht die Handhabung von nahezu allen Ladehilfsmitteln und Lagergütern [Hom-2018, S. 167f.].

Stapler werden sowohl im Lagerbereich als auch in der Lagervorzone und in der Produktion eingesetzt. Auch im Outdoor-Bereich können Stapler verwendet werden, wie beispielsweise zur Be- und Entladung von LKWs und Eisenbahnwagen [Hom-2018, S. 174].

Für den Einsatz von Staplern müssen bestimmte Restriktionen beachtet werden, wie z. B. eine zu hohe Bodensteigung und zu niedrige Tür- bzw. Torhöhen. [Hom-2018, S. 174]. Aus wirtschaftlichen Gründen sind außerdem große Entfernungen (über 200 m) zu vermeiden [Pfe-1998, S. 158].

Scheffler et al. unterteilen die Bauarten von Staplern nach der relativen Lage der Last zur Radbasis, wie Tabelle 2-3 zu entnehmen ist [Sch-1998, S. 378].

Tabelle 2-3: Klassifizierung von Staplern nach Scheffler et al. [Sch-1998]

Bauartgruppe	Relative Lage der Last zur Radbasis	Beispiele
Gabelstapler	Außerhalb der Radbasis, vor den Vorderrädern	Gehstapler, Dreiradstapler, Vierradstapler...
Stapler ohne Gegenmasse	Innerhalb der Radbasis	Spreizenstapler, Schubstapler...
Quer- und Seitenstapler	Seitlich, außerhalb der Radbasis	Querstapler, Seitenstapler...
Sonderausführungen	-	Mehrwegestapler, Teleskopstapler

2.2.3 Routenzugsysteme

Unter einem Routenzugsystem wird ein Transportsystem verstanden, in dem Transporteinheiten gebündelt bewegt werden. Es besteht aus einem oder mehreren Schlepfern mit Anhängern sowie einem Konzept zur sich wiederholenden Ver- und/oder Entsorgung von Quellen und Senken an in Summe mindestens drei räumlich getrennten Haltepunkten entlang einer oder mehrerer definierter Routen [VDI-5586b].

In der VDI-Richtlinie 5586 werden weitere wichtige Begriffsdefinitionen eingeführt [VDI-5586b]:

Bereitstelleinheit: Wagen eines Routenzugsystems, der an den Bereitstellorten Transportgüter ohne Ladungsträger, einzelne Ladungsträger (z. B. KLTs) oder Ladungsträger auf/in einem Transporthilfsmittel (z. B. GLTs auf Trolleys) abgibt.

Bereitstellort: Ort, an dem Bereitstelleinheiten durch einen vorgelagerten Prozess für die Beladung des Routenzugs bereitgestellt werden oder

	an dem der Routenzug(fahrer) Ladungsträger entlädt und für einen nachfolgenden Prozess bereitstellt.
Haltepunkt:	Ort auf der Route, an dem der Routenzug zwecks Be- und/oder Entladung hält.
Routenzug:	Verbund aus Schlepper und Anhängern, der als Transportmittel im Routenzugsystem dient.
Route:	Definierter Fahrweg eines Routenzugs im Layout entlang der zugeordneten Haltepunkte.
Tour:	Lastspiel eines Routenzugs, das neben der Fahrt entlang der Route die Be- und Entladung an den Haltepunkten einschließlich der dort anfallenden Nebentätigkeiten beinhaltet.

Abbildung 2-2 verdeutlicht diese Begrifflichkeiten in einer schematischen Darstellung.

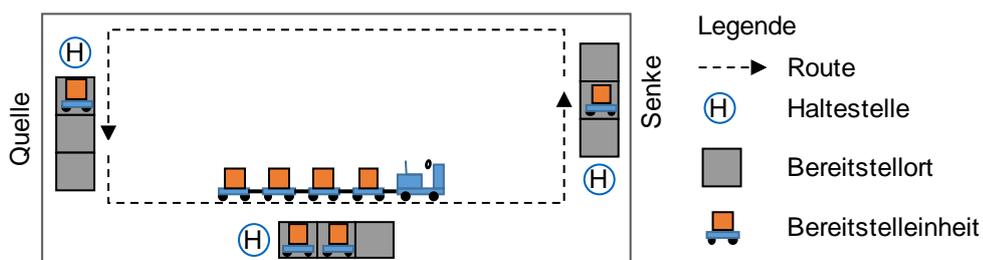


Abbildung 2-2: Schematische Darstellung eines Routenzugsystems (in Anlehnung an [VDI-5586b])

Darüber hinaus werden folgende zeitbezogenen Begrifflichkeiten definiert:

Routenfrequenz:	Kehrwert des Tourenstartabstands, der auf eine Route bezogen die Anzahl der Touren pro Zeiteinheit angibt.
Zykluszeit	Zeit, die ein Routenzug im Mittel für die Durchführung aller zugehörigen Tätigkeiten auf einer Tour benötigt.
Wiederbeschaffungszeit	Zeitspanne zwischen der Signalisierung eines Transportbedarfs und der Bereitstellung des zugehörigen Transportguts am Bereitstellort.

Routenzugsysteme werden sowohl für die Materialversorgung als auch -entsorgung eingesetzt. Die eingesetzten Ladungsträger umfassen neben den standardisierten KLTs und GLTs, auch Spezialladungsträger, deren Grundfläche von den EURO- oder

ISO-Maßen abweicht. Die Ermittlung von Transportaufträgen erfolgt sowohl bedarfsorientiert als auch verbrauchsorientiert.

Für die technische Ausgestaltung der Schlepper und Anhänger stehen unterschiedliche Gestaltungsalternativen zur Verfügung. Schlepper unterscheiden sich bezüglich der Antriebsart (Elektroantrieb, Verbrennungsantrieb, Treibgasantrieb oder Brennstoffzellenantrieb), der Bauweise (Dreirad- oder Vierradschlepper) sowie der Bedienung (manuell oder automatisch).

Die Anhänger unterscheiden sich grundsätzlich bezüglich ihrer Eignung für den Transport unterschiedlicher Ladungsträgertypen (KLTs, GLTs, Sonderformen). Je nach Bauform sind für den Transport zusätzliche Transporthilfsmittel notwendig, auf welchen die Ladungsträger abgestellt werden. Je nach technischer Ausgestaltung sind weitere Hilfsmittel, wie beispielsweise ein Handhubwagen, notwendig, um den störungsfreien Betrieb zu gewährleisten. Darüber hinaus existieren Unterschiede bezüglich des Zugriffs auf die Transporteinheiten. Anhänger können entweder eine einseitige oder beidseitige Be- und Entladung ermöglichen. Bei den zweiseitig beladbaren Anhängern ist zu unterscheiden, ob die Beladeseite die Entladeseite definiert oder ob diese unabhängig voneinander sind.

Für den Einsatz von Routenzugsystemen bestehen verschiedene Anforderungsvoraussetzungen. Grundsätzlich beschränkt sich der Einsatz auf Horizontaltransporte. Bereitstellungen oder Abholungen von Material in oder aus Sackgassen sind nicht möglich, da sich mit Routenzügen für gewöhnlich keine Rückwärtsfahrten realisieren lassen. Darüber hinaus müssen die Breite der Wege sowie die Kurvenradien eine sichere Fahrt ermöglichen.

Mögliche Ziele für die Einführung eines Routenzugsystems bestehen in

- der Verstetigung des Materialflusses,
- der Reduzierung von Beständen im Produktionsbereich,
- der Verringerung der Anzahl der Transporte durch Bündelung,
- der Erhöhung der Transportkapazität,
- der Reduzierung der gesamten Transportwege,
- der Verringerung der Anzahl der Leerfahrten,
- der Reduzierung der Anzahl der Transportmittel sowie des Verkehrsaufkommens sowie

- der Reduzierung der Unfallgefahr [VDI-5586a].

2.3 Analyse verschiedener Ansätze zur Leistungsberechnung der Transportmittel

2.3.1 Einflussfaktoren auf die notwendige Flottengröße

Die Faktoren, welche einen wesentlichen Einfluss auf Leistung eines Transportsystems und somit auf die notwendige Flottengröße haben, sind in der Abbildung 2-3 dargestellt und werden im Folgenden beschrieben.

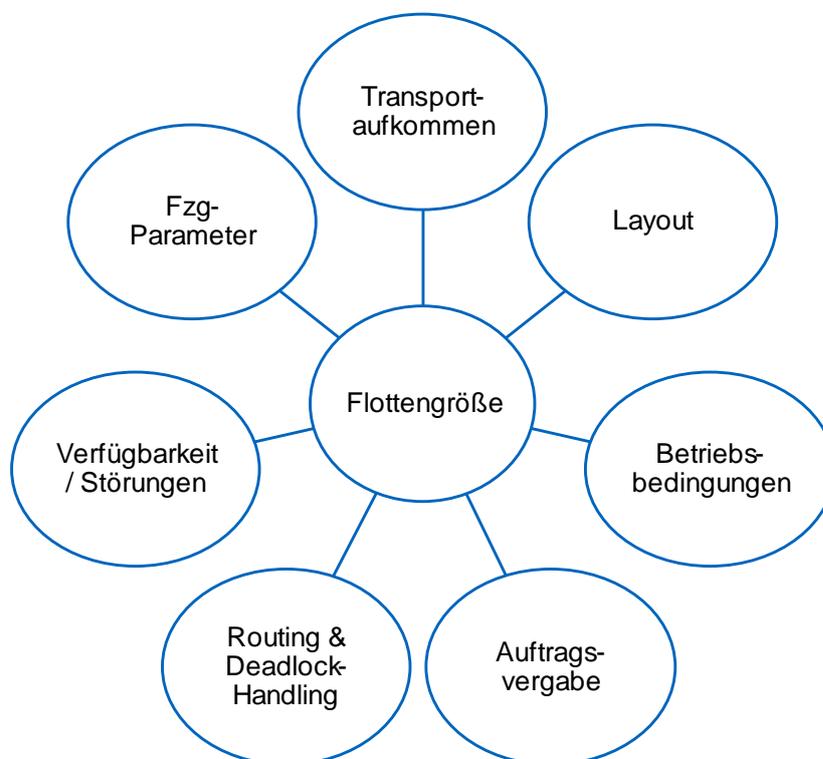


Abbildung 2-3: Einflussfaktoren auf die notwendige Flottengröße in Anlehnung an [Lie-2021]

Layout

Die Fahrzeuge bewegen sich auf einem vorgegebenen Wegenetz, welches die verschiedenen Quellen und Senken im System verbindet. Das Layout wird gewöhnlich durch einen Graphen abgebildet, bei welchem Quellen, Senken sowie Kreuzungen durch die Knoten repräsentiert werden. Die Kanten zwischen den Knoten geben die Verbindungen wieder, entlang welcher die Fahrzeuge verfahren können. Diese werden für gewöhnlich mit der Fahrzeit oder aber mit der Distanz zwischen den Knoten gewichtet. Die Abbildung 2-4 zeigt ein einfaches Layout, welches sich aus fünf Knoten zusammensetzt. Die Kanten sind mit den Entfernungen zwischen den Knoten gewichtet.

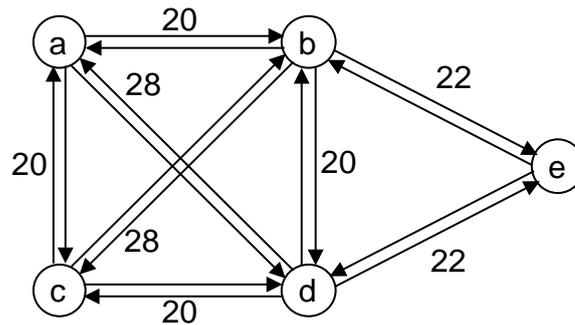


Abbildung 2-4: Beispielhaftes Layout, bestehend aus 5 Knoten. Angegeben ist die Distanz zwischen den einzelnen Knoten.

Für die formale Darstellung von Graphen stehen neben der grafischen Darstellung unterschiedliche Datenstrukturen wie beispielsweise Adjazenzmatrizen und -listen zur Verfügung. Mit Hilfe dieser lassen sich die kürzesten Wege und Entfernungen in einem Graphen bestimmen. Aus dem Bereich der Graphentheorie stehen dafür unterschiedliche Algorithmen zur Verfügung, welche

- den kürzesten Weg und die Entfernung zwischen einem Startknoten und einem Zielknoten bestimmen (A*-Algorithmus [Har-1968]),
- die kürzesten Wege und Entfernungen zwischen einem Startknoten und allen anderen Knoten bestimmen (Dijkstra-Algorithmus [Dij-1959]), sowie
- die kürzesten Wege und Entfernungen zwischen allen Knotenpaaren bestimmen (Triple-Algorithmus [Flo-1962]).

Die folgende Entfernungsmatrix (Tabelle 2-4) enthält die kürzesten Entfernungen für das beispielhafte Layout aus Abbildung 2-4.

Tabelle 2-4: Entfernungsmatrix

Entfernungsmatrix E					
	a	b	c	d	e
a	-	20	20	28	42
b	20	-	28	20	22
c	20	28	-	20	42
d	28	20	20	-	22
e	42	22	42	22	-

Neben der Wahl der Topologie ist zu entscheiden, in welchen Fahrrichtungen sich die Fahrzeuge entlang einzelner Layoutabschnitte bewegen dürfen. Bei unidirektionalem Verkehr können Layoutabschnitte lediglich entlang einer Fahrrichtung zurückgelegt werden. Bei bidirektionalem Verkehr hingegen können Layoutabschnitte in entgegengesetzten Fahrrichtungen befahren werden. Dafür bedarf es einer aufwändigen

2.3 Analyse verschiedener Ansätze zur Leistungsberechnung der Transportmittel

Koordination des Verkehrs, um zu verhindern, dass sich zwei Fahrzeuge auf einem Layoutabschnitt in entgegengesetzter Fahrtrichtung begegnen und sich somit gegenseitig blockieren. Jedoch lassen sich die mittleren Fahrtstrecken gegenüber einem unidirektionalen Einbahnstraßensystem verkürzen. Darüber hinaus ist es möglich, zwei unidirektionale, entgegen gerichtete Spuren je Layoutabschnitt zu verwenden. Somit können die Layoutabschnitte in beide Richtungen befahren werden, ohne dass sich zwei entgegenkommende Fahrzeuge blockieren. Jedoch erfordert dies einen erhöhten Platzbedarf [Vis-2006, S. 680].

Ebenfalls abhängig vom Layout ist der Grad der Behinderung weiterer Fahrzeuge bei der Aufnahme und Abgabe von Paletten.

Transportaufkommen

Das Transportaufkommen gibt die Anzahl und Relation der Transportaufträge wieder, welche innerhalb der zugrundeliegenden Betrachtungsperiode anfallen. Tabelle 2-5 gibt beispielhaft das Transportaufkommen in einem Materialflusssystem bestehend aus fünf Stationen wieder. Dabei treten die Stationen sowohl als Quellen als auch als Senken für einzelne Transporte auf. Insgesamt sind in der Betrachtungsperiode 128 Transporte zu erfüllen.

Tabelle 2-5: Transportmatrix

Transportmatrix T					
	a	b	c	d	e
a	-	12	5	10	8
b	5	-	15	0	10
c	8	12	-	10	5
d	0	8	0	-	0
e	10	0	10	0	-

Zu beachten ist, dass nicht alle Transporte zwangsläufig mit dem Beginn der Betrachtungsperiode ausführbar sind, sondern möglicherweise zu unterschiedlichen Zeitpunkten innerhalb des Betrachtungszeitraums zur Verfügung stehen.

Betriebsbedingungen

Unter dem Begriff Betriebsbedingungen werden unterschiedliche Aspekte zusammengefasst, welche die Leistung der Fahrzeugflotte beeinflussen. Darunter fällt auch das Batteriemangement. Für gewöhnlich werden die Fahrzeuge über einen elektrischen Motor angetrieben. Die Energie hierfür wird über Batterien bereitgestellt. Je nach Fahrzeugtyp und Betriebsablauf kann ein Batteriezyklus ausreichend Energie für eine gesamte Schicht bereitstellen. Der Wechsel oder das Laden der Batterie kann zwischen

den Schichten erfolgen. In anderen Systemen wiederum erfolgt dies zwischen dem Ausführen einzelner Aufträge, wodurch zusätzliche Zeit in Anspruch genommen wird.

Ebenfalls unter dem Begriff Betriebsbedingungen fallen besondere Anforderungen bei der Ausführung der Transporte wie beispielsweise eine Bereitstellung der Transporteinheiten in einer fest definierten Auftragssequenz. Für manuell bediente Fahrzeuge ist ebenso die Verteilung der Mitarbeiterarbeitszeiten und -pausen von großer Bedeutung.

Auftragsvergabe

Die Aufgabe der Auftragsvergabe (engl. dispatching) ist die Zuordnung von Aufträgen zu Fahrzeugen. Unter einem Auftrag wird ein Transportauftrag verstanden. Ein Transportauftrag ist durch einen Startort, an welchem die Transporteinheit aufzunehmen ist, einen Zielort, an welchem die Transporteinheit abzugeben ist, sowie dem Zeitpunkt, zu welchem der Auftrag durchzuführen ist, charakterisiert [Hom-2011, S. 312]. Die Ausführung eines Auftrages setzt sich aus den folgenden Schritten zusammen:

1. Anfahrt zum Startort (falls die aktuelle Position des Fahrzeuges nicht mit der Startposition des Auftrags übereinstimmt)
2. Aufnahme der Transporteinheit
3. Transport der Transporteinheit vom Start- zum Zielort
4. Abgabe der Transporteinheit

Grundsätzlich lassen sich Auftragsvergabestrategien in zwei Kategorien unterteilen: Bei sogenannten Fahrzeug-initiierten Strategien wird für ein Fahrzeug der nächste auszuführende Auftrag gewählt. Hingegen wird bei Auftrags-initiierten Strategien für ein Fahrzeug der Auftrag gewählt, der als nächstes von diesem Fahrzeug ausgeführt wird [Egb-1984].

Mögliche Strategien für eine Fahrzeug-initiierte Auftragsvergabe bestehen beispielsweise in der Wahl des Auftrags,

- welcher bereits am längsten auf seine Ausführung wartet,
- dessen Startort sich am nächsten zur aktuellen Position des Fahrzeuges befindet.

Bei Auftrags-initiierte Strategien kann für einen Auftrag beispielsweise das Fahrzeug gewählt werden,

- welches sich in der geringsten Entfernung zum Startort des Auftrags befindet,

2.3 Analyse verschiedener Ansätze zur Leistungsberechnung der Transportmittel

- welches am wenigsten ausgelastet ist,
- welches am längsten untätig war.

Ebenfalls im Bereich Auftragsvergabe lassen sich Strategien für das Positionieren von nicht beschäftigten Fahrzeugen einordnen. Beendet ein Fahrzeug einen Auftrag und bekommt es nicht unmittelbar einen Folgeauftrag zugewiesen, muss entschieden werden, wo das Fahrzeug auf den nächsten Auftrag wartet. Dabei können unterschiedliche Zielsetzungen verfolgt werden, wie beispielsweise die Minimierung der maximalen Anfahrdauer eines Fahrzeuges zu dem Startort eines Auftrages oder aber eine gleichmäßige Verteilung der Fahrzeuge über das Layout [Egb-1993].

Zu berücksichtigen ist insbesondere, dass nicht beschäftigte Fahrzeuge, welche nicht auf gesonderten Parkplätzen gepuffert werden, möglicherweise weitere Fahrzeuge der Flotte bei der Ausführung von Transportaufträgen behindern.

Routing und Deadlock-Handling

Unter dem Begriff Routing wird die Festlegung der Route verstanden, auf welcher ein Fahrzeug fährt, um von seiner aktuellen Position ein vorgegebenes Ziel zu erreichen. Die Aufgabe des Deadlock-Handling besteht in der Ausführung der berechneten Routen derart, dass mit wechselseitigen Blockaden zwischen zwei oder mehreren Fahrzeugen – sogenannten Deadlocks – umgegangen werden kann.

Routingalgorithmen lassen sich grundsätzlich in statische sowie dynamische Algorithmen unterteilen. Bei der Verwendung von statischen Algorithmen wird für jede Start-Ziel-Relation eine Route einmalig berechnet, welche jedes Mal herangezogen wird, falls eine Fahrt zwischen diesen beiden Positionen im Layout notwendig ist. Bei dynamischen Algorithmen wird hingegen jedes Mal eine neue Route berechnet. Dabei steigt der Rechenaufwand gegenüber einem statischen Routing, jedoch lassen sich Echtzeitinformationen wie das gegenwärtige Verkehrsaufkommen zur Wahl der derzeit günstigsten Route verwenden. Somit können für eine Start-Ziel-Relation je nach Zeitpunkt und Systemzustand unterschiedliche Wege gewählt werden [Vis-2006, S. 696f.].

Ein Deadlock beschreibt eine Situation, in welcher ein oder mehrere gleichzeitig stattfindende Prozesse auf ewig blockiert sind, sodass die Ressourcenanforderungen der Prozesse nie erfüllt werden können [Kim-1997, S. 849]. Das Auftreten von Deadlocks ist ein logistisches Problem, welches in unterschiedlichen Bereichen berücksichtigt werden muss. Im Kontext des Verkehrs der Fahrzeuge entsprechen einzelne Layoutabschnitte den Ressourcen sowie die Fahrzeuge den Prozessen. Ein Deadlock tritt beispielsweise dann auf, wenn sich zwei Fahrzeuge innerhalb einer einspurigen Gasse in entgegengesetzter Fahrtrichtung begegnen.

Im Bereich der Transportmittel können Deadlocks aber auch beispielsweise beim Lastwechsel auftreten: Ein Fahrzeug kann die Transporteinheit nicht auf den vorgesehenen Übergabepplatz abgeben, da auf diesem bereits die Transporteinheit gepuffert wird, welche von dem Fahrzeug als nächstes transportiert werden soll.

In der Literatur werden hinsichtlich des Umgangs mit Deadlocks drei generische Ansätze unterschieden. Die *Deadlock-Prävention* ist ein Offline-Ansatz, welche auf Basis statischer Regeln verhindert, dass ein Deadlock eintritt. Ein Beispiel für die Anwendung einer solchen Strategien ist ein striktes Einbahnstraßensystem. Bei der *Deadlock-Vermeidung* werden die Ressourcen hingegen auf Basis des aktuellen Systemzustandes dynamisch derart zugewiesen, dass es nicht zu einem Deadlock kommen kann, beispielsweise durch die Verwendung einer Ampelanlage. Das Ziel der dritten Strategie, dem *Erkennen und Auflösen von Deadlocks*, ist es nicht, Deadlocks zu verhindern. Sobald jedoch ein Deadlock vorliegt, muss dieser erkannt und durch entsprechende Maßnahmen aufgelöst werden. Von den beiden sich gegenüberstehenden Fahrzeugen müsste bei einer solchen Strategie eines zurücksetzen und dem anderen die freie Fahrt gewähren [Cof-1971].

Verfügbarkeiten und Störungsmanagement

Strategien für den Umgang mit Störungen kommen dann zum Einsatz, wenn ein Fahrzeug aufgrund einer Störung ausfällt und für die Ausführung von Transportaufträgen temporär nicht zur Verfügung steht. In diesem Fall muss das Fahrzeug zum einen geborgen werden, zum anderen sollte die Störung möglichst schnell behoben werden.

Der Einfluss solcher Störungen hängt im Wesentlichen von der Verfügbarkeit der Fahrzeuge ab. Weisen diese eine hohe Verfügbarkeit auf, sind Störungen bei der Durchsatzbetrachtung nahezu zu vernachlässigen. Zu beachten ist jedoch, dass gestörte, ausgefallenen Fahrzeuge andere Fahrzeuge behindern können, wodurch sich Auswirkungen auf den Durchsatz verstärken.

Fahrzeug-Parameter

Einen direkten Einfluss auf die notwendige Flottengröße haben die Parameter der eingesetzten Fahrzeuge. Je schneller diese verfahren oder je mehr Transporteinheiten diese gleichzeitig transportieren können, umso weniger Fahrzeuge sind notwendig, um alle anfallenden Transportaufträge fristgerecht zu erfüllen.

Die relevanten Parameter lassen sich dahingehend untergliedern, welche sich auf die Dimensionen und Kinematik der Fahrzeuge, auf den Transport sowie auf den Lastwechsel beziehen (siehe Tabelle 2-6).

Tabelle 2-6: Fahrzeugparameter

Kategorie	Parameter
Dimensionen	– Höhe
	– Breite
	– Länge
	– Wendekreisdurchmesser
Kinematik	– max. Geschwindigkeit
	– max. Geschwindigkeit im beladenen Zustand
	– Kurvengeschwindigkeit
	– Kurvengeschwindigkeit im beladenen Zustand
	– Beschleunigung
	– Beschleunigung im beladenen Zustand
	– Verzögerung
	– Verzögerung im beladenen Zustand
Transport	– Typ der Transporteinheiten
	– Kapazität Anzahl Transporteinheiten
	– Kapazität Gewicht
Lastwechsel	– Dauer der Lastaufnahme
	– Dauer der Lastabgabe
	– Art der Lastabgabe

Fahrzeuge können aufgrund ihrer Dimensionen bestimmte Layoutrestriktionen aufweisen, wodurch die Leistung beeinflusst werden kann. Bei der Kinematik wird jeweils unterschieden, ob ein Fahrzeug beladen oder leer verfährt. Die Parameter für den Transport beziehen sich neben dem Typ der transportierbaren Transporteinheiten (Palette, KLT, etc.) auf die Kapazität der Fahrzeuge, welche durch die maximale Anzahl an Transporteinheiten oder durch ein maximales Gewicht der Transporteinheiten gegeben sein kann. Der Lastwechsel ist im Wesentlichen durch die Dauer des Lastwechselspiels charakterisiert. Unter der Art des Lastwechsels werden weitere Aspekte zusammengefasst, welche einen Einfluss auf die Systemleistung haben. Werden bei der Lastaufnahme und -abgabe andere Fahrzeuge behindert? Kann die Aufnahme oder Abgabe beliebig erfolgen oder nur von und zu einer bestimmten Richtung?

Durch eine entsprechende Parametrisierung eines Flurförderzeugs mit den aufgelisteten Parametern lassen sich die betrachteten Transportmittel zudem voneinander abgrenzen. Beispielsweise verfügen manuell bediente Stapler über deutlich höhere Geschwindigkeiten und niedrigere Lastwechselzeiten als FTF. Routenzüge zeichnen sich wiederum insbesondere durch höhere Transportkapazitäten aus.

2.3.2 Analytische Bestimmung der notwendigen Flottengröße

Ein analytischer Ansatz zur Bestimmung der notwendigen Flottengröße, welcher auch in der Praxis Anwendung findet, ist das Verfahren nach Großeschallau [Gro-1984]. Dieses Verfahren lässt sich für die Auslegung von FTF-Flotten als auch von Stapler-Flotten anwenden und berücksichtigt das zugrundeliegende Layout, das Transportaufkommen sowie die Fahrzeug-Parameter. Es setzt sich aus den folgenden Schritten zusammen:

1. Modellierung des Layouts durch einen Graphen
2. Ermittlung der Entfernungsmatrix E
3. Ermittlung der Fahrzeitenmatrix F
4. Ermittlung der Transportmatrix T
5. Ermittlung der Leerfahrtenmatrix L
6. Ermittlung der notwendigen Fahrzeuganzahl

Für die Verdeutlichung des Vorgehens wird das beispielhafte Layout aus der Abbildung 2-4 herangezogen.

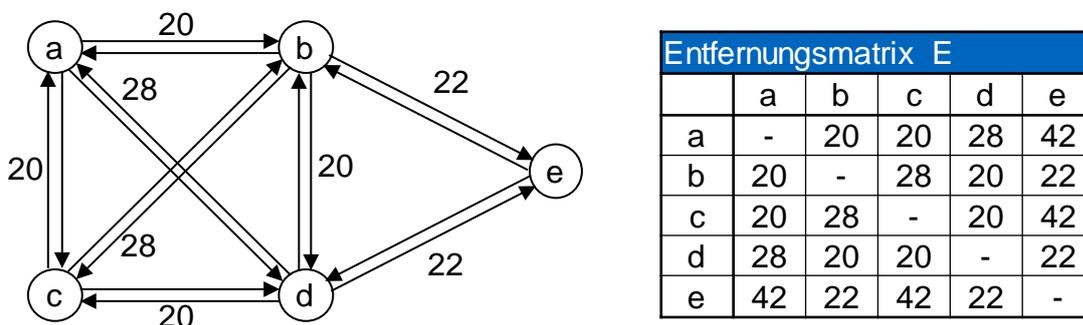


Abbildung 2-5: Betrachtetes Layout und zugehörige Entfernungsmatrix

Bereits im Abschnitt 2.3.1 wurde auf die Modellierung des Layouts durch einen Graphen sowie auf die Ermittlung der Entfernungsmatrix eingegangen.

Im dritten Schritt ist die Fahrzeitenmatrix F zu erstellen. Werden Beschleunigungs- und Verzögerungsprozesse vernachlässigt, ergibt sich die Fahrzeit zwischen zwei Knoten unmittelbar aus der Entfernung. Bei der Berücksichtigung von Beschleunigungs- und Verzögerungsprozessen sind hingegen zwei Geschwindigkeits-Zeit-Verläufe zu unterscheiden. Ist die zurückzulegende Strecke ausreichend lang und wird die maximale Geschwindigkeit erreicht, ergibt sich ein trapezförmiger Verlauf, welcher sich aus einer Beschleunigungsphase, einer Fahrt mit maximaler und konstanter Geschwindigkeit sowie einer Verzögerungsphase zusammensetzt. Eine Drecksfahrt

2.3 Analyse verschiedener Ansätze zur Leistungsberechnung der Transportmittel

ergibt sich hingegen, wenn die maximale Geschwindigkeit nicht erreicht wird (siehe Abbildung 2-6) [Arn-2009, S. 204f.].

- l : Gesamtstrecke.
- $t(l)$: Fahrzeit für das Zurücklegen der Gesamtstrecke l .
- v : Geschwindigkeit
- s_b : Beschleunigungsstrecke, Verzögerungsstrecke.
- s_c : Strecke, welche mit konstanter (maximaler) Geschwindigkeit zurückgelegt wird.
- t_b : Beschleunigungszeit, Verzögerungszeit.
- t_c : Zeitdauer der Fahrt mit konstanter (maximaler) Geschwindigkeit.

Die Fahrzeit für das Zurücklegen der Strecke l ergibt in Abhängigkeit der zurückzulegenden Strecke, der maximalen Geschwindigkeit sowie der Beschleunigung zu:

$$t(l) = \begin{cases} 2t_b + t_c & \text{für } l \geq 2s_b = \frac{v_{max}^2}{a} \\ 2t_b & \text{für } l < 2s_b = \frac{v_{max}^2}{a} \end{cases}$$

$$= \begin{cases} \frac{l}{v_{max}} + \frac{v_{max}}{a} & \text{für } l \geq \frac{v_{max}^2}{a} \\ 2\sqrt{\frac{l}{a}} & \text{für } l < \frac{v_{max}^2}{a} \end{cases}$$

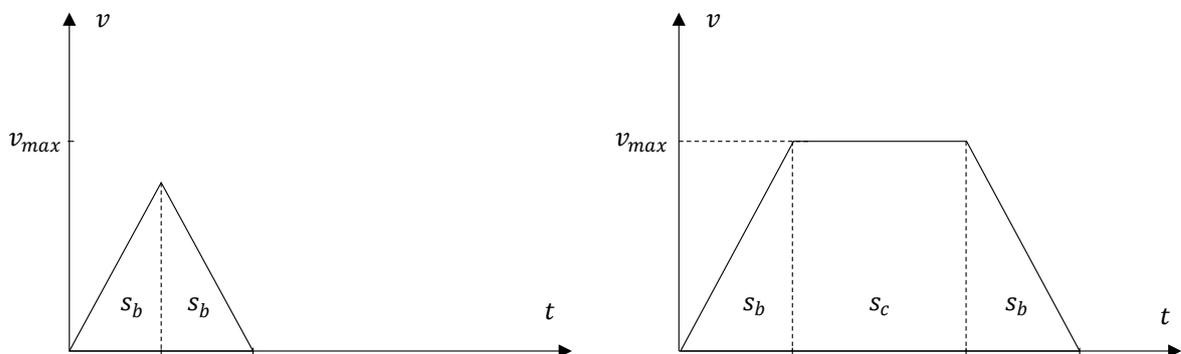


Abbildung 2-6: Geschwindigkeits-Zeitverläufe für eine Dreiecksfahrt (links) und eine Trapezfahrt (rechts)

Werden reduzierte Kurvengeschwindigkeiten berücksichtigt, kann die Fahrzeitenmatrix F nicht mehr ausschließlich aus der Entfernungsmatrix E abgeleitet werden. Ferner besteht die Möglichkeit, zwischen einer Fahrzeitenmatrix für die Fahrtdauer im beladenen Zustand sowie einer Fahrzeitenmatrix für die Fahrtdauer ohne Transporteinheiten zu differenzieren.

Mit einer angenommenen Geschwindigkeit von $v = 0,5 \text{ ms}^{-1}$ ergibt sich folgende Fahrzeitenmatrix (vgl. Tabelle 2-7):

Tabelle 2-7: Fahrzeitenmatrix F

Fahrzeitenmatrix F					
	a	b	c	d	e
a	-	40	40	56	84
b	40	-	56	40	44
c	40	56	-	40	84
d	56	40	40	-	44
e	84	44	84	44	-

Die Transportmatrix T enthält die Anzahl der erforderlichen Lastfahrten zwischen einzelnen Knotenpaaren innerhalb eines definierten Zeitraums. Bei einer Kapazität von mehr als einer Transporteinheit ist die Ermittlung der Anzahl der erforderlichen Lastfahrten komplex, da auch zielgemischte Fahrten sowie Fahrten mit Zuladen möglich sind. Für die Weiterführung des Beispiels wird die Transportmatrix aus Tabelle 2-5 herangezogen und als Betrachtungsdauer eine Stunde zugrunde gelegt.

Zum Ausgleich der Differenz zwischen Quellen- und Zielorthäufigkeit sind Leerfahrten notwendig. Die für die Leerfahrten zurückzulegende Strecke und damit auch die erforderliche Zeitdauer sind davon abhängig, wie der Fahrzeugüberschuss auf den Fahrzeugbedarf aufgeteilt wird.

Tabelle 2-8: Transportmatrix, Fahrzeugangebot a und Fahrzeugbedarf b

Transportmatrix						Quellenhäufigkeit	Fahrzeugbedarf b
	a	b	c	d	e		
a	-	12	5	10	8	35	12
b	5	-	15	0	10	30	
c	8	12	-	10	5	35	5
d	0	8	0	-	0	8	
e	10	0	10	0	-	20	
Senkenhäufigkeit		23	32	30	20	23	128
Fahrzeugangebot a		0	2	0	12	3	17

Für die Ermittlung des Fahrzeugüberschusses (oder auch Fahrzeugangebot) und des Fahrzeugbedarfs wird zunächst bestimmt, wie häufig ein Knoten eine Senke (Spaltensumme) sowie eine Quelle (Zeilensumme) im Transportprozess darstellt. Ist die Differenz aus Quellen- und Senkenhäufigkeit für einen Knoten positiv, ergibt sich ein Fahrzeugbedarf an diesem Knoten. Ist die Differenz hingegen negativ, ergibt sich ein Fahrzeugangebot. In dem Beispiel enden am Knoten a 23 Fahrten, während dort 35 Fahrten beginnen. Somit weist der Knoten a ein Fahrzeugbedarf von 12 Fahrzeugen auf.

Die optimale Verteilung des Fahrzeugangebots auf den Fahrzeugbedarf kann durch das Aufstellen und Lösen eines klassischen Transportproblems ermittelt werden [Dom-2015, S. 87f.]:

$$\min z = \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n f_{ij} x_{ij}$$

unter den Nebenbedingungen:

$$\sum_{j=1}^n x_{ij} = a_i \text{ für } i = 1, \dots, m \quad (1)$$

$$\sum_{i=1}^m x_{ij} = b_j \text{ für } j = 1, \dots, n \quad (2)$$

$$x_{ij} \in \mathbb{N}_0 \text{ für } i = 1, \dots, m \text{ und } j = 1, \dots, n$$

Mit:

z :	Gesamtleerfahrtdauer
$f_{i,j}$:	Fahrtzeit zwischen den Knoten i und j
$x_{i,j}$:	Anzahl der Leerfahrten zwischen den Knoten i und j
$i \dots m$:	Knoten mit einem Fahrzeugangebot
$j \dots n$:	Knoten mit einem Fahrzeugbedarf
a_i :	Fahrzeugangebot des Knoten i
b_i :	Fahrzeugbedarf des Knoten j

Die erste Nebenbedingung besagt, dass das Fahrzeugangebot an jedem Angebotsort komplett abgerufen werden soll, während die zweite für jeden Nachfrageort festlegt, dass der Fahrzeugbedarf vollständig erfüllt werden soll.

Die zur Lösung des klassischen Transportsystems verfügbaren Verfahren lassen sich unterteilen in [Dom-2015, S. 88]:

- Eröffnungsverfahren zur Bestimmung einer zulässigen Basislösung (Nordwesteckenregel, Vogel'sche Approximations- und Spaltenminimum-Methode)
- Optimierungsverfahren, die – ausgehend von einer zulässigen Basislösung – die optimale Lösung liefern (Stepping-Stone-Methode).

Ein einfaches heuristisches Vorgehen zur Bestimmung der Leerfahrten besteht aus den folgenden vier Schritten:

1. Wähle den Knoten mit dem größten Fahrzeugbedarf
2. Bestimme den dazu nächstgelegenen Knoten mit einem Fahrzeugangebot
3. Versuche Bedarf und Angebot auszugleichen
4. Falls weitere Leerfahrten erforderlich sind, gehe zu 1. sonst Stopp

Auf das Beispiel angewendet ergeben sich vier Iterationen (siehe Tabelle 2-9):

2.3 Analyse verschiedener Ansätze zur Leistungsberechnung der Transportmittel

Tabelle 2-9: Heuristisches Vorgehen zur Bestimmung der Leerfahrten

	1. Iteration	2. Iteration	3. Iteration	4. Iteration
Knoten mit größtem Fahrzeugbedarf	a mit Bedarf: 12	a mit Bedarf: 10	c mit Bedarf: 5	c mit Bedarf: 3
Nächstgelegener Knoten mit Fahrzeugangebot	b mit Angebot: 2	d mit Angebot: 12	b mit Angebot: 2	e mit Angebot: 3
Ausgleich	b → a : 2	d → a : 10	b → c : 2	e → c : 3
Weitere Leerfahrten erforderlich	ja	ja	ja	nein

Abschließend lässt sich die Anzahl der notwendigen Fahrzeuge bestimmen. Anhand der Transportmatrix T sowie der Leerfahrtenmatrix L lassen sich in Kombination mit der Fahrzeitenmatrix F die Dauer der Last- und Leerfahrten ermitteln, wie in Tabelle 2-10 zu sehen ist:

Tabelle 2-10: Transportmatrix T , Leerfahrtmatrix L und Fahrzeitmatrix F

Transportmatrix T						Leerfahrtmatrix L						Fahrzeitenmatrix F (in s)					
	a	b	c	d	e		a	b	c	d	e		a	b	c	d	e
a	-	12	5	10	8	a	-	0	0	0	0	a	-	40	40	56	84
b	5	-	15	0	10	b	2	-	0	0	0	b	40	-	56	40	44
c	8	12	-	10	5	c	0	0	-	0	0	c	40	56	-	40	84
d	0	8	0	-	0	d	10	0	2	-	0	d	56	40	40	-	44
e	10	0	10	0	-	e	0	0	3	0	-	e	84	44	84	44	-

Es ergibt sich mit der Dauer der Lastfahrten (7204 s), der Dauer der Leerfahrten (720 s), der Dauer der Lastwechsel (1280 s, mit einer Lastwechselzeit von 5 s) ein Gesamtzeitbedarf von 9204 s. Somit gilt für die Anzahl der notwendigen Fahrzeuge:

$$n_{Fzg} = \frac{t_{\text{Bedarf}}}{t_{\text{Periode}}} = \frac{9204s}{3600s} = 2,56 \rightarrow 3 \text{ Fahrzeugen}$$

Aufgrund der Vereinfachungen und Annahmen liefert das Vorgehen jedoch lediglich einen groben Richtwert für die Anzahl der Fahrzeuge. Daher ist die Durchführung einer Simulationsstudie notwendig, um eine hinreichend genaue Aussage über die Durchsatzleistung zu erhalten [Gan-1998; Le--2006; Vis-2006].

2.3.3 Planung und Leistungsberechnung von Routenzugsystemen

Die VDI-Richtlinie 5586 (Blatt 2) beschreibt ein Vorgehen zur Planung von Routenzugsystemen, welches sich aus vier Phasen zusammensetzt:

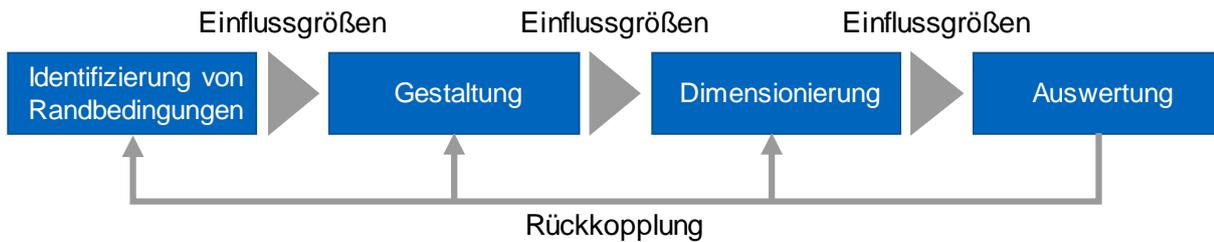


Abbildung 2-7: Vier Phasen der Routenzugsystemplanung (in Anlehnung an [VDI-5586a])

Unter die Identifizierung von Randbedingungen fallen die Daten zu Transportgütern und -mengen, Layout, und Auftragssteuerung sowie Beschränkungen wie beispielsweise die maximale Länge eines Routenzuges oder auch die maximale Fahrgeschwindigkeit. Die Gestaltung umfasst die Auswahl von Elementen sowie die Entwicklung von Prozessen und die Steuerung eines Routenzugsystems. Darunter fallen zum einen die technische und organisatorische Ausgestaltung, zum anderen aber auch die Festlegung von Routen und Verkehrsregeln. Die Dimensionierung beinhaltet die rechnerische Auslegung des Routenzugsystems hinsichtlich der benötigten Ressourcen. Die Auswertung setzt sich mit der Bestimmung von Bewertungskennzahlen zur Beurteilung des geplanten Routenzugsystems auseinander.

Die beschriebene Dimensionierung bezieht sich lediglich auf eine Route, welche hinsichtlich der Haltepunkte als bekannt angenommen wird und beinhaltet keine Optimierung von Routenführungen. Das Verfahren ist daher für jede Route separat anzuwenden, eine routenübergreifende Betrachtung, welche beispielsweise auch Verkehrseffekte berücksichtigt, erfolgt nicht. Das Vorgehen lässt wie folgt zusammenfassen:

1. Bestimmung eines normierten Ladungsträgerdurchsatzes innerhalb der Betrachtungsperiode.
2. Bestimmung der Routenfrequenz aus dem Ladungsträgerdurchsatz und der Routenzugkapazität sowie Bestimmung des sich unmittelbar ergebenden maximalen Zeitabstands zwischen zwei Routen.
3. Berücksichtigung der Auslastung unterhalb der maximalen Kapazität.
4. Ermittlung der Zykluszeit.
5. Bestimmung der notwendigen Anzahl der Routenzüge.

Zunächst ist der Durchsatz der Ladungsträger zu ermitteln. Dieser ergibt sich aus sämtlichen Artikeln, die an sämtlichen Haltepunkten der Tour bereitzustellen sind. Um eine verbindliche Aussage über die Nutzung der Ressource Routenzug zu erhalten, wird dieser Durchsatz normiert. Beispielsweise benötigen GLTs mehr Ressourcen als KLTs. Somit werden GLTs wie KLTs in normierte Ladungsträger (NLTs) umgerechnet.

2.3 Analyse verschiedener Ansätze zur Leistungsberechnung der Transportmittel

Die Routenzugfrequenz ergibt sich aus dem Quotienten aus dem normierten Ladungsträgerdurchsatz sowie aus der ebenfalls normierten Routenzugkapazität und entspricht der Anzahl an Touren, die pro Zeiteinheit mindestens erforderlich sind. Der Kehrwert der Frequenz beschreibt den größtmöglichen zeitlichen Abstand zwischen aufeinanderfolgenden Startzeitpunkten von Touren, bei welchem der geforderte Durchsatz gerade noch erreicht wird.

Zu beachten ist, dass dabei von stets maximal ausgelasteten Routenzügen ausgegangen wird. Wird eine geringe Auslastung zugrunde gelegt, ergibt sich ein entsprechend verringerter Tourenabstand sowie eine entsprechend erhöhte Routenfrequenz.

Die Zykluszeit setzt sich aus:

- der reinen Fahrzeit,
- der Haltepunktzeit, welche Nebenzeiten an den Haltepunkten umfasst,
- der Beladezeit sowie der
- Entladezeit zusammen.

Werden Beschleunigungs- und Verzögerungsprozesse sowie reduzierte Kurvengeschwindigkeiten vernachlässigt, ergibt sich die Fahrzeit direkt aus der Tourenlänge. Die Haltepunktzeit umfasst Zeitzuschläge, welche an jedem Haltepunkt zusätzlich zum Be- oder Entladen auftreten, wie beispielsweise das Auf- und Absteigen des Fahrers. Zu beachten ist, dass nicht zwangsweise jeder Haltepunkt bei jeder Tour angefahren wird. Die Wahrscheinlichkeit für das Anfahren eines Haltepunktes kann aus dem Verhältnis von Ladungsträgerdurchsatz und der Routenfrequenz bestimmt werden. Die Beladezeit umfasst die Vorgänge am Haltepunkt, an dem Ladungsträger an den Routenzug übergeben werden. Entsprechend umfasst die Entladezeit die Vorgänge am Haltepunkt, an dem Ladungsträger vom Routenzug abgegeben werden.

Bildet man abschließend den Quotienten aus der Kapazität-berücksichtigenden Zykluszeit sowie des Kapazität-berücksichtigenden Tourenabstandes, ergibt sich die Anzahl der insgesamt erforderlichen Routenzüge.

Zur Bestimmung der Routen schlagen Günthner et al. eine layoutbasierte Methode vor, welche die Routen basierend auf dem Produktionslayout bestimmt. Dabei wird zuerst festgelegt, welche Senken zu einer Route zusammengefasst und in welcher Reihenfolge diese Orte beliefert werden sollen. Möglichst zu vermeiden sind viele Kurven, Gegenverkehr und häufiges Kreuzen anderer Routen. Anschließend werden die Haltepunkte auf den Routen festgelegt und geprüft, ob gegebenenfalls mehrere, nahe

beieinanderliegende Senken von einem Haltepunkt aus beliefert werden können. Im nächsten Schritt wird das Transportvolumen der einzelnen Routen, also die Anzahl der zu transportierenden Ladungsträger je Zeiteinheit berechnet. Daraufhin wird ermittelt, wie viele Ladungsträger ein Routenzug bei der festgelegten Planauslastung maximal ausliefern kann. Im Anschluss wird berechnet, wie viele Touren je Zeiteinheit auf der jeweiligen Route gefahren werden müssen, sodass das gesamte Transportvolumen der Routen abgewickelt werden kann [Gün-2013].

Blatt 2 der VDI-Richtlinie 5586 bietet ein einfaches analytisches Berechnungsmodell zur Dimensionierung von Routenzugsystemen. Hierbei können allerdings keine dynamischen Einflüsse berücksichtigt werden.

2.3.4 Vergleichende Ansätze

In der VDI-Richtlinie 2710 „Ganzheitliche Planung von Fahrerlosen Transportsystemen“ erfolgt ein Vergleich verschiedener Transportmittel für verschiedene Verkettungsprinzipien des Transports. Während sich Blatt 1 mit den qualitativen Aspekten auseinandersetzt, bietet Blatt 4 eine quantitative Analyse für die Investitionsentscheidung. Hier werden allerdings keine genauen Auskünfte über die Dimensionierung der Transportsysteme gegeben. Auch Mischformen werden nicht berücksichtigt. [VDI-2710]

Fuss & Lackmann entwickeln ein Tool zur ganzheitlichen Planung von Materialversorgungs- und Entsorgungsprozessen für die Produktion. Mehrere Lösungsvarianten können ausgeplant und mit Hilfe verschiedener Kennzahlen verglichen werden. Allerdings sind die zugrunde liegenden Ansätze analytisch und berücksichtigen daher keine dynamischen Effekte wie z. B. die Interaktionen zwischen den Fahrzeugen oder die stochastischen Verteilungen der Prozesse. [Fus-2015]

Salhi et al. stellen die Dimensionierung heterogener Transportsysteme als ein lineares Optimierungsproblem auf, welches anschließend mit Hilfe einer selbstentwickelten Heuristik gelöst wird. Das sogenannte „multi-depot fleet size and mix vehicle routing problem“ (MDFSMVRP) kombiniert drei Aspekte bei der Entscheidung:

- Die Bestimmung der Anzahl an Fahrzeuge pro Fahrzeugtyp.
- Berechnung der optimalen Routen.
- Die Zuweisung der Routen zu den jeweiligen Fahrzeugen.

Für Systeme mit komplexeren Strukturen können allerdings solche Ansätze aufgrund des enormen Rechenaufwands nicht eingesetzt werden [Sal-1997]. Außerdem handelt

2.3 Analyse verschiedener Ansätze zur Leistungsberechnung der Transportmittel

es sich hierbei auch um eine statische Berechnungsmethode, wodurch Transportsysteme unterdimensioniert werden können.

3 Entwicklung eines Planungsvorgehens für Transportsysteme mit verschiedenen Transportmitteltypen

In diesem Kapitel wird das Konzept des simulationsbasierten Planungsvorgehens zur Auswahl der Transportmittel vorgestellt. Wesentliche Aspekte dieses Ansatzes wurden in [Mes-2022] veröffentlicht.

3.1 Entwurf des Planungsvorgehens

Zur Dimensionierung innerbetrieblicher Transportsysteme stehen in der Literatur zahlreiche Methoden zur Auswahl. Diese unterscheiden sich sowohl in der Methodik als auch in den zugrunde liegenden Annahmen. Während analytische Ansätze einfach und schnell umgesetzt werden können, bieten Materialflusssimulationen die Möglichkeit, dynamische Einflüsse zu berücksichtigen und liefern somit genauere Ergebnisse. Aufgrund der hohen Anzahl an Lösungsalternativen, die bei heterogenen Systemen entstehen, sind solche Methoden nicht geeignet. Eine vollständige Enumeration und Simulation der Lösungsalternativen erfordert außerdem einen hohen Rechenaufwand und ist somit vor allem bei komplexen Systemen nicht möglich.

Um die Flottengröße von FTS zu bestimmen, greifen Yifei et al. auf einen zweistufigen Ansatz zurück, welcher im ersten Schritt die Anzahl der Fahrzeuge analytisch berechnet und diese anschließend anhand einer Simulation verifiziert. Wird die geforderte Leistung nicht erreicht, so wird die Anzahl der Fahrzeuge um eins erhöht und erneut durch ein Simulationsmodell verifiziert [Yif-2010]. Diese Vorgehensweise ermöglicht eine genaue und gleichzeitig effiziente Ermittlung der Flottengröße und wird daher im Projekt PlaKAT verwendet.

Da es sich in diesem Projekt um heterogene Transportsysteme handelt, kann eine optimale Lösung nicht garantiert werden. Um die Lösungskosten weiter zu optimieren bzw. lokale Optima zu vermeiden, werden mehrere initiale Lösungen generiert, welche anschließend simulativ bewertet werden. Die dadurch erzielte Verbesserung ist jedoch mit einem höheren Rechenaufwand verbunden. Die Auswahl der besten Lösungsvarianten erfolgt hierbei auf Basis der Kosten. Der gesamte Ablauf des simulationsbasierten Ansatzes ist der Abbildung 3-1 zu entnehmen.

3 Entwicklung eines Planungsvorgehens für Transportsysteme mit verschiedenen Transportmitteltypen

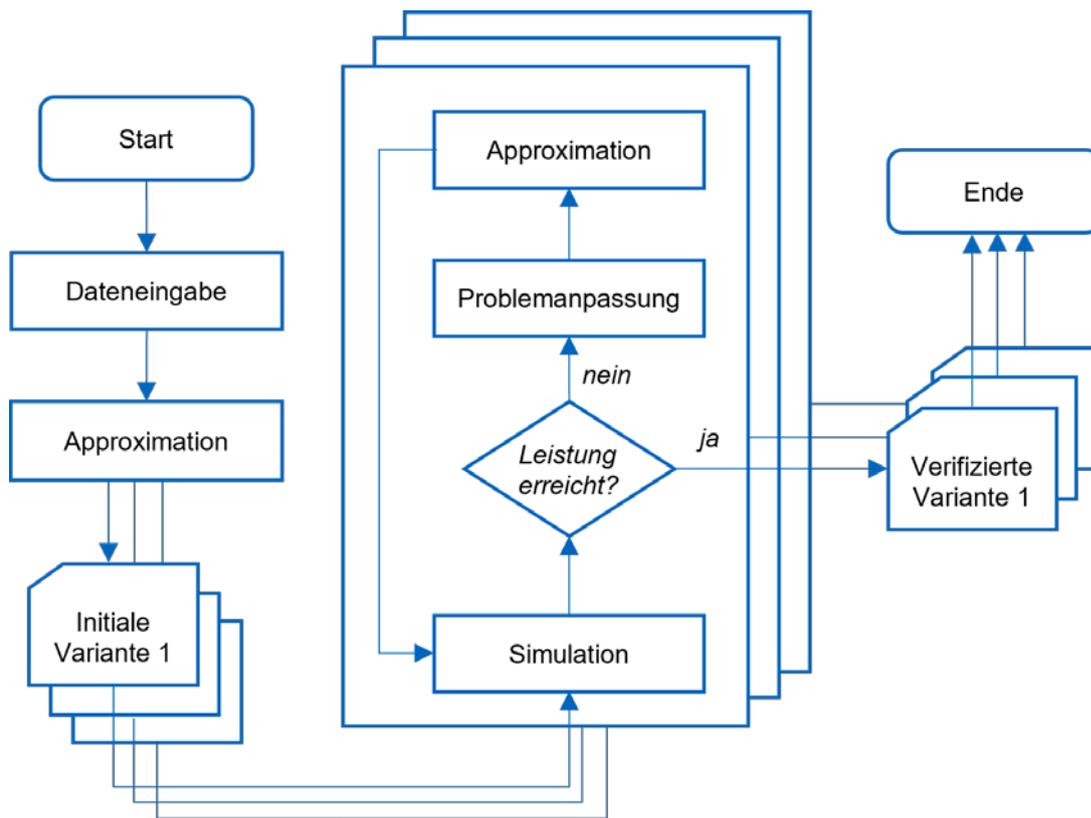


Abbildung 3-1: Schematische Darstellung des simulationsbasierten Ansatzes

3.2 Analytisches Modell zur Berechnung der Flottengröße

Wie in Kapitel 2 erklärt wurde, kann die Dimensionierung heterogener Transportsysteme als ein Optimierungsproblem aufgestellt werden. Exakte Ansätze wie das Branch-and-Bound oder das Branch-and-Cut sind allerdings aufgrund der hohen Komplexität nicht geeignet. Daher wurde eine heuristische Methode entwickelt, welche in diesem Abschnitt vorgestellt wird. Hierzu werden zuerst die folgenden Variablen definiert:

$T \leq 3$: Anzahl der unterschiedlichen Transportmitteltypen

K : Anzahl der unterschiedlichen Fahrzeugarten

$V = \{v_{k \in \{1, \dots, K\}}\}$: Menge der unterschiedlichen Fahrzeugarten v_k

A : Menge der Aufträge

$\pi = \{\pi_{i \in \{1, \dots, K\}}\}$: Menge der K -stelligen Permutationen π_i der Menge V

$\pi_i(k)$: Rangfolge der Fahrzeugart v_k in der Permutation π_i

C_i : Gesamtkosten bei der Permutation π_i

n_{ik} :	Anzahl der Fahrzeuge der Art k bei der Permutation π_i
$N_i = \{n_{ik}\}$:	Flottenzusammensetzung bei der Permutation π_i
$A_k \in A$:	Menge der Transportaufträge, die der Fahrzeugart v_k zugewiesen ist
$c_{var,k}$:	Kosten pro Stunde beim Einsatz der Fahrzeugart v_k [€/h]
$t_k^a > 0$:	Dauer des Auftrags a von der Fahrzeugart v_k [h]
$x_{ik}^a \in \{0,1\}$:	ist gleich 1, wenn der Auftrag a der Fahrzeugart v_k bei der Permutation π_i zugewiesen ist
$c_{fix,k}$:	Kosten eines Fahrzeugs der Art v_k [€]
$y_{ik}^t \in \{0,1\}$:	ist gleich 1, wenn bei der Permutation π_i $n_k > 0$ und v_k vom Typ t ist
$c_{inv,t}$:	Zusätzliche Investitionen beim Einsatz von mindestens einem Fahrzeug des Transportmitteltyp t [€]

Die Grundidee dieser Berechnungsmethode besteht darin, die Auslastung der Fahrzeuge bei verschiedenen Zuweisungen der Transportaufträge zu den Transportmitteln zu maximieren. Für jede Permutation π_i aus den unterschiedlichen Fahrzeugarten werden zuerst die Transportaufträge nach den Reihenfolgen $\pi_i(k)$ verteilt und anschließend die Anzahl der jeweiligen Fahrzeuge n_{ik} und die entsprechenden Gesamtkosten C_i berechnet. Die Kosten einer Variante werden mit der folgenden Formel berechnet:

$$C_i = \sum_{t=1}^{T=3} \sum_{k=1}^K \sum_{a=1}^A c_{var,k} \cdot x_{ik}^a \cdot t_k^a + n_{ik} \cdot c_{fix,k} + y_{ik}^t \cdot c_{inv,t}$$

Im zweiten Schritt wird die Auslastung der Fahrzeuge mit der höchsten Priorität ($\pi_i(k) = 1$) maximiert. Hierzu soll eine Teilmenge von Aufträgen $A' \in A_k$ auf die restlichen Fahrzeugarten umverteilt werden, sodass n_{ik-1} gerade um eins reduziert wird. Dieser Schritt wird so lange durchgeführt, bis die Auslastung aller Fahrzeugarten optimiert ist. In jeder Iteration werden die jeweiligen Kosten ermittelt, um die beste Lösungsvariante zu bestimmen.

Für die Generierung der Planungsvarianten wird diese Methode ebenso eingesetzt. Diese entsprechen den Kombinationen mit den niedrigsten Kosten, wobei die Anzahl der unterschiedlichen Varianten vom Anwender anzugeben ist und die Gesamtanzahl der möglichen Kombinationen $!K$ nicht überschreiten darf.

3 Entwicklung eines Planungsvorgehens für Transportsysteme mit verschiedenen Transportmitteltypen

Der Gesamtablauf ist in Tabelle 3-1 anhand eines Pseudocodes zusammengefasst.

Tabelle 3-1 Algorithmus der analytischen Methode zu Ermittlung der erforderlichen Flottengröße

Pseudocode Approximation der erforderlichen Flottengröße $O(!K)$	
1	Für jede $\pi_{i \in \{1, \dots, !K\}} \in \pi$ der Menge $V = \{v_{k \in \{1, \dots, K\}}\}$
2	Transportaufträge A auf $v_{k \in \{1, \dots, K\}}$ nach den Reihenfolgen $\pi_i(k)$ verteilen
3	Berechne die Flottengrößen $N_i = \{n_{ik}\}$ und die entsprechenden Kosten C_i
4	Für jedes Fahrzeugart $v_{k \in \{2 \dots K\}}$
5	Identifiziere $A' \in A_k$ von v_{k-1} , sodass $n_{ik-1} = n_{ik-1} - 1$
6	Transportaufträge A' auf die Transportmittel $v_{j \in \{k+1, \dots, K\}}$ verteilen
7	Berechne die Flottengrößen N_i' und die entsprechenden Kosten C_i'
8	Wenn $(C_i' < C_i)$
9	$(N_i, C_i) = (N_i', C_i')$
10	Ende
11	Ende
12	Ende
13	Beste Lösung $N^* = \{N_i C_i > C_j, \forall j \in \{1, \dots, !K\} \setminus i\}$

Hier ist zu beachten, dass die entwickelte Methode die Berücksichtigung verschiedener Fahrzeugarten für die unterschiedlichen Transportmitteltypen ermöglicht. So können z. B. Routenzüge mit unterschiedlicher Ladekapazität oder mehrere FTF-Varianten miteinander verglichen werden. Die Komplexität steigt allerdings exponentiell mit der Anzahl der betrachteten Fahrzeugarten.

3.2.1 Dimensionierung der einzelnen Transportmitteltypen

Zur Dimensionierung von FTS und Staplersystemen wird die Methode nach Großschallau (siehe 2.3.2) eingesetzt. Die Ermittlung der benötigten Anzahl an Routenzügen erfolgt nach der VDI-Richtlinie 5586, wobei die Bestimmung der Routen mit Hilfe der layoutbasierten Planungsmethode nach Günthner et al. durchgeführt wird. Für die Optimierung der Routen können zahlreiche exakte und approximative Methoden eingesetzt werden [Cac-2015]. Da im Simulationsmodell die Routen dynamisch berechnet werden, muss der Algorithmus performant sein, während gleichzeitig eine gute Lösung gewährleistet werden kann. Ein einfaches Verfahren bietet 2-Opt, welches durch Vertauschen der Reihenfolge der anzufahrenden Stationen die initiale Lösung verbessert [Cro-1958]. Dies wird daher sowohl in das analytischen Berechnungsmodell als auch in das Simulationsmodell integriert. Anders als bei der originalen Version des

Algorithmus, können hier mehrere Quelle und Senken bedient werden. Aus diesem Grund soll bei jeder Iteration zusätzlich überprüft werden, ob die Reihenfolge der anzufahrenden Haltestationen möglich ist. Für alle Aufträge muss also die Quelle vor der Senke bedient werden.

3.2.2 Berechnung der erforderlichen Zeit zur Durchführung der Aufträge

Für die Berechnung der Auftragsdauer müssen zuerst die kürzesten Entfernungen bestimmt werden. Dies erfolgt mit Hilfe des Floyd-Warshall-Algorithmus (oder Triple-Algorithmus), welche um Restriktionen zwischen den Fahrzeugarten und dem Layout erweitert wurde. Da Fahrzeugarten unterschiedliche Restriktionen aufweisen, werden fahrzeugspezifische Routen ermittelt.

Die Dauer der Aufträge setzt sich aus Fahrzeiten und Lastübergabezeiten zusammen. Die Berechnung der Fahrzeiten berücksichtigt die Beschleunigungs- und Vorzögerungsvorgänge, wie in Abschnitt 2.3.2 beschrieben ist. Die Lastübergabezeiten sind konstant und werden vom Anwender definiert.

3.3 Simulative Bewertung der Lösungen

In diesem Abschnitt wird zuerst beschrieben, wie die generierten Lösungsvarianten anhand der Simulationsergebnisse bewertet werden. Anschließend erfolgt eine Analyse der Konvergenz des entwickelten Ansatzes.

3.3.1 Verifikation der Lösungsalternative und Anpassung des Problems

Die Verifikation der berechneten Lösungsvariante erfolgt durch den Vergleich zwischen den geforderten Durchsatzwerten $D_{c,soll}$ für alle Quellen-Senken-Relationen $c \in \{1, \dots, C\}$ und denjenigen, die von der Simulation ermittelt werden $D_{c,sim}$. Durch die stochastische Natur der ereignisdiskreten Simulationen sind diese nicht konstant, sondern schwanken um ihren jeweiligen Erwartungswert. Demzufolge wird ein Toleranzbereich eingeführt, um die Konvergenz des Planungsvorgehens zu ermöglichen. Die geforderte Leistung des Systems wird dann erreicht, wenn alle Durchsatzwerte über dem Toleranzbereich liegen:

$$D_{c,sim} \geq D_{c,soll} - \Delta; \forall c \in \{1, \dots, C\}$$

3.3.2 Divergenz des Planungsvorgehens

Die Ermittlung einer geeigneten Lösungsvariante ist durch die Konvergenz des Ansatzes bedingt. Diese ist jedoch in bestimmten Fällen nicht gewährleistet:

Unbestimmte Divergenz

Eine unbestimmte Divergenz tritt auf, wenn die Leistung des Systems durch Erhöhung der Fahrzeuganzahl weder gegen einen bestimmten Wert strebt noch wieder abnimmt. Dies ist z. B. der Fall, wenn die Simulation abgebrochen wird, während sich das System noch in der Einschwingphase befindet. Die Simulationsdauer ist also so auszuwählen, dass das System einen quasistationären Zustand erreicht. Die mathematischen Verteilungen der Prozesse sowie die Komplexität des Transportsystems beeinflussen außerdem die Streuung der Durchsatzwerte im Laufe der Simulation. Eine angemessene Auswahl des Toleranzbereichs ist also für die Konvergenz des Vorgehens notwendig.

Bestimmte Divergenz

Eine bestimmte Divergenz liegt vor, wenn die geforderte Leistung des Systems im Laufe der Iterationen nicht erreicht werden kann. Erhöht sich die Anzahl der Fahrzeuge weiter, so vermehren sich auch die Interaktionen und es verringert sich somit die Systemleistung. Mehrere Gründe können zu einer bestimmten Divergenz führen:

- Unterdimensionierung der Puffer and den Quellen und Senken
- Ineffiziente Auftragsvergabe- und Routingstrategien
- Geringe Leistung der Fahrzeuge
- Strenge Restriktionen

4 Mathematische Modellierung und Formalisierung der Eingangsdaten

Die Anwendung des entwickelten Planungsvorgehens soll auf Systeme mit unterschiedlichen Parametern und Randbedingungen erfolgen. Daher ist eines der Ziele von PlaKAT, ein generisches Simulationsmodell zu entwickeln. Dies ist bedingt durch eine geeignete Modellierung und Formalisierung der Eingangsdaten, um die Erweiterbarkeit, die Skalierbarkeit sowie die Flexibilität des Modells zu gewährleisten. Hauptaspekte der Modellierung der Eingangsdaten wurden in [Mes-2021] vorgestellt.

Das betrachtete Transportsystem kann als ein sogenanntes “Multi-Commodity Network Flow Model“ abgebildet werden. Hierbei soll eine Menge an Ladeeinheiten von mehreren Quellen zu mehreren Senken durch ein Netzwerk transportiert werden. Der Transport erfolgt hierbei anhand der unterschiedlichen Transportmitteltypen: Stapler, FTF und Routenzug.

4.1 Modellierung der Layoutdaten

Das Layout lässt sich als ein gerichteter Graph mit einer Menge von Knoten und gewichteten Kanten modellieren. Knoten sind durch eine Position und einen Typ, nämlich Quelle, Senke, Kreuzung oder Fahrzeugpool, bestimmt. Quellen und Senken stellen Schnittstellen zu externen Systemen dar. Um die hierbei stattfindenden Interaktionen im Simulationsmodell exakt abbilden zu können, wird für jede dieser Übergabestationen ein Puffer mit variabler Kapazität definiert. Kanten können mehrere Eigenschaften aufweisen, wie z. B. Breite, maximal zulässige Höhe usw. und repräsentieren die Wege zwischen den unterschiedlichen Knoten. Jede Kante ist also mit einem Start- und einem Zielknoten assoziiert. Für eine genauere Abbildung des Layouts werden darüber hinaus Kurven berücksichtigt. Diese werden durch einen Radius sowie ein Kantenpaar definiert. Das Kantenpaar setzt sich aus einer einfallenden und einer ausfallenden Kante eines bestimmten Knotens zusammen.

4.2 Modellierung des Transportaufkommens

Das Transportaufkommen beschreibt die Art und Menge der Ladeeinheiten, die zwischen Quellen und Senken in einer bestimmten Zeiteinheit befördert werden sollen. Ladeeinheiten weisen demnach verschiedene Eigenschaften, wie beispielsweise das

Gewicht oder die Art des Ladehilfsmittels auf. Um die stochastischen Effekte, die in realen Systemen auftreten, zu beschreiben, werden statt konstante Werte für die Anzahl der zu transportierenden Ladeeinheiten mathematischen Verteilungen eingeführt. So lassen sich beliebige Ankunftsprozesse an den Quellen abbilden. Da Quellen sowohl Lagersysteme als auch Fördertechnikelemente repräsentieren können, wird eine zusätzliche boolesche Variable eingeführt, welche angibt, ob die Ladeeinheiten nach der Strategie First-In-First-Out (FIFO) abgearbeitet werden sollten. Eine ähnliche Modellierung erfolgt ebenso für die Bearbeitungsprozesse an den Senken. Für jede Transportrelation ist also die mathematische Verteilung der Bearbeitungszeit zu definieren. Das Transportsystem kann dementsprechend auch als ein Warteschlangennetz dargestellt werden, wie in Abbildung 4-1 zu sehen ist. λ_c und μ_c bezeichnen hierbei die Ankunftsraten an den Quellen bzw. die Bearbeitungsraten an den Senken.

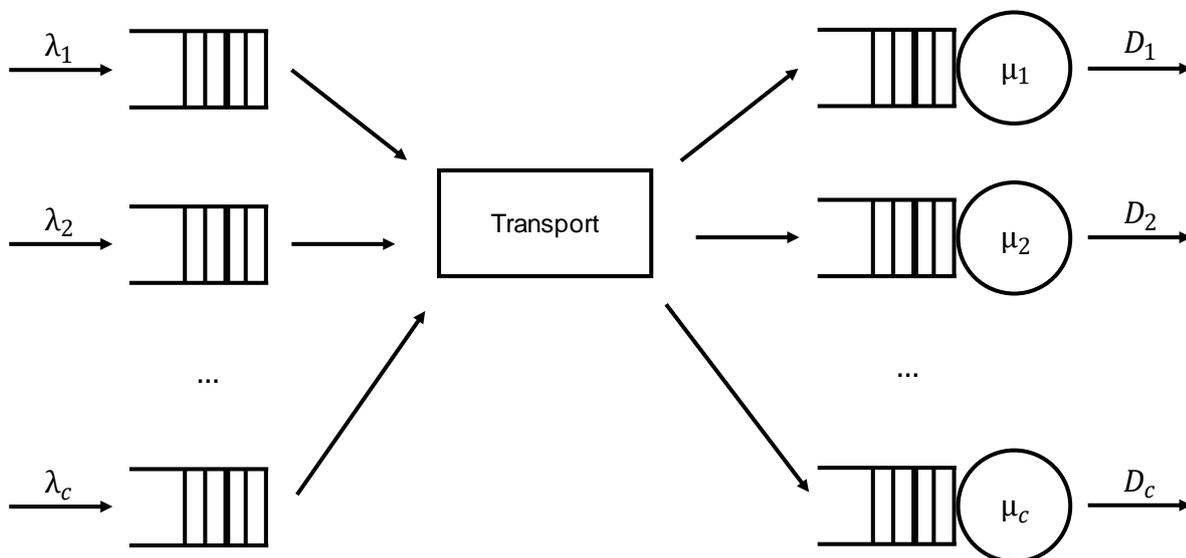


Abbildung 4-1 Schematische Abbildung eines Transportsystems als ein Warteschlangennetz

4.3 Modellierung der Fahrzeuge

Wie in Abschnitt 2.3.1 beschrieben ist, haben sowohl Fahrzeugparameter (siehe Tabelle 2-6) als auch Transportunterbrechungen wie Störungen, Mitarbeiterpausen oder Batterieladevorgänge einen bedeutenden Einfluss auf die Leistung des Systems. Eine Transportunterbrechung lässt sich durch eine Dauer, einen zeitlichen Abstand zwischen zwei aufeinanderfolgenden Unterbrechungen sowie eine Zielposition beschreiben. Die Zielposition entspricht in der Regel einem der definierten Fahrzeugpools, welcher beim Auftreten einer Unterbrechung angefahren werden soll (z. B. Batterieladevorgang oder Mitarbeiterpause). Ist die Zielposition nicht definiert, so soll das Fahrzeug an seiner Position stillstehen (z. B. Fahrzeugstörung). Ähnlich wie bei

Transportrelationen werden hier auch mathematische Verteilungen verwendet, um die stochastischen Einflüsse der Unterbrechungen im Transport zu berücksichtigen.

Treten Wartezeiten bis zur Zuweisung der nächsten Fahraufträge auf, so werden Transportmittel in der Regel zu definierten Positionen fahren, um den Verkehr durch Blockaden an den Senken nicht zu beeinträchtigen. Um dieses Verhalten im Simulationsmodell abbilden zu können, wird daher eine zusätzliche Variable für die Warteposition des Transportmittels eingeführt. Wird diese nicht spezifiziert, so wird das Fahrzeug an der Senke stehen bleiben, bis diesem ein neuer Auftrag zugewiesen wird.

4.4 Modellierung der Restriktionen

Ein weiterer relevanter Aspekt für die Planung innerbetrieblicher Transportsysteme besteht in den Restriktionen, die durch Inkompatibilitäten der Transportmittel mit bestimmten Layoutabschnitten oder Transportaufgaben entstehen.

4.4.1 Restriktionen zwischen Transportmitteln und Layout

Restriktionen zwischen den Fahrzeugen und dem Layout können u. a. bauliche, sicherheitstechnische oder leistungsbezogene Gründe haben. So können z. B. Fahrzeuge durch bestimmte Wege aufgrund ihrer Breite, Höhe oder Wendekreisdurchmesser nicht fahren. Bestimmte Bereiche können außerdem aufgrund Sicherheitsvorkehrungen eine maximal zulässige Geschwindigkeit aufweisen oder für FTF gesperrt werden. Ein Beispiel zur Erhöhung der Systemleistung ist die Vorgabe einer Fahrtrichtung für bestimmte Routen, um die Interaktionen zwischen den Fahrzeugen zu reduzieren.

Eine generische Modellierung solcher Beschränkungen erfordert eine automatische Interpretation von logischen Zusammenhängen, die vom Anwender des Planungstools definiert werden müssen, welches mit einem hohen Implementierungsaufwand verbunden ist. Aufgrund der sehr hohen Anzahl an Kanten in realen Systemen führt außerdem die Einführung boolescher Variablen zu einem enormen Aufwand und Unübersichtlichkeit bei der Dateneingabe. Im Rahmen des Forschungsprojekts PlaKAT wurden daher Restriktionen zwischen Transportmitteln und Layout fest implementiert.

4.4.2 Restriktionen zwischen Transportmitteln und Transportaufträgen

Im Gegensatz zu den Restriktionen bezüglich des Layouts werden Restriktionen zwischen Transportmitteln und Transportaufträgen explizit anhand boolescher Variablen umgesetzt. Diese stellen Inkompatibilitäten zwischen den Fahrzeugen und den

transportierten Ladeeinheiten bzw. dem Lastübergabeprozess dar. So kann sichergestellt werden, dass z. B. Behälter nicht mit Stapler transportiert werden können.

4.5 Zusammenfassung der Modellierung und Formalisierung der Eingangsdaten

Die Modellierung der Eingangsdaten bietet eine weitgehend generische Struktur, so dass eine einfache Erweiterbarkeit und Skalierbarkeit des Systems gegeben ist. Durch die Nutzung von mathematischen Verteilungen und optionalen Parametervariablen ist es möglich, Transportsysteme mit unterschiedlichen Detailtiefen abzubilden. Der flexible Umgang mit der vorhandenen Datenlage ermöglicht also den Einsatz des Planungstools sowohl für bestehende Systeme als auch für Neuplanungen.

Im Anhang A ist die Struktur des entwickelten Datenmodells mit Hilfe eines UML-Klassendiagramms dargestellt. Da die Dateneingabe in einer externen Oberfläche erfolgt, wird eine XML-Schnittstelle für den Datenaustausch mit dem Simulationsmodell verwendet. Die objektorientierte Struktur dient hierfür als Basis zur Erstellung des XML-Schemas.

5 Modellierung und Implementierung des Simulationsmodells

In diesem Kapitel wird das zentrale Element des Planungstools, das generische Simulationsmodell, vorgestellt. Hierbei wird zuerst die Modellierung der einzelnen Bausteine des Layouts sowie der Steuerungsprozesse beschrieben. Anschließend wird die Implementierung des Modells in einer ereignisdiskreten Simulationsumgebung erläutert.

5.1 Modellierung der Layoutbausteine

In diesem Abschnitt die Modellierung der für die Erstellung des Layouts benötigten Komponenten beschrieben.

5.1.1 Baustein Kreuzung

Der Baustein Kreuzung besteht aus mehreren Ein- und Ausgängen, welche durch Kurven und Wegen miteinander verbunden sind. Die Ein- und Ausgänge repräsentieren die Verbindungen zwischen dem Knoten und den Kanten. Die Geometrie einer Kurve bzw. eines Weges lässt sich dann durch die Richtung der ein- und ausfallenden Kanten sowie des definierten Radius ableiten. Abbildung 5-1 zeigt eine beispielhafte Kreuzung mit einem Eingang und der Ausgänge, welche aus einem Weg und zwei Kurven mit unterschiedlichen Radien besteht.

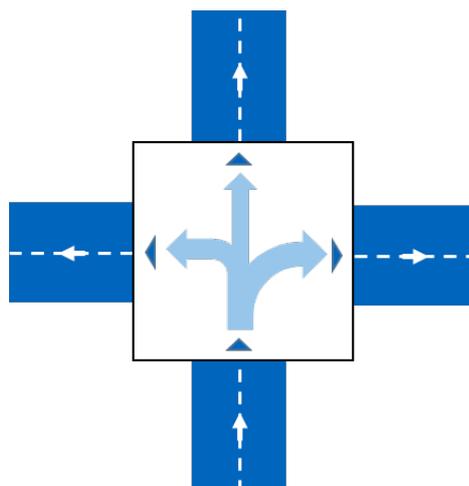


Abbildung 5-1: Modellierung einer Kreuzung im Simulationsmodell

5.1.2 Baustein Fahrzeugpool

Ein Fahrzeugpool wird als eine Haltestation mit einer unbegrenzten Kapazität modelliert, sodass theoretisch alle Fahrzeuge gleichzeitig parken können. Der Fahrzeugpool hat somit keine physikalischen Eigenschaften. Eine genauere Abbildung eines Parkplatzes kann allerdings so erfolgen, in dem mehrere Fahrzeugpools durch Kanten und Knoten verbunden werden.

5.1.3 Baustein Quelle

In Abbildung 5-2 ist die Modellierung des Bausteins Quelle im Transportsystem dargestellt. Für jede Transportrelation, die von einer Quelle transportiert werden soll, wird der entsprechende Ankunftsprozess automatisch erstellt. Dieser erzeugt auf dem Puffer Ladeeinheiten mit definierten Eigenschaften nach einer vorgegebenen mathematischen Verteilung. Die Ladeeinheiten werden dann zu einer Übergabestation befördert und können von den Transportmitteln aufgenommen werden. Handelt es sich bei einer Quelle um ein Lagersystem, so wird ein Transportauftrag beim Generieren der Ladeeinheit erzeugt. Andernfalls wird den Auftrag erst beim Verlassen des Puffers erstellt.

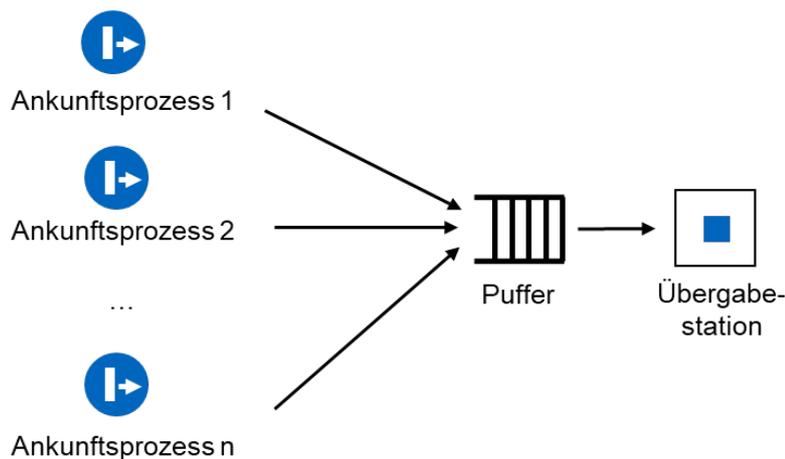


Abbildung 5-2: Modellierung des Bausteins Quelle im Simulationsmodell

5.1.4 Baustein Senke

Abbildung 5-3 zeigt die Modellierung des Bausteins Senke im Transportsystem. Dieser besteht aus einem Puffer und eine Bearbeitungsstation, die deren Bearbeitungszeit automatisch nach der mit der Ladeeinheit assoziierten mathematischen Verteilung anpasst und anschließend zu einer Senke weiter transportiert.

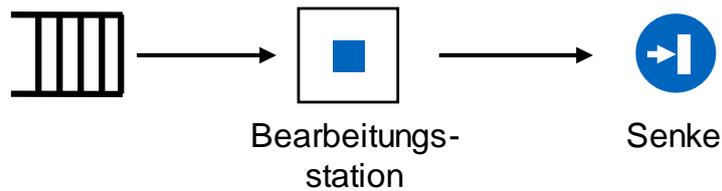


Abbildung 5-3: Modellierung des Bausteins Senke im Simulationsmodell

5.2 Modellierung der Steuerungsprozesse

Für die Auftragsvergabe wurde eine Fahrzeug-initiierte Strategie eingesetzt, wie in der Abbildung 5-4 dargestellt ist. Nach Start der Simulation werden die Aufträge den verfügbaren Fahrzeugen zugewiesen. Im zweiten Schritt werden die Routen ermittelt und gegebenenfalls optimiert. Fahrzeuge fahren dann zu einer Quelle, nehmen eine Ladeeinheit auf und geben diese wieder an einer Senke ab. Handelt es sich um einen Routenzug, so können mehrere Quellen und Senken angefahren werden. Nach der (letzten) Lastübergabe, wird den neuen Auftrag zugewiesen.

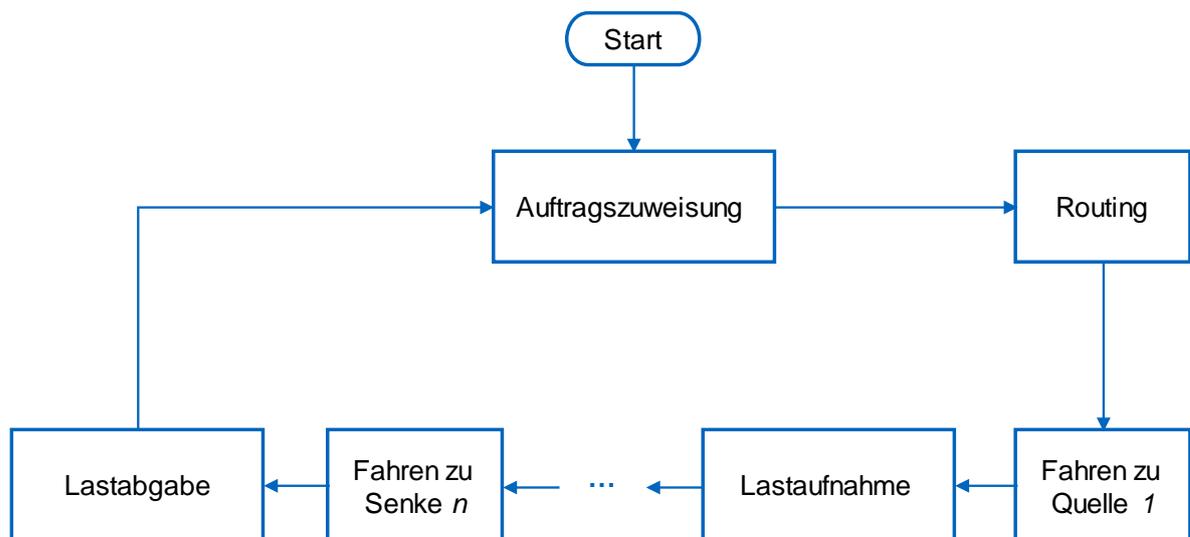


Abbildung 5-4: Auftragsinitiierte Strategie

5.2.1 Auftragszuweisung

Sind Fahraufträge nach Ende des Lastabgabevorgangs verfügbar, so werden diese dem betroffenen Fahrzeug zugewiesen. Dies erfolgt nach der Strategie First-In-First-Out, wobei die Restriktionen zwischen den Transportmitteln und den Aufträgen berücksichtigt werden. Routenzügen können mehrere Aufträge gleichzeitig zugeordnet werden. Sind keine Aufträge vorhanden, fährt das Transportmittel zu seiner definierten Warteposition. Der Auftragszuweisungsprozess ist in Abbildung 5-5 zusammengefasst.

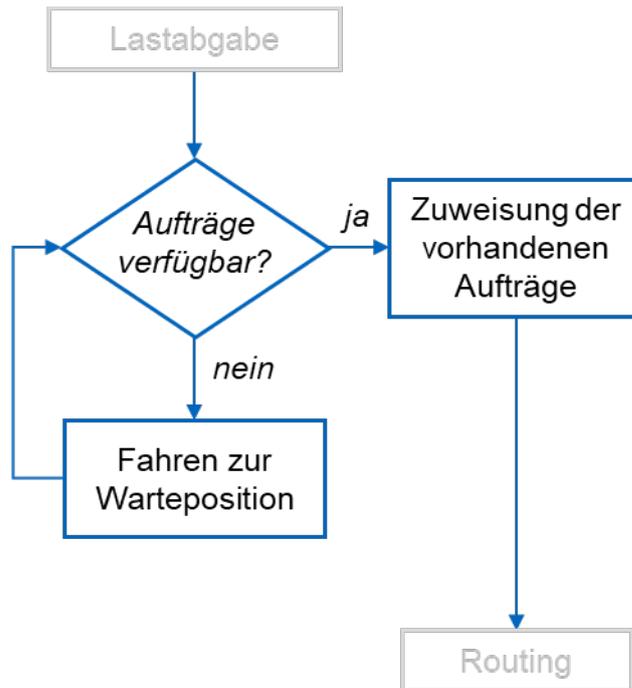


Abbildung 5-5: Zuweisung von Aufträgen

5.2.2 Routing

Aufträge werden an den Senken erzeugt und in einer nach der frühesten Startzeit geordneten Tabelle hinzugefügt. Ein Auftrag setzt sich aus einer Quelle, einer Senke und einer Ladeeinheit zusammen. Werden dem Fahrzeug mehrere Aufträge zugeordnet, so erfolgt die eine Routenoptimierung mittel des 2-opt-Algorithmus. Hierbei wird versucht, die Gesamtzeit zur Durchführung der zugewiesenen Aufträge durch Änderung der Reihenfolge der anzufahrenden Quellen und Senken zu minimieren. Für jeden Teilauftrag muss die Quelle vor der Senke angefahren werden.



Abbildung 5-6: Routingalgorithmus

5.2.3 Lastübergabe

Lastaufnahme

Quellen und Senken werden von den Fahrzeugen über Sensoren, die auf den Wegen positioniert sind, erkannt. Entspricht die nächste anzufahrende Haltestelle des Fahrzeugs einer detektierten Quelle, so erfolgt das Lasttransfer. Für den Fall eines Routenzugs können mehrere Lastübergaben nacheinander stattfinden.

Lastabgabe

Wird die Zielquelle detektiert, so wird zuerst geprüft, ob ein freier Pufferplatz vorhanden ist, bevor die Last auf den Übergabepplatz abgegeben wird. Handelt es sich um die letzte Senke des Auftrages, so wird dem Fahrzeug ein neuer Auftrag zugewiesen. Ansonsten wird die nächste Übergabestation angefahren.

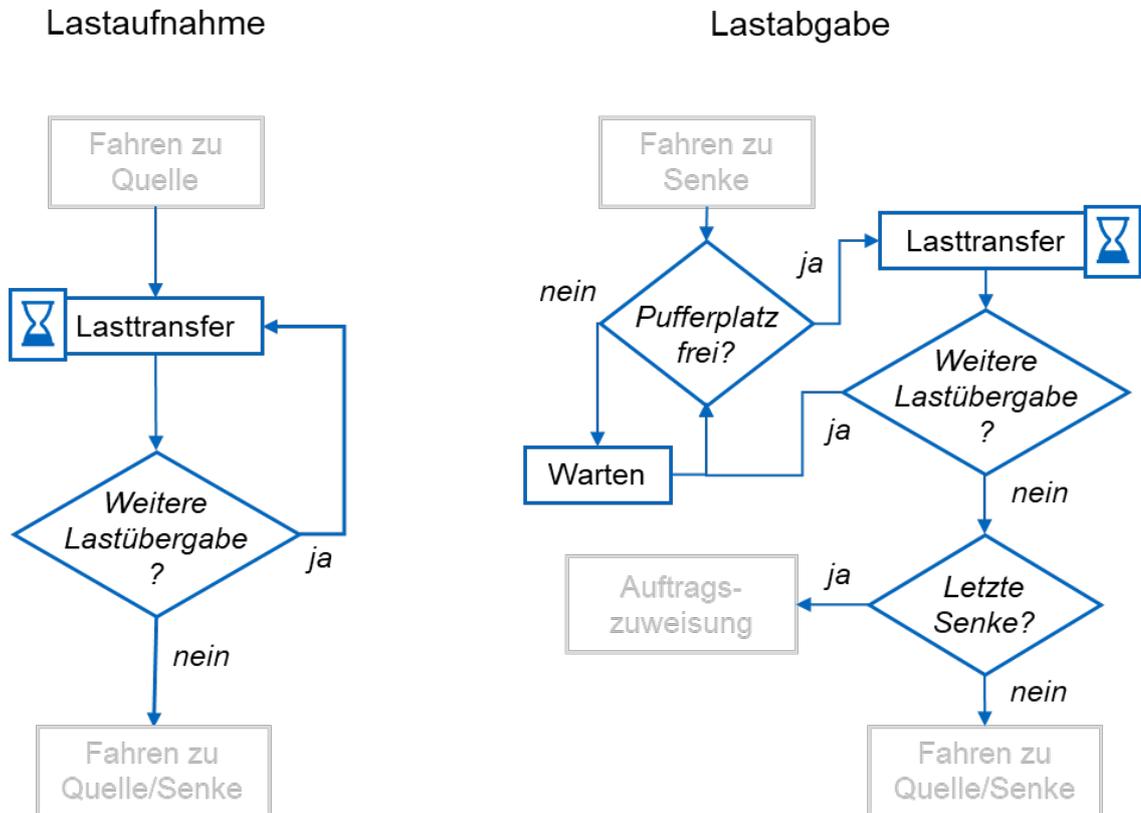


Abbildung 5-7: Lastaufnahme- und Abgabeprozesse

5.3 Implementierung des Simulationsmodells

Das Simulationsmodell wurde in der ereignisdiskreten Simulationssoftware Tecnomatrix Plant Simulation implementiert. Das Modell besteht aus vier Modulen, welche die Leistungsanalyse des Transportsystems ermöglichen.

5.3.1 Datenmanagement

Die Eingangsdaten werden in einer externen Oberfläche eingegeben, welche über eine XML-Schnittstelle mit dem Simulationsmodell kommuniziert. Das Modul Datenmanagement dient daher dazu, die Daten aus XML-Dateien zu laden und so aufzubereiten, dass diese im Simulationsmodell verwendet werden können.

5.3.2 Layout

Dieses Modul beschäftigt sich mit der automatischen Erstellung des Layouts. Dies setzt sich aus den folgenden Schritten zusammen:

- Erstellung und Positionierung der Wege
- Erstellung und Positionierung der Knoten
- Verbindung des Netzwerkes
- Erstellung der Sensoren zur Erkennung von Haltestellen

5.3.3 Steuerung

In diesem Modul werden alle Methoden und Funktionen, die für die Steuerung des Transportsystems benötigt werden, zusammengefasst. Dazu zählen die Auftragsvergabe- und Routingstrategien, die Algorithmen des Pausen- und Störungsmanagements sowie die operative Steuerung der Fahrzeuge.

5.3.4 Statistik

Im Modul Statistik können unterschiedliche Leistungskennzahlen beobachtet werden. Dadurch lassen sich Engstellen identifizieren und somit Optimierungspotentiale ableiten.

Durchsatz

Durchsatzwerte stellen entscheidende Kennzahlen für die Analyse der Leistung des Transportsystems dar. Beim entwickelten Planungsvorgehen dienen diese außerdem als Referenzgröße für die Bewertung der Leistung. Im Simulationsmodell werden für alle Transportrelationen (engl. commodity) die Durchsatzwerte in Ladeeinheit pro Stunde auf der vertikale Achse in Abhängigkeit der Simulationszeit dargestellt (siehe Abbildung 5-8). Damit kann u. a. die Einschwingphase der Simulation ermittelt werden.

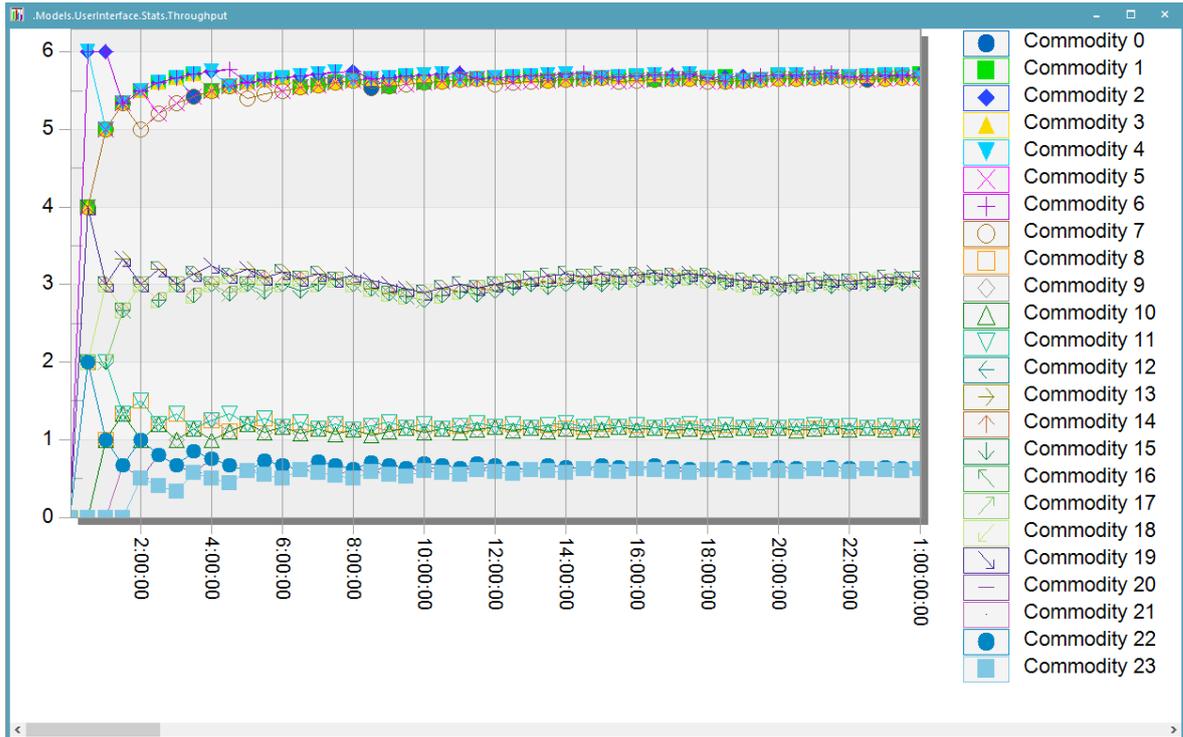


Abbildung 5-8: Durchsatzwerte für die definierten Transportrelationen

Durchlauf- und Prozesszeiten

Abbildung 5-9 zeigt, wie die Durchlauf- und Prozesszeiten für die jeweiligen Transportrelationen im Statistikmodul dargestellt werden.

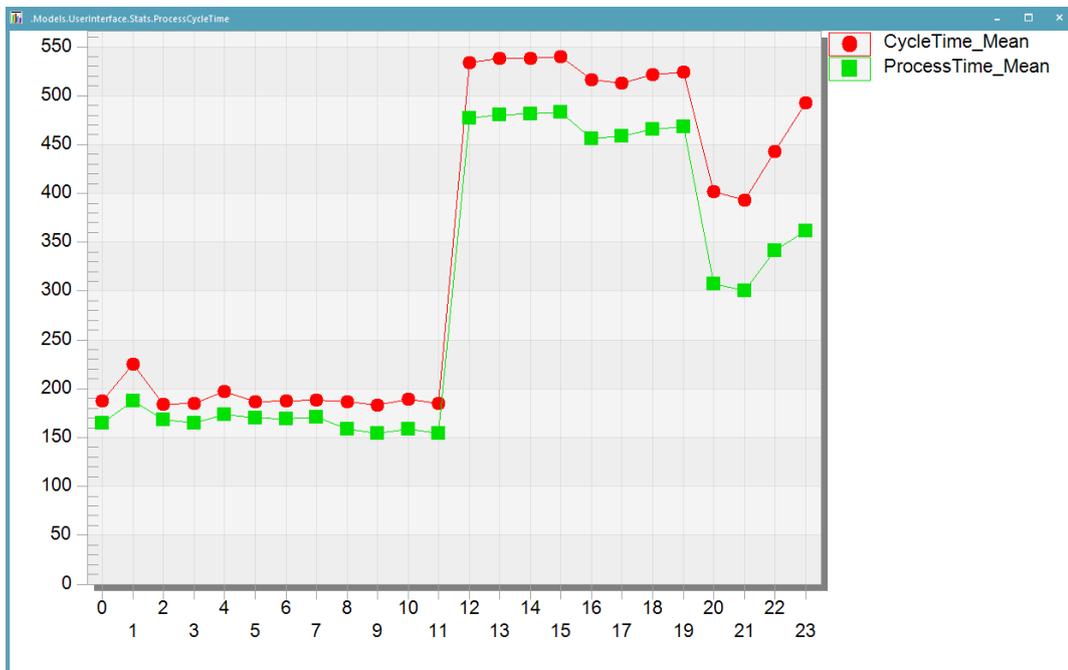


Abbildung 5-9: Durchlauf- und Prozesszeiten für die definierten Transportrelationen

Fahrzeugauslastung

Eine weitere wichtige Kennzahl zur Analyse der Systemleistung ist die Auslastung der Fahrzeuge. Diese wird nach den Zuständen der Fahrzeuge in vier Kategorien eingeteilt: Fahrend, Lastübergabe, Wartend und Blockiert (siehe Abbildung 5-10).

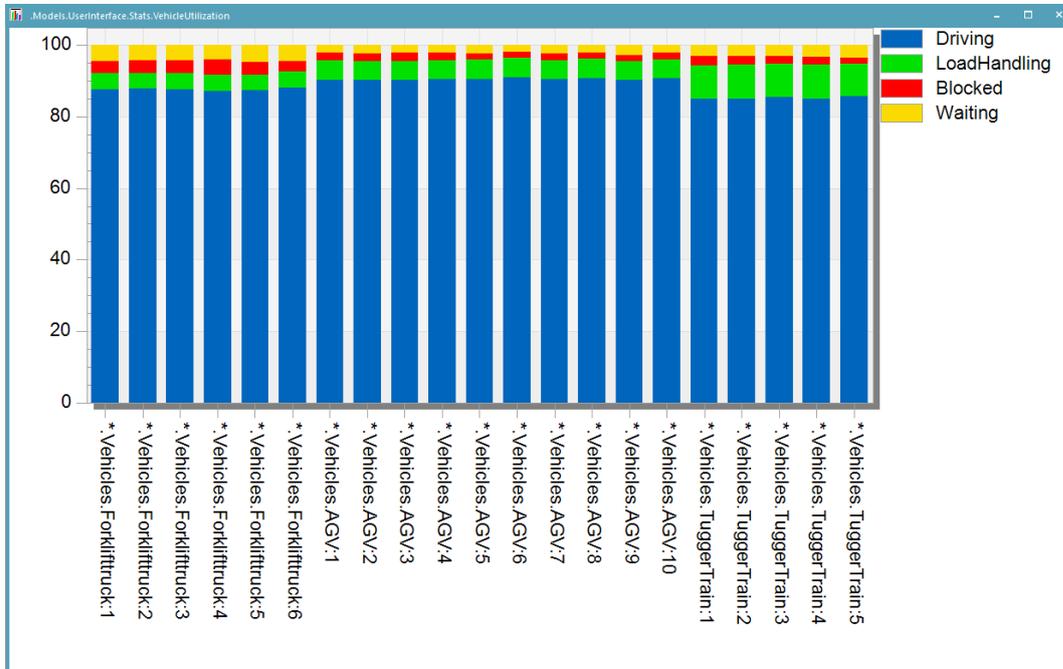


Abbildung 5-10: Zeitanteile der möglichen Zustände der Fahrzeuge

Pufferbelegung

Die Pufferdimensionierung spielt eine wichtige Rolle bei der Planung innerbetrieblicher Transportsysteme, da Pufferkapazitäten die Leistung des Systems erheblich beeinflussen können. Daher werden ebenso die Pufferbelegungen der Quellen und Senken im Modul Statistik aufgeführt. Hierbei werden die Wahrscheinlichkeiten der möglichen Pufferzustände abgebildet, wie der Abbildung 5-11 zu entnehmen ist.

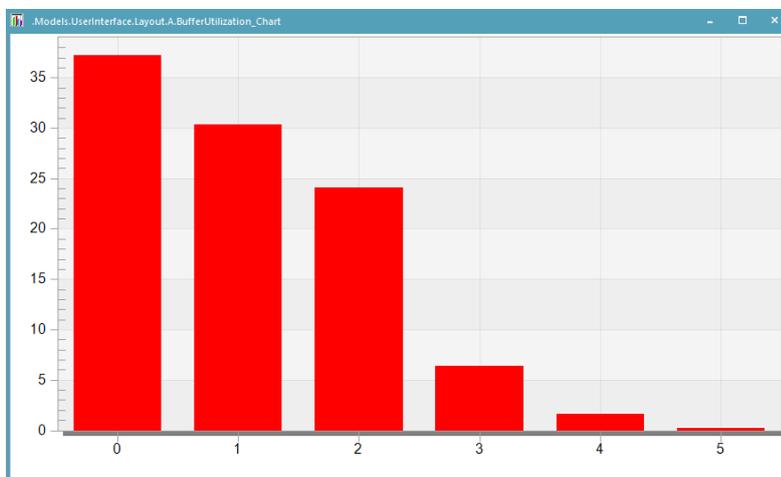


Abbildung 5-11: Wahrscheinlichkeit der möglichen Pufferbelegungszustände

Heat-Map

Ein weiterer Aspekt bei der Planung des Transportsystems besteht in der Gestaltung des Layouts. Hierzu steht daher eine Heat-Map zur Verfügung. Durch eine Farbkodierung lassen sich ausgelastete Layoutabschnitte identifizieren und daraus geeignete Optimierungsmaßnahmen ableiten.

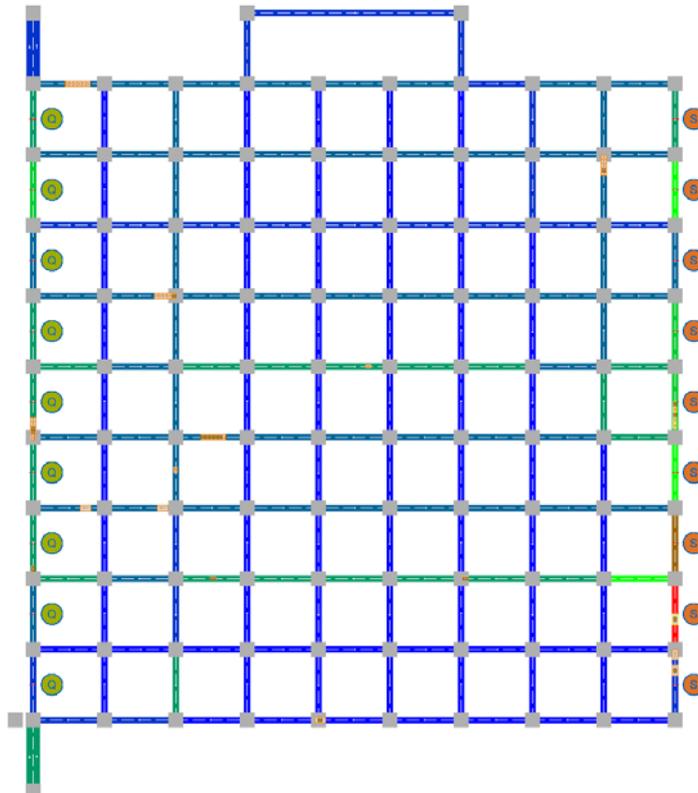


Abbildung 5-12: Heat-Map zur Darstellung der Auslastung einzelner Wegabschnitte

5.4 Validierung des Simulationsmodells

Jeder der beschriebenen Aspekte des Simulationsmodells wurde mit Hilfe von Tests unter extremen Bedingungen und Sensitivitätsanalysen validiert. Die Simulationsumgebung ermöglicht außerdem die Visualisierung aller relevanten Interaktionen, sodass eine erhöhte Zuverlässigkeit des Modells sichergestellt ist. Im Rahmen von mehreren Expertengesprächen im Laufe der Projektlaufzeit konnten erfahrene Simulationsexperten das Modell verifizieren und validieren. Nicht zuletzt erfolgte im Laufe der demonstratorischen Umsetzung des Planungstools ein Vergleich der Ergebnisse dieses Modells mit den Ergebnissen aus einem von einem Partnerunternehmen entwickelten Simulationsmodell.

6 Implementierung eines Softwaredemonstrators zur Planung innerbetrieblicher Transportsysteme

In diesem Kapitel wird die demonstratorische Umsetzung des simulationsbasierten Planungsvorgehens beschrieben.

6.1 Aufbau des Demonstrators

Das im letzten Kapitel beschriebene Simulationsmodell wurde in eine graphische Oberfläche integriert, welche die Anwender durch die einzelnen Schritte des Planungsvorgehens führt. Die Implementierung wurde in der Entwicklungsumgebung Microsoft Visual Studio mit der objektorientierte Programmiersprache C# durchgeführt.

Wie in Kapitel 3 erklärt, erfordert die Methode zur Bestimmung der Flottengröße, vor allem bei größeren Netzwerken mit mehreren Fahrzeugarten, einen hohen Rechenaufwand. Diese wurde daher ebenso in C# umgesetzt. Im Vergleich zur eigenen Programmiersprache von Tecnomatix Plant Simulation bzw. zu MS-Excel-VBA bietet C# die Möglichkeit, komplexe und aufwändige Berechnungsabläufe zu parallelisieren und somit die Rechenzeit deutlich zu reduzieren. Zur einfachen Erweiterbarkeit des Modells nutzt außerdem das darunterliegende Programm eine objektorientierte Struktur, welche der in Kapitel 4 vorgestellten Datenmodellierung entspricht.

Die Auslagerung der Benutzeroberfläche sowie des analytischen Berechnungsmodells in eine externe Softwareumgebung bedingt die Kommunikation zwischen den beiden Programmen, um Daten bzw. Anweisungen auszutauschen. Hierzu stellt Plant Simulation mehrere Möglichkeiten wie z. B. die Socket-, die OPCUA- oder die Datenbank-schnittstelle zur Auswahl. Für die Übertragung der Eingangsdaten sowie der berechneten Routen nutzt der Demonstrator die XML-Schnittstelle. Hierbei werden die Eingangsdaten in einem XML-Schema gespeichert und anschließend aus der Plant-Simulation-Umgebung geladen. Auf diese Weise erfolgt ebenso die Speicher- und Ladefunktion des Planungstools. Um die Berechnung zu starten bzw. Informationen während der Berechnungslaufzeit zu kommunizieren, wird die sogenannte COM-Schnittstelle verwendet. Durch die hierfür integrierten Methoden und Funktionen in Plant Simulation lässt sich die Berechnung mit einem geringen Aufwand automatisieren. Der Aufbau des entwickelten Softwaredemonstrators ist in Abbildung 6-1 zusammengefasst.

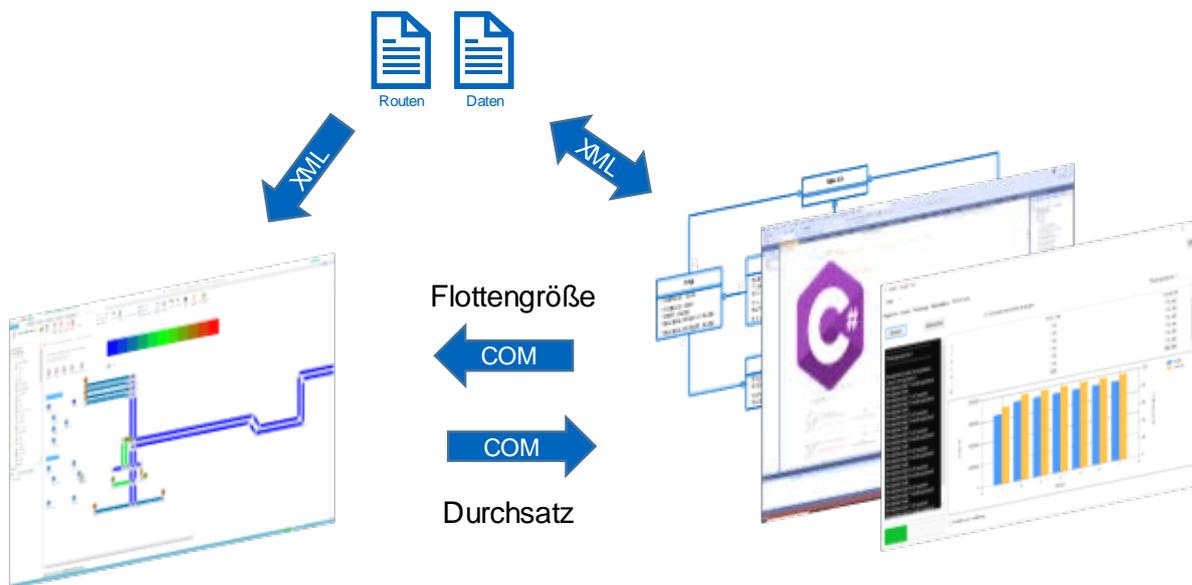


Abbildung 6-1: Aufbau des Softwaredemonstrators

6.2 Benutzeroberfläche zur Dateneingabe

In diesem Abschnitt wird die Benutzeroberfläche vorgestellt, welche den Planer durch die einzelnen Schritte des Planungsvorgehens führt. Diese besteht aus fünf Reiter, die im Folgenden näher erläutert werden.

6.2.1 Reiter „Allgemeine Daten“

Dieser Reiter umfasst allgemeine Parameter, die für die Anwendung des Vorgehens benötigt werden. Darunter fallen die zusätzlichen Investitionen für den Einsatz der unterschiedlichen Transportmitteltypen, die Berechnungs- bzw. Simulationsparameter, wie z. B. die Dauer der Simulation und der Anzahl der unterschiedlichen Lösungsalternativen, sowie den Standardkurvenradius im Layout (siehe Abbildung 6-2). Unter „Datei“ können Dateien gespeichert und geladen werden, um die Wiederverwendung der Daten zu Erleichtern. Durch Klicken der Schaltfläche „?“ werden alle Informationen zu den Lizenzen der angewendeten Bibliotheken angezeigt. Die Anzeigetaste (oben rechts) dient zur Visualisierung des Layouts sowie des Transportaufkommens, welches die Dateneingabe deutlich erleichtert.

Abbildung 6-2: Registerkarte „Allgemeine Daten“

6.2.2 Reiter „Layout“

Der Reiter „Layout“ besteht aus drei Registerkarten und umfasst alle Daten, die zur Definition des Layouts erforderlich sind.

In der Registerkarte „Knoten“ (siehe Abbildung 6-3) werden durch Klicken der entsprechenden Tasten Knoten hinzugefügt bzw. gelöscht. Hierbei werden der Name, die X- und Y-Koordinaten des Knotens sowie der Knotentyp definiert. Beim Knotentyp stehen zwei Möglichkeiten zur Auswahl: Fahrzeugpool und Knoten (vgl. Kreuzung).

Name	X-Koordinaten [m]	Y-Koordinaten [m]	Knotentyp
K0E	0,00	0,00	Knoten
K01	14,40	0,00	Knoten
K02	16,00	0,00	Knoten
K0F	27,20	0,00	Knoten
K0A	7,20	6,00	Knoten
K05	14,40	6,00	Knoten
K06	16,00	6,00	Knoten
K0B	18,50	6,65	Knoten
K07	18,50	10,00	Knoten
K08	14,40	10,00	Knoten
K09	16,00	10,00	Knoten
K10	12,50	10,00	Knoten
K11	11,00	10,00	Knoten
K16	16,00	15,00	Knoten
K17	14,40	15,00	Knoten
K18	16,00	16,60	Knoten
K19	14,40	16,60	Knoten
K20	14,40	28,75	Knoten
K21	16,00	28,75	Knoten
K22	14,40	30,15	Knoten
K23	16,00	30,15	Knoten

Abbildung 6-3: Registerkarte „Knoten“

6 Implementierung eines Softwaredemonstrators zur Planung innerbetrieblicher Transportsysteme

Abbildung 6-4 zeigt die Registerkarte „Kanten“, anhand derer die Kanten durch einen Doppelklick der entsprechenden Zellen erstellt werden. Diese werden dann in Weiß hinterlegt. Mit Hilfe der Auswahlbox werden die verschiedenen Eigenschaften der Kanten angezeigt und können anschließend geändert werden. Die Schaltfläche „Defaultwerte“ dient zur Definition von Standardwerten für alle Knoten.

	K0E	K01	K02	K0F	K0A	K05	K06	K0B	K07	K08	K09
K0E	-1,00	14,40	-1,00	-1,00	-1,00	-1,00	-1,00	-1,00	-1,00	-1,00	-1,00
K01	14,40	-1,00	1,60	-1,00	-1,00	-1,00	-1,00	-1,00	-1,00	-1,00	-1,00
K02	-1,00	1,60	-1,00	11,20	-1,00	-1,00	6,00	-1,00	-1,00	-1,00	-1,00
K0F	-1,00	-1,00	11,20	-1,00	-1,00	-1,00	-1,00	-1,00	-1,00	-1,00	-1,00
K0A	-1,00	-1,00	-1,00	-1,00	-1,00	7,20	-1,00	-1,00	-1,00	-1,00	-1,00
K05	-1,00	6,00	-1,00	-1,00	7,20	-1,00	1,60	-1,00	-1,00	-1,00	-1,00
K06	-1,00	-1,00	-1,00	-1,00	-1,00	-1,00	-1,00	-1,00	-1,00	-1,00	4,00
K0B	-1,00	-1,00	-1,00	-1,00	-1,00	-1,00	-1,00	-1,00	3,35	-1,00	-1,00
K07	-1,00	-1,00	-1,00	-1,00	-1,00	-1,00	-1,00	3,35	-1,00	-1,00	2,50
K08	-1,00	-1,00	-1,00	-1,00	-1,00	4,00	-1,00	-1,00	-1,00	-1,00	1,60
K09	-1,00	-1,00	-1,00	-1,00	-1,00	-1,00	-1,00	-1,00	2,50	1,60	-1,00
K10	-1,00	-1,00	-1,00	-1,00	-1,00	-1,00	-1,00	-1,00	-1,00	1,90	-1,00
K11	-1,00	-1,00	-1,00	-1,00	-1,00	-1,00	-1,00	-1,00	-1,00	-1,00	-1,00
K16	-1,00	-1,00	-1,00	-1,00	-1,00	-1,00	-1,00	-1,00	-1,00	-1,00	-1,00
K17	-1,00	-1,00	-1,00	-1,00	-1,00	-1,00	-1,00	-1,00	-1,00	5,00	-1,00
K18	-1,00	-1,00	-1,00	-1,00	-1,00	-1,00	-1,00	-1,00	-1,00	-1,00	-1,00
K19	-1,00	-1,00	-1,00	-1,00	-1,00	-1,00	-1,00	-1,00	-1,00	-1,00	-1,00
K20	-1,00	-1,00	-1,00	-1,00	-1,00	-1,00	-1,00	-1,00	-1,00	-1,00	-1,00
K21	-1,00	-1,00	-1,00	-1,00	-1,00	-1,00	-1,00	-1,00	-1,00	-1,00	-1,00
K22	-1,00	-1,00	-1,00	-1,00	-1,00	-1,00	-1,00	-1,00	-1,00	-1,00	-1,00
K23	-1,00	-1,00	-1,00	-1,00	-1,00	-1,00	-1,00	-1,00	-1,00	-1,00	-1,00
K24	-1,00	-1,00	-1,00	-1,00	-1,00	-1,00	-1,00	-1,00	-1,00	-1,00	-1,00

Abbildung 6-4: Registerkarte „Kanten“

Mit Hilfe der Tabelle in der Registerkarte „Kurven“ (siehe Abbildung 6-5) können ausgewählte Kurven in einer Kreuzung gesperrt bzw. entsprechende Radien angepasst werden. Kreuzungen werden über das Aufklappmenü ausgewählt, wodurch diese auch automatisch auf der rechten Seite der Tabelle schematisch dargestellt werden.

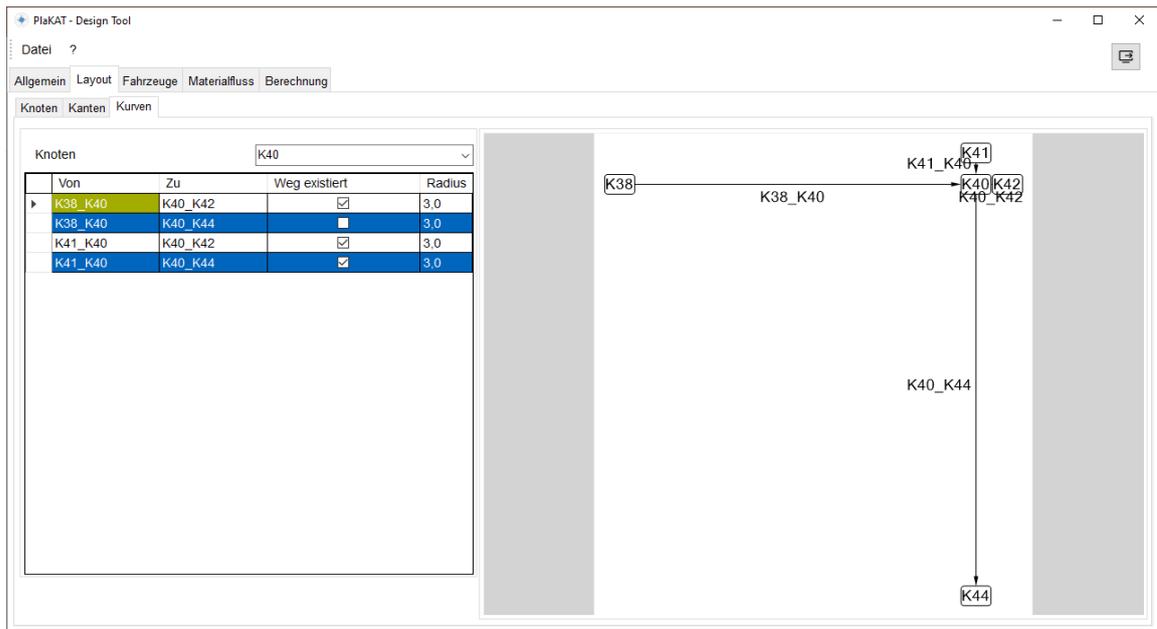


Abbildung 6-5: Registerkarte „Kurven“

6.2.3 Reiter „Fahrzeuge“

Abbildung 6-6 zeigt den Reiter „Fahrzeuge“, in dem die zu berücksichtigenden Fahrzeuge und deren Eigenschaften definiert werden.

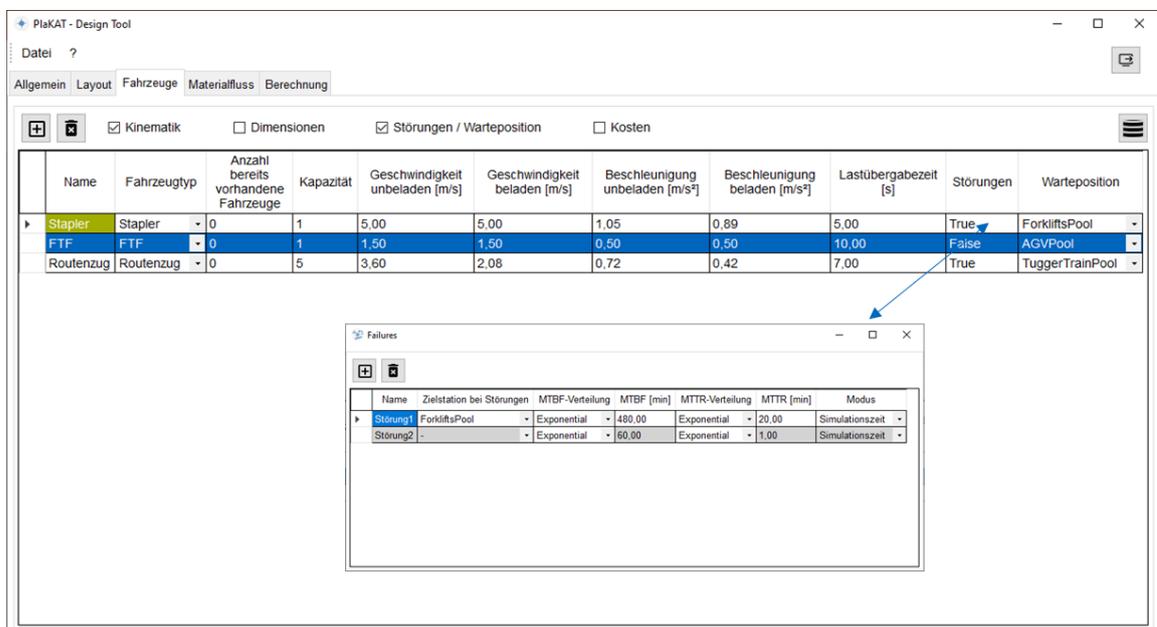


Abbildung 6-6: Reiter „Fahrzeuge“

Hierbei sollen in erster Linie der Name, der Typ, die Kapazität sowie, falls es sich um eine Erweiterung eines bestehenden Systems handelt, die Anzahl der bereits vorhandenen Fahrzeuge angegeben werden. Diese werden dementsprechend bei der Berechnung der Kosten der Lösungsalternative nicht berücksichtigt. Für eine bessere

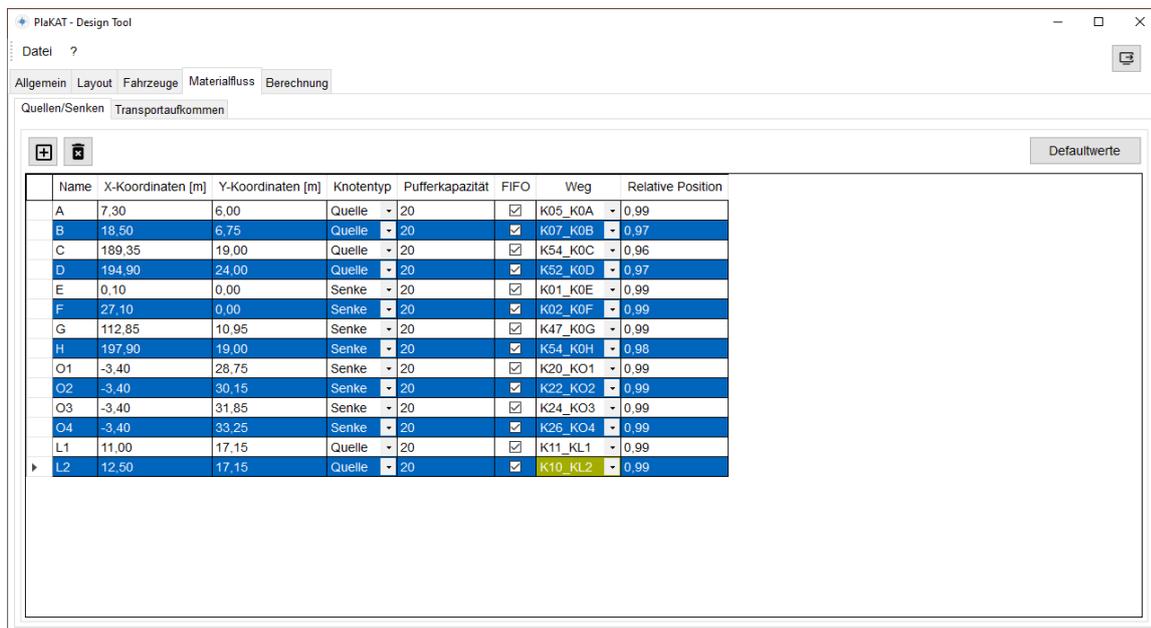
6 Implementierung eines Softwaredemonstrators zur Planung innerbetrieblicher Transportsysteme

Übersichtlichkeit bei der Dateneingabe wurden Auswahlkästchen integriert, anhand denen bestimmte Eigenschaften ein- und ausgeblendet werden können. Durch Doppelklick der entsprechenden Zelle erscheint ein Formular, in dem Fahrzeugstörungen und Pausen definiert werden können.

6.2.4 Reiter „Materialfluss“

Der Reiter „Materialfluss“ setzt sich aus den Registerkarten „Quelle/Senke“ und „Transportaufkommen“ zusammen.

In der ersten Registerkarte des Reiters „Materialfluss“ (siehe Abbildung 6-7) werden Quellen und Senken definiert. Durch Eingabe der X- und Y-Koordinaten werden automatisch die Wege identifiziert, auf welche die jeweiligen Sensoren im Simulationsmodell gesetzt werden sollen sowie die relative Position dieser Sensoren auf den Wegen berechnet. Für den Fall eines bidirektionalen Weges kann zusätzlich die Fahrtrichtung, bei der den Sensor erkannt wird, ausgewählt werden. Pufferkapazitäten und FIFO-Strategien (bei den Quellen) sind außerdem einzugeben.



Name	X-Koordinaten [m]	Y-Koordinaten [m]	Knotentyp	Pufferkapazität	FIFO	Weg	Relative Position
A	7,30	6,00	Quelle	20	<input checked="" type="checkbox"/>	K05_K0A	0,99
B	18,50	6,75	Quelle	20	<input checked="" type="checkbox"/>	K07_K0B	0,97
C	189,35	19,00	Quelle	20	<input checked="" type="checkbox"/>	K54_K0C	0,96
D	194,90	24,00	Quelle	20	<input checked="" type="checkbox"/>	K52_K0D	0,97
E	0,10	0,00	Senke	20	<input checked="" type="checkbox"/>	K01_K0E	0,99
F	27,10	0,00	Senke	20	<input checked="" type="checkbox"/>	K02_K0F	0,99
G	112,85	10,95	Senke	20	<input checked="" type="checkbox"/>	K47_K0G	0,99
H	197,90	19,00	Senke	20	<input checked="" type="checkbox"/>	K54_K0H	0,98
O1	-3,40	28,75	Senke	20	<input checked="" type="checkbox"/>	K20_KO1	0,99
O2	-3,40	30,15	Senke	20	<input checked="" type="checkbox"/>	K22_KO2	0,99
O3	-3,40	31,85	Senke	20	<input checked="" type="checkbox"/>	K24_KO3	0,99
O4	-3,40	33,25	Senke	20	<input checked="" type="checkbox"/>	K26_KO4	0,99
L1	11,00	17,15	Quelle	20	<input checked="" type="checkbox"/>	K11_KL1	0,99
L2	12,50	17,15	Quelle	20	<input checked="" type="checkbox"/>	K10_KL2	0,99

Abbildung 6-7: Registerkarte „Quellen/Senken“

Wie in Abbildung 6-8 zu sehen ist, werden in der Registerkarte „Transportaufkommen“ die einzelnen Transportrelationen festgelegt. Nach Auswahl des Ladehilfsmittels, der Quelle und der Senke sollen die Ankunfts- und Bearbeitungsprozesse bestimmt werden. Durch Deaktivieren der Auswahlkästchen können Restriktionen zwischen den Transportrelationen und den Transportmitteltypen umgesetzt werden.

ID	Ladehilfsmittel	Quelle	Senke	Ankunftszeitverteilung	Ankunftsrate [LE/h]	Bearbeitungszeitverteilung	Bearbeitungsrate [LE/h]	Mit Stapler mög.	mit FTF mög.	mit Routenzug mög.
0	Palette	A	O1	Konstant	5,70	Exponential	50,00	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
1	Palette	A	O2	Konstant	5,70	Exponential	50,00	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
2	Palette	A	O3	Konstant	5,70	Exponential	50,00	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
3	Palette	A	O4	Konstant	5,70	Konstant	50,00	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
4	Palette	B	O1	Konstant	5,70	Konstant	50,00	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
5	Palette	B	O2	Konstant	5,70	Konstant	50,00	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
6	Palette	B	O3	Konstant	5,70	Konstant	50,00	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
7	Palette	B	O4	Konstant	5,70	Konstant	50,00	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
8	Palette	L1	E	Konstant	1,15	Konstant	50,00	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
9	Palette	L2	E	Konstant	1,15	Konstant	50,00	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
10	Palette	L1	F	Konstant	1,15	Konstant	50,00	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
11	Palette	L2	F	Konstant	1,15	Konstant	50,00	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
12	Palette	C	O1	Konstant	3,13	Konstant	50,00	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
13	Palette	C	O2	Konstant	3,13	Konstant	50,00	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
14	Palette	C	O3	Konstant	3,13	Konstant	50,00	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
15	Palette	C	O4	Konstant	3,13	Konstant	50,00	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
16	Palette	D	O1	Konstant	3,13	Konstant	50,00	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
17	Palette	D	O2	Konstant	3,13	Konstant	50,00	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
18	Palette	D	O3	Konstant	3,13	Konstant	50,00	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
19	Palette	D	O4	Konstant	3,13	Konstant	50,00	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
20	Palette	L1	G	Konstant	0,63	Konstant	50,00	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>

Abbildung 6-8 Registerkarte „Transportaufkommen“

6.2.5 Reiter „Berechnung“

Nachdem das Transportsystem und die Berechnungsparameter festgelegt wurden, kann die Berechnung gestartet werden (siehe Abbildung 6-9).



Abbildung 6-9: Reiter „Berechnung“

Durch die Auswahlbox können die Anwender zwischen den generierten Planungsvarianten wechseln und die jeweiligen Ergebnisse beobachten. In der Tabelle werden für jede Iteration des zweistufigen Vorgehens die Flottenzusammensetzung und die damit

6 Implementierung eines Softwaredemonstrators zur Planung innerbetrieblicher Transportsysteme

verbundenen Kosten zusammengefasst. Im Laufe der Berechnung können außerdem die Simulationsmodelle durch Aktivieren des entsprechenden Auswahlkästchens angezeigt werden. Zu jedem Zeitpunkt können die Berechnungen abgebrochen werden.

Wird die geforderte Leistung bei einer Lösungsalternative erreicht, so wird das entsprechende Modell unter dem im Reiter „Allgemeine Daten“ definierten Pfad gespeichert und anschließend geschlossen.

6.3 Validierung des simulationsbasierten Planungsvorgehens durch Anwendung in Beispielszenarien

Im zweiten Schritt sollen Potentiale aufgezeigt werden, welche durch Berücksichtigung von Mischformen entstehen können.

6.3.1 Fallbeispiel 1: Fahrerloses Transportsystem

In Fallbeispiel 1 werden 78 Ladeeinheiten pro Stunde aus einem zweispurigen Blocklager und vier Fördertechnikelementen zu einem vierspurigen Lager und ebenso vier Fördertechnikelementen mit Hilfe von FTF transportiert.

Im ersten Experiment wird ein Vergleich zwischen der mit dem entwickelten Tool berechneten und der von den Planern erstellten Lösungsvarianten durchgeführt. Es wurden eine Simulationszeit von 200 Stunden und ein Toleranzbereich von 2 % definiert. In Abbildung 6-10 sind die Ergebnisse dargestellt.

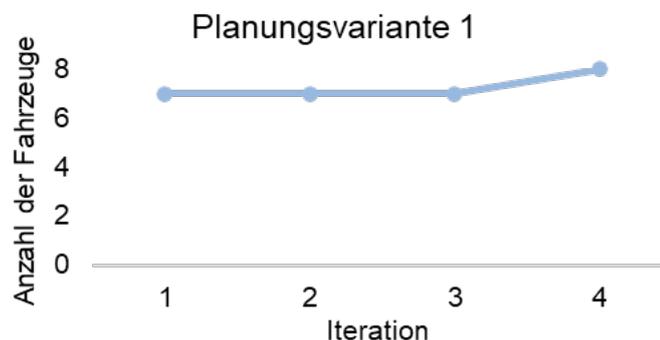


Abbildung 6-10: Fallbeispiel 1- Entwicklung der Anzahl der Fahrzeuge im Laufe der Berechnungsiterationen für Planungsvariante 1 im Experiment 1

Nach vier Iterationen konvergiert das Planungsvorgehen und liefert eine Flotte von 8 FTF, welches im Vergleich mit der Lösung der Planer mit 10 FTF deutlich niedriger ist. Mehrere Gründe können diesen Unterschied erklären, wie z. B.:

- Überschätzung des Steuerungsfaktors bei dem analytischen Berechnungsmodell
- Unbekannte Annahmen bei der analytischen Berechnung
- Ineffiziente Steuerungsstrategien im Simulationsmodell

6.3.2 Fallbeispiel 2: Routenzugsystem

Im Fallbeispiel 2 transportieren Routenzüge mit einer Kapazität von 30 Ladeeinheiten insgesamt 76 Ladeeinheiten pro Stunde von einem zentralen Depot zu 41 verschiedenen Senken. Ähnlich wie im Projekt PlaKAT greifen die Logistikplaner auf ein Simulationsmodell für die Dimensionierung des Systems zurück.

Im ersten Experiment werden nur Routenzüge berücksichtigt. Hierbei beträgt die Simulationszeit 200 Stunden pro Iteration. Sowohl das entwickelte Planungstool als auch das Simulationsmodell des Partnerunternehmens liefern die gleiche Konfiguration für das Routenzugsystem mit drei Fahrzeugen. Das Planungsvorgehen konvergierte hierbei schon ab der ersten Iteration.

Im zweiten Experiment wurden zusätzlich Stapler und FTF berücksichtigt. Die Anzahl an Planungsalternativen wurde außerdem auf drei festgelegt. Die Ergebnisse sind in Abbildung 6-12 zu sehen.

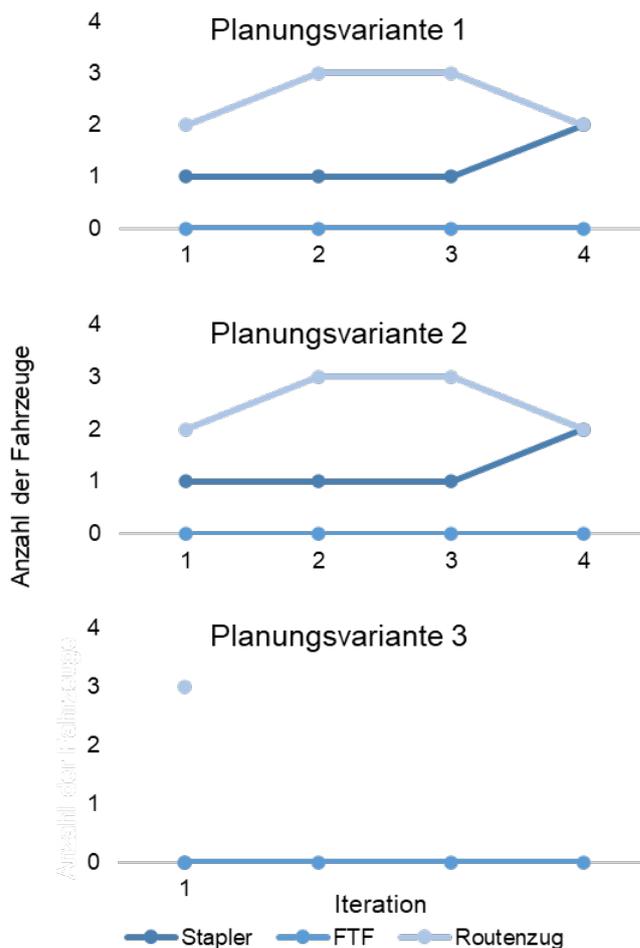


Abbildung 6-11: Fallbeispiel 2- Entwicklung der Anzahl der Fahrzeuge im Laufe der Berechnungsiterationen für Planungsvarianten 1-3 im Experiment 2

Die Lösungsalternativen 1 und 2 weisen eine identische Entwicklung der Fahrzeuganzahl im Laufe der Iterationen auf. Sie setzen sich aus zwei Routenzügen und zwei Staplern zusammen. Lösungsalternative 3 liefert die gleiche Konfiguration wie im ersten Experiment und ist gegenüber Alternative 1 und 2 günstiger.

6.3.3 Fallbeispiel 3: Heterogenes Transportsystem

Im Fallbeispiel 3 wird gezeigt, wie das entwickelte Planungsvorgehen auf ein hochkomplexes System angewendet werden kann. Es handelt es sich hierbei um ein Transportsystem, welches eine Kombination aus den drei in diesem Projekt betrachteten Transportmitteln nutzt. 95 unterschiedliche Transportbeziehungen mit insgesamt 380 Ladeeinheiten pro Stunde sollen zwischen 22 Quellen und 13 Senken transportiert werden. Das Layout besteht aus mehr als 100 Kreuzungen, die in einer rechteckigen Gitterstruktur angeordnet sind.

Für die Berechnung wurden drei unterschiedliche Planungsvarianten generiert. Die Simulationszeit pro Iteration beträgt hierbei 200 Stunden. Die Berechnungsergebnisse sind in der Abbildung 6-13 dargestellt.

Auch durch Erhöhung der Anzahl der Fahrzeuge wird die geforderte Leistung des Systems nicht erreicht. Dem liegt zu Grunde, dass bei bestimmten Transportrelationen nur sehr wenige Transporte stattfinden, so dass diese auch nach 200 Stunden noch starke Schwankungen zeigen. Beobachtet man die Leistung des Systems im Laufe der Iterationen, so lässt sich feststellen, dass die mittlere Leistung des Systems schon ab der zweiten bzw. dritten Iteration deutlich über dem Toleranzbereich liegt. Aus diesem Grund sollten weitere Anstrengungen unternommen werden, sodass die Konvergenz des Vorgehens sichergestellt werden kann.

6 Implementierung eines Softwaredemonstrators zur Planung innerbetrieblicher Transportsysteme

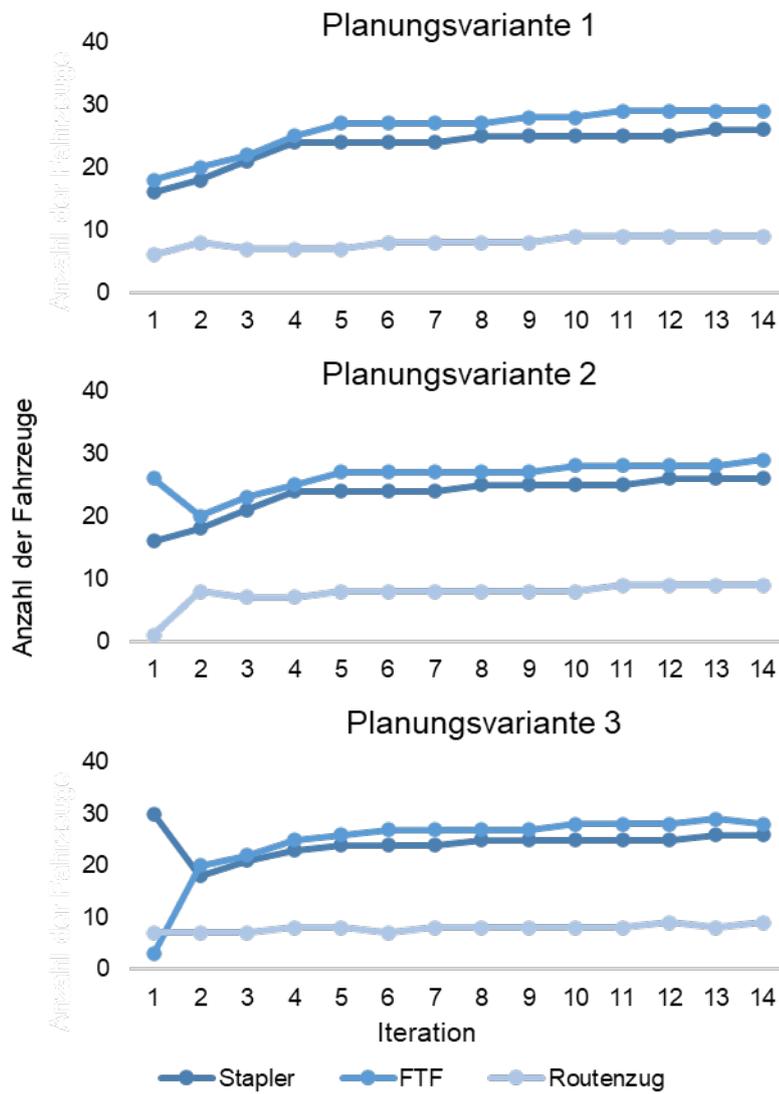


Abbildung 6-12: Fallbeispiel 3- Entwicklung der Anzahl der Fahrzeuge im Laufe der Berechnungsiterationen für Planungsvarianten 1-3

7 Zusammenfassung der Forschungsergebnisse und Ausblick

In diesem Kapitel werden die wichtigsten Forschungsergebnisse zusammengefasst und ein Ausblick auf zukünftigen Forschungsbedarf gegeben.

7.1 Zusammenfassung

Das Ziel des Forschungsprojektes PlaKAT bestand darin, einen ganzheitlichen Ansatz für die vergleichende Dimensionierung und Bewertung der Transportsysteme, die eine Kombination aus den Transportmitteltypen Stapler, FTF und Routenzug nutzen, zu entwickeln. Anhand eines darauf basierenden Planungstools sollen Anwender dabei unterstützt werden, eine möglichst optimale Lösung für das Transportsystem zu finden.

Dazu wurden zunächst die einzelnen Transportmittel hinsichtlich der relevanten Eigenschaften und Prozesse strukturiert. Im zweiten Schritt wurden die relevanten Einflussfaktoren auf die Leistung des Transportsystems identifiziert und nach sinnvollen Kategorien klassifiziert. Durch eine strukturierte Literaturrecherche zum Stand der Forschung im Bereich der Planung innerbetrieblicher Transportsysteme erfolgte anschließend eine vertiefte Analyse verschiedener praxisüblicher Ansätze. Es hat sich gezeigt, dass vergleichende Planungsansätze, welche die dynamischen Einflüsse des Transportsystems berücksichtigen, bisher nicht betrachtet wurden.

Um diese Forschungslücke zu schließen, wurde ein simulationsbasierter Ansatz entwickelt, welcher eine zweistufige Vorgehensweise zur Ermittlung der optimalen Systemkonfiguration nutzt. Hierbei wird zuerst eine Lösung anhand eines heuristischen Verfahrens bestimmt, die anschließend mittels Simulation verifiziert wird. Zur Vermeidung potenzieller lokaler Optima können außerdem unterschiedliche Lösungsvarianten erstellt werden.

Zur Modellierung des für die Bewertung der Alternativen eingesetzten Simulationsmodells musste zuerst das reale System abstrahiert werden. Dazu erfolgte die mathematische Modellierung der Eingangsdaten auf Basis des "Multi-Commodity Network Flow" Modells. Durch den Einsatz von mathematischen Verteilungen für unterschiedliche Parameter, wie z. B. die Ankunfts- und Bearbeitungsprozesse an den Übergabestationen, kann das Transportsystem mit unterschiedlichen Detailtiefen geplant werden.

Basierend auf der entstandenen Eingangsdatenstruktur wurden im Anschluss die einzelnen Layoutbausteine sowie die Steuerungsprozesse modelliert und in die Simulationsumgebung integriert. Durch die generische Modellierung lassen sich Simulationsmodelle für nahezu beliebige Systemkonfigurationen automatisch erstellen. Durch verschiedenen Leistungskennzahlen ermöglicht die Simulation, die Systemleistung zu untersuchen bzw. Engpässe zu identifizieren und daraus Optimierungspotenziale abzuleiten.

Zur Unterstützung beim Einsatz des Planungsvorgehens wurde eine Benutzeroberfläche implementiert. Diese nutzt verschiedene Reiter, um die Dateneingabe zu vereinfachen. Durch die Einbindung des Simulationsmodells wurde die Anwendung automatisiert. Im letzten Schritt erfolgte die Validierung des Planungsvorgehens durch eine Anwendung in drei Beispielszenarien aus der Praxis mit unterschiedlicher Komplexität.

Die Forschungsziele dieses Forschungsvorhabens wurden somit erreicht.

7.2 Ausblick

Das entwickelte Planungsvorgehen ermöglicht eine schnelle und zuverlässige Gestaltung innerbetrieblicher Transportsysteme. Das verwendete Simulationsmodell ermöglicht dabei die Berücksichtigung zahlreicher Einflussfaktoren und Layoutkonfigurationen. Da die Auftragsvergabe hierzu dezentral erfolgt, besteht keine Möglichkeit zur globalen Optimierung. Aus diesem Grund empfiehlt sich die Weiterentwicklung des Tools um eine auftragsorientierte Strategie, welche eine optimale Zuweisung der Aufträge liefert.

Ein weiterer Aspekt bei der Planung innerbetrieblicher Transportsysteme besteht in der Dimensionierung der Puffer an den unterschiedlichen Quellen und Senken des Systems. Die notwendige Pufferkapazität wird in der Regel mittels der sogenannten Warteschlangentheorie ermittelt. Dies erfordert Kenntnisse über den Ankunftsprozess des vorgelagerten Systems und den Bearbeitungsprozess des nachgelagerten Systems. Da diese im Vorhinein nicht bekannt sind, können die Pufferkapazitäten nicht bestimmt werden. Eine Möglichkeit zur Lösung dieses Problems bietet der Einsatz des entwickelten Simulationsmodells.

Darüberhinaus lässt sich die in diesem Forschungsprojekt angewendeten Vorgehensweise für die Lösung anderer Planungsaufgaben in der innerbetrieblichen übertragen. So können z. B. Lager- bzw. Kommissioniersysteme gestaltet werden, indem

mehrere Systemausprägungen, welche ebenso Mischformen berücksichtigen, simulativ bewertet werden.

Die weitergehende Forschung soll schließlich im Rahmen einer Dissertation des Autors stattfinden

7.3 Nutzen und industrielle Anwendungsmöglichkeiten

Für die Anwendung der Ergebnisse des Forschungsprojekts ist lediglich die Anpassung des entwickelten Planungsansatzes an betriebliche Bedürfnisse und die folgende Implementierung als Softwaretool notwendig. Zur Orientierung für die Implementierung kann der vorgestellte Demonstrator dienen.

Das in diesem Projekt entwickelte Planungsvorgehen liefert eine Basis für die Planung innerbetrieblicher Transportsysteme. Durch die automatische Generierung verschiedener Lösungsalternativen können außerdem bereits in der Grobplanungsphase sinnvolle Konfigurationen für das Transportsystem erprobt werden. Davon profitieren in besonderer Weise auch kleine und mittlere Unternehmen (KMU), denen häufig die Möglichkeit zur eigenständigen Forschung an neuen Planungsmethoden fehlt.

Der im Forschungsprojekt entwickelte Demonstrator steht nach Abschluss des Projekts allen Interessenten aus Lehre, Wissenschaft sowie Wirtschaft diskriminierungsfrei zur Verfügung, so dass er als Basis für eine praxistaugliche Anwendung genutzt werden kann.

7.4 Verwendung der zugewendeten Mittel

Wissenschaftlich-technisches Personal und studentische Hilfskräfte (Einzelansatz A.1 und A.3 des Finanzierungsplans):

Um die geforderten Forschungsinhalte zur Entwicklung des simulationsbasierten Planungsvorgehens sowie zur Implementierung des Softwaretools, bedurfte es in den sieben definierten Arbeitspaketen eines wissenschaftlichen Mitarbeiters mit qualifizierter akademischer Ausbildung. Infolgedessen wurde ein Mitarbeiter der Einstufung nach TV-L 13 mit der Bearbeitung des Forschungsvorhabens beauftragt. Zur Unterstützung für sich wiederholende Tätigkeiten und Routinearbeiten auf Weisung wurden während der gesamten Projektlaufzeit studentische Hilfskräfte eingesetzt. In Tabelle 7-1 ist der Einsatz des wissenschaftlich-technischen Personals sowie der studentischen Hilfskräfte in den jeweiligen Arbeitspaketen dargestellt.

7 Zusammenfassung der Forschungsergebnisse und Ausblick

Es wurden ein wissenschaftlicher Mitarbeiter (wissenschaftlich-technisches Personal, Einzelansatz A.1 des Finanzierungsplans) im Umfang von 24 Personenmonaten sowie studentische und wissenschaftliche Hilfskräfte im Umfang von 12 Personenmonaten (mit 20 Stunden pro Woche) eingesetzt. Bedingt durch den hohen Arbeitsaufwand bei der Entwicklung und Umsetzung des Simulationsmodells war ein verstärkter Einsatz von studentischen und wissenschaftlichen Hilfskräften notwendig. Der bewilligte Budgetrahmen wurde nicht überschritten.

Tabelle 7-1: Einsatz des wissenschaftlich-technischen Personals im Forschungsvorhaben

Arbeitspakete		Zeitplan								Personalaufwand			
		Jahr 1				Jahr 2				Wiss. MA	Stud. HK		
		Q1	Q2	Q3	Q4	Q1	Q2	Q3	Q4				
1	Analyse und Strukturierung von relevanten Transportmitteln	■										2	1
2	Analyse verschiedener Ansätze zur Leistungsberechnung der Transportmittel	■										2	1
3	Entwicklung eines Planungsvorgehens für Transportsysteme mit mehreren Transportmitteltypen		■									2	1
4	Mathematische Modellierung des Quellen- und Senkenverhaltens sowie des Layouts			■	■							5	2,5
5	Modellierung und Implementierung des Simulationsmodells				■	■						6	3
6	Demonstratorische Umsetzung des Tools und Anwendung an Beispielszenarien						■	■				5	2,5
7	Dokumentation und Transfer der Ergebnisse in die Praxis	■	■	■	■	■	■	■	■	■		2	1
										24	12		

Geräte (Einzelansatz B des Finanzierungsplans):

Geräte wurden für das Vorhaben nicht beantragt.

Leistungen Dritter (Einzelansatz C des Finanzierungsplans):

Für die Umsetzung des Simulationsmodells wurde eine „Plant Simulation Researcher Lizenz“ beschafft, wie es im Einzelansatz C des Finanzierungsplans vorgesehen war. Der bewilligte Budgetrahmen wurde hierbei nicht überschritten.

7.5 Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit

Homogene innerbetriebliche Transportsysteme lassen sich anhand von analytischen und simulativen Ansätzen mit unterschiedlichen Detailtiefen gestalten und dimensionieren. Da sich diese Ansätze in der Methodik und der unterliegenden Annahmen und Randbedingungen unterscheiden, ist ein darauf basierender Vergleich der betrachteten Transportmittel ungenau und kann dazu führen, dass suboptimale bzw. nicht anforderungsgerechte Lösungsvarianten gewählt werden. Vergleichende Ansätze aus dem aktuellen Stand der Forschung können außerdem die dynamischen Einflüsse wie z. B. die Wechselwirkungen zwischen den Transportmitteln nicht berücksichtigen. Aus dieser Forschungslücke resultiert die Notwendigkeit der geleisteten Arbeit, welche im Rahmen von mehreren Treffen des Projektbegleitenden Ausschusses bestätigt wurde.

Mit Hilfe des entwickelten Planungstools erfolgt eine optimale Gestaltung des Transportsystems, welche mittels Simulation nachgewiesen ist. Hierbei unterstützt die integrierte Benutzeroberfläche die Anwender durch die einzelnen Schritte des Vorgehens. Das Simulationsmodell ermöglicht außerdem die Analyse von eventuellen Engpässen im Layout, wodurch Optimierungspotenziale aufgezeigt werden können. Die zur Bearbeitung dieser Inhalte angewendeten wissenschaftlichen Methoden und durchgeführten Expertengespräche erforderten den Einsatz Wissenschaftlicher Mitarbeiter, welche durch studentische Hilfskräfte im Laufe der Projektlaufzeit unterstützt wurden. Die geleisteten Arbeiten entsprechen dem begutachteten und bewilligten Forschungsantrag und waren daher für die Bearbeitung des Forschungsvorhabens notwendig und angemessen.

7.6 Ergebnistransfer in die Wirtschaft

7.6.1 Spezifische Transfermaßnahmen während der Projektlaufzeit

Die folgende Tabelle 7-2 zeigt die spezifischen Transfermaßnahmen, die während der Projektlaufzeit stattgefunden haben.

Tabelle 7-2: Spezifische Transfermaßnahmen während der Projektlaufzeit

Ziel	Rahmen	Zeitraum
Maßnahme A: Projektbegleitender Ausschuss (PA)		
Fortlaufende Diskussion und Abstimmung des	A1 Vorstellung des Projekts und Diskussion der geplanten Arbeiten	17.09.2020

Forschungsfortschritt mit Unternehmen des Projektbegleitenden Ausschuss (PA)	A2 Vorstellung des entwickelten Planungsvorgehens	14.04.2021
	A3 Vorstellung der Funktionalitäten des Planungskompasses und Festlegung der Anwendungsszenarien	12.10.2021
	A4 Vorstellung der Projektergebnisse und der demonstratorischen Anwendung	23.02.2022

Maßnahme B: Präsentation auf Kongressen und Konferenzen

Präsentation von (Teil-)Ergebnissen des Projekts auf Fachtagungen vor Wirtschaft und Wissenschaft	B1 Präsentation des Planungsvorgehens auf dem Deutschen Materialflusskongress → Aufgrund der Corona-Situation wurde der Deutsche Materialflusskongress (13.03 – 01.04) abgesagt	
	B2 Präsentation der mathematischen Modellierung und des Simulationsmodells auf der European Conference on Modelling and Simulation (ECMS) Wurde auf der International Conference on Modelling and Applied Simulation (MAS) präsentiert	15-17.09.2021

Maßnahme C: Elektronischer Newsletter und Internetauftritt

Elektronische Verbreitung der Forschungsinhalte und -ergebnisse, Gewinn weiterer interessierter Unternehmen	C1 Das Projekt wird im Newsletter des am fml angesiedelten Logistik-Innovationszentrums (liz) vorgestellt	12.10.2020
	C2 Ergebnistransfer über den liz-Newsletter	01.12.2021
	C3 Frei zugänglicher Internetauftritt des Forschungsprojekts über die Homepage des fml	Fortlaufend
	C4 Das Projekt wird auf der LinkedIn-Seite des Lehrstuhls fml (über 1500 Abonnenten) vorgestellt. (Es handelt sich hierbei um eine freiwillige Maßnahme)	06.2021 03.2022

Maßnahme D: Veröffentlichungen

Ergebnistransfer in die Wirtschaft	D1 Vorstellung des Projekts in der Fachzeitschrift „Logistik Heute“ (oder vergleichbar) im Umfang von 4 Seiten. → Das Projekt wurde in der Zeitschrift f+h im selben Umfang vorgestellt	06.2021
	D2 Publikation der demonstratorischen Umsetzung in der Fachzeitschrift „ZWF Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb“ (oder vergleichbar) im Umfang von 8 Seiten → Im Artikel wurde die simulationsbasierte Dimensionierungsmethode vorgestellt	11.04.2022

Maßnahme E: Übernahme in die Lehre

Einbringung der erarbeiteten Ergebnisse in den Lehrbetrieb	E1 Mitarbeit studentischer Hilfskräfte	Fortlaufend
	E2 Anfertigung von Studienarbeiten im Rahmen des Projekts	Fortlaufend

Maßnahme F: liz – Logistik-Innovationszentrum München

Ergebnistransfer in die Wirtschaft	F1 Vortrag und Vorführung im Rahmen des an der Forschungsstelle jährlich stattfindenden liz-Logistikseminars → Das Projekt wurde im Rahmen einer Postersession im Deutschen Materialflussskongress vorgestellt	18.03.2021
------------------------------------	--	------------

Veröffentlichungen

Die folgenden Veröffentlichungen erfolgten während der Projektlaufzeit oder wurden während der Projektlaufzeit angenommen:

Mestiri, S; Fottner, J: Simulationsbasiertes Planungstool zur Optimalen Auswahl der Transportmittel. In: Fördern und Heben f+h, 06 2021, S. 18–19.

Mestiri, S; Jamil, J; Fottner, J: A Flexible and Generic Simulation Model for in-Bound Transport Systems. In: Proceedings of the 20th International Conference on Modeling & Applied Simulation, 2021, S. 85–90.

Mestiri, S.; Fottner, J.: Simulationsbasierte Dimensionierung innerbetrieblicher Transportsysteme. In: Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb, Jg. 117 (2022) Nr. 4, S. 229–233.

Präsentation auf Veranstaltungen

Auf folgenden Veranstaltungen wurden Ergebnisse des Projekts vorgestellt:

Deutscher Materialflusskongress 2021: Planungskompass zur Auswahl innerbetrieblicher Transportmittel, 18.03.2021, Online.

20th International Conference on Modelling and Applied Simulation MAS e. V.: A Flexible and Generic Simulation Model for in-Bound Transport Systems, 15.09.-17.09.2021, Online.

7.6.1 Spezifische Transfermaßnahmen nach der Projektlaufzeit

Die folgende Tabelle 7-3 enthält die geplanten spezifischen Transfermaßnahmen nach Projektabschluss.

Tabelle 7-3: Spezifische Transfermaßnahmen nach Projektabschluss

Ziel	Rahmen	Zeitraum
Maßnahme G: Beratung		
Ergebnistransfer an Unternehmen ohne eigene Forschungsaktivität	H1 Unterstützung von Unternehmen bei der eigenständigen Anwendung der Ergebnisse durch das Angebot von In-house-Seminaren oder Beratungsleistungen	Fortlaufend
Maßnahme H: Veröffentlichungen		
Ergebnistransfer in die Wirtschaft	I1 Veröffentlichung des Abschlussberichts auf der Homepage des Lehrstuhls fml	9. Quartal
	I2 Vorstellung des Demonstrators und der Evaluationsergebnisse in der Fachzeitschrift „Logistik Heute“ (oder vergleichbar) im Umfang von 6 Seiten	10. Quartal

	I3 Vorstellung des Demonstrators bei Lehrstuhlbesichtigungen und öffentlichen Workshops der Wirtschaft	Ab 9. Quartal
--	---	---------------

Maßnahme I: Konzepttransfer

Möglichkeit der Nutzung der Ergebnisse	J1 Das entwickelte Konzept inkl. Demonstrator steht allen Interessierten diskriminierungsfrei zur Begutachtung bereit. Die geplanten Veröffentlichungen während und nach der Projektlaufzeit werden für Bewerbung des Demonstrators ebenso genutzt wie die an der Forschungsstelle regelmäßig stattfindenden Veranstaltungen, darunter bspw. Show-Cases für Unternehmen und Veranstaltungen im Rahmen des Mittelstand 4.0-Kompetenzzentrums Augsburg.	Fortlaufend
--	--	-------------

7.6.2 Einschätzung zur Realisierbarkeit des Transferkonzepts

Durch die folgenden geplanten Maßnahmen nach der Projektlaufzeit ist ein Transfer der im Forschungsprojekt PlaKAT erzielten Ergebnisse sichergestellt.

- Maßnahme H1: Im Rahmen von Beratungsleistungen werden Unternehmen bei der Anwendung der Ergebnisse unterstützt.
- Maßnahme I1: Der Abschlussbericht wird über die Homepages des Lehrstuhls fml öffentlich zugänglich gemacht.
- Maßnahme I2: Der Projektleiter wird das Thema im Rahmen einer Dissertation weiterverfolgen. Daher ist eine fortlaufende Publikation in Fachzeitschriften sichergestellt.
- Maßnahme I3: Die Projektergebnisse werden in dem Simulationsdemonstrator des Lehrstuhls fml integriert, sodass bei zukünftigen Lehrstuhlbesichtigungen das simulationsbasierte Planungsvorgehen (Benutzeroberfläche und Simulationsmodell) vorgeführt werden können. Bisher erfolgte der Ergebnistransfer über die lehrstuhleigenen Newsletter im Dezember 2021.
- Maßnahme J1: Zur Nutzung der erzielten Forschungsergebnisse stehen Konzept und Demonstrator zur Begutachtung bereit.

7.7 Durchführende Forschungsstelle

Technische Universität München, Lehrstuhl für Fördertechnik Materialfluss Logistik (fml)

Der Lehrstuhl fml versteht sich als offene Forschungseinrichtung, die wesentlich zum wissenschaftlichen Fortschritt auf den Gebieten der Materialflusstechnik und Logistik beitragen will. Mit Hilfe der gewonnenen Erkenntnisse sowie deren Praxistransfer, insbesondere auch an kleine und mittlere Unternehmen (KMU), wird somit ein wichtiger Beitrag zur Sicherung des Logistikstandortes Deutschland geleistet. Als wesentliche Forschungsinhalte werden neben Aspekten der Technischen Logistik die Steuerung und Optimierung von Materialflussprozessen durch innovative Ident-Technologien (RFID), die Weiterentwicklung der Logistikplanung auf Basis digitaler Werkzeuge sowie die Rolle des Menschen in der Logistik behandelt.

Lehrstuhl für Fördertechnik Materialfluss Logistik (fml)	
Anschrift	Boltzmannstraße 15, 85748 Garching
Leiter der Forschungsstelle	Prof. Dr.-Ing. Johannes Fottner
Projektleitung	Slaheddine Mestiri
Kontakt	Tel.: 089/289-15929, www.mec.ed.tum.de/fml

7.8 Förderhinweis

Das IGF-Vorhaben 20959 N/1 („PlaKAT“) der Forschungsvereinigung Intralogistik / Fördertechnik und Logistiksysteme (IFL) e.V. wurde über die AiF im Rahmen des Programms zur Förderung der industriellen Gemeinschaftsforschung (IGF) vom Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages gefördert.

Für die Förderung und Unterstützung sei gedankt

8 Verzeichnis der Veröffentlichungen

Simulationsbasiertes Planungstool zur Optimalen Auswahl der Transportmittel
Fördern und Heben (f+h) 6 / 2021

[Mes-2021b]

A Flexible and Generic Simulation Model for in-Bound Transport Systems
International Conference on Modeling & Applied Simulation (MAS) 2021

[Mes-2021a]

Simulationsbasierte Dimensionierung innerbetrieblicher Transportsysteme
Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb (ZWF) 4 / 2022

[Mes-2022]

9 Verzeichnis der studentischen Arbeiten

Entwicklung eines ganzheitlichen Ansatzes für die vergleichende Dimensionierung und Bewertung von innerbetrieblichen Transportsystemen

Masterarbeit von Wiebel Christian Curt Josef

[Wie-2021]

Entwicklung eines Planungsvorgehens für innerbetriebliche Transportsysteme mit verschiedenen Transportmitteltypen

Bachelorarbeit von Zheng Huiyuan

[Zhe-2021]

Entwicklung und Implementierung eines Routingalgorithmus für innerbetrieblichen Transportsysteme mit verschiedenen Transportmitteltypen

Semesterarbeit von Küster Fabian Alexander

[Küs-2022]

Literaturverzeichnis

- [Arn-2009] Arnold, D.; Furmans, K.: Materialfluss in Logistiksystemen. Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg, 2009.
- [Cac-2015] Caceres-Cruz, J.; Arias, P.; Guimarans, D.; Riera, D.; Juan, A. A.: Rich Vehicle Routing Problem. In: ACM Computing Surveys, Jg. 47 (2015) Nr. 2, S. 1–28.
- [Cof-1971] Coffman, E. G.; Elphick, M. J.; Shoshani, A.: System Deadlocks. In: Computing Surveys (1971), S. 67–78.
- [Cro-1958] Croes, G. A.: A Method for Solving Traveling-Salesman Problems. In: Operations Research, Jg. 6 (1958) Nr. 6, S. 791–812.
- [Dij-1959] Dijkstra, E. W.: A note on two problems in connexion with graphs. In: Numerische Mathematik (1959), S. 269–271.
- [Dom-2015] Domschke, W.; Drexl, A.; Klein, R.; Scholl, A.: Einführung in Operations Research. Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg, 2015.
- [Egb-1984] Egbelu, P. J.; Tanchoco, J. M. A.: Characterization of Automatic Guided Vehicle Dispatching Rules. In: International Journal of Production Research (1984), S. 359–374.
- [Egb-1993] Egbelu, P. J.: Positioning of automated guided vehicles in a loop layout to improve response time. In: European Journal of Operational Research (1993), S. 32–44.
- [Flo-1962] Floyd, R. W.: Algorithm 97: Shortest path. In: Communications of the ACM (1962) Nr. 6, S. 345.
- [Gan-1998] Ganesharajah, T.; Hall, N. G.; Sriskandarajah, C.: Design and operational issues in AGV-served manufacturing system. In: Annals of Operations Research, Jg. 76 (1998), S. 109–154.
- [Gro-1984] Großeschallau, W.: Materialflußrechnung – Modelle und Verfahren zur Analyse und Berechnung von Materialflußsystemen. Springer, Berlin, Heidelberg, 1984.

- [Gün-2013] Günthner, W. A.; Durchholz, J.; Klenk, E.; Boppert, J.; Knöschl, T.; Klevers, M.: Schlanke Logistikprozesse – Handbuch für den Planer. Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg, 2013.
- [Han-2013] Handfield, R.: Embracing global logistics complexity to drive market advantage. DVV Media Group, Hamburg, 2013.
- [Har-1968] Hart, P. E.; Nilsson, N.; Raphael, B.: A Formal Basis for the Heuristic Determination of Minimum Cost Paths. In: IEEE Transactions of systems science and cybernetics (1968), S. 100–107.
- [Hom-2011] Hompel, M. ten; Heidenblut, V.: Taschenlexikon Logistik – Abkürzungen, Definitionen und Erläuterungen der wichtigsten Begriffe aus Materialfluss und Logistik. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg, 2011.
- [Hom-2018] Hompel, M. ten; Schmidt, T.; Dregger, J.: Materialflusssysteme. Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg, 2018.
- [Kim-1997] Kim Chang Wan; Tanchoco, J. M. A.; Koo, P.-H.: Deadlock Prevention in Manufacturing Systems With AGV Systems: Banker's Algorithm Approach. In: Journal of Manufacturing Science and Engineering (1997), S. 849–854.
- [Küs-2022] Küster, F. A.: Entwicklung und Implementierung eines Routingalgorithmus für innerbetrieblichen Transportsysteme mit verschiedenen Transportmitteltypen. Semesterarbeit. Lehrstuhl für Fördertechnik Materialfluss Logistik, Technische Universität München, 2022.
- [Le--2006] Le-Anh, T.; Koster, M.B.M. de: A review of design and control of automated guided vehicle systems. In: European Journal of Operational Research, Jg. 171 (2006) Nr. 1, S. 1–23.
- [Lie-2017] Lieb, C.; Klenk, E.; Galka, S.; Keuntje, C.: Einsatz von Routenzugsystemen zur Produktionsversorgung – Studie zu Planung, Steuerung und Betrieb. fml - Lehrstuhl für Fördertechnik Materialfluss Logistik, Garching b. München, 2017.
- [Lie-2021] Lienert, T.: Methodik zur simulationsbasierten Durchsatzanalyse FTF-basierter Kommissioniersysteme. fml - Lehrstuhl für Fördertechnik Materialfluss Logistik Technische Universität München, Garching b. München, 2021.

- [Mar-2014] Martin, H.: Transport- und Lagerlogistik. Springer Fachmedien Wiesbaden, Wiesbaden, 2014.
- [Mes-2021a] Mestiri, Jamil; Fottner: A Flexible and Generic Simulation Model for in-Bound Transport Systems Proceedings of the 20th International Conference on Modeling & Applied Simulation, 2021, S. 85–90.
- [Mes-2021b] Mestiri, S.; Fottner, J.: Simulationsbasiertes Planungstool zur optimalen Auswahl der Transportmittel. In: Fördern und Heben (f+h), Jg. 2021 (2021) Nr. 6
- [Mes-2022] Mestiri, S.; Fottner, J.: Simulationsbasierte Dimensionierung innerbetrieblicher Transportsysteme. In: Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb, Jg. 117 (2022) Nr. 4, S. 229–233.
- [Pfe-1998] Pfeifer, H.; Kabisch, G.; Lautner, H.: Fördertechnik – Konstruktion und Berechnung. Vieweg+Teubner Verlag, Wiesbaden, 1998.
- [Sal-1997] Salhi, S.; Sari, M.: A multi-level composite heuristic for the multi-depot vehicle fleet mix problem. In: European Journal of Operational Research, Jg. 103 (1997) Nr. 1, S. 95–112.
- [Sch-1998] Scheffler, M.; Feyrer, K.; Matthias, K.: Fördermaschinen. Vieweg+Teubner Verlag, Wiesbaden, 1998.
- [Ull-2014] Ullrich, G.: Fahrerlose Transportsysteme. Springer Fachmedien Wiesbaden, Wiesbaden, 2014.
- [VDI-2510] VDI: Fahrerlose Transportsysteme (FTS). VDI Nr. 2510, 2005.
- [VDI-2689] VDI: Leitfaden für Materialflussuntersuchungen Manual of material flow investigations. VDI Nr. 2689, 2019.
- [VDI-2710] VDI: Ganzheitliche Planung von Fahrerlosen Transportsystemen (FTS). VDI-RICHTLINIEN Nr. 2710, 2007.
- [VDI-3586] VDI: Flurförderzeuge. VDI-RICHTLINIE Nr. 3586, 2007.
- [VDI-5586a] VDI: Routenzugsysteme. VDI-RICHTLINIEN Nr. 5586 Blatt 2, 2016.
- [VDI-5586b] VDI: Routenzugsysteme. VDI-RICHTLINIE Nr. 5586 Blatt 1, 2016.

- [Vis-2006] Vis, I. F.A.: Survey of research in the design and control of automated guided vehicle systems. In: European Journal of Operational Research, Jg. 170 (2006) Nr. 3, S. 677–709.
- [Wie-2021] Wiebel, C. C. J.: Entwicklung eines ganzheitlichen Ansatzes für die vergleichende Dimensionierung und Bewertung von innerbetrieblichen Transportsystemen. Masterarbeit. Lehrstuhl für Fördertechnik Materialfluss Logistik, Technische Universität München, 2021.
- [Yif-2010] Yifei, T.; Junruo, C.; Meihong, L.; Xianxi, L.; Yali, F.: An estimate and simulation approach to determining the Automated Guided Vehicle fleet size in FMS2010 3rd IEEE International Conference on Computer Science and Information Technology, S. 432–435.
- [Zhe-2021] Zheng, H.: Entwicklung eines Planungsvorgehens für innerbetriebliche Transportsysteme mit verschiedenen Transportmitteltypen. Bachelorarbeit. Lehrstuhl für Fördertechnik Materialfluss Logistik, Technische Universität München, 2021.

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1-1: Bestandteile eines Transportsystems	5
Abbildung 1-2: Vision des Forschungsvorhabens	7
Abbildung 2-1: Quelle-Senke-Relationen	10
Abbildung 2-2: Schematische Darstellung eines Routenzugsystems (in Anlehnung an [VDI-5586b])	15
Abbildung 2-3: Einflussfaktoren auf die notwendige Flottengröße in Anlehnung an [Lie-2021]	17
Abbildung 2-4: Beispielhaftes Layout, bestehend aus 5 Knoten. Angegeben ist die Distanz zwischen den einzelnen Knoten.	18
Abbildung 2-5: Betrachtetes Layout und zugehörige Entfernungsmatrix	24
Abbildung 2-6: Geschwindigkeits-Zeitverläufe für eine Dreiecksfahrt (links) und eine Trapezfahrt (rechts)	25
Abbildung 2-7: Vier Phasen der Routenzugsystemplanung (in Anlehnung an [VDI-5586a])	30
Abbildung 3-1: Schematische Darstellung des simulationsbasierten Ansatzes	36
Abbildung 4-1 Schematische Abbildung eines Transportsystems als ein Warteschlangennetz	42
Abbildung 5-1: Modellierung einer Kreuzung im Simulationsmodell	45
Abbildung 5-2: Modellierung des Bausteins Quelle im Simulationsmodell	46
Abbildung 5-3: Modellierung des Bausteins Senke im Simulationsmodell	47
Abbildung 5-4: Auftragsinitiierte Strategie	47
Abbildung 5-5: Zuweisung von Aufträgen	48
Abbildung 5-6: Routingalgorithmus	48
Abbildung 5-7: Lastaufnahme- und Abgabeprozesse	49
Abbildung 5-8: Durchsatzwerte für die definierten Transportrelationen	51
Abbildung 5-9: Durchlauf- und Prozesszeiten für die definierten Transportrelationen	51
Abbildung 5-10: Zeitanteile der möglichen Zustände der Fahrzeuge	52
Abbildung 5-11: Wahrscheinlichkeit der möglichen Pufferbelegungszustände	52
Abbildung 5-12: Heat-Map zur Darstellung der Auslastung einzelner Wegabschnitte	53
Abbildung 6-1: Aufbau des Softwaredemonstrators	56
Abbildung 6-2: Registerkarte „Allgemeine Daten“	57
Abbildung 6-3: Registerkarte „Knoten“	57

Abbildung 6-4: Registerkarte „Kanten“	58
Abbildung 6-5: Registerkarte „Kurven“	59
Abbildung 6-6: Reiter „Fahrzeuge“	59
Abbildung 6-7: Registerkarte „Quellen/Senken“	60
Abbildung 6-8 Registerkarte „Transportaufkommen“	61
Abbildung 6-9: Reiter „Berechnung“	61
Abbildung 6-10: Fallbeispiel 1- Entwicklung der Anzahl der Fahrzeuge im Laufe der Berechnungsiterationen für Planungsvariante 1 im Experiment 1	63
Abbildung 6-12: Fallbeispiel 2- Entwicklung der Anzahl der Fahrzeuge im Laufe der Berechnungsiterationen für Planungsvarianten 1-3 im Experiment 2	64
Abbildung 6-13: Fallbeispiel 3- Entwicklung der Anzahl der Fahrzeuge im Laufe der Berechnungsiterationen für Planungsvarianten 1-3	66
Abbildung A-7-1: Darstellung der Eingangsdatenstruktur	A-1

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1-1: Zuordnung der Arbeitspakete zu den Kapiteln des Schlussberichts	8
Tabelle 2-1: Kategorisierung von Flurförderzeugen nach Bauform und Einsatzzweck [VDI-3586]	11
Tabelle 2-2: FTF-Kategorien nach [Ull-2014]	12
Tabelle 2-3: Klassifizierung von Staplern nach Sheffler et al. [Sch-1998]	14
Tabelle 2-4: Entfernungsmatrix	18
Tabelle 2-5: Transportmatrix	19
Tabelle 2-6: Fahrzeugparameter	23
Tabelle 2-7: Fahrzeitenmatrix F	26
Tabelle 2-8: Transportmatrix, Fahrzeugangebot a und Fahrzeugbedarf b	27
Tabelle 2-9: Heuristisches Vorgehen zur Bestimmung der Leerfahrten	29
Tabelle 2-10: Transportmatrix T, Leerfahrtmatrix L und Fahrzeitmatrix F	29
Tabelle 3-1 Algorithmus der analytischen Methode zu Ermittlung der erforderlichen Flottengröße	38
Tabelle 7-1: Einsatz des wissenschaftlich-technischen Personals im Forschungsvorhaben	70
Tabelle 7-2: Spezifische Transfermaßnahmen während der Projektlaufzeit	71
Tabelle 7-3: Spezifische Transfermaßnahmen nach Projektabschluss	74

Anhang A Eingangsdatenstruktur

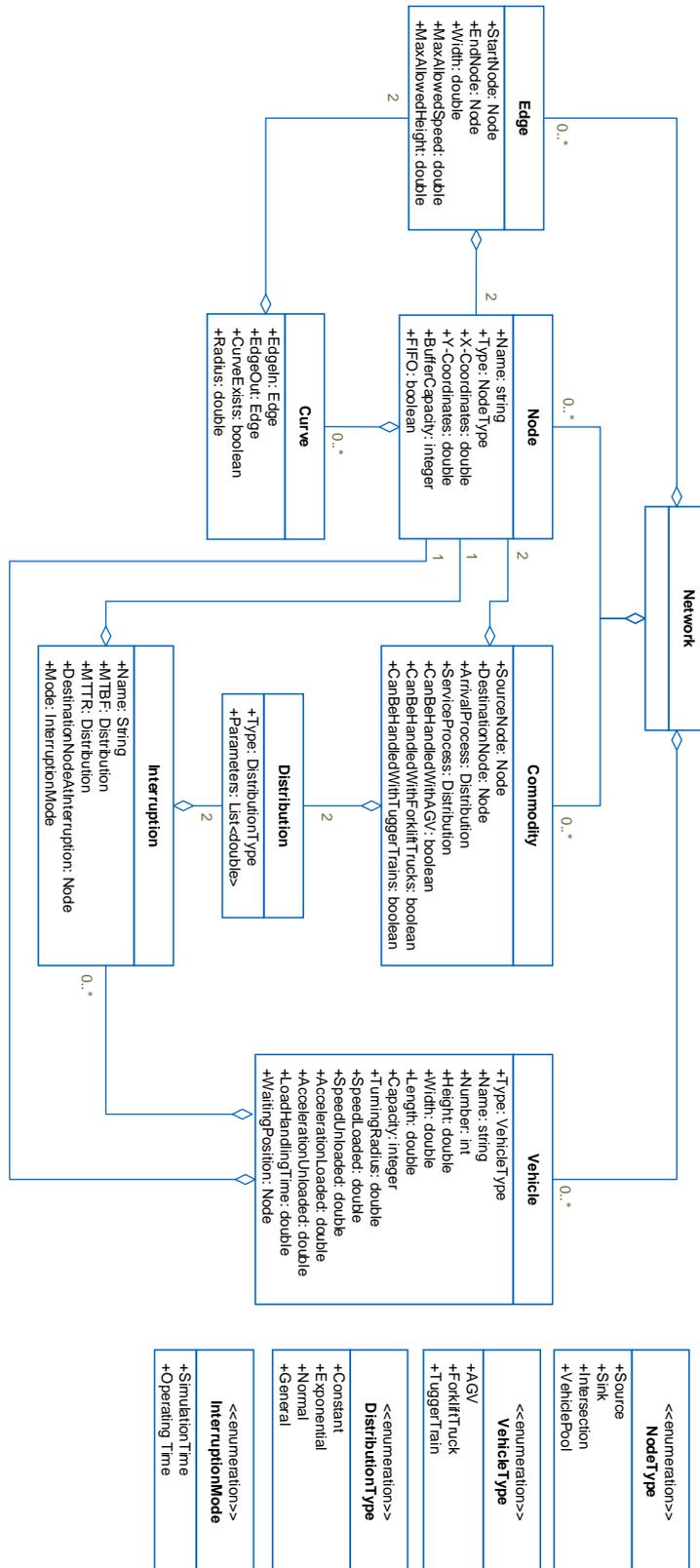


Abbildung A-7-1: Darstellung der Eingangsdatenstruktur