

Effizienter Einsatz autonomer Fördermittel in der Intralogistik

Diplomarbeit an der TU-Graz
Institut für Technische Logistik



von

Gunter Wolbank

Graz, September 2011

EIDESSTATTLICHE ERKLÄRUNG

Ich erkläre an Eides statt, dass ich die vorliegende Arbeit selbstständig verfasst, andere als die angegebenen Quellen/Hilfsmittel nicht benutzt und die den benutzten Quellen wörtlich und inhaltlich entnommenen Stellen als solche kenntlich gemacht habe.

Graz, am

.....
(Unterschrift)

Widmung

Diese Arbeit widme ich meiner Familie

Vorwort

Diese Diplomarbeit wurde zur Erlangung des akademischen Grades „Diplom-Ingenieur des Maschinenbaus“ verfasst. Sie wurde im Zuge meines Studiums an der TU-Graz am Institut für Technische Logistik und in Kooperation mit der Firma [REDACTED] durchgeführt.

Für die Unterstützung, Betreuung und die Durchsicht der Diplomarbeit möchte ich mich bei Herrn Dipl.-Ing. Dr. techn. Christian Landschützer besonders bedanken.

Herrn Univ.-Prof. Dr.-Ing. habil. Dirk Jodin danke ich ebenfalls für die Unterstützung während der Diplomarbeit.

Die sehr gute Zusammenarbeit mit meinen Betreuern von Seiten der Firma [REDACTED] möchte ich hier ebenfalls erwähnen.

Weiterer Dank gilt den Mitarbeitern des Institutes, welche mich mit guten Ratschlägen versorgt haben.

Gunter Wolbank

Graz, September 2011

Kurzfassung

Die vorliegende Diplomarbeit trifft eine Aussage über den effizienten Einsatz von autonomen Fördermitteln. Dafür wird nach einer umfangreichen Literaturstudie der Stand der Technik dargelegt und das Problemfeld beschrieben. Im Weiteren werden logistische Kennzahlen für ein System definiert und berechnet. Schließlich werden Auslegungsregeln geliefert.

Erfahrungen von der Logistikmesse CeMat 2011 werden ebenfalls geschildert und verschiedene Lösungen von Herstellern vorgestellt.

Ein System von frei agierenden Fahrzeugen hat viele Freiheitsgrade und jeder Bereich der Technik findet Einfluss, es werden die mechanischen Komponenten beleuchtet und logistische Kennzahlen bestimmt. Der mechanische Aufbau ist abhängig vom Einsatzbereich. Die Lastaufnahmemittel müssen je nach Größe und Automatisierungsgrad an die Waren und die Anlage angepasst werden. Genauso wird die Energiebereitstellung davon abhängen und die Ladestrategie beeinflussen. Für eine Positionierung des Fahrzeuges bei der automatischen Übergabe kann mit einem flächenbeweglichen Fahrwerk viel Zeit eingespart werden. Jedoch ist das linienbewegliche Fahrwerk günstiger in Konstruktion und Kosten.

Nach der Betrachtung der Fahrzeuge wird das ganze Transportsystem in die einfachsten Teile, die Station zur Übergabe der Waren und die Transportstrecke, unterteilt. Die Grenzleistungen dieser Bereiche werden bestimmt. Die Abhängigkeiten des Durchsatzes von den Eigenschaften der Fahrzeuge bei Übergabe der Waren und auf der Strecke werden gezeigt. Beispielhaft werden verschiedene Lagervarianten definiert. Der Durchsatz dieser wird berechnet und mit den Werten der stetigen Fördertechnik verglichen. Mit dem Monte-Carlo Algorithmus wird der durchschnittliche Fahrweg berechnet. Hier wird die Abhängigkeit des Durchsatzes von Fahrweg, Fahrzeit und der Anzahl der geladenen Waren verdeutlicht. Außerdem wird mit Hilfe einer MATLAB Simulation die Anzahl der Kollisionen in den Lagerszenarien gezählt und der Verlauf der Kollisionsanzahl über verschiedene Parameter dargestellt.

Beim Auslegen eines Systems von autonomen Fahrzeugen müssen schließlich einige Punkte beachtet werden, die im Laufe der Arbeit herausgearbeitet werden und zum Schluss zusammengefasst als Auslegungsregeln formuliert werden.

Inhaltsverzeichnis

EIDESSTATTLICHE ERKLÄRUNG	II
Widmung	III
Vorwort	IV
Kurzfassung	V
Inhaltsverzeichnis	VI
1 Einleitung	1
1.1 Problemumfeld	3
1.1.1 Einsatz von FTS in der Vergangenheit	6
1.1.2 Einsatz von FTS in heutigen Unternehmen	8
1.1.3 Der Schritt von FTF zum frei agierenden Fahrzeug	8
1.2 Aufgabenstellung und Ziel	10
2 Problemanalyse und Literaturrecherche	13
2.1 Grundlagen	13
2.2 Stand der Technik	15
2.3 Literaturrecherche	18
2.3.1 Fahrstrategien	19
2.3.2 Blockierungen	22
2.3.3 Flottengröße	24
2.3.4 Allgemeines	26
2.4 Problembeschreibung	27
3 Entwicklung von Maßnahmen	29
3.1 Betrachtung der Fahrzeuge	29
3.1.1 Eigenschaften	30
3.1.2 Technologien	33
3.1.2.1 Varianten der Lastaufnahmemittel	34
3.1.2.2 Fahrwerk	36
3.1.2.3 Energiebereitstellung	37
3.1.3 Kennzahlengenerator	40
3.1.4 Prototypen und entwickelte Fahrzeuge	41
3.2 Leistung der autonomen Fördermittel im System	47
3.2.1 Herangehensweise	47
3.2.2 Einsatzgebiete	48
3.2.3 Grenzleistungsrechnung	50
3.2.3.1 Grundlegendes	50
3.2.3.1.1 Übergabestation	55
3.2.3.1.2 Strecke	56
3.2.3.2 Monte-Carlo Simulation	57
3.2.3.2.1 Grundlage	58
3.2.3.2.2 Math-Cad Berechnung	59

3.2.4	Prototyp einer Kollisionssimulation	63
4	Auswirkung der Maßnahmen	65
4.1	Allgemeines.....	65
4.2	Szenarien	68
4.2.1	700er Lager.....	68
4.2.1.1	Einfache Schleifen	70
4.2.1.2	Mehrfache Schleifen	71
4.2.1.3	Allgemeine Situation	72
4.2.2	Zentrallager A.....	73
4.2.3	Allgemeine Läger.....	74
4.2.4	Szenario zur Berechnung von Kollisionen	76
5	Bewertung der Maßnahmen	77
5.1	Ergebnisauswertung	77
5.1.1	Allgemein	77
5.1.2	Auswertung der Szenarien im 700er-Lager	78
5.1.3	Zentrallager A.....	82
5.1.4	Allgemeine Läger.....	84
5.1.4.1	Einzelfahrstrategie	84
5.1.4.2	Mehrfachfahrstrategie	85
5.1.5	Kollisionsalgorithmus	85
5.1.6	Zusammenfassung der Ergebnisauswertung.....	87
5.2	Anwendungsbeispiele.....	88
5.2.1	Versuchsaufbau	88
5.2.2	Projekt A	90
5.2.3	Projekt B	90
5.2.4	Zusammenfassung der Projekte	91
5.3	Bewertung der Maßnahmen	91
6	Zusammenfassung	93
6.1	Auslegungsregeln	94
7	Verzeichnisse	96
7.1	Literaturverzeichnis.....	96
7.2	Abbildungsverzeichnis	98
7.3	Tabellenverzeichnis.....	100
7.4	Gleichungsverzeichnis.....	101
Anhang.....	A-1	
A	veröffentlichter Kurztext	A-1
A-1	Deutsch	A-1
A-2	Englisch	A-2
B	Kennzahlengenerator.....	B-1
B-1	Read-Me Datei	B-1
C	MathCAD Programmcodes	C-1
C-1	Berechnung mittels des Zentrallagers A.....	C-1
C-2	Berechnung des Allgemeinen Lagers (Einzelfahrstrategie).....	C-7
C-3	Berechnung des Allgemeinen Lagers (Mehrfachfahrstrategie)...	C-12
C-4	Berechnung des Allgemeinen Lagers (spezielle Verteilung)	C-18
D	MATLAB Programmcode	D-1
D-1	Prototyp zur Kollisionszählung	D-1

1 Einleitung

Logistik ist ein breites Fachgebiet. Überall spielt die Logistik eine Rolle. Die erste Erwähnung der Logistik findet sich bei den Römern in der Antike und bedeutet „Versorgung der Truppe; militärisches Nachschubwesen“ [DUD97] .

Heute werden angefangen vom Kleinbetrieb bis hin zum Flughafen verschiedenste logistische Aspekte berücksichtigt und geplant. Jeder Betrieb achtet auf den Nachschub, die Bereitstellung von Waren und die Versorgung jeder Arbeitsstation mit Arbeitsmitteln. Dabei kennt die Logistik selbst keine Grenzen. Die Auslegung der Straßen für den Fernverkehr kann genauso logistisch betrachtet werden, wie der Materialfluss innerhalb eines Betriebes. Dieser wird, unter anderem, näher von der Intralogistik betrachtet.

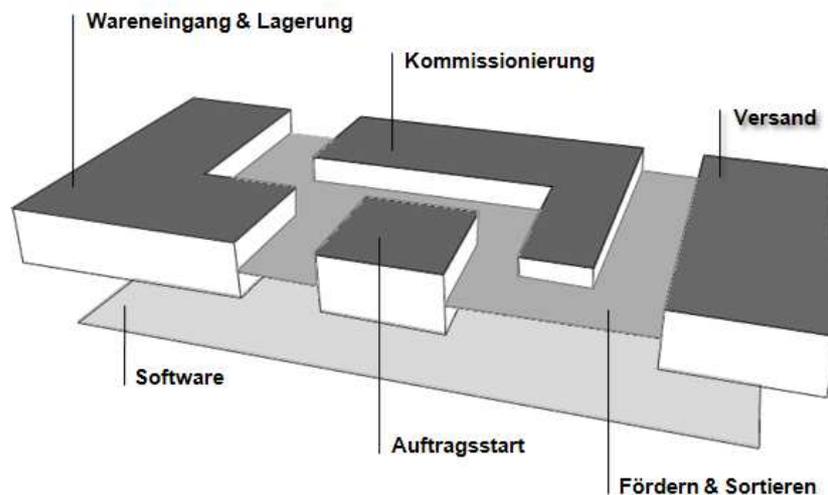


Abbildung 1-1: Darstellung Lagerbereiche

Die Intralogistik behandelt folgende Bereiche, die in Abbildung 1-1 dargestellt sind:

- Wareneingang
- Lagerung
- Auftragsstart
- Kommissionierung
- Versand sowie
- Fördern und Sortieren und
- Software

Die speziellen Aufgaben der einzelnen Bereiche können individuell verschieden sein, die Grundaufgaben bleiben allerdings die gleichen. Im Wareneingang findet der Wareneingang statt, hier übertritt die Ware die Systemgrenze des Betriebes und wird nach dem Auspacken auf Menge und Qualität geprüft und im

System registriert. Der nächste Schritt ist die Einlagerung. Dabei kommt es auf die Art des Artikels und der Zugriffshäufigkeit an, in welche Art von Lager die Einlagerung stattfindet. Beim Auftragsstart wird im System eine Bestellung gebucht, die verschiedene Artikel zu einem Auftrag und einem Ziel verknüpft. Um die Artikel aus den meist sortenreinen Lagerplätzen zu einem Auftrag zu kombinieren findet der Schritt der Kommissionierung statt. Ein fertig kommissionierter Auftrag wird im Versand auf Vollständigkeit kontrolliert, verpackt und verlässt die innerbetriebliche Logistik. Die Verknüpfung der einzelnen Bereiche wird über verschiedenste Sorter und Fördertechniken realisiert. Für den zeitlichen Ablauf und die Steuerung ist eine übergeordnete Software zuständig. Dafür kommen Materialflussrechner und Programme in Frage. Diese Funktionen werden auch von sogenannten Warehouse Management Systemen übernommen.

Ein Teilbereich der Intralogistik plant die Wege und Durchlaufzeiten der Waren vom Wareneingang zum Warenausgang, das Fördern und das Sortieren. Die Herausforderung dabei ist, dass die Grundregel der Logistik eingehalten wird. Diese sogenannte 6-r Regel lautet [HSN07] :

- Die richtige Ware
- zur richtigen Zeit
- am richtigen Ort
- in der richtigen Menge
- in der richtigen Qualität und
- zu den richtigen Kosten zur Verfügung zu stellen.

Dabei hat der Transport von Waren einen besonderen Stellenwert. Gelangt die Ware zu früh zu ihrem Ziel, sind dort Pufferzonen oder Lager notwendig. Diese Plätze können den Arbeitsraum behindern und höhere Kosten verursachen. Weiter bedeutet dies, dass die Waren auf die Bearbeitung warten müssen. Wartezeiten vergrößern jedoch Durchlaufzeiten und die Leistung eines Systems wird dadurch verringert. Außerdem verursachen gelagerte Waren ebenfalls Kosten. Diese resultieren aus benötigtem Raumbedarf und einer gewissen Verwaltungsarbeit, da diesen Waren auch immer ein Standplatz zugewiesen werden muss um eine Nachverfolgung zu ermöglichen.

Das Zuspätkommen verursacht ganz eindeutig Kosten. Kommen Waren zu spät zu den Arbeitsstationen müssen diese auf Arbeit warten. Stillstandzeiten sind für Maschinen und Arbeiter Verlust, da diese nicht wieder nachgeholt werden können. Nachdem der Preisdruck hoch ist, wird versucht diese Kosten so gering wie möglich zu halten. Daher wird einerseits der Materialfluss derart geplant, dass Puffer und Lager so groß wie nötig aber so klein wie möglich ausgelegt werden, andererseits wird versucht Wartezeiten zu minimieren.

Um Materialflüsse im innerbetrieblichen Bereich zu realisieren, kommt die Fördertechnik zum Tragen.

Fördertechnik ist, die Technik des Fortbewegens „von Gütern in beliebiger Richtung über begrenzte Entfernungen durch technische Hilfsmittel“, einschließlich der Lehre über die Fördermittel und ihrer durch sie aufgebauten Systeme [HSN07] .

In der Fördertechnik kommen verschiedenste Fördermittel zum Einsatz. Hier gibt es einige Zugänge zur Klassifizierung der Fördermittel. In der obersten Ebene der Unterscheidung können Fördermittel in Stetig- und in Unstetigförderer unterteilt werden. Eine nähere Betrachtung der Fördermittel wird in Kapitel 2.1 dargestellt.

Nach dieser Einleitung über das Thema der Intralogistik, ihre Unterteilung in Bereiche, der Darstellung der Wichtigkeit eines geplanten Materialflusses und der ersten Unterscheidung in der Fördertechnik, wird im Weiteren auf das Problemumfeld der Arbeit näher eingegangen. Hier werden die zwei Lagervarianten und die historische Entwicklung der Unstetigförderer und ihrer Automatisierung erörtert. Später werden die Aufgabenstellung und das Ziel definiert.

1.1 Problemumfeld

In Kooperation mit einer Firma, die ihren Hauptaufgabenbereich in der Planung und Abwicklung von Projekten für Distributionslager und Produktionsstätten definiert, wurde ein Problemumfeld erläutert. Für die Projekte werden zwei Varianten von Lagern eingesetzt. Das sind *Ware zum Mann* (WzM) und *Mann zur Ware* (MzW) Lager.

Das WzM-Lager ist hochautomatisiert. Hier werden die Waren dynamisch bereitgestellt. Das bedeutet, dass die Artikel in einem automatisierten Lager gelagert werden. Die Ein- und Auslagerung wird durch Regalbediengeräte (RBG) oder über Shuttle-Varianten durchgeführt. Ein Regalbediengerät bearbeitet eine ganze Gasse eines Lagers. Shuttle-Systeme können als aufgeschnittene RBG betrachtet werden. In jeder Ebene einer Regalgasse verfährt ein Shuttle auf Schienen und transportiert ein- und aus zu lagernde Waren zu einem Lift. Dieser steht an einer oder an beiden Stirnseiten der Regalgasse und bedient die einzelnen Ebenen. Wird eine Ware zur Kommissionierung benötigt, so wird diese automatisch aus dem Lager ausgelagert und mittels Fördertechnik in die Lagervorzone zu einem Arbeitsplatz befördert. Dies ist die dynamische Bereitstellung. In Abbildung 1-2 ist eine Lagervorzone mit zwei Arbeitsplätzen dargestellt. Die für einen Auftrag benötigten Waren kommen über die Fördertechnik von links und werden in die Schleifen der Arbeitsplätze gebracht. Hier wird der Auftrag kommissioniert und die nicht benötigten Waren werden nach rechts wieder zurück zum Lager gefördert.

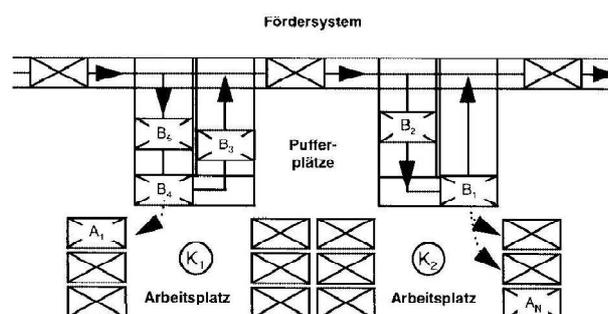


Abbildung 1-2: Ware zum Mann Lager
(nach [GUD05] S. 699, Abb. 17.4)

Das MzW-Lager ist die klassische Variante der Warenbereitstellung. Die Waren werden statisch bereitgestellt. Der Kommissionierer erhält seinen Auftrag in der Lagervorzone und muss durch die Regalgänge gehen um die benötigten Waren dem Auftrag hinzuzufügen. Die Abgabe erfolgt in der Lagervorzone und kann auf verschiedene Fördertechniken passieren. Abbildung 1-3 stellt die Kommissionierung in so einem Lager dar.

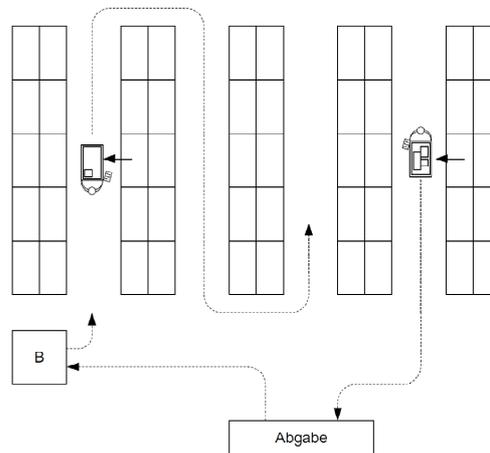


Abbildung 1-3: Mann zu Ware Lager
(nach [HSN07] S. 270, Abb 5.27)

Die Ausführung dieser zwei Lagervarianten kann von der ABC-Verteilung der Artikel abhängen. Diese Verteilung stellt die Zugriffshäufigkeit dar und wird über eine Lorenzkurve abgebildet (siehe Abbildung 1-4). Die Kurve wurde von einem amerikanischen Statistiker und Ökonom, Max Otto Lorenz, entwickelt und stellt eine statistische Verteilung grafisch dar und verdeutlicht die Ungleichverteilung. Eine in der Logistik übliche ABC-Verteilung ist eine 80/20 Verteilung. Dabei machen 20% der Artikel 80% des Umsatzes oder der Zugriffe aus, diese werden auch als A-Dreher oder Schnelldreher bezeichnet. Die B-Dreher oder Langsamdreher sind 30% der Artikel und machen nur mehr 15% der Zugriffe aus und Die C-Dreher sind die Ladenhüter. Diese sind nur für 5% des Umsatzes verantwortlich, bestehen aber aus den restlichen 70% der Waren.

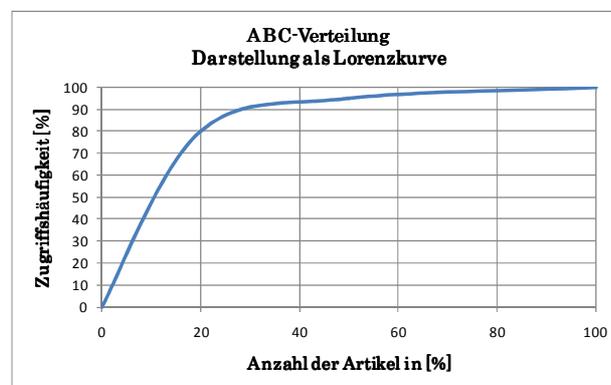


Abbildung 1-4: Beispielhafte 80/20 ABC Verteilung

Die Schnelldreher, die einen hohen Durchsatz in einem Lager haben, werden meist mit automatischen Lagern bearbeitet. Also kommen hier die WzM-Läger

zur Verwendung. Langsamdreher können sowohl mit WzM-Läger als auch mit MzW-Lägern kommissioniert werden, wobei hier im MzW-Lager, ein Kommissionierer für weniger Regalgassen zuständig ist als in einem C-Dreher Bereich. Dieser Bereich wird hauptsächlich mit den manuellen Lagern bedient. Von den verschiedenen Bereichen im Lager müssen die Aufträge weiter transportiert werden. Als Ladehilfsmittel (LHM) soll hauptsächlich an Standardbehälter (600x400mm) gedacht werden. Der Weg der LHM beginnt beim Auftragsstart. Über verschiedene Fördertechnik werden die notwendigen A-, B- oder C-Läger angefahren und der Auftrag kommissioniert. Dann kommt der Auftragsbehälter zum Versand und dem Warenausgang. Die Leerbehälter werden zuletzt wieder zum Auftragsstart gebracht und die Schleife beginnt von vorne. Die angesprochenen Bereiche beziehen sich auf Abbildung 1-1.

Der Materialfluss besteht im Generellen also aus zwei Schleifen. Die oben beschriebene Auftragschleife und die Schleife der Lagerbehälter. Diese werden im Wareneingang mit neuen Waren gefüllt und in die entsprechenden Läger gebracht, bis sie leer sind und wieder nachgefüllt werden müssen. Die angesprochenen Materialflüsse umfassen sowohl Tätigkeiten des Förderns und Sortierens, als auch das Lagern, Kommissionieren und Bereitstellen von Waren und Behältern in der Intralogistik.

Die Motivation zum Vergleich neuer Systeme stammt aus folgender Situation. Diese Firma plant für Kunden, welche Distributionszentren oder Produktionsstätten betreiben, die Lösungen um die Waren innerhalb der Betriebe zu bewegen. Distributionszentren sind Zwischenläger mit verteiler Funktion. Beispielhaft dafür anzuführen sind Knotenpunkte der Postzustellung und Zulieferer von Apotheken in der Pharmabranche. Auch die Verteilung von Nahrungsmittel und Kleidungsstücken von Zentralläger in die einzelnen Geschäfte wird über derartige Distributionslager bewerkstelligt. Im Zuge des Outsourcens von Teilbereichen durch große Hersteller, wurde auch dieses Gebiet an externe Firmen überantwortet. Die externen Firmen übernehmen somit den Auftrag, die Waren ihrer Kunden mit Hilfe von Distributionslägern an viele verschiedene Ziele fristgerecht zu liefern. Die Abhängigkeit der externen Firma von dem Hersteller ist sehr groß. Das Lager, die Fördertechnik und das Warehouse Management sind auf die Anforderungen des Herstellers ausgerichtet. Der Druck auf diese externe Firma wird von zwei Seiten verstärkt. Einerseits hat eine weitere Firma die Möglichkeit dem Hersteller diese Dienstleistung anzubieten, daher wird der Preisdruck erhöht. Andererseits wird durch die derzeitige Wirtschaftslage eine Finanzierung dieser Läger erschwert, Banken vergeben Kredite auf kurzfristige Zeit, somit müssen sich diese Läger schneller amortisieren. Die Sicherheit, dass eine Firma nicht durch ein billigeres Angebot von einer anderen Firma unterboten wird sinkt. Folglich müssen sich die Betreiber schon bei der Finanzierung Gedanken machen, wie in einem Fall des Auftragsverlustes zu reagieren ist. Auch daher kommt der Wunsch nach Flexibilität. Die bisher erstellten Läger bedienen sich hauptsächlich der örtlich fixierten Fördertechnik. Ein Umbau oder eine Anpassung an andere Artikel, Waren oder Anforderungen geht mit hohen Investitionen und einer zeitlichen Dauer von ungefähr einem Jahr einher.

Eine ähnliche Motivation findet sich bei Kunden im Produktionsbereich. Hier ist der Druck auf die Kunden die Schnellebigkeit der Produkte und dem

möglichst schnellen Reagieren auf den Markt. Daher sind auch hier flexible Produktionsstätten erwünscht, damit ein Umbau oder eine neue Modellierung für ein neues Produkt nicht zu kostspielig in Zeit und Finanzierungsmitteln wird.

Die Erfahrungen der Firma liegen im Bereich der Fördertechnik hauptsächlich bei Stetigförderern, wie zum Beispiel bei Rollenbahnen oder Gurtförderern. Diese sind hinsichtlich ihrer Leistung oft erprobt und im Einsatz bestätigt. Hinsichtlich Flexibilität ist diese Technik jedoch sehr eingeschränkt. Einmal ausgelegt, werden die maximal möglichen Leistungen erbracht, wenn höhere Leistungen gefordert werden, müsste eine aufwendige Erweiterung durchgeführt werden. Daher wird schon in der Planung eine Einschätzung des Marktes auf einen längeren Zeitrahmen gemacht. Veränderungen des Layouts werden also durch eine Leistungsreserve nach oben verhindert.

Aufgrund dieser Situation stellt sich die Frage, wie mehr Flexibilität erreicht werden kann.

1.1.1 Einsatz von FTS in der Vergangenheit

Fahrerlose Transportsysteme (FTS) haben ihre Anfänge bereits in den 50er Jahren des letzten Jahrhunderts in Amerika. Diese ersten fahrerlosen Fahrzeuge folgten einem aufgeklebten Streifen am Boden um Waren von A nach B zu transportieren ohne dabei von Menschen gesteuert zu werden. Die Lenkung wurde stattdessen von einem Stellmotor am Lenkrad des adaptierten Fahrzeugs realisiert. Dieser erste Versuch der Automatisierung von Unstetigförderern findet ab den 60er Jahren einen Aufschwung in Deutschland und Europa. Die Entwicklung der FTS Technik von 1963 bis in die 90er Jahre ist in Abbildung 1-5 dargestellt. Ausgelöst und unterstützt wurde diese Entwicklung durch die Verbesserung und Verkleinerung der Rechnersysteme. Die ersten Einsätze mit vielen Fahrzeugen haben in der Automobilindustrie stattgefunden. Eine Blütezeit erlebten die FTS in den 80er Jahren, seitdem hat sich die Anzahl an neu installierten Anlagen pro Jahr auf einem niedrigeren Niveau eingependelt. Die Anzahl von eingesetzten Fahrzeugen pro Anlage ist stetig gesunken. Den Grund dafür findet Prof. Elbracht in der Inflexibilität und dem hohem Investitionsbedarf der Systeme. Ein weiteres Problem wird in der Wartung und der täglichen Verfügbarkeit gesehen, welche teilweise nur unzureichend erfüllt werden können. Die Hoffnung, dass sich die FTS zu hoch flexiblen und den Materialfluss selbst steuernden Systemen entwickeln, hat sich für den Autor des Artikels nicht erfüllt (vgl. [ELB02]).

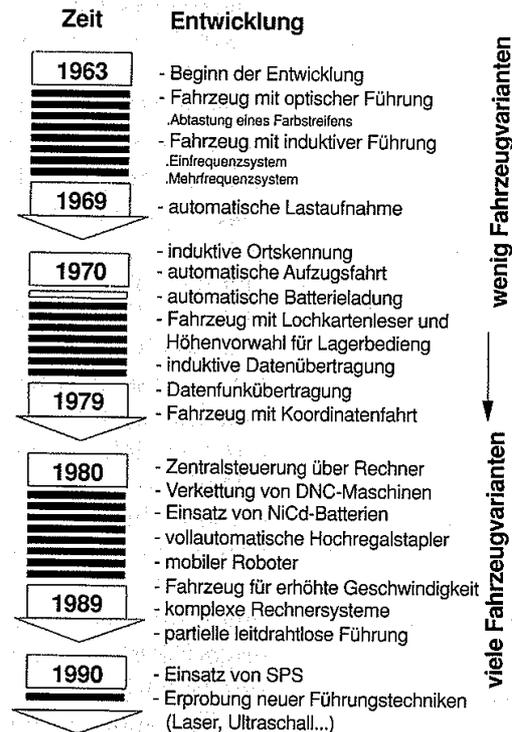


Abbildung 1-5: Entwicklung der FTS-Technik von 1963 bis in die 90er Jahre
(nach [ELB02] , Abb.1)

Gegensätzlich zu obiger Darstellung, werden FTS vom Verein Deutscher Ingenieure als in hohem Maße flexibel bezeichnet. Als weitere Vorteile von FTS werden folgende Punkte genannt:

- Verringerung der Herstellungskosten und Durchlaufzeiten
- hohe Zuverlässigkeit und Verfügbarkeit
- organisierter Material- und Informationsfluss; dadurch produktivitätssteigernde Transparenz innerbetrieblicher Logistikabläufe
- jederzeit pünktliche und kalkulierbare Transportvorgänge
- Minimierung von Angstvorräten und Wartebeständen
- Verringerung der Personalbindung im Transport und dadurch Senkung der Personalkosten (insbesondere beim Mehrschichtbetrieb)
- Minimierung von Transportschäden und Fehllieferungen; durch Vermeidung von Folgekosten

(vgl. [VDI05]).

Diese beiden kontroversen Ansichten zum Einsatz von Fahrerlosen Transportsystemen machen deutlich, dass viel Potential in den Systemen steckt. Die Möglichkeiten des Einsatzes sind so vielfältig wie die möglichen Varianten der Fahrzeuge. Was den Einsatz in der Vergangenheit jedoch bestimmt hat, sind die Arten der Spurführung und den aufwendigen oder teuren Rechnern zur übergeordneten Steuerung. Die Spurführung begann mit simplen optischen Sensoren und wurde später mit verschiedenen Leitdrahttechniken realisiert. Der bauliche Aufwand den diese Führungsarten hervorgerufen haben, konnte nicht als flexibel bezeichnet werden. Auch der Materialfluss war in dem Sinne nicht flexibel gestaltbar. Allerdings haben sich die Voraussetzungen seitdem verändert.

1.1.2 Einsatz von FTS in heutigen Unternehmen

Durch die technischen und elektronischen Entwicklungen der vorangegangenen Jahre, insbesondere durch die Miniaturisierung und die Steigerung der Leistungsdichte von Rechnern, haben FTS heute eine Vielzahl von Möglichkeiten der Anwendungen dazubekommen. Diese beginnen bei der einfacheren Spurführung durch im Boden eingelassene Magnete, die als Wegmarker fungieren, oder der Orientierung mit Hilfe von reflektierenden Markierungen an Wänden für Lasersensoren und gehen bis zu Ladekontrollsensoren und dem Planen welche Transporte mit dem Batterieladestand noch durchgeführt werden können. Das soll heißen, dass sich die Sensortechnik und die Leistungsfähigkeit der Fahrzeuge gesteigert haben. Damit sind weniger bauliche Maßnahmen als in der Vergangenheit notwendig. Die Flexibilität und Einsatzbreite dieser Systeme wird gesteigert.

Als ganz aktuelles Beispiel kann das LKH Klagenfurt genannt werden. Hier wird ein über 8 km Wegenetz mit fahrerlosen Transportfahrzeugen (FTF) versorgt. Näheres zu diesem Beispiel wird im Kapitel 2.2 gesagt werden.

Obwohl in der genannten Anlage eine große Anzahl an Fahrzeugen eingesetzt wird, ist der Einsatz einer großen Flotte in der Wirtschaft heute eher selten zu finden. Der Grund dafür ist noch immer in der Vielzahl von individuellen Lösungen zu suchen. Eine Serienfertigung für FTF gibt es nicht, da jeder Anwender eigens für ihn angepasste Varianten fordert und einsetzt. Der erste Schritt zu kostengünstigeren FTF wäre eine Modularisierung der einzelnen Baugruppen, damit könnten mehr Anwender, auf Basismodulen aufbauend, ihre Fahrzeuge für ihre Anforderungen anpassen.

Weiter ist heute eine zentrale Steuerung des Materialflusses üblich. Das heißt, das ganze System wird von einem Materialflussrechner überwacht und gesteuert, der Unterschied zwischen Stetigförderer und Unstetigförderer ist hier gering, da beide eine Steuerung benötigen.

Ein anderer Punkt, welcher noch zu erwähnen ist, ist die Notwendigkeit der Nachverfolgung einzelner Waren. Auf Stetigförderern sind die Wege der Waren klar nachzuvollziehen. Bei Unstetigförderern muss diese Nachvollziehbarkeit ebenfalls gegeben sein. Dafür können die Waren mit unterschiedlichen Technologien (RFID, Barcode, etc) dem Fahrzeug zugewiesen werden. Damit kann der Transport wie ein Arbeitsschritt protokolliert werden.

1.1.3 Der Schritt von FTF zum frei agierenden Fahrzeug

FTF wurden in den vorhergehenden Kapiteln betreffend ihre Entstehung und dem heutigem Einsatz erklärt.

Die nächsten Schritte, die im Sektor des automatisierten Transportes zu erwarten sind, betreffen zumindest zwei Punkte. Einerseits wird durch die Sensortechnologie bald ein Umfahren von Hindernissen möglich sein. Durch die höheren Speicherkapazitäten können dem Fahrzeug mittels Teach-In Funktion die gesamte Umgebung beigebracht werden. Aus diesem Wissen kann das Fahrzeug, wenn es vor einem Hindernis steht, alternative Routen zum Ziel berechnen. Eine ähnliche Entwicklung ist derzeit auch auf der Straße zu beobachten, dort wird dem Fahrer mit immer mehr Fahrassistenten das Fahren erleichtert. Für die Intralogistik heißt das, dass der Transport von Waren flexibler wird und

sich die Häufigkeit der notwendigen Eingriffe in Systeme verringern kann. Mit der Funktion, dass Fahrzeuge sich ihren Weg innerhalb gewisser Grenzen zu ihrem Ziel selbst berechnen können, fallen die notwendigen baulichen Maßnahmen, wie Wegmarkierungen, weg. Es werden keine Arten der Spurführung mehr benötigt. In der Wirtschaft ist diese Technologie noch nicht angekommen. Ein Grund dafür sind verschiedene Sicherheitsbestimmungen. Wenn der Einsatz der Fahrzeuge sich in Lagerbereiche erstreckt, wo eine Interaktion mit dem Menschen auftritt, muss die Sicherheit des Menschen in jeder Situation gewährleistet sein. Sicherheitskreise innerhalb des Fahrzeugs, die das Verhalten kontrollieren und redundant absichern treiben den Preis derzeit in die Höhe. In der nahen Zukunft wird sich dafür aber sicher eine Lösung finden.

Wenn es nicht zu einer Interaktion mit Menschen kommt, weil der Einsatzbereich sich auf definierte Bereiche beschränkt, muss auch dort der Zugang möglich sein um Wartungstätigkeiten durchführen zu können. Das Thema Sicherheit ist heute noch nicht gelöst.

Der zweite Punkt, der schon heute betrachtet wird, hat seinen Ausgang im Internet und dessen Entwicklung. Durch das Internet ist es zu einer globalen Vernetzung vieler Rechner und einer Informationsflut gekommen. Durch das Cloud Computing, kann jeder von überall auf eigene Daten zugreifen und ist überall erreichbar. Zwei Begriffe sollen hier angesprochen werden:

Das Internet der Dinge, bezieht sich auf eine Verknüpfung der virtuellen und der realen Welt. Durch die „radio-frequency identification“ Technologie (RFID) können Dinge mit ihrer Umgebung kommunizieren und sagen was sie sind, woher sie kommen und wohin sie wollen und anderes mehr.

In der Intralogistik würde das bedeuten, dass Waren miteinander kommunizieren, sich untereinander organisieren und gemeinsam einen Auftrag generieren könnten. Diesen Auftrag würden Fördermittel erhalten und die Waren an ihr Ziel bringen. Das wäre ein Schritt zur Dezentralisierung. Ein übergeordneter Materialflussrechner wäre in diesem Szenario nicht notwendig. Übergeordnet müsste zumindest eine Kommunikationsplattform bestehen. (vgl. [GüH10])

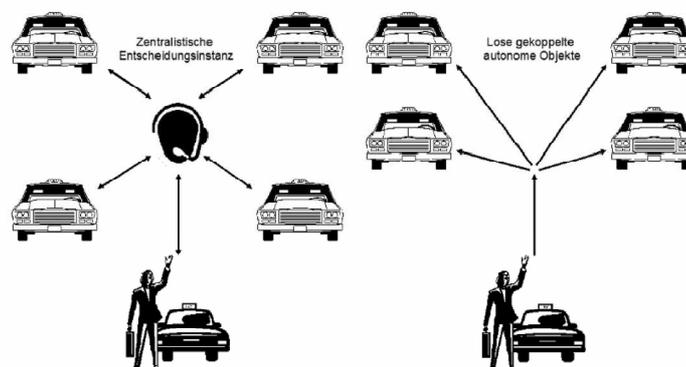


Abbildung 1-6: Illustration eines Beispiels zum Vergleich von zentralistischer und dezentraler Organisation (nach [BuH07] , S. 95, Abb. 2.)

Abbildung 1-6 zeigt einen Vergleich von zentralistischer zu dezentraler Organisation. Anstatt einer übergeordneten Entscheidungsinstanz, welche hier die Taxis zur Auftragsdurchführung auswählt, wird in der dezentralen Organisation

durch verschiedene Auswahlverfahren der Auftrag von einer Software Applikation gemacht. (vgl. [BuH07]).

Der Weg zu so einer Dezentralisierung ist noch ein weiter. Jede Entität innerhalb dieses Netzwerkes braucht für die Realisierung seine eigene Software Applikation, einen sogenannten Agenten. Diesen kann man sich vorstellen, als virtuelles Programm, das die Eigenschaften des realen Dinges kennt und mit den anderen Agenten um einen Auftrag verhandelt.

Schwarmintelligenz ist der zweite Begriff, der hier angesprochen werden soll. Dabei geht es um das Zusammenarbeiten einzelner FTF, im Englischen AGV (automated guided vehicle) genannt. In Anlehnung an die Natur und einen Ameisenschwarm ist man dabei einen sogenannten Ameisenalgorithmus zu entwickeln. Dieser soll einer Fahrzeugflotte ermöglichen selbstständig einen Materialfluss aufrecht zu erhalten. Dabei soll Kollisionsvermeidung, Anpassung an Auftragsschwankungen, reaktive Störungserkennung einzelner Fahrzeuge durch eine Vernetzung der Fahrzeuge und eine Weitergabe relevanter Informationen ermöglicht werden. Auch die frühe Auswahl alternativer Routen bei möglichen Staus durch Hindernisse jeglicher Art soll damit möglich sein. (vgl. [GHT10])

Die Veränderung im Verhalten von FTF macht diese Fahrzeuge nicht mehr nur zu Transportfahrzeugen, sondern zu frei agierenden oder autonomen Fördermitteln. Wobei vorerst die selbstständige Auswahl der Routen realisiert werden kann. Die dezentrale Steuerung wird, wenn überhaupt, erst die weitere Entwicklung darstellen. Zukünftig sollen jedenfalls ohne menschliches Zutun Entscheidungen getroffen werden, was Auftragsabwicklungen betrifft.

Das Ziel in der Wirtschaft einsetzbar zu sein, wird dieses Konzept jedoch nur langsam erreichen. Jede Ware, jedes Fahrzeug, jede Station die eine Entscheidung treffen kann, muss mit der Umwelt kommunizieren können um diese optimal zu treffen. Dadurch steigt die Komplexität der Programme und der Vernetzungsgrad jeder einzelnen Entität, das kann Anwender abschrecken.

Zusammenfassend hat das spurenlesende Fahrzeug innerhalb von 60 Jahren eine Entwicklung hinter sich, die besonders in den letzten Jahren stark beschleunigt wurde. Bald soll das autonome Fahrzeug wie auf einem Marktplatz um seine Aufträge mit anderen autonomen Fahrzeugen verhandeln können.

1.2 Aufgabenstellung und Ziel

Aufgabenstellung

Im Zuge der raschen Weiterentwicklung der FTF zu autonomen Fördermitteln stellt sich der Firma die Frage, in welchen Branchen sich diese Fördermittel effizient einsetzen lassen.

Diese Frage löst viele weitere Fragen aus. Besonders wichtig ist klarzustellen, was einen effizienten Einsatz ausmacht und in welche Richtung die Betrachtungen hier gehen. In der Aufgabenstellung durch die Firma wurde hier von einer wirtschaftlichen Beurteilung der Themen Flexibilität, Skalierbarkeit, Redundanz oder eines TCO („total cost of ownership“) für diese Systeme gespro-

chen. In den ersten Vorstudien zu dem Thema hat sich die erste Breite dieser Punkte dargestellt.

Flexibilität bedeutet Biagsamkeit, Anpassungsfähigkeit [DUD97]. Kriterien, die diese bewerten können, werden in [VDI05] definiert. Besonders flexibel gilt ein System dann wenn möglichst viele dieser Kriterien erfüllt werden:

- Integrationsfähigkeit in bestehende Strukturen
- Transport unterschiedlicher Güter
- Layout-Änderungen
- Verlagerbarkeit des Fördersystems
- Anpassung an wechselnde Leistungen im Netz
- Änderung der Förderreihenfolge
- Anpassung an einen wachsenden Automatisierungsgrad

Skalierbarkeit stellt die Fähigkeit eines Systems dar, dass mit mehr Ressourcen weniger Zeit zur Bearbeitung der Aufträge notwendig ist und dieses Verhalten linear ist. Wenn, zum Beispiel ein Fahrzeug für die Bearbeitung eines Auftrages eine gewisse Zeit benötigt, dann würde sich diese Zeit halbieren, wenn zwei Fahrzeuge zum Einsatz kommen. Dies ist ein Beispiel für gute Skalierbarkeit.

Redundanz ist, bei technischen Anlagen, das Vorhandensein einer Sicherheit gegen Ausfall. Durch das doppelte Ausführen von Antrieben oder eines zweiten Sensorkreises wird dies erreicht. Es kann auch durch einen vereinfachten Ersatz ein Notbetrieb sichergestellt werden.

TCO ist ein Begriff aus der Betriebswirtschaftslehre und steht für die Gesamtbetriebskosten. Dabei werden, gesondert von den Investitionskosten, die Kosten betrachtet welche durch die Nutzung der Investition anfallen. Besonders die Energie-, Wartungs- und Reparaturkosten spielen eine entscheidende Rolle. Der TCO wird verwendet um weiterreichende Investitionsentscheidungen zu erleichtern.

Diese Punkte können betrachtet werden, wenn bereits konkrete Eigenschaften eines Systems vorhanden sind. Bei dieser Arbeit handelt es sich um eine Vorstudie, also sind konkrete Systeme noch nicht vorhanden und können weder getestet noch bewertet werden. Daher wurde im ersten Stadium der Arbeit eine Anpassung der Aufgabenstellung durchgeführt.

Die angepasste Aufgabenstellung fordert einen Vergleich von bestehender Stetigfördertechnik mit autonomen Fördermitteln und eine Definition des Einsatzgebietes.

Ziel

Ziel der Arbeit ist es, eine Aussage zu treffen über den Einsatz frei agierender Fahrzeuge in der Intralogistik. Das Hauptaugenmerk liegt hierbei in der Leistung eines solchen Systems.

Im ersten Schritt wird durch eine Literaturrecherche der Ist-Stand der Technik und der Forschung erhoben. Weiter werden die unterschiedlichen Bereiche in den Lagern beleuchtet und logistische Anforderungen erhoben. Die Anforderungen an ein neues System werden festgestellt. Im zweiten Schritt wird ein Vergleich der Systeme im theoretischen durchgeführt. Dabei wird vom Groben ins Feine gearbeitet. Methoden zur Berechnung der Leistung sollen definiert werden. Im nächsten Schritt werden die ausgearbeiteten Methoden auf allgemeine und konkrete Szenarien angewendet. Eine Auswertung der Ergebnisse soll stattfinden.

Zum Schluss wird für die Projektierung der Firma eine Basis für ein Lastenheft ausgearbeitet. Dieses soll Auslegungsregeln und Vorschläge für die Entwickler des Systems mit autonomen Fördermitteln beinhalten.

2 Problemanalyse und Literaturrecherche

Der in Unterkapitel 1.2 angesprochene Vergleich zwischen der Stetigfördertechnik und autonomen Fördermitteln erfordert einige Grundkenntnisse über diese beiden Systeme. Diese Grundlagen werden in diesem Kapitel erarbeitet. Die Kennzahlen für diesen Vergleich werden erklärt. Weiter wird der Stand der Technik anhand einer bestehenden Anlage erörtert. Dafür werden die Kenntnisse aus einem Besuch der Anlage herangezogen. Die Informationen aus der umfassenden Literaturrecherche werden in Themengebiete gegliedert und genau behandelt.

2.1 Grundlagen

In diesem Kapitel werden die Grundlagen für den Vergleich der beiden Förder-techniken erläutert. Besonders hinsichtlich des Materialfluss. Es werden auch Vorteile und Nachteile der einzelnen Bereiche aufgezeigt. Nicht betrachtet wird die genaue technische Ausführung, da diese für einen leistungsrelevanten Vergleich nicht genau bekannt sein muss.

In der Einleitung wird eine Klassifizierung der Fördermittel angesprochen. Die grobe Unterteilung lautet in stetige und unstetige Förderer. Für eine weitere Untergliederung wird hier auf [HSN07] verwiesen und nur beispielhaft für beide Gruppen ein paar Vertreter genannt:

Stetigförderer:

- Rollenbahn
- Rutsche
- Bandförderer
- Kettenfördersysteme

Unstetigförderer:

- Regalbediengerät
- Verschiebewagen
- Stapler
- Elektrohängebahn

Die Eigenschaften der Stetigförderer sehen folgendermaßen aus. Der Fördergutstrom kann kontinuierlich, bei Schüttgut, oder diskret kontinuierlich, bei Stückgütern, sein. Die Leistung von einem Stetigförderer hängt von

- Fördergeschwindigkeit und
- gemitteltem Stückgutabstand ab und

kann für Standardbehälter Grenzleistungen zwischen 4.100 TE/h mit einem Bandförderer und 1.200 TE/h mit einem Tragkettenförderer erreichen. (vgl. [GUD05])

Die Gleichung dazu lautet:

$$\lambda_{st} = \frac{v_F}{e_{st}} \dots \left[\frac{1}{s} \right] \quad \text{Gl. 2-1}$$

λ_{st} ... Durchsatz auf Stetigfördertechnik

v_F ... Fördergeschwindigkeit

e_{st} ... gemittelter Stückgutabstand

Die Vorteile eines Stetigförderers sind:

- einfacher Aufbau
- hohe Betriebssicherheit
- geringer Bedienungsaufwand
- große Mengen förderbar
- bei entsprechender Auslastung ein geringer Energiebedarf
- gut automatisierbar
- pufferfähig

Der große Nachteil von Stetigförderern ist, dass sie ortsfeste Anlagen sind und daher nicht flexibel gegenüber Änderungen des Layouts sind. Als aufgeständerte stetige Fördermittel stellen sie außerdem eine Behinderung für andere Flurförderer oder Personen dar. (vgl. [HSN07])

Unstetigförderer haben gegenüber den stetigen Fördermitteln den großen Vorteil, dass sie eine hohe Flexibilität aufweisen und in allen möglichen Varianten auftreten. Deshalb sind sie für jede Transportaufgabe einsetzbar. Sie können manuell betrieben werden, wie zum Beispiel: Ameisen, Gabelstapler und Hochregalstapler.

Eine Automatisierung wie in Regalbediengeräten, Elektrohängebahnen oder in FTS ist der zweite Einsatzbereich. In dieser Arbeit bekommen FTS die meiste Aufmerksamkeit. Positiv ist auch, dass bei Störungsfällen nicht das ganze System stillsteht, sondern einzelne Fahrzeuge zur Wartung herausgenommen werden können. Weitere Vorteile wurden bereits im Kapitel 1.1.1 beschrieben.

Die Berechnung der Förderleistung von Unstetigförderern hängt von verschiedenen Komponenten ab und kann nur für ein bestimmtes Fahrzeug berechnet werden. Notwendig sind einige grundlegende Eigenschaften die ein System hat:

- Fahrgeschwindigkeit
- Dauer der Übergabe bei Auf- oder Abgabestationen
- Anzahl der zu transportierenden Waren
- Zeit zum Feinpositionieren bei automatisierten Übergaben
- Wegstrecken und damit das Lagerlayout
- Fahrstrategien
- Wartezeiten

Der Durchsatz für einen Transport von A nach B würde sich demnach für ein einzelnes Fahrzeug und einer transportierten Ware mit folgender Gleichung errechnen lassen:

$$\lambda = \frac{3600}{2 \cdot t_{FP} + t_{Auf} + \frac{S_{Hin}}{V_F} + t_{Ab} + \frac{S_{Rück}}{V_F}} \cdot \left[\frac{TE}{h} \right] \quad \text{Gl. 2-2}$$

Die Leistung berechnet sich aus den benötigten Einzelzeiten für den Transport. Bei beiden Stationen wird eine Feinpositionierung benötigt. Abbildung 2-1 bil-

det die Gleichung grafisch ab. Die Rückfahrt ist hier als Leerfahrt angenommen. Verschiedene Strategien könnten aber auch diese Zeit nutzbar machen.

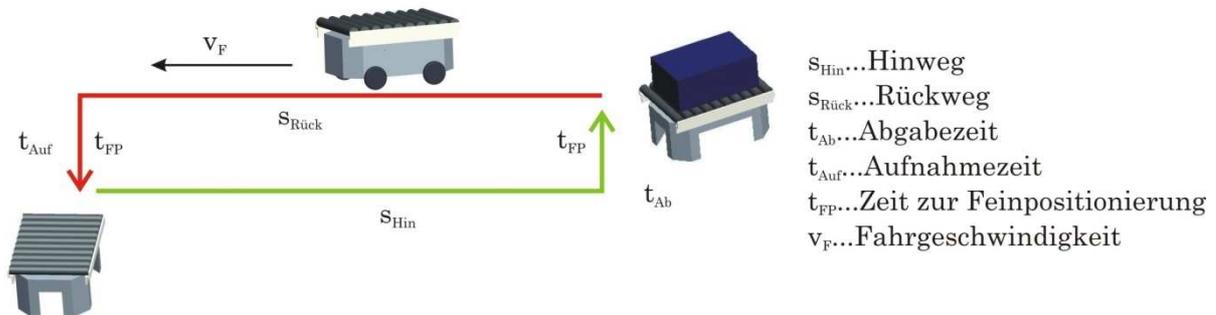


Abbildung 2-1: Transport A -> B mit autonomen Fahrzeug

Im Grunde gilt jedoch der Satz, dass die maximale Leistung eines Systems von der niedrigsten Leistung der Einzelkomponenten abhängt. Eine Herangehensweise und konkrete Berechnungsbeispiele folgen in den Kapiteln 3 und 4.

Nachteilig für fahrerlose Transportsysteme im Bereich Verwaltung wirkt sich der Umstand aus, dass die Fördergüter beim Transport den einzelnen Fahrzeugen zugeteilt werden müssen um eine Nachverfolgbarkeit bereit zu stellen. Ein höherer Steuerungsaufwand wirkt sich ebenfalls negativ auf den Betrieb aus. Es müssen entweder pro Fahrzeug eine Person oder hoch entwickelte und bisher teure Sensortechnik eingesetzt werden.

2.2 Stand der Technik

Im Moment werden von der Firma zur Bearbeitung des Materialflusses Systeme und Kombinationen aus verschiedenen Stetigförderern eingesetzt. Der Einsatz der verschiedenen Förderer hängt von der geforderten Leistung und den zu transportierenden Waren ab. Zur Behälterbeförderung werden Rollenförderer eingesetzt. Bei kleineren Waren ist ein Gurtförderer notwendig, da diese sonst nicht weiterbefördert werden können.

Die Stetigförderer sind von ihren Eigenschaften und Leistungen durch langjährigen Einsatz gut bekannt und werden hier auch nicht näher beleuchtet. Um einen Vergleich mit den Leistungen von frei agierenden Fahrzeugen machen zu können, wurden drei Klassen definiert.

Förderleistung der FT in [TE/h]	Preis in [€/m]
300 – 700	1200
700 – 1000	1400
> 1000	1600

Tabelle 2-1: Leistungstabelle derzeit eingesetzter Fördertechnik

Für jede der einzelnen Leistungsklassen sind im Preis auch die notwendigen Puffertechniken, Ein- und Ausschleusungen eingerechnet. In der Projektierung wird mit diesen Werten ein Lager vorab ausgelegt. Die Verfügbarkeit der

Stetigförderer liegt bei 98,5 – 99 % und die Kosten für Wartung und Stromverbrauch betragen jeweils 1,5% der Investitionskosten. Diese Werte wurden für den weiteren Vergleich herangezogen.

Im Bereich der frei agierenden Fahrzeuge will die Firma den Wissenstand ausbauen und beginnt Anlagen mit dieser Technik auszustatten. Um einen Überblick über den Ist-Stand eines solchen Systems zu bekommen, wird die Anlage im LKH Klagenfurt herangezogen. Diese Anlage stellt eher einen Spezialfall denn einen Einsatz in der Intralogistik dar. Die Technologie der Fahrzeuge und die Auslegung des Systems können den Entwicklungsstand repräsentieren. Abbildung 2-2 zeigt eine parallelisierte Übergabestation mit den eingesetzten Fahrzeugen.



Abbildung 2-2: FTS im LKH Klagenfurt

Im LKH Klagenfurt wurde im Jahr 2008 ein FTS realisiert mit der Flottengröße von 60 Fahrzeugen. Es handelt sich um spurgeführte Fahrzeuge. Auf jedem Meter der Strecke ist ein Magnet im Boden eingelassen um dem Fahrzeug selbstständige Fahrkurskorrekturen zu ermöglichen. Das ergibt auf einem 8 km verzweigten Wegenetz und Fahrspuren in zwei Richtungen 15.000 Magneten. Diese sind mit Hilfe eines Vermessers genau platziert. Der bauliche Aufwand ist somit nicht unerheblich. Die Lastaufnahme der Unterfahrschlepper erfolgt über einen Spindelhub, mit dem die bis zu 500 kg schweren Container angehoben werden. Die Fahrzeuge haben drei Räder. Das Antriebsrad liegt vorne und ist gesteuert, die beiden hinteren sind mit Sensoren ausgestattet und geben die Daten für die Odometrie. Jedes Fahrzeug kostet um die 50.000 €. Wenn die Fahrzeuge zusätzlich mit einem teuren Kreiselsensor ausgestattet wären, würde sich die notwendige Anzahl der versenkten Magneten verringern, da die Navigation genauer werden würde. In den Fahrzeugen sind Blei-Gel Akkus verbaut, für ungefähr 800 €. Bei der Ladestrategie wird noch viel experimentiert. In Abbildung 2-3 erkennt man das Innenleben, rechts ist das Bugrad, im hinteren Bereich erkennt man die großen Batterieeinheiten.



Abbildung 2-3: Zur Wartung geöffnetes Fahrzeug

Je nach Auslastungsgrad sind bis zu 45 Fahrzeuge in den Spitzenzeiten im Betrieb. Sie liefern den Krankenhausstationen Container mit Essen und sauberer Wäsche und transportieren Leerbehälter, Müllbehälter und gebrauchte Wäsche zurück zu Wäscherei, Entsorgungsstation und Küche. Ein Fahrzeug wickelt pro Tag durchschnittlich 30 Transporte ab. Die Auswahl hängt dabei nicht davon ab, wie viele km von einem Fahrzeug bereits gefahren wurden. Daraus folgt, dass manche sehr viele gefahrene Kilometer aufweisen, manche weniger. Die Leerfahrten werden nicht mit aufgezeichnet, nur die Transporte werden gezählt und nachverfolgt. Eine Vorauslegung des Projektes hat es im Sinne einer Machbarkeitsstudie gegeben. Eindeutig zu erkennen ist, dass beim Betreiben einer solchen Anlage die Funktion im Vordergrund steht. Hier ist die Technik für Hindernisumfahrung noch nicht im Einsatz.

Das System wurde von der Firma DS-Automotion installiert, diese hat einen laufenden Wartungsvertrag. Die Wartungskosten des Systems liegen bei 3% der Investitionskosten jährlich.

Die realisierte Anlage im LKH Klagenfurt, dient als gutes Beispiel für den Stand der Technik. Deutlich wird, dass es für jeden Anwendungsfall eigene teilweise individuelle Lösungen von Fahrzeugen gibt. Das macht die Entwicklung von Fahrzeugen teuer. In der Planung von neuen Anlagen werden Machbarkeitsstudien und Simulationen durchgeführt. Eine analytische Rechnung ist wegen der vielen Parameter, die das System beeinflussen kann, nur schwer realisierbar.

2.3 Literaturrecherche

Bei einer umfassenden Suche nach Literatur über „AGV“ und „Fahrerlose Transportsysteme“ in verschiedenen Datenbanken wurde eine Vielzahl von Berichten gefunden. In diesem Abschnitt werden sie in Themenbereiche gegliedert und die Informationen aufgearbeitet.

In folgende Bereiche werden die Informationen in diesem Kapitel eingeteilt:

- Ausarbeitung und Vergleich von verschiedenen Fahrstrategien
- Kollisionsvermeidung und Blockierungen
- Berechnungen zur Flottengröße

Bei SCHULZE wird das Thema ganz allgemein beleuchtet und als überaus zukunftssträftig beschrieben. Besonders durch die Entwicklungen in der Sensortechnik sollen sich AGV – Systeme besser einsetzen lassen. Eine Modularisierung der Technik, sodass ein schnelles Austauschen der Bauteile in den Fahrzeugen möglich wird, soll angestrebt werden. Als Beispiel zum Einsatz der neuen Technik, durch die Möglichkeiten der verschiedensten Sensoren, wird ein System vorgestellt. Dieses soll dem Kommissionierer in einem „Mann zu Ware“ Lager folgen, bis der Auftrag vollständig aufgeladen ist und diesen dann zu einer Bearbeitungsstation bringen. Abbildung 2-4 stellt diese Variante für einen Einsatz dar. (vgl. [SBB08])

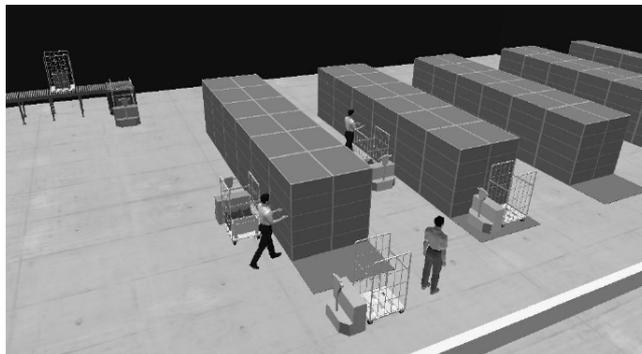


Abbildung 2-4: AGV-System mit Personenverfolgung (nach [SBB08] , Fig.1)

Zur allgemeinen Analyse und dem Design eines FMS (flexible manufacturing system) wird bei UM, CHEON und LEE ein Ansatz gesucht. Dieser kann zur Berechnung und Simulation von Durchsatz, Überlastungen und Verwendung eines Lagerlayouts verwendet werden. Mit Hilfe eines analytischen Simulationsmodells wird eine Aussage über ein System erhalten, das mit analytischen oder mathematischen Modellen schwer beschrieben werden kann. Es wird eine Vorgehensweise erklärt, wie diese Aussagen zu den Leistungen in dem vorliegenden hypothetischen Fall gefunden werden. Die Herangehensweise mit Hilfe von MONLP (multi-objective non-linear programming) und ES (evolution strategy) kann sich für weitere Untersuchungen als ein Werkzeug herausstellen. (vgl. [UCL09]

2.3.1 Fahrstrategien

Im Thema über Fahrstrategien gibt es bereits unzählige verschiedene Betrachtungen, Forschungen und Simulationsstudien. Dabei geht es um die Zuteilung der Waren zu den Fahrzeugen und deren Auswahl. Bei KOO und JANG werden Systeme mit fixen Routen behandelt. Wobei mit fixen Routen auch eine Einbahnregelung gemeint ist. Die nächsten Studien wurden über das Verhalten von Systemen gemacht, bei welchem die Routen in beide Richtungen verwendet werden konnten.

Bevor diese Überlegungen jedoch betrachtet werden, muss das übergeordnete mögliche Verhalten der Systeme bei der Auswahl der Fahrzeuge erklärt werden. Dabei gibt es zwei verschiedene mögliche Situationen: Bei der Auftragsanforderung ist

- ein oder mehrere Fahrzeuge verfügbar
- oder es ist keines verfügbar.

Im ersten Fall kommt es zur sogenannten Maschinen-motivierten-Auswahl, im zweiten Fall muss die Anfrage auf eine Warteposition gestellt werden, dies wird Fahrzeug-motivierten-Auswahl genannt. Diese beiden Varianten werden in Abbildung 2-5 dargestellt.

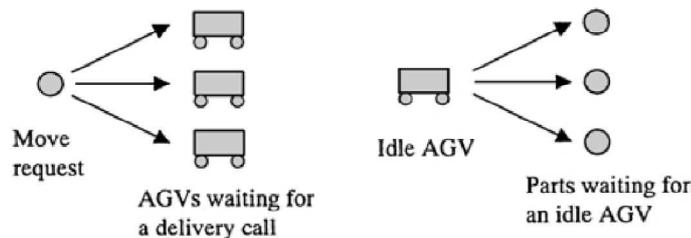


Abbildung 2-5: links: Maschinen-motivierte-Auswahl, rechts: Fahrzeug-motivierte-Auswahl (nach [KOJ02] Fig. 2)

Sobald dann ein Fahrzeug keinen Auftrag mehr bearbeitet, wird diesem ein Auftrag aus der Warteschlange zugeteilt. Die zuvor angesprochenen Fahrstrategien und Auswahlregeln kommen bei der Maschinen-motivierten-Auswahl zum Tragen. Hier muss zwischen den freien Fahrzeugen ausgewählt werden. Dabei gibt es verschiedene Möglichkeiten. Folgende AGV können ausgewählt werden:

- ein zufälliges
- das örtlich am nächsten liegende
- das am längsten verfügbare
- das am wenigsten verwendete

Auch für die Fahrzeug-motivierte-Auswahl gibt es verschiedene Regeln wie die Auswahl:

- einer zufälligen Maschine
- der FCFS (first come first serve) Regel
- die Auswahl der Maschine mit der kürzesten Anfahrt
- usw.

Welche der beiden Zuteilungsarten stattfindet hängt vom System ab. Gibt es genügend Fahrzeuge wird die Auswahl immer von der Maschine, oder der Station abhängen. Bei KOO und JANG wird die Wahrscheinlichkeit für die Maschinen-motivierte Auswahl mittels folgender Gleichung berechnet.

$$p = (1 - u^n) \quad \text{Gl. 2-3}$$

u ... Fahrzeugverfügbarkeit in %
n ... Anzahl der Fahrzeuge

Mit diesem Ansatz lässt sich die durchschnittliche Transportzeit für eine bestimmte Strategie über Kombinatorik berechnen. Zur Berechnung der Leerfahrtzeit muss die Wahrscheinlichkeitsrechnung herangezogen werden. (vgl. [KOJ02])

Bei dieser Studie hat in der Berechnung der Transport- und der Leerfahrtzeit der Parameter der Routenauswahl keine Berücksichtigung genommen. Bei LEE werden die Aufnahmeregeln ebenfalls beleuchtet und verschiedene Simulationen mit den unterschiedlichen Kombinationen der Aufnahmeregeln durchgeführt. Es wird hierbei auch die Steigerung der Leistung durch eine Mehrfachaufnahme berücksichtigt. Dabei kommt es zu dem Problem, dass ein teilgeladenes Fahrzeug auch wieder Waren aufnehmen könnte, wenn es bei einer Station mit Waren, die auf einen Transport warten, vorbei kommt.

Für die Aufnahme von zusätzlichen Waren werden folgende Strategien in dem Artikel betrachtet. Es werden also nur Waren aufgenommen; die

- zu derselben Zielstation müssen
 - zu der nächsten Station müssen, damit wird die Fahrdistanz gering gehalten
 - zu der Station mit der längsten Ausgabeschlange müssen
 - zu der Station mit der kürzesten Eingangsschlange müssen
 - zuerst der momentane Schlange hinzugefügt wurden.
- (vgl. [LeS06])

Nach dem Überwinden des Problems welche Waren aufgenommen werden, wird das Problem der Reihenfolge der Lieferung erkannt. Folgende Regeln sind hier dafür definiert worden. Es wird die Ware zuerst geliefert, die

- zur nächstliegenden Station muss
- die zuerst aufgenommen worden ist (FIFO, first in first out)

Diese Regeln werden in der Studie verschieden kombiniert, meist mit einem gewissen Zeitlimit, sodass keine Ladung zu lange im System verbleibt. Als Einschränkung wird definiert, dass die Fahrzeuge pro Strecke nur in eine Richtung fahren können und sich nicht gegenseitig überholen können. Außerdem ist das Layout in Zonen eingeteilt und diese können nur einzeln befahren werden. Das Aufladen der Batterien findet auf dafür vorgesehenen Strecken statt.

Zusammenfassend wird in der Studie gesagt, dass die Aufnahmeregeln welche das Warten und die Blockierung von Arbeitsstationen vermeiden, bessere Leistungen im System hervorrufen als die Auswahl von naheliegenden Stationen. Die Strategien mit den am nächsten liegenden Stationen haben allerdings

in Durchflusszeiten und der Anzahl von Teilen in Bearbeitung besser abgeschnitten. Die Flexibilität kann aber auch eine Überladung des Systems verursachen. Auch haben die Aufnahmeregeln mehr Einfluss auf die in der Simulation getesteten Anlagen als die Abgaberegeln. Schlussendlich wird noch erwähnt, dass ein Erhöhen der Flottengröße nicht immer zu einer höheren Leistung führt. (vgl. [LeS06])

Auch bei HO und LIU werden verschiedene Aufnahme- und Abgaberegeln simuliert und getestet. Hier werden ebenfalls Fahrzeuge mit einer Mehrfachaufnahme auf Leistung und auch auf Verspätungen der Ladungslieferung getestet. Es werden ähnliche Regeln wie bei LEE (siehe oben) definiert. Wobei die Routen ebenfalls nur in eine Richtung gefahren werden können und die Übergaben bei den Maschinen so angeordnet sind, dass immer zuerst eine Abgabe stattfindet, bevor bei der gleichen Maschine eine Aufnahme durchgeführt werden kann. Es werden 12 Aufnahmeregeln und 6 Abgaberegeln definiert. Als Ergebnisse werden die Leistungen der unterschiedlichen Kombinationen der Regeln verglichen. Unter den Aufnahmeregeln schneiden diese besser ab, die die längste Warteschlange an der Aufnahmestation berücksichtigen, dabei können mehr Waren auf die Fahrzeuge geladen werden. Wenn es um die Abgaberegeln geht, ist die Kombination besser, welche bei der Aufnahme Waren mit dem gleichen Ziel ausgewählt hat. Denn mit dieser können gleich mehrere Artikel mit der gleichen Route zu einer Maschine transportiert werden. Das wirkt sich positiv auf den Durchsatz aus. Dabei wird ersichtlich, dass Kombinationen mit einer ähnlichen Logik am besten zusammen arbeiten. Also Regeln wie GQL (greatest queue length) und IDF (identical destination first). Die schlechteste Leistung in dieser Studie wird durch die Kombination der Regeln SAST (smallest average slack time) mit EDTF (earliest due time first) und LTSF (longest time in system first) erreicht. SAST ist die kleinste durchschnittliche Schlupfzeit, also die Zeitdifferenz die übrig bleibt, wenn von der Zeit zum Liefertermin die Bearbeitungszeit abgezogen wird. Sozusagen eine Reservezeit. Wenn diese negativ wird, kann der Liefertermin nicht eingehalten werden. EDTF bezeichnet die am nächsten liegende Ankunfts- oder Lieferzeit und die Regeln dazu wählt bei der Aufnahme der Waren, jene mit der nächsten Lieferzeit. Die Leistung in Durchsatz und durchschnittlichen Verspätungszeit des hier getesteten Systems mit diesen Regeln ist jedoch die schlechteste. (vgl. [HoL09])

Zusammenfassend zeigt sich, dass es viele Varianten an Fahrstrategien gibt. In den beschriebenen Studien lässt sich herauslesen, dass manche besser für ein System geeignet sind als andere. Durchwegs soll der Zusammenhang zwischen den Bearbeitungszeiten in den Stationen, die Anzahl der im Prozess befindlichen Waren und die Transportzeit genauer betrachtet werden um eine neue Anlage auszulegen.

2.3.2 Blockierungen

Ein anderer Punkt, der hier erwähnt werden soll, ist die Vermeidung von Blockierungen. Blockierungen oder „dead-locks“ sind das worst-case Szenario in einer Anlage mit fahrerlosen Transportfahrzeugen. Wobei der Ort für diese Situation unterschiedlich sein kann. Es kann zu Blockierungen auf der Strecke und bei den Übergaben kommen.

In den heute eingesetzten Anlagen werden für jede Fahrtrichtung eigene Spuren gelegt. Wenn es dazu kommt, dass dort ein Hindernis auftritt, dann können die Fahrzeuge den Hindernissen bisher nicht ausweichen. Das Fahrzeug fährt erst weiter wenn der Weg wieder frei ist. Bei anderen Systemen werden Spuren auch in beide Richtungen genützt. Hier muss ein Algorithmus vorhanden sein, der nur einem Fahrzeug die Durchfahrt durch diesen Streckenteil erlaubt. Sonst stehen sich zwei Vehikel mit entgegengesetzter Fahrtrichtung im Weg und rufen eine Blockierung für diesen Streckenabschnitt hervor.

Bei den Stationen kann es durch verschiedene Ereignisse zu Stauungen oder Blockierungen kommen. Es kann vorkommen, dass die automatische Übergabe einer Ware aufgrund eines Winkelfehlers nicht korrekt durchgeführt werden kann, hier muss dieser Fehler korrigiert werden. In so einer Situation kommt es zu einer Blockierung der Station. Zu Stauungen kann es kommen, wenn mehrere Fahrzeuge bei einer Station eine Übergabe zu tätigen haben. Wenn die Fahrzeuge einer Spur folgen, wird eine Warteschlange gebildet, die abgearbeitet wird. Bei frei verfahrenen Fahrzeugen müssen Regeln aufgestellt werden, damit bei dem Warten auf Bearbeitung keine chaotischen Zustände auftreten und zufahrende Fahrzeuge den Platz für wegfahrende verstellen.

Wie zu erkennen ist, sind die Möglichkeiten von Blockierungen mannigfaltig. In der Literatur sind bereits viele Herangehensweisen und Studien zu diesem Thema durchgeführt worden. Bei YOO (vgl. [YSC05]) wird zur Vermeidung von Blockierungen ein neuer Algorithmus erklärt. Oft kommt noch ein sogenannter DPA (deadlock prevention algorithm) zur Verwendung, der auf Petri Netze aufgebaut ist. Ein Petri-Netz ist eine Methode verschiedene, meist diskrete Systeme zu modellieren. Dabei werden unterschiedliche Komponenten verwendet um Signale, Strecken und Stationen zu einem System zusammenzufügen. Die Petri-Netze werden im Vorhinein zum Layout passend gebildet und können später nur mit großem Aufwand an Änderungen angepasst werden. Dadurch wird eine Blockierung bereits in der Design Phase der Anlage verhindert. Durch erhöhte Anforderungen an Flexibilität ist diese Methode nur kompliziert an zu wenden. Mit Hilfe eines DAA (deadlock avoidance algorithm) soll diese Anpassung an Veränderungen im System erleichtert werden. Dabei wird hier immer eine Einteilung der Fahrzeuge in Zonen durchgeführt.

Eine Weiterentwicklung stellt der Artikel von HO und LIAO dar. Drei Methoden für eine Verhinderung von Blockierungen werden hier angesprochen. Die erste verwendet, wie oben schon erwähnt, eine Vorab-Modellierung der Pfade, sodass keine Kollisionen entstehen können. In der zweiten Methode werden die Fahrwege aufgrund der Position der Maschinen berücksichtigt, dabei ist keine Echtzeitfähigkeit vorhanden. Zur dritten Methode zählt die Einteilung in Zonen. Dabei werden hier die Zonen dynamisch eingeteilt und kontrolliert. Weiterhin wird nur ein Fahrzeug einer Zone zugeteilt. (vgl. [HLi09])

Der Fortschritt bei der Behandlung von Blockierungen zeigt, dass alles in Richtung Flexibilität geht. Allerdings werden die Fähigkeiten der Fahrzeuge in der bisher erwähnten Literatur nicht näher berücksichtigt. Zum Einsatz kommen spurgeführte Fahrerlose Transportfahrzeuge, die in der englischsprachigen Literatur als AGV (automated guided vehicle) bezeichnet werden.

Erwähnung finden soll hier auch die Studie von RAJOTIA und SHANKER. Diese arbeiten die Vorteile von beidseitig befahrbaren Wegen, im Vergleich zu einseitig befahrenen Wegen heraus.

Dabei wird der Mehraufwand bei in beiden Richtungen befahrenen Routen dem höherem Durchsatz und der möglichen Einsparungsmöglichkeit von Fahrzeugen gegenüber gestellt. Auch die Flexibilität ist dabei höher als bei Einbahnrouden. Der Mehraufwand wird besonders bei Kreuzungen deutlich, da hier die Fahrzeuge auf das Einfahren in Strecken warten müssen, sonst kommt es hier zu Blockierungen aufgrund von Gegenverkehr in einspurigen Bereichen. Also werden hier Pufferzonen mit erhöhter Kapazität notwendig. Ebenfalls erkannt wird in dem Artikel, dass ab einer optimalen Fahrzeuganzahl, eine Erhöhung dieser nur die Warte- und Standby-Zeiten von Fahrzeugen vergrößert. (vgl. [RaS98])

Aus einem anderen Bereich mit einer ähnlichen Problemstellung beschäftigen sich FURMANS und HUBER. Hier wird mittels Bedientheorie eine Modellierung der Blockiervorgänge in manuellen Kommissionier Systemen aufgestellt. (vgl. [FHW09]) Der Weg eines Kommissionierers in einem „Mann zu Ware“ Lager wird in Felder aufgeteilt. Die Felder haben keine Warteposition und können nur von einem Arbeiter besetzt werden. In Abbildung 2-6 ist diese Situation dargestellt. Zu den einander gegenüberliegenden Regalpositionen in einem Gang gibt es nur jeweils eine Entnahmeposition für den Kommissionierer und auch an den Stirnseiten gibt es nur ein Feld. Zur Basisstation gibt es n Vorfelder, die als Wartefelder für die Basis bezeichnet werden können.

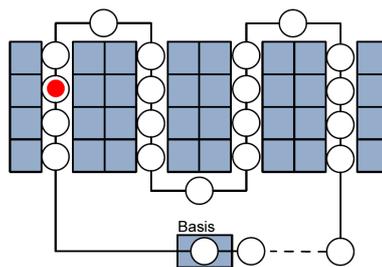


Abbildung 2-6: Felddarstellung in "Mann zu Ware" Lager (nach [FHW09] , Abb. 4)

Es werden auch verschiedene Gangstrategien erwähnt die hier nicht relevant sind. Interessant ist die betrachtete Auswirkung von Blockierungen. Eine Blockierung kann in einem Gang oder an der Basisstation auftreten, in dem ein Kommissionierer einem anderen das Feld blockiert. Bei der Berechnung der Leistung eines solchen Kommissionier-Systems wird erkannt, dass die Anzahl an Kommissionierern die Leistung beeinflusst. Anders als in der Literatur bisher angenommen ist das Verhältnis der Leistung jedoch nicht linear mit den eingesetzten Arbeitern. Ab einer gewissen Zahl beginnen sich die Kommissionierer gegenseitig zu behindern. Die daraus entstehenden Warte-

oder Stillstandzeiten verringern den Durchsatz, sodass es zu keiner linearen Abhängigkeit kommt.

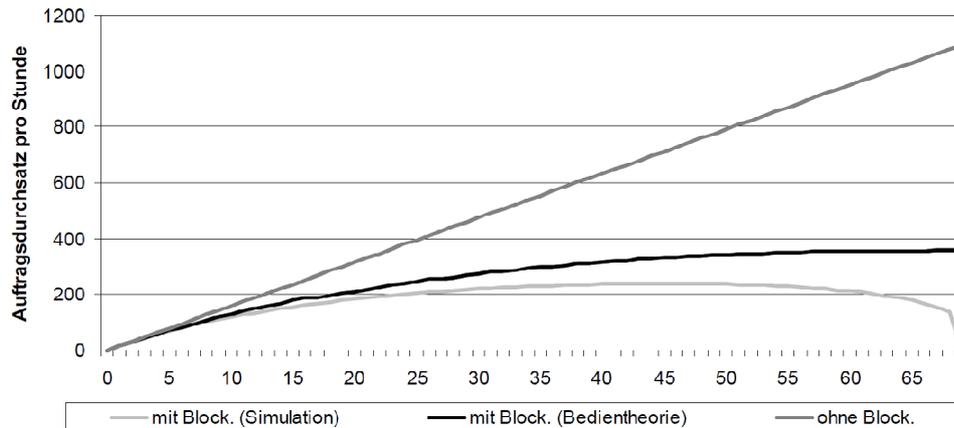


Abbildung 2-7: Verlauf pro Kommissionierer (nach [FHW09], Abb. 10)

Abbildung 2-7 zeigt den Verlauf der Leistung bei den eingesetzten Kommissionierern. Dabei ist die lineare Funktion, die statische Berechnungsgrundlage für viele Anlagen. In der Berechnung mit der Bedientheorie, wie sie in dem Artikel aufgestellt wird nähert sich die Leistung einem Grenzwert an. Die Leistung steigt auch mit jedem Kommissionierer nicht mehr gleichmäßig an. Es ist ersichtlich, dass diese sich gegenseitig zu beeinflussen beginnen. Schließlich wird ein Vergleich zwischen den Ergebnissen einer Simulation mit Blockierungen und der verwendeten Bedientheorie durchgeführt, dieser ist in Abbildung 2-7 dargestellt. Die Ergebnisse der Simulation passen bis zu einer bestimmten Anzahl an Arbeitern mit den Ergebnissen der Bedientheorie zusammen. Zum Schluss zeigt sich in der Simulation, dass das System überlastet ist. Es kommt zu einem Abfall in der Leistung und zu einem Deadlock.

2.3.3 Flottengröße

Als letzten hervorzuhebenden Punkt, bei der Betrachtung von FTF-Systemen, soll die Dimensionierung der Flottengröße genannt werden. Zu diesem Thema gibt es viele Arten der Berechnung und viele Studien haben sich damit befasst. Ausschlaggebend um eine Aussage über die notwendige Anzahl der Fahrzeuge zu machen sind die verschiedenen Zeiten. Ein Fahrzeug verbringt seine Zeit in einem System auf unterschiedliche Arten. Das optimale Ziel wäre, dass ein Fahrzeug seine Zeit nur mit Transporten verbringt. Es kommen jedoch auch Leerfahrten zur nächsten Aufnahmestelle, Wartezeiten bis zum nächsten Auftrag oder Wartezeiten, weil eine Blockierung aufgetreten ist, vor. Um die notwendige und auch für ein System maximal mögliche Flottengröße bestimmen zu können müssen diese Zeiten schon im Voraus berechnet werden.

RAJOTA und SHANKER entwickeln ein Werkzeug zur Vorbestimmung einer Fahrzeug Anzahl für ein System. Hier werden drei unterschiedliche Zustände für ein Fahrzeug erkannt:

- Warentransport
- Leerfahrten
- Warten oder blockiert sein

Wobei die Zeiten für den Warentransport leicht zu eruieren sind. Bei den beiden anderen Zuständen, sind die dafür aufgebrauchten Zeiten schwierig zu berechnen, da sie von zufälligen und nicht vorhersehbaren Ereignissen abhängen. Die Summe der drei Zeiten durch die Zeit die ein Fahrzeug verfügbar ist, ergibt die notwendige Anzahl an Fahrzeugen. In Gl. 2-4 bedeutet $[x]^+$, dass die kleinste ganze Zahl größer als x verwendet werden soll.

$$N = \left\lceil \frac{T_1 + T_e + T_{wb}}{T_a} \right\rceil^+ \quad \text{Gl. 2-4}$$

Für die Berechnung der Transportzeit (T_1) werden die bekannten notwendigen Transporte zwischen allen Stationen einer Anlage herangezogen und ihre Zeiten summiert. Die minimale Anzahl der notwendigen Fahrzeuge errechnet sich rein aus dieser gesamten Transportzeit der Waren, durch die Zeit, die ein Fahrzeug verfügbar ist. Diese Zeit (T_a) ist ein Teil des betrachteten Zeitfensters und abhängig von dem Verfügbarkeitsgrad der Fahrzeuge.

Die Leerfahrtzeit wird auf verschiedene Arten geschätzt. Folgende Schätzungen für Leerfahrtzeiten werden aus der gesichteten Literatur aufgezählt. Sie sind gleich:

- wie die gesamte Transportzeit.
- der Anzahl an Leerfahrten mal der durchschnittlichen Zeit für die Transporte.
- der leeren Fahrten, die von einer Station starten zu anderen Stationen in der Größe des Verhältnisses der bei den jeweiligen Stationen aufgenommenen Waren.
- der Fahrtzeit von der Position, wo gerade Waren abgegebenen wurden, zur am weitesten entfernten Station

Die Ansätze bilden zwei Grenzen, einerseits die minimale Anzahl und andererseits die maximale Anzahl. In der Realität wird die Anzahl der notwendigen Fahrzeuge zwischen den beiden Grenzen liegen. Das vorliegende Modell hält sich an eine Kombination und Optimierung der Annahme für die Leerfahrtzeiten aus den oben genannten Punkten.

Die Schätzung der Blockierungs- und Wartezeit kann vorab nicht berechnet werden, da sie von der Anzahl der eingesetzten Fahrzeuge abhängt. Sie soll aber wenn möglich eliminiert werden, da es sich nur um Verlustzeiten handelt. In der erwähnten Studie, werden sie jedoch mit 10 – 15 % der Transportzeiten geschätzt. Diese Zeiten sind nicht nur von der Flottengröße sondern auch vom Anlagenlayout und den verschiedenen Fahrstrategien abhängig. Es handelt sich bei diesen um Fahrzeuge, die keinen Hindernissen ausweichen können.

In den Ergebnissen der Simulation und im Vergleich mit den vorher in dem Artikel beschriebenen Modellen wird unter anderem bemerkt, dass der

Einsatz von mehr Fahrzeugen als notwendig nur die Wartezeiten dieser erhöht. Diese überzähligen Fahrzeuge steigern den Durchsatz in der Anlage also auch nicht weiter. (vgl. [RSB98]).

Bei KOO, JANG und SUH wird ebenfalls eine Methode präsentiert, welche die Flottengröße analytisch vorbestimmen soll. Gemeinsam mit der Flottengröße wird auch die Wartezeit der Waren betrachtet. In Abbildung 2-8 werden die

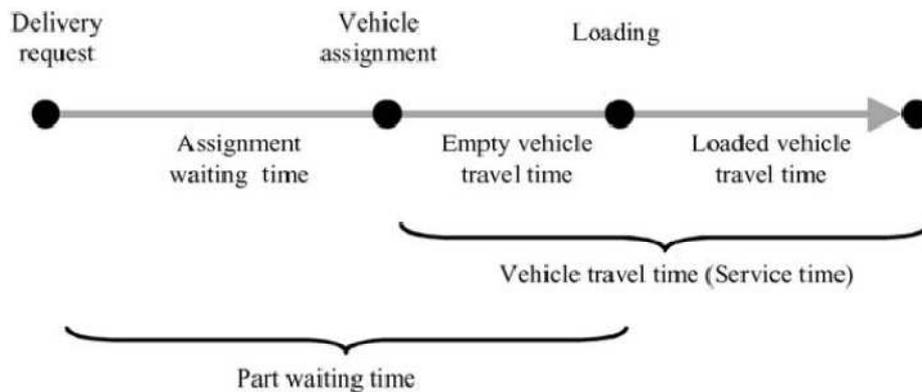


Abbildung 2-8: Zuteilung der Zeiten in einem Transport
(nach [KJS05] , fig. 1, S. 212)

verschiedenen Zeitpunkte und Zeiten zu der Fahrtzeit und der Wartezeit des Artikels zugeteilt. Die minimale Flottengröße wird, wie oben bei RAJOTA und SHANKER berechnet. Danach werden Zuschläge für Leerfahrtzeiten errechnet. Zur Kontrolle, ob genügend Fahrzeuge im System vorhanden sind, wird die Wartezeit der Waren mit einem Sollwert verglichen.

Die Berechnung der Leerfahrtzeiten wird nach verschiedenen Auswahlregeln der Fahrzeuge unterteilt. Berücksichtigt wird sowohl die Auswahl des nächsten Fahrzeuges und eines zufälligen freien Fahrzeuges, als auch die des am längsten verfügbaren Fahrzeuges und weitere.

Das in dem Artikel erstellte Modell, erreicht ähnliche Werte wie die erstellte Simulation, jedoch werden einige Annahmen getroffen, die das Modell vereinfachen. Besonders das Weglassen der gegenseitigen Beeinflussung der Fahrzeuge macht eine Modellannahme leichter. (vgl. [KJS05])

2.3.4 Allgemeines

Die Punkte Flottengröße, Blockierungen und Fahrstrategien beschäftigen die Forschung und die Wirtschaft schon seit Langem. Seit die Sensortechnik verstärkt zum Einsatz kommt erweitert sich das Gebiet. Dabei sind die verschiedenen Lösungen in der Software ebenfalls sehr präsenste Themen.

In der Literatur sind neue Ansätze zur Steuerung von fahrerlosen Transportsystemen zu finden. Diese verteilen die Entscheidungsgewalt auf die Fahrzeuge selbst, oder zumindest auf die virtuellen Agenten der Fahrzeuge. Dieser Schritt weg von einem zentral gesteuerten System zu einem dezentralisiert gesteuerten

wird mit der Begründung zu höherer Flexibilität und einfacherer Inbetriebnahme voran getrieben. Bei FARAHVASH und BOUCHER wird die Architektur der virtuellen Agenten erklärt. Ein Agent ist eine programmierte Einheit, die autonom, intelligent und flexibel mit der Umwelt interagieren kann. Zur Steuerung von einem System sogenannter Multi-Agenten können verschiedene Hierarchien von Agenten eingeführt werden. Die Idee dahinter ist, dass viele einzelne Agenten gemeinsam Aktionen durchführen, die sie alleine gar nicht oder nicht auf eine optimierte Art durchführen könnten. Als ein Beispiel wird in dem Bericht ein Agent dargestellt der den Verkehr von fahrerlosen Transportfahrzeugen koordiniert. (vgl. [FaB04])

2.4 Problembeschreibung

Die in den bisherigen Kapiteln und besonders im Kapitel 2.3 dargestellte Situation zeigt viele Punkte auf, die bearbeitet werden könnten. In diesem Unterkapitel wird das Problem genau beschrieben.

Um einen effizienten Einsatz von autonomen Fördermitteln zu definieren müssen viele Punkte betrachtet werden. Das ganze System besteht aus mechanischen, elektronischen, softwaretechnischen und logistischen Komponenten. Die Bearbeitung jeder einzelnen würde den Rahmen dieser Arbeit überschreiten.

Im Zuge der Arbeit werden die mechanischen Komponenten der Fahrzeuge beleuchtet und bereits eingesetzte Varianten beschrieben. Das Problem liegt in der Vielzahl der möglichen Lösungen. Für viele Anlagen werden bisher individuelle Fahrzeuge eingesetzt. Die Varianten der Komponenten werden hier benannt und nach ihren Vor- und Nachteilen bewertet. Eine nähere Studie der einzelnen mechanischen Komponenten erscheint erst nach einer Definition des Einsatzbereiches als sinnvoll.

Nach dem Erkennen der Haupteigenschaften werden Vergleichsmöglichkeiten gesucht. Der Einsatz lässt sich gegenüber der Stetigfördertechnik bewerten. Abbildung 2-9 zeigt welche Eigenschaften der beiden Techniken einander gegenübergestellt werden können. Ausführungen dazu folgen in Kapitel 3.2.2.

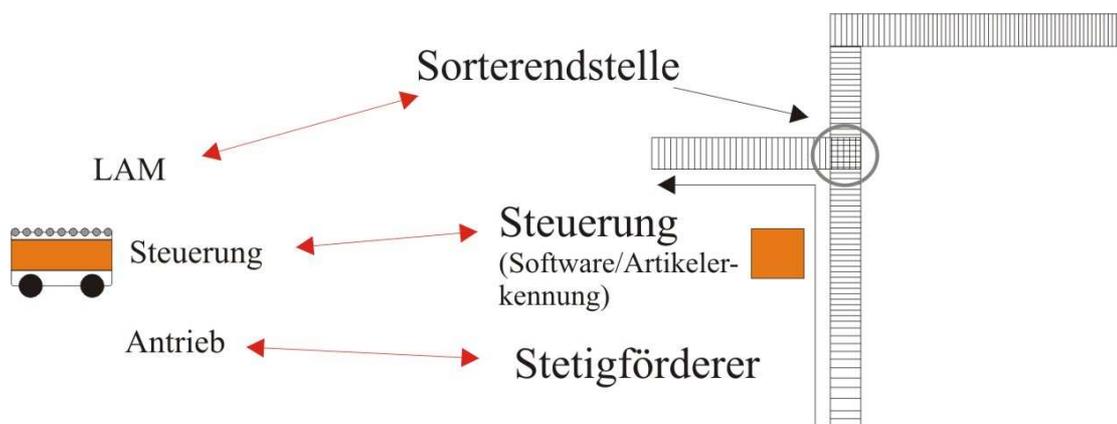


Abbildung 2-9: Vergleich der Eigenschaften von FT und Fahrzeug

Um aussagekräftige Werte zu erhalten werden Kennzahlen, wie Durchsatz, etc., definiert und ermittelt.

Daher ist der nächste Schritt, die Feststellung, in welchem Bereich der Intralogistik autonome Fördermittel effizient eingesetzt werden können. Dafür muss die Leistung und die Kennzahlen, die mit diesen Systemen realisierbar sind, erarbeitet werden. Die Herausforderung ist, dass in diesen Systemen die Berechnung der Leistung nicht mit einfachen analytischen Mitteln möglich ist. Die Wege der Fahrzeuge können aufgrund der Fähigkeit Hindernisse zu umfahren variieren. Ebenso werden die Fahraufträge zufällig auftreten und die Auswahl des Fahrzeuges hängt von verschiedenen Strategien ab, wie sie oben bereits dargestellt wurden. Berücksichtigt werden muss auch die Beeinflussung der Fahrzeuge untereinander. Es spielen bei der Berechnung viele Faktoren hinein. Mit Hilfe von Grenzleistungsbetrachtungen und dem Monte-Carlo Algorithmus werden Kennzahlen von allgemeinen und beispielhaften Szenarien bewertet und berechnet.

Als Schlussinformation werden Auslegungsregeln für Entwickler formuliert, die ein System von autonomen Fördermitteln implementieren.

Kurz zusammengefasst werden in den folgenden Kapiteln diese Punkte bearbeitet:

- Betrachtung der Fahrzeuge
- Leistungen der autonomen Fördermittel im System
- Definition von Szenarien
- Auswertung der Ergebnisse

3 Entwicklung von Maßnahmen

Dieses Kapitel behandelt zwei Gebiete, die für ein System von frei agierenden Fahrzeugen in der Interlogistik relevant sind. Zuerst werden die Fahrzeuge selbst betrachtet und ihre Eigenschaften bewertet. Außerdem wird eine Unterscheidung zwischen fahrerlosen Transportfahrzeugen, die im Englischen „automated guided vehicle“ heißen und der nächsten Generation von frei agierenden oder autonomen Fördermitteln definiert.

Im zweiten Teil werden der Einsatz der Fahrzeuge und ihre Leistung im System betrachtet. Die Schritte werden hierbei vom Einfachen zum Komplexen durchgeführt und zwei Berechnungsmethoden werden präsentiert.

3.1 Betrachtung der Fahrzeuge

In diesem Teil werden die Fahrzeuge, die als autonome Fördermittel zum Einsatz kommen, betrachtet. Dabei werden zuerst allgemeine Eigenschaften dargestellt. Es werden verschiedene Prototypen, die auf der CeMat 2011 ausgestellt worden sind, beschrieben und der Einsatz dieser erklärt. Abschließend wird auf die einzelnen notwendigen Technologien in den Fahrzeugen Bezug genommen. Es werden Hinweise gegeben welche dieser Technologien noch weitergehende Studien erfordern um einen vertrauenswürdigen Einsatz in der Wirtschaft zu ermöglichen.

Zuvor benötigt es einer Begriffsdefinition. Wie im Kapitel 1.1.1 erwähnt, sind fahrerlose Transportsysteme seit Langem im Einsatz. Im Englischen werden diese als „Automated Guided Vehicles“ bezeichnet. Die Entwicklung dieser Transportfahrzeuge begann mit optischer Spurführung. Später wurde die induktive Spurführung realisiert. Die Fahrzeuge haben in der Routenwahl auf bauliche Begebenheiten zurückgreifen müssen um sich orientieren zu können. Das heißt die Routenwahl der Fahrzeuge ist nicht flexibel und die Fahrzeuge hängen von regelmäßigem äußeren Informationsaustausch ab um ihre Position zu bestimmen.

Bei autonomen Fahrzeugen handelt es sich schon mehr um mobile Roboter, denn um fahrerlose oder automatisch geführte Fahrzeuge. Im Moment muss die Umgebung noch eingelernt oder als virtuelle Daten im „on-board“ PC gespeichert werden. Auf diesem PC werden ebenso Entscheidungsalgorithmen für eine freie Routenwahl programmiert. Danach findet sich das Fahrzeug aber, soweit möglich, selbst zurecht und kann Hindernisse umfahren oder alternative Routen berechnen. Die Autonomie ist mit jedem Entwicklungsschritt gewachsen. Aufgrund dieser letzten Entwicklung zur freien Beweglichkeit in der Umgebung werden die Fahrzeuge in dieser Arbeit als frei agierende oder autonome Fördermittel bezeichnet. Auch in [VDI05] wird der Begriff ähnlich definiert. Abbildung 3-1 zeigt diese Definition und die Unterteilung mobiler flurgebundener Fördermittel.

Vom Menschen gesteuert	Automatisch gesteuert
Vom Menschen direkt gesteuert (klassischer Gabelstapler, LKW, ...)	Fahrweg vom Menschen vorgegeben (Fahrerlose Transportsysteme)
Vom Menschen ferngesteuert (Manipulatorfahrzeuge)	Fahrweg nicht vorgegeben (autonome Roboter)

Abbildung 3-1 Definition mobiler flurgebundener Fördermittel
(nach [VDI05] , Bild 3, S. 3)

3.1.1 Eigenschaften

Die wesentlichen Eigenschaften eines frei agierenden Fördermittels sind jene, die zum Transport einer Ware von A nach B notwendig sind. Folgende Punkte sind zu erwähnen:

- Transportfähigkeit
- Fahrgeschwindigkeiten
- Genauigkeit der Positionierung
- Verfügbarkeit
- Einsatzbereich
- Sicherheit
- Kommunikation und Steuerung

Jeder dieser Punkte ist wichtig um ein einzelnes Fahrzeug funktionstüchtig zu machen. Übergeordnet bedarf es einer Leitsteuerung, die die Aufträge zuteilt und den Materialfluss koordiniert. Diese Steuerung ist als zentraler Materialflussrechner in Verwendung. Die neue Entwicklung zur Dezentralisierung wurde in Kapitel 2.3 erwähnt.

Die *Transportfähigkeit* ist ein Überbegriff für mehrere Eigenschaften. Wichtig zu berücksichtigen ist die Art der Ware, die transportiert werden muss. Davon hängen die Größe und die zu ertragende Zusatzbelastung ab. Unter diesen Punkt fallen auch die Varianten der Lastaufnahmemittel (LAM), die von der Bereitstellung der Artikel abhängen. Wenn Paletten transportiert werden, wird eine Art von Gabeln als LAM dienen. Welche unterschiedlichen Technologien hier noch zum Einsatz kommen wird im Unterkapitel 3.1.2 beschrieben. Die Möglichkeit zur automatisierten Übergabe hängt auch vom LAM ab. Wie viele Waren oder Ladehilfsmittel aufgenommen und transportiert werden können, zählt ebenfalls zur Transportfähigkeit.



Abbildung 3-2: FTF mit 2 LAM zur mehrfachen Lastaufnahme (nach [VDI05] , Fig. 6)

Die unterschiedlichen *Fahrgeschwindigkeiten* sind ein notwendiger Faktor zum Transport von Waren. Für autonome Fahrzeuge ist die Maximalgeschwindigkeit ein wichtiger Parameter zur Überwindung größerer Strecken. Zur Optimierung sollten hier so wenige Störungen wie möglich auftreten. Auch die Kurvengeschwindigkeit muss berücksichtigt werden, da sie die durchschnittliche Fahrgeschwindigkeit verringert. Durch verschiedene Algorithmen können eckige Fahrrouen vermieden werden, was sich positiv auf die Fahrzeit auswirkt.

Die zweite Gruppe von Geschwindigkeiten sind Annäherungs- und Sicherheitsgeschwindigkeiten. Bei der Ersten handelt es sich um eine verringerte Geschwindigkeit, damit das Fahrzeug eine Feinpositionierung durchführen kann. Sicherheitsgeschwindigkeiten sind jene Geschwindigkeiten, mit welchen das Fahrzeug fährt, z.B. wenn es sich in kritischen Bereichen aufhält. Kritische Bereiche sind dort, wo erhöhter Verkehr herrscht oder wo der Sensor nicht um Ecken sehen kann. Die Geschwindigkeit wird ebenfalls aus Sicherheitsgründen verringert, wenn Hindernisse in der vorberechneten Route auftauchen und umfahren werden müssen. Wenn die autonomen Fahrzeuge miteinander oder einer übergeordneten Verkehrssteuerung kommunizieren, kann bei drohender Kollision mit einem anderen autonomen Fahrzeug, bereits frühzeitig eine Ausweichroute gewählt werden. Damit kann ein Verringern der Geschwindigkeiten vermieden werden.

Die *Genauigkeit der Positionierung* ist abhängig von der Sensortechnologie, der Annäherungsgeschwindigkeit und auch vom Fahrwerk. Sie ist notwendig um ein Fehlertoleranzmaß einhalten zu können. Dabei handelt es sich um Versatz- und Winkelfehler. Diese Fehler müssen klein gehalten werden um eine fehlerfreie Übergabe durchführen zu können oder eine Station anzufahren an der geladen werden kann. Im schlechtesten Fall kann sich ein Standardbehälter, z.B., so verkeilen, dass die Station und das Fahrzeug blockiert sind, in Abbildung 3-3 ist dies zu erkennen. Wie genau diese Toleranzen sein müssen hängen von der Art der Übergabe und den zu übergebenden Waren ab.

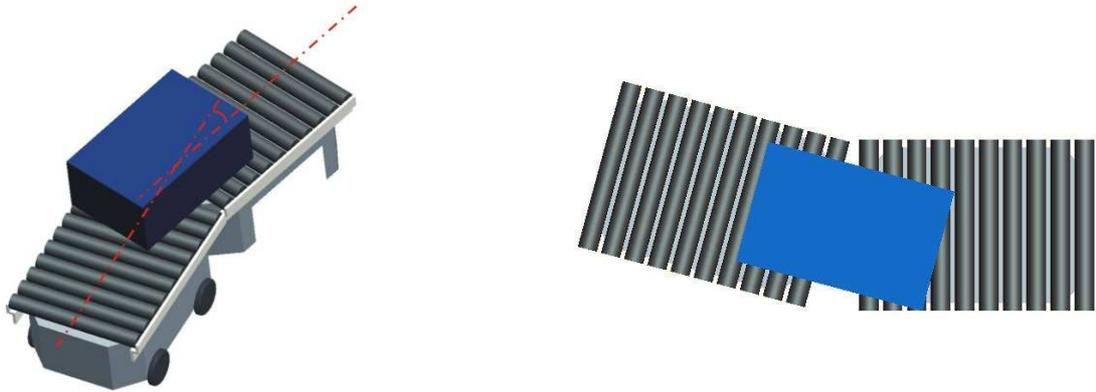


Abbildung 3-3: Winkelfehler und Verkeilen

Die *Verfügbarkeit* ist der Grund, wieso der Einsatz von frei agierenden Fahrzeugen oft wirtschaftlich gesehen nicht rentabel ist. Sie ist jener Anteil eines Zeitfensters, in welcher ein Fahrzeug seine Tätigkeiten durchführen kann. Die Verfügbarkeit hängt ab von der Energiebereitstellung und der Störungsanfälligkeit der Komponenten. Die Energiebereitstellung kann im Vorhinein berücksichtigt werden. Die Lebensdauer und Ausfallswahrscheinlichkeit der Komponenten kann in der Konstruktion beeinflusst werden. Die Energiebereitstellung soll hier auch die Ladestrategien und Ladetechnologien berücksichtigen. Näher wird im Unterkapitel 3.1.2 darauf eingegangen.

Mit dem *Einsatzbereich* von Fahrzeugen können zwei Dinge gemeint sein. Einerseits kann es den Bereich bezeichnen, den ein Fahrzeug abfahren kann ohne nachgetankt oder aufgeladen zu werden. Da sich die hier betrachteten Fahrzeuge in geschlossenen Räumen bewegen, ist dieser Einsatzradius recht gut begrenzt. Wichtiger ist der Einsatzbereich als Arbeitsraum. Damit ist der Raum gemeint, den das Fahrzeug benötigt um sich zu bewegen, zu drehen und Kurven zu fahren. Er hängt, sowie die Genauigkeit der Positionierung, sehr vom Fahrwerk ab. Es besteht aber auch eine Abhängigkeit von der Größe des Fahrzeuges und damit direkt auch von der Anzahl der Lastaufnahmemittel.

Die *Sicherheit* ist auch eine Eigenschaft, die für frei agierende Fahrzeuge besonders berücksichtigt werden muss. Hier besonders, weil die Fahrzeuge nicht immer die gleichen Routen wählen, sondern sich überall frei bewegen können. Daher müssen genügende Vorkehrungen getroffen werden, dass in erster Linie der Mensch nicht gefährdet wird und im Weiteren auch die Ladung nicht beschädigt wird. Für dieses Thema gibt es eigene Arbeitsbestimmungen. Unter anderem müssen redundante Sicherheitskreise für die Sensoren vorhanden sein, dass ein Fahrzeug überhaupt als sicher gilt. Diese Eigenschaften werden hier nur angesprochen und nicht weiter behandelt.

Kommunikation und Steuerung sind die Schlagworte, die sich im Laufe der Entwicklung am meisten verändert haben. Die Kommunikation hängt von der Computer- und Informationstechnologie ab und soll hier ebenfalls nur erwähnt werden. Mit dem Thema der Steuerung haben sich viele Studien bereits befasst (siehe Kapitel 2.3).

Es gibt die interne Fahrzeugsteuerung, die Geschwindigkeit und Richtung regelt und die übergeordnete Steuerung, die die Organisation von Fahraufträgen, Transportstrategien und Routen übernimmt. Im bereits genannten Kapitel werden unterschiedlichste Strategien beschrieben und ihre Auswirkung auf die Leistung eines Systems von Fahrzeugen ermittelt.

3.1.2 Technologien

Dieses Kapitel behandelt die Technologien, die zur Realisierung der in 3.1.1 aufgezählten Eigenschaften notwendig sind. Außerdem werden Ansätze und Strategien dargestellt, die für einen effizienten Einsatz ausschlaggebend sein können. Es sei hier nochmals darauf hingewiesen, dass die Aufzählung der Konstruktionen und Technologien keinen Anspruch auf Vollständigkeit erheben. Aufgrund des Variantenreichtums der Transportwaren in Größe und Gewicht, wird hier der Standardbehälter oder Kleinladungsträger (KLT) als hauptsächliches Ladehilfsmittel (LHM) gewählt.

Ein autonomes Fördermittel besteht aus ähnlichen Baugruppen, wie ein FTF. Der Unterschied zwischen den beiden Transportfahrzeugen wurde bereits auf Seite 29 herausgearbeitet. Abbildung 3-4 zeigt und benennt diese Baugruppen.

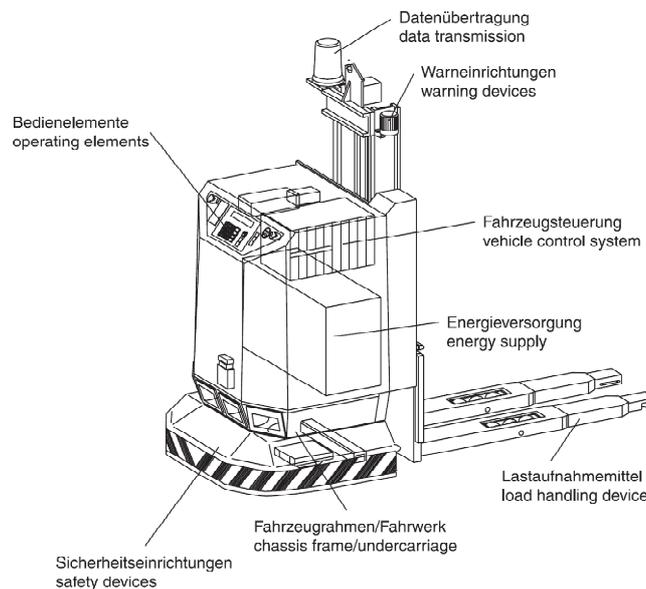


Abbildung 3-4: Baugruppen eines FTF (nach [VDI05], Bild 8, S.14)

Die Lastaufnahmemittel, das Fahrwerk und die Energieversorgung werden im Folgenden näher betrachtet.

3.1.2.1 Varianten der Lastaufnahmemittel

Das Lastaufnahmemittel (LAM) ist die ausschlaggebende Baugruppe, für die Art von Waren, die transportiert werden können. Sie sind die physische Schnittstelle für den Transport der Ladungen und sind so auszuwählen, dass sie mit der Umgebung zusammenarbeiten können. Dabei sind zwei Hauptgruppen zu unterscheiden: Aktive und Passive LAM.

Passive LAM benötigen externe Hilfe um ihre Ladung auf oder ab zu geben. Das kann sowohl automatisch mit Schiebern oder manuell stattfinden. Die Ladungssicherung sollte extra berücksichtigt werden.

Aktive LAM verfügen über Aktoren, welche die Ladung an Stationen übergeben. Eine manuelle Übergabe ist meist dennoch möglich.

Außer diesen beiden LAM Gruppen, gehören auch Anhängerschlepper und Unterfahrschlepper erwähnt.

Bei Anhängerschleppern müssen die Waren auf eigenen Konstruktionen mit Fahrwerken transportiert werden. Der Anhängvorgang kann automatisiert werden. Für FTF müssten die Anhänger auf fix definierten Positionen stehen. Frei agierende Fahrzeuge könnten diese selbst orten und koppeln. Der Vorteil von Anhängerschleppern ist, dass das Gewicht der gezogenen Konstruktionen nicht übernommen werden muss und somit ein energiesparender Transport möglich ist. Die Nachteile liegen hier bei den notwendigen Anhängern, die über verschiedene angepasste Eigenschaften verfügen müssen. Zum Beispiel ist eine Anhängkupplung für einen automatisierten Kupplungsvorgang notwendig und eine Identifikationsmöglichkeit muss gegeben sein. Die Kosten des LHM wären folglich höher. Weiter muss der Fahrweg über genügend Platz verfügen, da ein solcher Lastzug ein anderes Fahrverhalten in Kurven und zu bestimmten Positionen verfügt. Der Raumbedarf ist also ebenfalls höher als bei einem einzelnen Fahrzeug.

Unterfahrschlepper benötigen so wie Anhängerschlepper speziell konstruierte LHM um die Waren zu transportieren. Genügend Platz unter den LHM ist notwendig, dass ein Unterfahren möglich ist. Um die Waren störungsfrei zu transportieren ist ein aktives Anheben notwendig. Daraus folgt, dass das Fahrzeug für das gesamte Gewicht der Waren ausgelegt sein muss. Das LHM benötigt weniger Bauteile, weil ein Fahren nicht notwendig ist. Als Beispiel für einen Unterfahrschlepper wurde bereits das im LKH Klagenfurt eingesetzte System in Kapitel 2.2 angeführt. Ein weiteres System mit Unterfahrschleppern ist in Abbildung 3-5 dargestellt. Diese Fahrzeuge bewegen Regale.



Abbildung 3-5: Unterfahrschlepper Kiva von QuietLogistics
(nach [Qui11])

Die aktiven LAM, welche keine zusätzlichen Konstruktionen außer dem KLT benötigen, sind auf den Fahrzeugen montiert. Das Höhenniveau der LAM ist dabei angepasst an die Übergabe. Die Techniken die dabei eingesetzt werden sind:

- Rollenförderer
- Rollerswitch
- Schieber
- Gurtförderer
- Gabeln

Rollenförderer, Rollerswitch und Schieber sind für den Transport und die Übernahme von KLT in Gebrauch. Ein Rollenförderer ist üblicherweise als Stetigförderer über einen längeren Weg verwendet. Der Rollerswitch findet in stetig fördernden Anlagen als Ein- oder Ausschleuser Verwendung. In Abbildung 3-6 sind beide Bauteile dargestellt. Auf der rechten Seite ist der Rollerswitch als Aussorter in einer Rollenbahn eingebaut. Er besteht aus einer oder mehreren Reihen schwenkbarer Rollen. Bei diesen beiden Techniken ist die Übergabe nur möglich, wenn der Behälter von der Abgabe soweit auf die Aufnahme transportiert wird, dass diese ihn dann übernehmen kann. Es sind also Aktoren auf beiden Seiten der Übergabe notwendig.



Abbildung 3-6: links: Rollenförderer; rechts: Rollerswitch

Für die Übergabe mit einem Rollenförderer als LAM, muss das Fahrzeug sich längs zu der Transportrichtung positionieren. Die Anfahrt der Station ist somit eingeschränkt. Bei einem Rollerswitch sind alle vier Richtungen zur Positionierung frei. Jedoch wird damit die Lastsicherung zum Thema, da der Behälter frei auf dem Fahrzeug liegt und in keiner Richtung abgestützt werden kann. Im Falle des Rollenförderers kann zumindest seitlich eine Schiene montiert werden um Querkräfte, die durch Kurvenfahrten auftreten, aufzunehmen. Das muss bei der Auslegung der Beschleunigungen der Fahrzeuge berücksichtigt werden.

Der Schieber ist per se kein LAM, da er den KLT bewegt und nicht trägt. Dennoch zählt er am Fahrzeug montiert als Aktuator, der der Aufnahme und Abgabe der Ladung dient. Somit wird er hier aufgeführt. Ein Schieber kann je nach Konstruktion einen Behälter von Fahrzeug auf die Station bewegen, ohne dass die Station einen Aktuator hat, das Gleiche funktioniert anders herum genauso. Es muss also für eine Übergabe nur ein Beteiligter über diesen Mechanismus verfügen. Im Gegensatz zu einer Übergabe mit Rollenförderer oder Rollerswitch.

Gurtförderer und Gabeln werden hier nur erwähnt. Der Gurtförderer ist von der Wirkungsweise einem Rollenförderer ähnlich. Für einen Einsatz bei Standardbehältern ist er jedoch nicht notwendig, da kleine Waren bewegt wer-

den. Ein Einzeltransport solcher kleinen Waren muss wirtschaftlich gründlich hinterfragt werden. Eine Gabel als LAM ist für den Einsatz von Paletten gedacht, die hier in erster Linie ebenfalls nicht betrachtet werden sollten. Auf Paletten können ebenfalls KLT transportiert werden. Hier soll aber hauptsächlich der Transport von Behältern betrachtet werden, die auch einzeln an oder von dem Fahrzeug übergeben werden können.

3.1.2.2 Fahrwerk

Das Fahrwerk eines frei agierenden Fahrzeuges ist die mechanische Baugruppe, die viel Einfluss auf das Verhalten hat, z.B. Manövrierfähigkeit. Andere Punkte sind die Tragfähigkeit von Lasten, Geschwindigkeiten, Beschleunigungen und Energieverbrauch.

Die Art des Fahrwerks kann durch die Anzahl der Freiheitsgrade unterschieden werden. Es gibt die linienbeweglichen und die flächenbeweglichen Fahrwerkskonstruktionen.

Ein linienbewegliches Fahrwerk hat gegenüber einem flächenbeweglichen Fahrwerk die Vorteile, dass ein geringerer fertigungstechnischer und steuerungstechnischer Aufwand betrieben werden muss. Dem steht gegenüber, dass die Manövrierfähigkeit geringer ausfällt. Das bedeutet, dass mehr Platz zur Positionierung, Orientierung und für den Fahrweg benötigt wird als bei flächenbeweglichen Fahrwerken (vgl. [VDI05]). In Abbildung 3-7 werden die wichtigsten Varianten gezeigt.

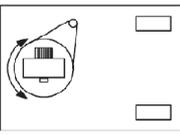
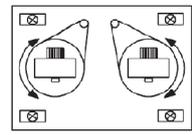
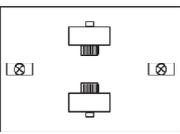
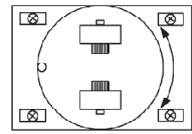
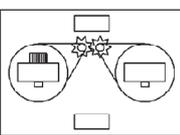
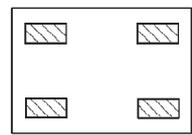
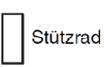
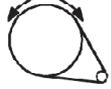
Fahrwerk	Mögliche Fahrbewegung	Fahrwerk	Mögliche Fahrbewegung
 Dreirad	<ul style="list-style-type: none"> • linienbeweglich • Geradeausfahrt und Drehen um Hinterachse • Vorzugsfahrtrichtung vorwärts, Rückwärtsfahrt möglich 	 mehrere unabhängige Fahr-/Lenkeinheiten	<ul style="list-style-type: none"> • flächenbeweglich
 Differentialantrieb	<ul style="list-style-type: none"> • linienbeweglich • Geradeaus- und Rückwärtsfahrt • Drehen um Mittelachse möglich 	 Differentialantrieb mit Drehachse	<ul style="list-style-type: none"> • flächenbeweglich
 Gekoppelter Lenkantrieb	<ul style="list-style-type: none"> • linienbeweglich • Geradeaus- und Rückwärtsfahrt • Drehen um Mittelachse möglich 	 Mecanum-Antrieb	<ul style="list-style-type: none"> • flächenbeweglich <p><small>Quelle: Miag Fahrzeugbau GmbH, Braunschweig</small></p>
Symbole:  Fahr-antrieb  Stützrad  Lenk-antrieb  drehbares Stützrad (ggf. gefedert)			

Abbildung 3-7: Aufstellung verschiedener Fahrwerksvarianten
(nach [VDI05], Bild 9, S. 16)

Ausschlaggebend für die Auswahl einer Fahrwerksvariante für ein frei agierendes Fahrzeug werden mehrere Punkte sein. Einer raschen Feinpositionierung für eine schnelle Übergabe steht der Aufwand zur Steuerung eines solchen Fahrwerks gegenüber. Die Zeit, die bei der Übergabe benötigt wird, hat Einfluss auf die Leistung eines ganzen Systems, in wie weit, wird im Kapitel 3.2.3.1 erklärt. Eine weitere Betrachtung benötigt auch der Energieaufwand, der bei den unterschiedlichen Varianten auftritt.

Erwähnt soll werden, dass durch höhere Fahrgeschwindigkeiten auch höhere Belastungen auf Fahrzeug und transportierte Ware wirken. Das Fahrzeug muss den Sicherheitsbestimmungen genügen. Eine Reaktionszeit für Ausweichmanöver muss immer berücksichtigt werden. Weiter benötigen die geladenen Waren bei höheren Fahrgeschwindigkeiten und den daraus resultierenden Längs- und Querschleunigungen Vorkehrungen für die Ladungssicherung, was den Aufwand der Konstruktion des Fahrzeuges um einen weiteren Punkt aufwendiger gestaltet. Diese Bemerkung zeigt die Vernetzung der einzelnen Eigenschaften eines Fahrzeuges, da die Ladungssicherung in der Technik der Lastaufnahmemittel berücksichtigt werden muss.

Eigenschaften wie die Kippstabilität, Wenderadien, und ähnliche, werden hier nicht näher besprochen.

3.1.2.3 Energiebereitstellung

Die Energiebereitstellung ist ein umfassendes Thema. Für FTF gibt es bereits einige Lösungen, die erfolgreich eingesetzt werden. Für frei agierende Fördermittel sind diese nur eingeschränkt verwendbar. Da der Einsatzbereich in der Intralogistik sich auf geschlossene Hallen bezieht, werden Verbrennungskraftmotoren außer Acht gelassen. Es werden hauptsächlich elektrische Fahrzeugvarianten in der Wirtschaft ausgewählt.

Die Energieversorgung kann in eine externe und eine interne aufgeteilt werden. Da FTF vorbestimmten Fahrwegen folgen, können diese Strecken zur externen Versorgung genutzt werden. Stromschienen oder berührungslose induktive Energieübertragung sind dabei Möglichkeiten. Für autonome Fahrzeuge sind diese Möglichkeiten nicht erstrebenswert, da sie die freie Beweglichkeit einschränken.

Zur internen Versorgung werden unterschiedlichste Arten von Akkumulatoren verwendet. Diese werden bei Ladestationen nachgeladen. Die Technologien sind:

- verschiedene Varianten der Blei-Säure-Batterien (auch Blei-Gel)
- Nickel-Cadmium (Ni-Cd) Batterien
- Nickel-Metallhydrid
- Lithium-Ionen Akku

Der Blei-Gel Akkumulator wird häufig eingesetzt, weil die Anschaffungskosten gering und die Lebensdauer mit 3 bis 5 Jahren im mittleren Bereich liegen. Der Nachteil liegt in der Leistungsdichte und damit im hohen Gewicht um eine entsprechende Leistung zu erzielen. Die Nickel-Cadmium oder Nickel-Metallhydrid Technologie liegt mit der Leistungsdichte über Blei-Gel Akkumulatoren, ist je-

doch auch deutlich höher mit den Kosten pro Kilowattstunde. Der Einsatz von Cadmium in Energiezellen ist in der EU verboten worden.

Lithium-Ionen Akkus haben die höchste Energiedichte von 90 – 150 Wh/kg. Die Lebensdauer und die Anzahl der Ladungszyklen übersteigt die der genannten Technologien ebenfalls.

Eine neue Technologie als Energiespeicher sind die sogenannten Supercaps oder Doppelschichtkondensatoren. Die Leistungsdichte liegt bei 2000 bis 10000 W/kg. Diese Leistung kann in kurzer Zeit aufgenommen und wieder abgegeben werden. Die Lebensdauer ist unbegrenzt. Daher eignet sie sich für Energieabgaben auf kurze Zeit und wenn die Aufladung sehr schnell vor sich gehen soll. In Abbildung 3-8 werden die erwähnten Technologien in einem Diagramm verglichen.

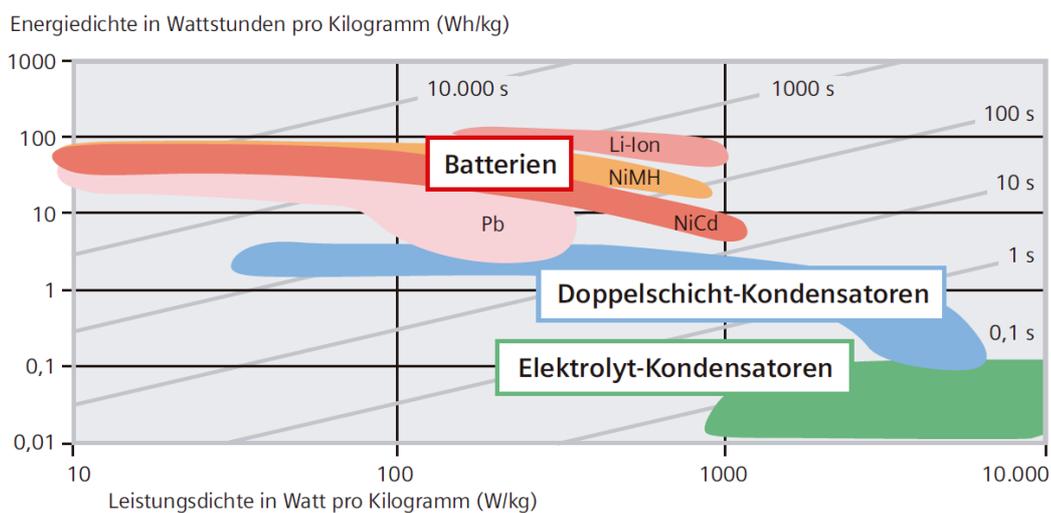


Abbildung 3-8: Vergleich von Batterietechnologien (nach [GER07] , S. 74)

Bei der Auswahl der Batterien in Hinsicht auf wirtschaftliche Nutzung in einem System sind einige Punkte zu berücksichtigen. Die mögliche Anzahl der Ladezyklen beschränkt die Lebensdauer, dadurch entstehen Wartungskosten, die bei teuren Varianten relevanten Einfluss haben. Die Lebensdauer hängt auch von der richtigen Ladesteuerung ab. Die Steuerungen müssen angepasst werden und mögliche Memory Effekte, Tiefentladungen oder zu hohe Temperaturen während der Ladung vermeiden.

Weiter sind die Anzahl der Ladestationen auf die Auswahl und den Einsatz der Batterie abzustimmen. Bei Doppelschichtkondensatoren werden mehr notwendig sein, als bei einer Technologie, die ihre Leistung über einen längeren Zeitraum speichern kann.

Ladestrategien

Dieses Thema spielt sehr stark in die Verfügbarkeit von frei agierenden Fahrzeugen ein. Dazu müssen verschiedene Ladestrategien und die notwendige Einsatzzeit betrachtet werden. Die Ladestrategien müssen an diese angepasst werden. Bei einem Mehrschichtbetrieb müssen andere Konzepte realisiert werden, denn in einem Einschichtbetrieb. In [VDI05] werden vier Batteriebetriebsarten benannt:

- Kapazitive Ladung ohne Batteriewechsel
- Kapazitive Ladung mit Batteriewechsel
- Kapazitive Ladung mit Zwischenladungen
- Taktbetrieb

In der Betriebsart mit kapazitiver Ladung ohne Batteriewechsel muss die Betriebsdauer bekannt sein und die Batteriekapazität muss so dimensioniert werden, dass es zu keiner schädigenden Tiefentladung kommen kann. Außerdem muss nach der Entladung genügend Zeit für eine Vollladung vorhanden sein. Wie lange diese dauert hängt von der eingesetzten Technologie ab.

Bei einer kapazitiven Ladung mit Batteriewechsel muss eine Tiefentladung ebenfalls vermieden werden, hier kann jedoch innerhalb einer Schicht, die Batterie ausgetauscht werden. Damit kann die Betriebsdauer des Fahrzeuges verlängert werden. Die Konstruktion verändert sich dahingehend, dass ein Austausch der Batterie möglich sein muss und dieser automatisierbar ist. Dieser Austausch kann auch Quelle für Störungen sein und mit höheren Konstruktionskosten verbunden sein. Weiter sind doppelte Ausführungen der Batteriezellen notwendig, da eine aufgeladen wird und sich die andere im Betrieb befindet.

Mit Zwischenladungen kann die Kapazität der Batterie kleiner ausgelegt werden um den gleichen Zeitraum bedienen zu können. Dazu muss jedoch der Betrieb passen und die Ladestationen entsprechend häufig vorhanden sein. In dieser Betriebsart wird nicht bis zur Entladung gewartet, sondern während des Betriebes, z.B. wird beim Warten auf den nächsten Auftrag zwischen durch wieder aufgeladen. Im Laufe der Betriebsdauer verringert sich die Kapazität dennoch bis zur Grenze der Betriebskapazität. Für diese Betriebsart dürfen keine Technologien verwendet werden, bei welchen der „Memory Effekt“ auftreten kann.

Zuletzt kann die Batterie noch im Taktbetrieb verwendet werden. Dabei wird zwischendurch mit hohem Strom schnell aufgeladen. Die Batteriekapazität verringert sich so über die Betriebsdauer bei optimaler Auslegung nur bis zu einem gewissen Level und bleibt auf diesem Niveau. Diese Betriebsart kann als „Mikrozyklus“ bezeichnet werden. Es wird jene Batteriekapazität ausgenutzt, in der das Verhältnis zwischen der Zeit zum Laden und dem Entladen so klein wie möglich ist. Das Verhältnis kann bei NiMh Akkumulatoren bei 1:4 liegen. Die Technologie darf nicht anfällig auf den „Memory-Effekt“ sein.

3.1.3 Kennzahlengenerator

Die Technologien, die im Kapitel 3.1.2 angesprochen wurden, können in verschiedenster Kombination verbaut werden. Die Leistungen und Einsatzgebiete sind entsprechend vielfältig. Eine Aussage zu treffen, welche Variante für einen bestimmten Einsatzfall auszuwählen ist, ist daher schwer. Um einen Vergleich der einzelnen Lösungen durchführen zu können, wären Kennzahlen eine Möglichkeit. Dieses Gebiet würde sich für künftige Studien anbieten. Damit könnte eine Auswahl vereinfacht und nachvollziehbar gemacht werden.

Kennzahlen, sind dimensionslos gemachte Werte von unterschiedlichen Eigenschaften und können so mit anderen Eigenschaften oder Kombinationen von Eigenschaften kombiniert werden. Beispiele dimensionsloser Kennzahlen sind die Reynoldszahl und die Mach-Zahl.

Das Ziel des Kennzahlengenerators im ersten Schritt war die vielen möglichen Varianten der Fahrzeuge miteinander vergleichbar zu machen. Eine Bewertung der Eigenschaften hätte eine dimensionslose Zahl ergeben, die für einen Fahrzeugtyp charakteristisch gewesen wäre. Der zweite Schritt hätte einem System von Stetigförderern ebenfalls Kennzahlen zugewiesen, sodass ein objektiver Vergleich zwischen den Fahrzeugtypen und den Stetigfördersystemen möglich wäre. Dieser Ansatz zur Bewertung des effizienten Einsatzes von autonomen Fahrzeugen wurde aufgrund seines theoretischen Zuganges jedoch nicht weiter verfolgt. Die Erfahrungen aus dem Bewerten der Eigenschaften konnten in die weitere Arbeit eingearbeitet werden.

Ein Prototyp für einen möglichen Auswahlkasten um Kennzahlen zu generieren ist in Abbildung 3-9 dargestellt. Eine Beschreibung ist im Anhang zu finden.

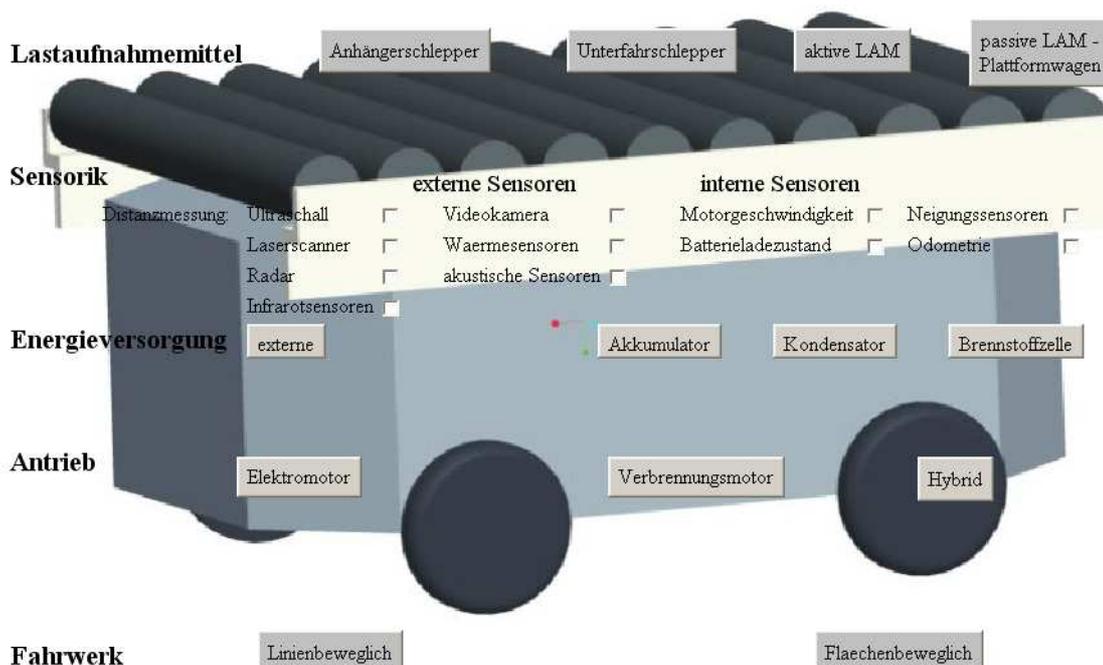


Abbildung 3-9: Prototyp eines Auswahlkastens für einen Kennzahlengenerator

3.1.4 Prototypen und entwickelte Fahrzeuge

Im Zuge dieser Studie konnten Erfahrungen auf der CeMat 2011 in Hannover gesammelt werden. CeMAT bedeutet Centrum für Materialflusstechnik. Diese Messe findet seit 2005 alle 3 Jahre in Deutschland statt. Viele namhaften Firmen stellen hier auf Messeständen Neuheiten aus. Der Kundenkontakt und der Vergleich mit der Konkurrenz sind wichtige Aspekte der Messe.

Direkt zum Thema, der autonomen Fördermittel, wurden von 6 verschiedenen Herstellern interessante Lösungen präsentiert. Manche Aussteller haben Entwicklungen ausgestellt, die Ansätze und Möglichkeiten zur Anwendung liefern. Diese werden hier angesprochen.

Die Kooperation zwischen DEMATIC und dem Fraunhofer Institut IML, sowie die Firma KNAPP haben auf ihren Messeständen Aufbauten präsentiert, die bereits eine Lageranwendung erkennen lassen.

Multi-Shuttle Move

Das *Multi-Shuttle Move* von DEMATIC (siehe Abbildung 3-10) ist ein Regalshuttle, das durch ein zusätzliches Fahrwerk aus dem Regal herausfahren und sich auf der Fläche frei bewegen kann. Die Eigenschaften sind in Tabelle 3-1 angeführt. Die Übergabe erfolgt durch einen am Fahrzeug montierten Schieber, der mittels Linearführung hinter den Behälter greift und diesen aus dem Regal oder der Station auf die Ladefläche, beziehungsweise von dieser auf den Zielstandort schiebt.



Abbildung 3-10: Das Multi-Shuttle Move

Das Fahrwerk zur Bewegung auf der Fläche besteht aus einem Differentialantrieb an der vorderen Achse und einem un gelenkten Stützrad hinten – ein modifizierter Dreiradantrieb. Es ist linienbeweglich und dieser Nachteil ist beim Einfahren in die Lagergasse eindeutig erkennbar. Die Abstimmung der Sensoren von den präsentierten Fahrzeugen ist nicht bekannt. Das Shuttle muss bei falscher Orientierung zur Einfahrt, zurücksetzen und einen neuerlichen Anfahrversuch durchführen. Für dieses gesamte Manöver werden 36 Sekunden benötigt. Wenn beim ersten Mal in die Gasse eingefahren werden kann, dauert der Vorgang 24 Sekunden.

Transportfähigkeit	1 KLT (600 x 400) mit bis zu 40kg
Fahrgeschwindigkeit im Regal	2 m/s
Fahrgeschwindigkeit auf der Fläche	1 m/s
Verfügbarkeit	4,5h ohne Nachladen
Energiebereitstellung	Blei-Gel Akku
Kommunikation und Sensorik	Funkortung, Abstands- und Inertialsensoren

Tabelle 3-1: Eigenschaften des Multi-Shuttle Move von Dematic (vgl [HoK11])

Der Aufbau bestand aus einer ungefähr 5m langen Lagergasse gefüllt mit Standardbehältern. Drei Multi-Shuttle Move waren für Umlagerungen zuständig. Diese haben immer einen KLT aus dem Lager geholt und sind aus der Lagergasse gefahren. Auf der freien Fläche vor dem Lagerboden sind zwei Punkte angefahren worden, um auf der anderen Seite wieder in die Lagergasse hineinzufahren. Durch die zwei fixen Punkte konnte von einer freien Beweglichkeit nichts erkannt werden. Im Gegenteil, die immer gleichen Wege haben sich bereits am Boden durch die Radspuren abgezeichnet. Zwei Problemstellen haben sich bei diesem Versuchsaufbau erkennen lassen. Die Einfahrt in die Lagergasse war, aufgrund der notwendigen genauen Positionierung der Fahrzeuge, ein Flaschenhals und die beiden anderen Fahrzeuge haben auf der freien Fläche Stehzeiten gehabt. Das zweite Problem ergibt sich aus der Vermeidung einer Blockierungssituation. Wenn es vorkommt, dass ein Fahrzeug einen Behälter an einer Position absetzt, die sich näher zur Ausfahrt der Lagergasse befindet als die Position von der ein neuer aufgenommen werden soll, kann es nicht zurück nach vorne fahren. Die Lagergasse ist als Einbahn programmiert. Sonst würden zwei Fahrzeuge, die in die entgegengesetzten Richtungen fahren eine Blockierung hervorrufen. Dadurch können nicht jedes Mal Doppelspiele durchgeführt werden und das Fahrzeug muss aus der Gasse hinaus, auf der freien Fläche zum Eingang fahren und dort erneut hinein fahren, um den nächsten Transport beginnen zu können. Diese Begebenheit senkt die Leistung dieses Systems deutlich. Es ist zu berücksichtigen, dass dieser Aufbau nicht dafür gedacht war eine leistungsfähige Anlage zu zeigen. Die Aussteller wollten damit zeigen, dass die neue Entwicklung die Fähigkeit besitzt in einer Lagergasse und auf der freien Fläche zu manövrieren.

Durch ein grobes Messen der Zeit, die die Fahrzeuge für die Transporte benötigten wurde der theoretische Durchsatz mit der Formel aus Gl. 2-2 berechnet, der für zukünftige Vergleiche dieses Systems Fortschritte erkennbar machen können. Die Zahlen sind in der Tabelle 2-1 dargestellt

Tätigkeit	Dauer	theor. Durchsatz
Einfahren in Lagergasse (einfach)	24 s	150 E/h
Einfahren in Lagergasse (doppelt)	36 s	100 E/h
Ausfahren aus Lagergasse	9 s	400 E/h
Transport	90 s	40 E/h

Tabelle 3-2: Daten zum CeMat Aufbau des Dematic Multi-Shuttle Move

Open-shuttle

Die Firma KNAPP hat am Messestand ihr *open-shuttle* (siehe Abbildung 3-11) präsentiert. Dieser Prototyp ist gemeinsam mit der Firma adept gebaut worden. Es handelte sich dabei um ein autonomes Fördermittel, welches Standardbehälter transportiert. In Tabelle 3-3 sind die Eigenschaften dargestellt.

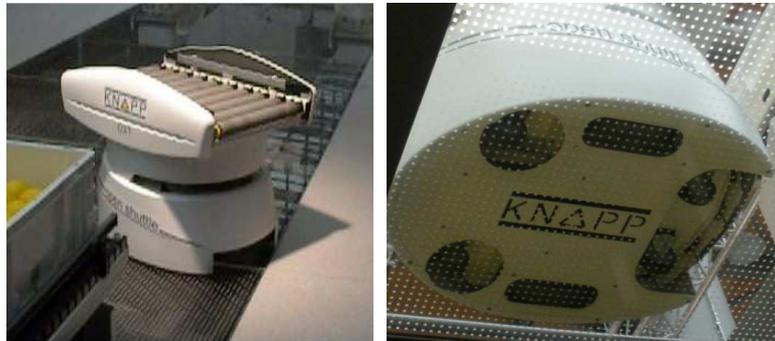


Abbildung 3-11: open-shuttle von KNAPP

Transportfähigkeit	1 KLT (600 x 400)
Fahrgeschwindigkeit	1,8 m/s
Verfügbarkeit	4h ohne Nachladen
Energiebereitstellung	NiMh
Kommunikation und Sensorik	WLAN, Laserscanner und Ultrasonic

Tabelle 3-3: Eigenschaften des open-shuttle von KNAPP

Das Lastaufnahmemittel dieses Fahrzeuges ist ein Rollenförderer. Daher müssen die Stationen ebenfalls mit Aktuatoren ausgestattet sein, damit auf das Lastaufnahmemittel zugegriffen werden kann. Mit Hilfe von Lichtschranken erkennt das LAM ob ein Behälter geladen ist.

Das Fahrwerk des open-shuttle ist mit einem Differentialantrieb ausgestattet. Die Antriebsräder sind mittig angeordnet und vier frei bewegliche Räder dienen der Unterstützung (siehe Abbildung 3-11, rechts). Dadurch kann das Fahrzeug vorwärts und rückwärts fahren. Drehungen um die Mittelachse können gemacht werden. Das Rückwärtsfahren ist wegen der Ultraschallsensoren langsam möglich und daher die sekundäre Richtung. Zur feinen Positionierung an die Station ist ein Winkeldreieck notwendig, an dem sich der Lasersensor orientiert. Eine Warenübergabe dauert 18 Sekunden. Das ist die Zeit, die ein Fahrzeug benötigt um sich so genau wie möglich an der Station zu positionieren, den Behälter zu übergeben und sich von der Station wieder zu entfernen.

Der Präsentationsaufbau von KNAPP war dynamischer als jener der Firma DEMATIC. Gezeigt wurde der Transport von Standardbehältern. 3 Fahrzeuge waren ständig im Betrieb. Zwei weitere waren im Standby verfügbar oder waren zum Laden an den Dockingstationen.

Vier Stationen, die Behälter auf Fördertechnik bereitstellten, waren im Viereck auf einer Fläche von ungefähr 30 Quadratmetern aufgebaut. Jeweils zwei Stationen waren Abgaben und Aufnahmen. Ein Fahrzeug hat von einer Aufnahmestation einen Behälter abgeholt und diesen bei der gegenüberliegenden Station abgegeben. Von dieser Station wurde der Behälter in einer C-förmig

aufgebauten Förderstrecke zur danebenliegenden Station gefördert. Von dort hat das nächste Shuttle den Behälter wieder auf die andere Seite transportiert. Die Wege der Fahrzeuge kreuzen sich und damit wurde gezeigt, dass sie sich gegenseitig ausweichen können. Auch Hindernisse können umfahren werden.

Problematisch war beim Ausweichen die Reaktionszeit. Teilweise kam es zu Berührungen zwischen den Fahrzeugen, weil die Wege zu knapp aneinander vorbeigeführt haben und die Sensoren zu spät darauf reagierten.

Dauer Übergabe + Feinpositionierung	19 s
Fahrzeit für 9 m	9 s
Zeit zum Zuteilen des nächsten Auftrages	7 s
Gesamtdauer eines Auftrages	52 s
Durchsatz von 1 Fzg	69,2 TE/h
Durchsatz des Aufbaues (3 Fzg)	207,7 TE/h

Tabelle 3-4: Daten des KNAPP Aufbau der CeMAT 2011

KARIS

Ein Standaufbau der Wissenschaftlichen Gesellschaft Technische Logistik (WGTL) hat die Fähigkeiten des autonomen Fahrzeuges *KARIS* demonstriert (Abbildung 3-12, links). Die WGTL ist ein Zusammenschluss von deutschen Universitäten zu einer Arbeitsgruppe in Kooperation mit Partnern aus der Wirtschaft. *KARIS* bedeutet „Kleinskaliges Autonomes Redundantes Intralogistik System“, das hauptverantwortliche Institut ist am Karlsruher Institut für Technologie das Institut für Fördertechnik und Logistiksysteme. Das Prinzip der flexiblen Transportlogistik soll damit erklärt werden. Der Transport von Standardbehältern kann auf zwei Arten durchgeführt werden. Die Fahrzeuge agieren als Unstetigförderer und bringen die Waren einzeln von A nach B. Oder die Fahrzeuge organisieren sich und bilden einen Stetigförderer.

Die Lastaufnahme des *KARIS* erfolgt über einen Rollenförderer und arbeitet ähnlich, wie die des open-shuttle von KNAPP.



Abbildung 3-12: Karis am Stand der WGTL auf der CeMAT 2011

Das Fahrwerk besteht aus vier Mechanum-Drive Rädern (Abbildung 3-12, rechts), auch omni-wheels genannt. Dadurch ist das Fahrzeug flächenbeweglich. Die Steuerung dieser Variante ist aufwendig. Außerdem ist ein Fahren über

längere Strecken mit diesen Rädern nicht energieeffizient. Durch die angestellten frei gelagerten Rollen entsteht mehr Reibung als mit einfachen Rädern. Diesen beiden Nachteilen steht der Vorteil gegenüber, dass das Fahrzeug sich schnell positionieren kann.

Geschwindigkeiten von bis zu 5 m/s sollen möglich sein. Für die Beschleunigung müssen allerdings Ladungssicherungssysteme konstruiert werden. Die weiteren Eigenschaften sind der Tabelle 3-5 zu entnehmen.

Transportfähigkeit	1 KLT (600 x 400)
Fahrgeschwindigkeit	bis zu 5 m/s
Energieübertragung	berührungslose Energieübertragung
Kommunikation und Sensorik	WLAN, 2 Laserscanner

Tabelle 3-5: Eigenschaften des KARIS

Andere Systeme

Am Messestand der WGTL wurden noch zwei weitere Systeme gezeigt. Die BInE (Basic Intralogistic Element) war ausgestellt und ist dargestellt in Abbildung 3-13 links. Konzipiert wurde dieses Element vom Technologie-Lizenz Büro der Baden-Württembergischen Hochschulen GmbH. Dieses Fahrzeug verfügt über zwei omnidirektionale Antriebsräder, Stützrollen und Hubspindeln. Es kann als Stetigförderer und als Unstetigförderer zum Einsatz kommen. In beiden Fällen muss es mit mehreren Einheiten zusammenarbeiten. Als Unstetigförderer wird eine Palette von vier Fahrzeugen unterfahren und nach Anheben transportiert. Wenn sich mehrere organisieren und mit den Hubspindeln fix aufstellen, können Waren mit Hilfe der Antriebsräder weitertransportiert werden und somit einen Stetigförderer realisieren.

Das zweite System hat den Namen KaTe (Abbildung 3-13, rechts), kleine autonome Transporteinheit und ist von der Universität Stuttgart unter Professor Wehking konstruiert und ausgestellt worden. Dabei handelt es sich um ein kleines FTF, das einer optischen Spur am Boden folgt. Die Lastaufnahme ist passiv. Die Grundidee dieses Systems ist, mit vielen billigen Einheiten, einen Behältertransport zu ermöglichen.



Abbildung 3-13: BInE (links) und KaTe (rechts) vom Messestand der WGTL

Diese beiden Lösungen sind noch im Stadium eines Prototypen. Wo der Einsatzbereich genau liegt, konnte nicht festgestellt werden.

Bei den nächsten besprochenen Varianten handelt es sich nicht um autonome Fördermittel. Jedoch sind hier einige Ideen realisiert, welche eine Betrachtung wert sind.

Von Swisslog wurde ein neuartiges Lagerbediensystem auf der CeMAT präsentiert, das *AutoStore*. Die Lagerbehälter werden übereinander gestapelt und auf Schienen über den Behältern verfahren Roboter (Abbildung 3-14, links). Diese heben die Behälter an, sortieren sie um, wenn ein Behälter auf dem benötigten steht und bringt diesen zur Bedienstation. Die Lagerdichte ist dadurch maximal. Das Interessante an dieser Lösung ist, die Vermeidung der Kollisionen und die Betrachtung betreffend Leistungssteigerungen durch zusätzliche Roboter. Ab einer gewissen Anzahl von Robotern behindern diese sich gegenseitig und würden keine Erhöhung des Durchsatzes mehr erreichen.

Der Messeaufbau der Firma *Trilogiq* hat ein sehr einfaches FTF gezeigt. Das hat auf schrägen Lastaufnahmeflächen Standardbehälter transportieren können und an Regalen abgegeben. Interessant war der Aufbau wegen der Mehrfachaufnahme von Standardbehältern ohne Aktuatoren. Nur mit Hilfe der Schwerkraft und Hebeln wurden die Waren ausgetauscht. In Abbildung 3-14 rechts wird die einfache Konstruktion des FTF und der Messestand gezeigt.

Auf der CeMat 2011 wurden einige FTF Systeme präsentiert, wie z.B. von SnoxFTS. Das Hauptaugenmerk wurde hier jedoch auf frei agierende Fördermittel und die neuen Ideen in diesem Bereich gelegt, daher werden die FTS nicht näher erwähnt. Im digitalen Anhang findet sich ein Video über die Messestände von DEMATIC, KNAPP und Trilogiq.

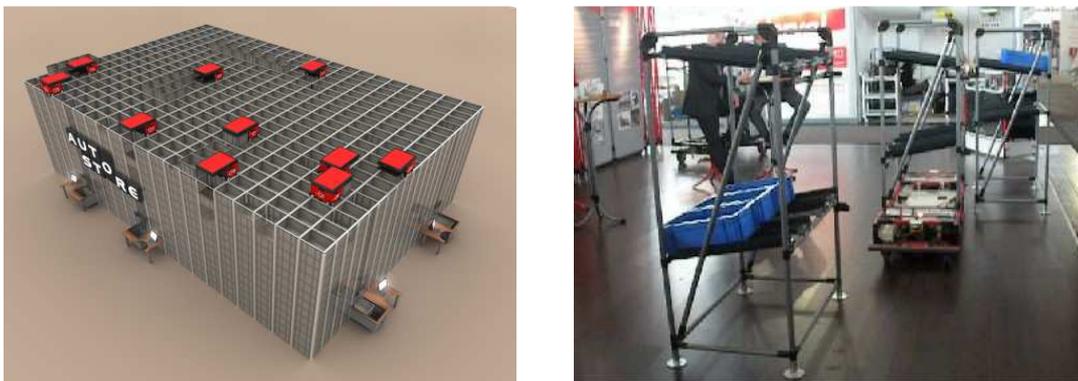


Abbildung 3-14: AutoStore (links) von Swisslog und FTF von Trilogiq (rechts)

Zusammenfassend kann zu den Auftritten auf der CeMAT bemerkt werden, dass die Entwicklung zu autonomen Fördermittel in den Anfängen steckt. Als Prototypen und Universitätsstudien sind bereits Systeme vorhanden. Die Wirtschaft hat diese Entwicklung noch nicht angenommen. Besonders die Übertragung der Verantwortlichkeit auf die einzelnen Fahrzeuge und die Nutzung von Schwarmintelligenz wird noch mit Skepsis betrachtet.

Dabei ungeklärt ist die Frage nach der möglichen Leistungsfähigkeit der Systeme, wenn diese sich selbst organisieren. Eine Überwachung und ein Nachverfolgen der Tätigkeiten sind bei dezentral verwalteten Anlagen komplex, oder aufwendig nach zu vollziehen für den Anwender.

3.2 Leistung der autonomen Fördermittel im System

Das Ziel dieser Arbeit liegt in der Definition eines effizienten Einsatzes von autonomen Fördermitteln. In den vorangegangenen Kapiteln sind der Forschungsstand und die bisher konstruierten Lösungen dargestellt worden. Die daraus gewonnenen Erkenntnisse und erkannten Problembereiche werden in diesem Kapitel bearbeitet.

Um einen effizienten Einsatz bewerten zu können, wird die Leistungsfähigkeit einer Anlage als Vergleichswert herangezogen. In erster Linie wird der Durchsatz eines Systems mit Unstetigförderern einem System mit Stetigförderern gegenübergestellt.

Im Verlauf dieses Kapitels wird zuerst die Herangehensweise an die Problemstellung erläutert. Danach werden die beiden ausgewählten Methoden theoretisch beschrieben.

3.2.1 Herangehensweise

Die Methode zur Beschreibung und Bewertung von autonomen Fördermitteln in einem System folgt dem „vom Einfachen zum Komplexen“ Prinzip. Das bedeutet, dass zuerst Überlegungen angestellt werden, wo dieses System zur Anwendung kommen kann. Im Weiteren werden die Grenzleistung und eine Methode zur Berechnung von Fahrwegen und Fahrzeiten in Lagerlayouts beschrieben.

Die Herausforderung bei der Berechnung von Fahrzeiten und Fahrwegen ist, dass autonome Fahrzeuge nach unterschiedlichsten Strategien für den nächsten Auftrag ausgewählt werden können. Außerdem hängen die Streckenlängen von der Anzahl geladener Waren ab. Für diese Arbeit wird eine allgemeine Strategie gewählt. Die Anzahl der geladenen Waren ist eine Eigenschaft der Fahrzeuge und wird variiert.

Mit Hilfe der Streckenlängen und einer ausgewählten Fahrstrategie kann als nächstes die Leistung für diese Anlage berechnet werden. Jedoch nur für ein einzelnes Fahrzeug. Wenn mehr Fahrzeuge in dem System eingesetzt werden, wird es je nach Größe der Anlage zu Behinderungen kommen. Durch einen Prototyp einer Simulation, werden die Anzahl der Kollisionen gezählt. Diese Anzahl der Kollisionen erhöht die Fahrzeiten um Ausweich- oder Wartezeiten. Die angepassten Transportzeiten der Waren, liefern dann eine geringere Leistung. Das Verhältnis dieser Leistung zu der zuvor berechneten Leistung wird in einem Leistungsgrad dargestellt.

Diese Ausarbeitungen zur Berechnung einer Leistung und einer korrigierten Leistung für ein System wird in den darauf folgenden Kapiteln auf Szenarien und reale Projekte angewandt.

3.2.2 Einsatzgebiete

Für die Ermittlung eines effizienten Einsatzes von autonomen Fördermitteln sollen zuerst Bereiche der Intralogistik definiert werden, wo eine Verwendung möglich und sinnvoll ist. Materialflüsse finden in der Intralogistik zwischen allen Bereichen statt, wie sie in Kapitel 1 angeführt wurden.

Um Gebiete abgrenzen zu können, welche von den Fahrzeugen bedient werden können, werden zuerst grundsätzliche Überlegungen über die Fähigkeiten getroffen. Die Fahrzeuge mit den in Kapitel 3.1 beschriebenen Eigenschaften, können folgende Tätigkeiten durchführen:

- Fördern
- Sortieren
- Puffern

Das Fördern ist die Grundtätigkeit und beinhaltet jede Warenbewegung von einer Station zur nächsten.

Stetigförderer benötigen Strecken, in welche Sorter eingebaut sind, um Waren an unterschiedliche Ziele transportieren zu können. Diese Aufgabe übernehmen frei agierende Fördermittel direkt, indem sie die geladenen Waren zu ihrem Bestimmungsort bringen. Dabei ist die Anzahl der aufgenommenen Waren abhängig, ob dieser Bestimmungsort auf dem schnellstmöglichen Weg angefahren wird oder ob zuvor noch andere abgeliefert werden.

Bei Aufkommen eines Staus können die Fahrzeuge auch als Puffer angesehen werden. Dieses ist jedoch unerwünscht.

Aus diesen Fähigkeiten lassen sich folgende Gebiete erkennen, wo Stetigförderer ersetzt werden könnten. In Abbildung 3-15 werden die Bereiche der Intralogistik und die Verknüpfung durch Stetigförderer (grün) dargestellt. Jeder Bereich muss an Förderbänder angebunden sein um einen stetigen Materialfluss zu realisieren. Um eine direkte Verbindung von Wareneingang zu Warenausgang herzustellen, ein sogenanntes „cross-docking“, benötigt es einer weiteren

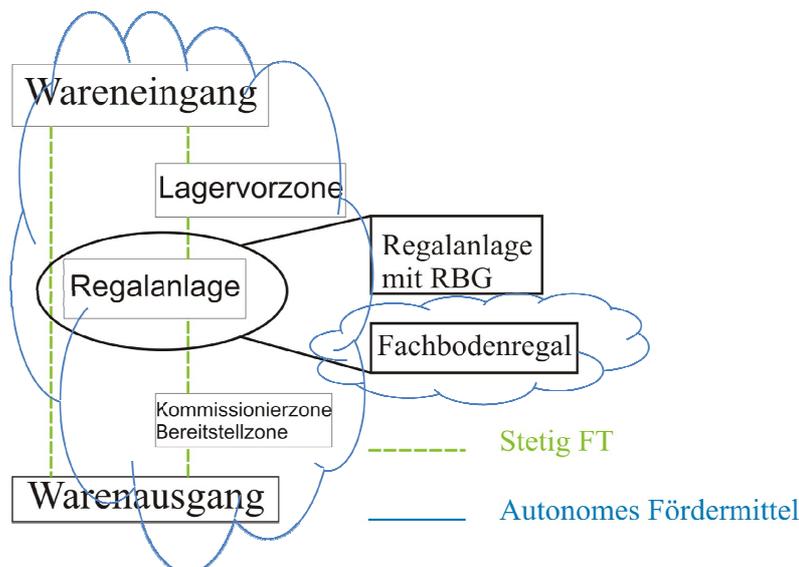


Abbildung 3-15: Einsatzgebiet von autonomen Fördermitteln

Verbindung aus Stetigförderern. Sonst müssen die Waren durch das ganze Lager transportiert werden, ohne bearbeitet zu werden. Das wirkt sich auf die Systemleistung und die Durchlaufzeit der Waren negativ aus.

Ein autonomes Fördermittel kann je nach Bedarf in jeden Bereich einfahren. Voraussetzung dafür ist genügend Platz zum Manövrieren, es können zum Beispiel die Fußwege der Mitarbeiter genutzt werden. Ohne Systemgrenzen beachten zu müssen kann das Fahrzeug das ganze Lager bedienen.

Unter anderem sind folgende Beispiele denkbar:

- direkte Verbindung von Wareneingang mit Warenausgang (cross-docking)
- Nachliefern von Fehlartikeln von der Regalanlage oder der Kommissionierzone zum Warenausgang
- im „Mann zu Ware“ Lager der Person entgegenfahren und so Laufwege verringern, oder wie bei SCHULZE (vgl. [SBB08]) der Person folgen und fertig kommissionierte Aufträge abliefern.
- Bearbeitung von Eilaufträgen

In diesen Beispielen ist die Flexibilität der Fahrzeuge zu erkennen. Die Übergaben können sowohl automatisiert, wie auch manuell ablaufen. Dadurch kann auch eine direkte Interaktion mit den Personen im Lager genutzt werden.

Diese Aussagen werden getroffen mit der Annahme, dass ein Lager mit Wareneingang und Warenausgang ein fixes Layout besitzt. Eine weitere Möglichkeit für den Einsatz von frei agierenden Fahrzeugen würde in veränderbaren Lagern entstehen. Ein flexibles Lager könnte nur mehr über Regalanlagen und Kommissionierzonen verfügen. Der Wareneingang und der Warenausgang wären sozusagen kombiniert. Zu einer gewissen Zeit würden die Artikel angeliefert werden. Dann wären die Fahrzeuge für die Bedienung der Einlagerung zuständig. Zu einer anderen Tageszeit würde die Auslieferung durchgeführt werden. Der Bereich, wo die Waren in die Anlage eintreten und wo fertige Aufträge sie wieder verlassen, wäre der gleiche. Eine örtliche Unterscheidung von Wareneingang und Warenausgang wäre damit nicht notwendig. Die Aufgabe der Bedienung der Stationen kann von Fahrzeugen durchgeführt werden. Ein Stetigförderer müsste für einen Zweirichtungsbetrieb ausgelegt werden, was die Sortertechnik und die Antriebstechnik aufwendig machen. Diese Art des Lagers könnte in der Zukunft die Flexibilität autonomer Fahrzeuge nutzen.

Die modernen Läger sind in der klassischen Aufteilung realisiert. Der Einsatz von frei agierenden Fördermitteln würde hier bei Erweiterungen der Läger möglich sein. Die dabei auftretende Layoutänderung lässt sich über die Fähigkeiten der Fahrzeuge einfacher gestalten. Das existierende Layout von hauptsächlich Stetigförderern müsste nicht aufwendig erweitert und angepasst werden, da andere Ressourcen genutzt werden.

Zu beachten ist jedoch, dass verschiedene Faktoren den Einsatz und die Auslegung schwierig gestalten können. Sind im Lager, z.B. bereits viele Stapler in Verwendung, können kleine autonome Fahrzeuge von den Fahrern übersehen werden. Ein möglicher Einsatzbereich ist nicht gleichbedeutend mit einem effizienten Einsatz, dafür muss der Aufwand zur Leistung stimmen.

3.2.3 Grenzleistungsrechnung

Die Möglichkeiten des Einsatzes sind in Kapitel 3.2.2 erkannt worden. Wie hoch die möglichen Leistungen sind, hängt von vielen Faktoren ab: Die verschiedenen Eigenschaften des Fahrzeuges, der Auswahlstrategie, die Wahl der Routen, das Layout der Anlage, die Größe der Flotte, etc. In den folgenden Unterkapiteln wird die Theorie für eine Berechnung von Durchsatz, Fahrzeit und Weg dargestellt. Auf grundsätzliche Überlegungen folgt ein Betrachten der Bereiche, in welchen sich ein frei agierendes Fahrzeug bewegt. Nach diesen wird ein Verfahren erklärt, mit welchem ein durchschnittlicher Wert für zufällige Abläufe berechnet werden kann.

3.2.3.1 Grundlegendes

Eine Grenzleistungsrechnung muss für jede Art der Anlage durchgeführt werden. Bis zu dieser Grenze kann sie verwendet werden, darüber hinaus kommt es zu einer Überforderung oder Blockierung. Die Läger in der Intralogistik werden derzeit für eine – aus Marktstudien bekannte – Anforderung ausgelegt. Durch Prognosen über die Zukunft werden zu dieser Auslegung Aufschläge gemacht um über eine gewisse Zeit keine erweiternden Investitionen mehr tätigen zu müssen. Besonders Anlagen mit stetiger Förderertechnik sind für nachträgliche Änderungen unflexibel. Der Einsatz von frei agierenden Fahrzeugen könnte hierzu eine Lösung sein. Denn sobald die Anforderungen an das Lager steigen könnte durch das Hinzufügen eines weiteren Fahrzeuges die Leistung gesteigert werden.

Die Grenzleistung eines Systems wird von der Leistung des Elementes begrenzt, das die höchste Auslastung aufweist. Dieses Element ist der sogenannte Flaschenhals. Werden mehr Einheiten eingebracht als das Engpasselement bearbeiten kann, kommt es zu einem Rückstau, Blockierungen und im schlechtesten Fall zu Stillstand. Dieses gilt es zu Vermeiden oder Gegenstrategien zu entwickeln.

Den Arbeitsbereich von frei agierenden Fahrzeugen kann man unterteilen in:

- die Übergabestation,
- die Fahrstrecken und
- Kreuzungen

Zusätzlich zu diesen sind noch Verfügbarkeits- oder Wartungsbereiche notwendig. Dabei handelt es sich um Stationen zur Batterieladung oder zur Reparatur.

Zur Identifizierung eines Flaschenhalses wurden vorerst folgende Annahmen für eine Transportaufgabe getroffen: Es wird eine Strecke von zehn Metern betrachtet, die von der optimalen Anzahl von Fahrzeugen bedient wird um einen möglichst hohen Durchsatz zu erzielen. Die Fahrzeuge behindern sich auf der Strecke nicht. Das bedeutet dass es keine Vorfahrtregeln bei Kreuzungen gibt. Die Geschwindigkeit der Fahrzeuge wird mit 2 m/s angenommen. Zur Übergabe der Waren wird eine Zeit von 15 Sekunden bemessen. Allerdings kann immer nur ein Fahrzeug an der Station sein, wo die Waren aufgenommen oder abgege-

ben werden. Mit Hilfe einer Zeitachse wurde diese Situation in Abbildung 3-16 dargestellt.

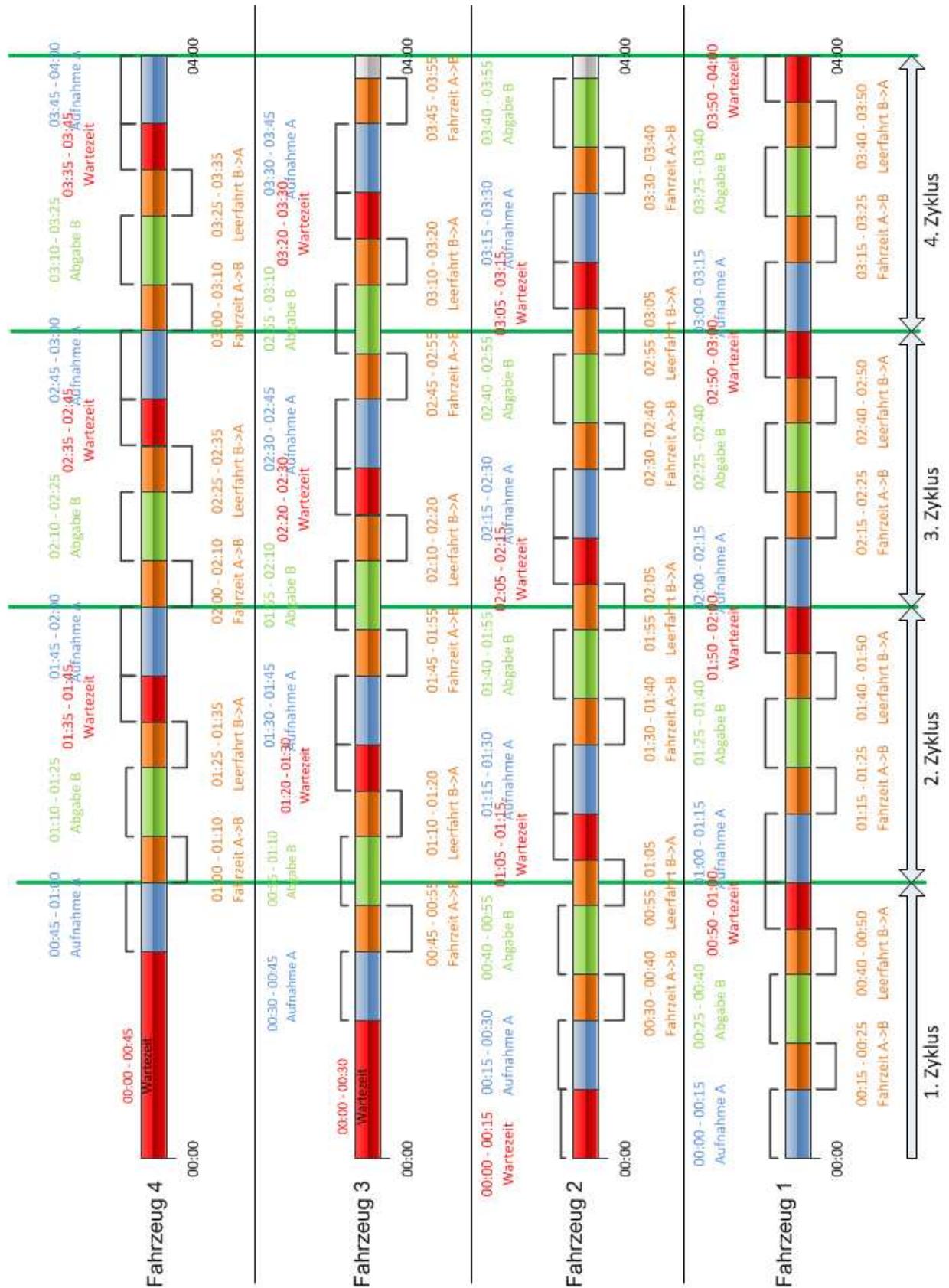


Abbildung 3-16: Zeitachse Einzellloop 20m Strecke, optimale Anzahl von Fahrzeugen

Das erste Fahrzeug startet beim zeitlichen Nullpunkt mit der Aufnahme einer Ware bei Station A. Diese dauert 15 Sekunden, so wie alle weiteren Übergaben. Die anderen 3 Fahrzeuge stehen in der Nähe der Station müssen allerdings warten bis die Übergabe des ersten Fahrzeuges abgeschlossen ist. Sobald sich dieses auf der Strecke von A nach B befindet kann das nächste Fahrzeug eine Ware aufnehmen. Das erste Fahrzeug kommt nach 25 Sekunden zur Station B und beginnt mit der Übergabe der Ware und fährt direkt darauf leer zur Station A zurück, wo es nach 50 Sekunden landet. Zu diesem Zeitpunkt befindet sich das zweite Fahrzeug bei der Übergabe in Station B und das dritte Fahrzeug auf der Strecke. Das Problem ist das vierte Fahrzeug, welches sich noch in der ersten Aufnahme befindet. Also muss das erste Fahrzeug solange warten bis die Station frei wird. Der erste Zyklus endet mit dem Beginn der zweiten Aufnahme einer Ware bei Station A durch das erste Fahrzeug. Ab jetzt sind alle Fahrzeuge im Rhythmus und müssen immer bei der Station A 10 Sekunden warten, bis sie frei wird. Drei weitere Zyklen sind zur Veranschaulichung dargestellt. Bei dieser Anzahl von Fahrzeugen ist die Station A und B immer völlig ausgelastet, mehr könnten bei den Stationen nicht bedient werden. Nochmals erwähnt sei, dass dieser Überlegungsansatz eher zu einem einfachen FTS gehört, jedoch werden aufbauend auf diesen die weiteren Szenarien erarbeitet. Die Annahmen dafür sind, dass sich die Fahrzeuge auf der Strecke und beim Warten vor einer Station nicht gegenseitig behindern.

Die Zeitachse in Abbildung 3-17 zeigt den Fall, wenn ein weiteres Fahrzeug eingesetzt wird. Dann kommt es dazu, dass bei der Rückkehr des ersten Fahrzeuges zu Station A das fünfte Fahrzeug noch immer auf die erste Aufnahme wartet. Die Wartezeiten würden sich von 10 Sekunden im ersten Fall auf 25 Sekunden steigern, je Fahrzeug und Zyklus. Die grünen Linien markieren den Beginn und das Ende der Zyklen, während die Blockpfeile die Zyklusdauer des Falles mit der optimalen Anzahl von Fahrzeugen darstellen. Die Anzahl der transportierten Waren bleibt gleich. Die Fahrzeuge die sich auf der Strecke befinden haben genug Platz zum Fahren, da sich die Warteposition vor der Station A befindet, solange es bei Station B nicht zu ungeplanten Situationen kommt.

Im Gegensatz dazu zeigt die Abbildung 3-18 die Zeitachse eines Transportes mit einem Fahrzeug weniger als optimal. Nachdem das dritte Fahrzeug an Station A beladen wurde, wartet kein weiteres Fahrzeug. Das erste Fahrzeug befindet sich zu dem Zeitpunkt noch auf dem Rückweg von Station B. Während die Fahrzeuge hier keine Wartezeiten haben und vollständig ausgelastet sind, also den maximalen Durchsatz erreichen, entsteht bei den Stationen eine Wartezeit bis das nächste Fahrzeug zur Übergabe bereit steht. Die Wartezeiten sind in der Grafik gekennzeichnet (roter Kreis). Zum Vergleich sind auch die Zyklen der beiden vorangegangenen Fälle eingezeichnet und der momentanen Betrachtung. Die Blockpfeile weisen auf den Fall mit der maximalen Auslastung der Stationen hin, die grünen Linien auf den Fall mit einem Fahrzeug zu viel und die gelben Linien geben den Zyklus der abgebildeten Situation wieder.

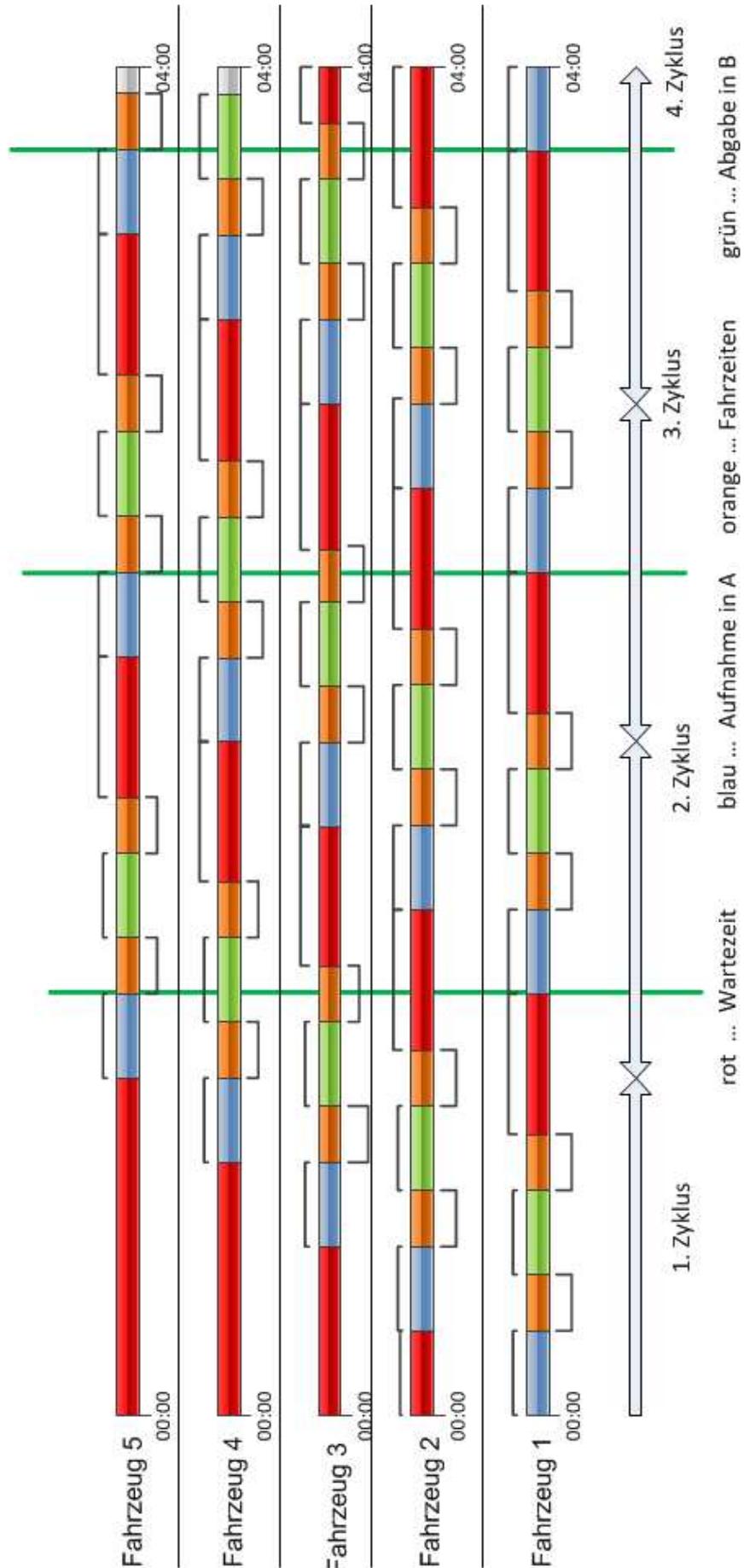


Abbildung 3-17: Zeitachse zu Einzelloops mit einem Fahrzeug mehr als optimal

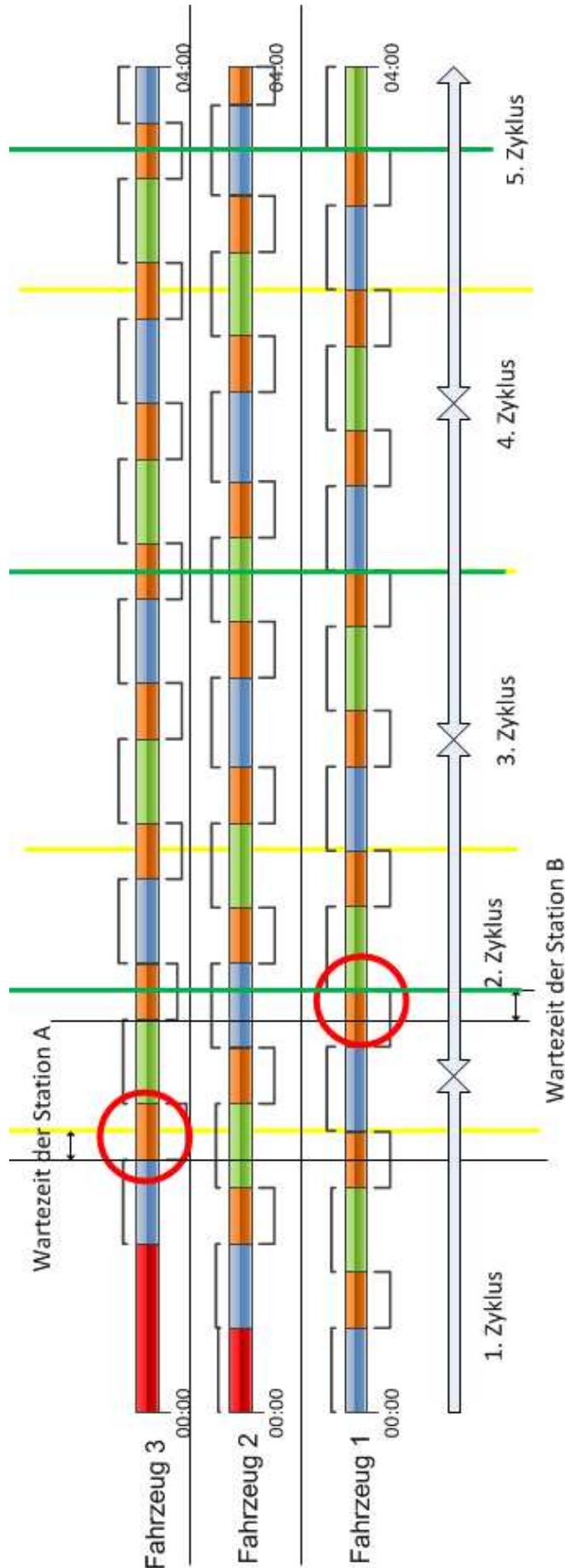


Abbildung 3-18: Zeitachse zu Einzelloops mit einem Fahrzeug weniger als optimal

Es fällt auf, dass sich mit einer steigenden Anzahl von Fahrereinheiten die Dauer der Zyklen um die auftretenden Wartezeiten vergrößert. Der erzielbare Durchsatz steigt dabei nicht an. Diese Aussage deckt sich mit den Studien aus verschiedenen Berichten aus der Fachliteratur, wie zum Beispiel bei RAJOTA und SHANKER. Dort heißt es, dass ab einer optimalen Flottengröße, die Wartezeiten der Fahrzeuge auf Kosten der Transport- und Leerfahrzeiten steigen. (vgl. [RaS98]).

Diese Abstraktion ist der Ausgangspunkt der Überlegungen. Es werden zuerst die einzelnen Elemente betrachtet um die späteren Zusammenhänge besser zu erkennen und eine Aussage des Einflusses dieser auf die Leistung eines ganzen Systems treffen zu können.

3.2.3.1.1 Übergabestation

Das erste Element mit welchem ein frei agierendes Fahrzeug in Kontakt tritt um einen Transport durchzuführen ist die Übergabestation. Dabei kann Ware passiv oder aktiv auf das Lastaufnahmemittel gelangen. Passive Übergaben können durch automatisierte Stationen durchgeführt werden oder durch manuelles Platzieren. In beiden Fällen muss eine Identifikation gemacht werden, damit das Ziel über den Leitreechner abgefragt werden kann. Im Falle einer dezentralen Steuerung, würde der Identifikationscode an der Last das Ziel mitteilen können. Diese Aktion benötigt einiges an Zeit.

Mehr Zeit braucht jedoch die genaue Positionierung des Fahrzeuges an der Station. In Kapitel 3.1.1 wird diese Eigenschaft genauer beschrieben. Während dieser Zeit kann kein anderes Vehikel sich der Station nähern und mit der Positionierung beginnen. Die Dauer der Feinpositionierung wird von einigen Bereichen der Technik beeinflusst. Wie im genannten Kapitel kann durch verschiedene Fahrwerke die Zeit reduziert werden. Die Sensortechnik und die Programmierung der Annäherungssteuerung spielen hier auch eine Rolle.

In den oben dargestellten Zeitachsen bildet die Übergabestation einen Engpass. Ab einer gewissen Anzahl von Fahrzeugen, wartet jedes Weitere darauf, dass die Station wieder verfügbar wird. Wenn die Übergabe schneller gehen würde, könnten mehr Fahrzeuge in einem bestimmten Zeitfenster bedient werden.

Eine weitere Erhöhung des Grenzdurchsatzes würde auch durch eine Mehrfachübergabe möglich sein. In diesem Fall wird eine beliebige Anzahl (n) von Waren auf das Fahrzeug geladen. In der zeitlichen Betrachtung müsste, diese Übergabe schneller verlaufen, als das n -fache der Beladezeit von einem Artikel. Dann könnte der Durchsatz gesteigert werden. Eine technische Realisierung der Station, die ein erneutes Positionieren des Fahrzeuges vermeidet, sollte angestrebt werden. Zu beachten ist, dass der Mehrfachtransport von Waren zu erheblichen Mehraufwand anwachsen kann. Dies betrifft sowohl die physikalische Anpassung des Fahrzeuges und der damit verbundene erhöhte Raum- und Manövrierbedarf, als auch die Materialflusssteuerung, da die n verschiedenen Waren nicht immer dasselbe Ziel haben werden.

Der Grenzdurchsatz einer Übergabestation kann formell durch den Zeitaufwand der angeführten Tätigkeiten berechnet werden. Zusammenfassend werden diese nochmals kurz beschrieben:

1. Das Fahrzeug fährt in den Bereich der Station ein und beginnt hier mit der Feinpositionierung (t_P ... Zeit für die Positionierung in [s]).
2. Nach der Feinpositionierung kommuniziert das Fahrzeug mit der Station und gibt die tatsächliche Übergabe frei (t_U ... Zeit für die tatsächliche Übergabe in [s]).
3. Wenn die Ware korrekt geladen und identifiziert wurde, entfernt sich der mobile Roboter von der Station und verlässt diesen Stationsbereich. Erst jetzt kann das nächste Fahrzeug dort einfahren (t_E ... Zeit zum Entfernen von der Station)

Die Formel für den Grenzdurchsatz lautet:

$$\lambda = \frac{c \cdot 3600}{t_P + t_U + t_E} \dots \left[\frac{TE}{s} \right] \quad \text{Gl. 3-1}$$

c ... Anzahl geladener Waren

3.2.3.1.2 Strecke

Das zweite Element welches genutzt wird ist die Wegstrecke von A nach B oder die Wegstrecken in einem größeren Lagerlayout. Bei frei agierenden Fahrzeugen können diese jedes Mal anders sein. Der Vorteil liegt in der Möglichkeit Hindernissen, die auf dem Weg liegen ausweichen zu können oder möglicherweise alternative Routen zu wählen, wenn Staus vorliegen. Dafür ist im Speicher der Einheit ein virtueller Plan hinterlegt. Diese Variabilität macht eine Berechnung des Weges und der möglichen Grenzleistung komplex. In dieser Vereinfachung wird der direkte Weg herangezogen und die maximale Auslastung davon berechnet. Bei GUDEHUS wird die maximale Leistung für eine Strecke mit der Formel Gl. 3-2 berechnet. Die in dieser Gleichung angeführte Notbremskonstante ist jene maximale Verzögerung, welche ein Fahrzeug bei einer Notbremsung aufgrund seiner Eigenschaften erreichen kann.

$$\lambda = \frac{3600}{t_0 + \frac{l_{TE}}{v_s} + \frac{v_s}{2 \cdot b_n}} \dots \left[\frac{TE}{s} \right] \quad \text{Gl. 3-2}$$

t_0 ... Reaktionszeit [s]
 l_{TE} ... Länge der Transporteinheit [m]
 v_s ... Fahrgeschwindigkeit [m/s]
 b_n ... Notbremskonstante [m/s²]

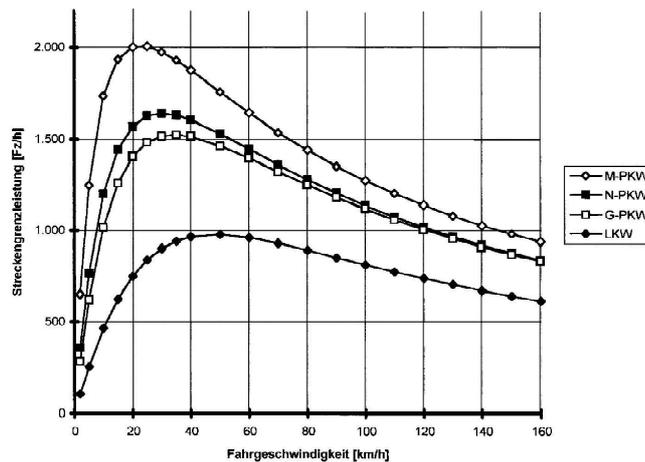


Abbildung 3-19: Streckengrenzleistung für div. Fahrzeuge über Geschwindigkeit (nach [GUD05], Abb. 13.5, S. 485)

Die Abbildung 3-19 stellt den Verlauf des Durchsatzes für verschiedene Fahrzeuge über der Fahrgeschwindigkeit dar. Daraus lässt sich eine optimale Geschwindigkeit ablesen. Diese Formel kann auf frei agierende Fördermittel umgelegt werden. Damit lässt sich in erster Näherung eine Leistung der Strecke bemessen.

Das wäre der maximal erreichbare Durchsatz für die Fahrwege. Reduziert wird dieser durch verschiedene mögliche Störungen, wie Kreuzungen und Hindernissen.

3.2.3.2 Monte-Carlo Simulation

In den ersten Überlegungen wird die Grenzleistung eines bekannten Transportweges berechnet und das Verhalten auf diesem untersucht. In einem flexiblen System von autonomen Fördermitteln werden die Routen nicht von vornherein bekannt sein. Beispielhaft können Szenarien ausgewählt werden. Die Berechnungen dieser werden jedoch nur für diese Szenarien gültig sein. Die Routenauswahl wird über verschiedene Regeln getroffen. Die Anfragen der Stationen und die Wege der Waren in Distributionslagern kann nur mit einer statistischen Verteilung vorher gesagt werden. Daher benötigt es einer anderen Methode zur Berechnung einer maximalen Leistung.

Diese analytische Berechnung beziehungsweise das Aufstellen eines mathematischen Modells bietet sich für eine eigene Studie an. Um dennoch mit einer Methode aussagekräftige Ergebnisse zu erhalten, wurde die Monte Carlo Simulation ausgewählt.

Die Monte-Carlo Simulation ist ein überschaubares Werkzeug um die Wegstrecken von mobilen Robotern bei stochastischen Aufträgen zu berechnen. Es können damit verschiedenste Szenarien berechnet werden und die Layouts der Lager können beliebig angepasst werden. Der Aufwand zur Anpassung der einzelnen Szenarien ist jedoch relativ groß, da die verschiedenen Fahrstrategien implementiert werden müssen.

3.2.3.2.1 Grundlage

Die Monte-Carlo Simulation basiert auf dem starken Gesetz der Großen Zahlen von Cantelli und Kolmogoroff. Dieses lautet (vgl. [SaH06]):

Liegen n unabhängige Zufallsvariablen mit derselben Verteilungsfunktion und endlichem Erwartungswert μ vor, dann strebt das arithmetische Mittel \bar{X}_n mit wachsendem n gegen μ ; und zwar **fast sicher**, d.h. mit **Wahrscheinlichkeit eins**.

Das bedeutet, dass sich mit einer großen Anzahl von Stichproben der arithmetische Mittelwert dem Erwartungswert der Stichproben nähert. Im Unendlichen sind beide Wert gleich. Bei BRONSTEIN wird dieser Satz mit Gleichung Gl. 3-3 beschrieben (vgl. [BMM01]):

$$E(x) = \int_{-\infty}^{+\infty} x \cdot f(x) dx \approx \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i \quad \text{Gl. 3-3}$$

Links des ungefähren Gleichheitszeichen in Gl. 3-3 wird der wahre Erwartungswert des Systems berechnet. Da die Dichtefunktion $f(x)$ nicht bekannt ist, kann auch der Erwartungswert nicht berechnet werden. Über die Annäherung des arithmetischen Mittelwertes, der rechts des ungefähren Gleichheitszeichens steht, kann dieser bei einer hinreichend großen Zahl von Stichproben den Erwartungswert ausdrücken.

Die Anwendung dieser Methode soll den durchschnittlichen Fahrweg von mobilen Robotern in verschiedenen Anlagen als Erwartungswert berechnen. Zufallsgeneratoren aus den Programmen MathCad und MATLAB werden dabei verwendet um die zuvor definierten Stationen in unterschiedlicher Reihenfolge auszuwählen und damit stochastische Fahrbefehle zu simulieren. Die Zufallsgeneratoren erzeugen dabei aus einem Intervall eine Menge von gleichverteilten Zahlen, welche den jeweiligen Stationen zugeteilt sind. Eine nähere Betrachtung der Zufallsgeneratoren wird hier nicht durchgeführt. Die Erklärung der Arbeitsweise dieser müsste in einem eigenen Kapitel behandelt werden und würde außerhalb des Rahmens dieser Arbeit liegen.

Einer näheren Betrachtung der Konvergenz und der Konfidenz wird in dieser Arbeit abgesehen und auf GASPERIN [Gas09] verwiesen. Hier wird die gewöhnliche Monte-Carlo-Methode zur Berechnung von Spielzeiten eines Regalbediengerätes angewendet. Die Konvergenzkriterien werden hergeleitet und berechnet. Die Erkenntnisse betreffend der Abbruchkriterien werden zur Anwendung in den hier eingeführten Systemen von frei agierenden Fahrzeugen herangezogen. Bei diesen Erkenntnissen handelt es sich um die Anzahl und die Bedingungen unter welchen ein Abbruch des Algorithmus zulässig ist und hinreichend genaue Ergebnisse liefert.

In erster Linie muss die Zahlenfolge des Ergebnisses konvergent sein um überhaupt ein Resultat ausdrücken zu können. Die Konvergenz wird aufgrund

des eingesetzten Zufallsgenerators nicht zwischen den jeweils letzten zwei Werten getestet, sondern zwischen Werten die einen gewissen Abstand zueinander haben. Dadurch wird vermieden, dass der Zufallsgenerator in einem Intervall zufällig ähnliche Zahlen auswählt und dadurch ein anderer Mittelwert als der gesuchte berechnet (vgl. [Gas09]) wird. Die Gleichung Gl. 3-4 stellt dieses Abbruchkriterium dar. In dieser Gleichung stellt der Index i die momentan berechnete Stichprobe dar. Die Variable n ist der Abstand zwischen den berechneten arithmetischen Mittelwerten, der gewählt wird um dieses Verhalten des Zufallsgenerators ab zu fragen. \bar{x} stellt den arithmetischen Mittelwert dar und ε die Genauigkeit mit der diese Abfrage durchgeführt werden soll.

$$|\bar{x}_i - \bar{x}_{i-n}| \leq \varepsilon \quad \text{Gl. 3-4}$$

Das zweite Abbruchkriterium folgt aus der Konfidenz. Um eine gewisse Genauigkeit zu erreichen werden die maximalen Amplituden der Konfidenz berechnet. Diese hängen von der Anzahl der Stichproben ab. Dieses Vorgehen wird bei GASPERIN genau hergeleitet.

Das Kriterium welches nach mehr Stichproben verlangt, wird ausgewählt. Die Auswahl fällt auf das zweite Kriterium. Die Berechnung der Anzahl der Stichproben nach der Größe der Konfidenzamplituden sagt, dass nach 35000 Stichproben der Wert hinreichend genau berechnet wird.

3.2.3.2.2 Math-Cad Berechnung

Die Monte-Carlo Methode, die im vorangegangenen Kapitel erklärt wurde, ist mit dem Programm MathCad durchgeführt worden. In Abbildung 3-20 wird eine Vorgehensweise und eine Fahrstrategie mittels Strukturdiagramm dargestellt. Das spezielle Lagerszenario wird in Kapitel 4.2.2 genauer dargestellt. Hier soll für die Erklärung des Diagrammes folgende Beschreibung für das Lager genügen.

Die Fahrt eines mobilen Roboters beginnt bei einer zentralen Station. Dort werden die Waren geladen und an andere Stationen verteilt. Von diesen anderen Stationen werden Waren wieder aufgenommen und zurück an die Zentralstation gebracht. Dieses Doppelspiel ähnelt dem eines Regalbediengerätes, jedoch sind die einzelnen Stationen weiter voneinander entfernt, weniger viele und die Strecken zwischen jeder einzelnen Station können in einer Wegematrix eingetragen werden.

In dem erwähnten Strukturdiagramm werden eine Fahrstrategie und die Schleife für die Berechnung des durchschnittlichen Fahrweges dargestellt. Die Grundlage dafür liegt in der Monte-Carlo Simulation.

Der erste Schritt nach dem Starten des Algorithmus liegt im Einlesen des Lagerlayouts. Dafür liegt eine Tabelle vor, in welcher die einzelnen Wegstrecken in Meter von jeder Station zu jeder anderen gespeichert sind. In diesem Fall ist eine Microsoft Excel Tabelle für diese Matrix verwendet worden. Als nächstes

müssen auch die Randbedingungen für das System festgelegt werden. Diese sind:

- Fahrgeschwindigkeit,
- Anzahl n der Ladehilfsmittel, welche das Fahrzeug laden kann,
- Die gesamte Übergabezeit mit Positionierung und Übergabe bei den Stationen,
- die reine Übergabezeit und
- die Definition der Startstation.
- Abbruchkriterien, wie in Kapitel 3.2.3.2.1 definiert.

Mit dem MathCad internen Zufallsgenerator werden ganze Zahlen, durch die Befehle **runif** und **round** generiert. Diese zufälligen und gleichverteilten Zahlen sind den Zielstationen zugewiesen. Die bei der Zentralstation geladenen Waren werden zu diesen Zielstationen transportiert, es müssen hierbei nicht gleich viele Stationen sein, wie geladene Waren oder LHM, da auch mehrere dieselbe Station als Ziel haben können.

Die Ziele werden in aufsteigender Reihenfolge sortiert und der Weg zur ersten, nächsten Station wird aus der Matrix gelesen und gespeichert. Das Fahrzeug fährt zu dieser Station und gibt den oder die Artikel dort ab. Hier wird eine Zahl über den Zufallszahlengenerator gebildet, welche den ersten Aufnahmepunkt für eine Ware, die zur Zentralstation geliefert werden soll, darstellt. Wenn diese ausgewählte Aufnahmestation, die gleiche ist wie die Zielstation an welcher das Fahrzeug die Ware abgegeben hat, wird diese Ware gleich wieder geladen. Durch diese Abfrage spart sich das Fahrzeug ein nochmaliges Anfahren dergleichen Station und den damit verbundenen Zeitaufwand der feinen Positionierung. Andernfalls, wird die Station im Speicher abgelegt um sie später anzufahren.

Bei der nächsten Abfrage, wird getestet, ob noch Waren zur Abgabe geladen sind. Sind noch Artikel vorhanden, wird der Weg zur nächsten Station ausgelesen, vom Fahrzeug angefahren und der Artikel abgegeben. Bei jeder Ablieferung einer Ware wird über eine neue zufällige Zahl eine Aufnahmeposition erzeugt. Fallen bereits zugeteilte Aufnahmepositionen mit einer Zielposition zusammen wird die Ware auch aufgenommen und eine Feinpositionierung wird wiederum eingespart. Diese Abfrage wird so oft durchgeführt bis alle Waren ihren Zielort erreicht haben.

Sind alle Waren abgeliefert, wird getestet ob es noch Stationen gibt, welche angefahren werden müssen um weitere aufzunehmen. Aufgrund des Zufallsgenerators kann es auch möglich sein, dass bereits wieder alle Waren aufgenommen wurden. Ist dies nicht der Fall werden diese Stationen in absteigender Reihenfolge angefahren. Also die Station am weitesten von der Zielposition entfernt zuerst. Dieser Test wird solange durchgeführt bis alle Waren aufgenommen sind. Danach wird der Weg zur Zentralstation ausgelesen und das Fahrzeug fährt dorthin um alle Waren abzugeben. Die einzelne Simulation eines Auftrages endet mit dieser Tätigkeit und wird als eine Stichprobe gesehen.

Zur Auswertung werden die einzelnen Wege, die das Fahrzeug zwischen den Stationen zurückgelegt hat, addiert. Diese Summe wird mit den vorher berech-

neten Summen der Wegstrecken addiert und durch die bisherige Anzahl der Aufträge dividiert. Ein arithmetischer Mittelwert aus allen bisher gerechneten Fahrten wird gebildet. Wenn dieser Wert oder die notwendige Anzahl der gerechneten Stichproben den Abbruchkriterien genügt wird der Algorithmus beendet. Das ist das Ergebnis der Monte-Carlo Simulation.

In der Abbildung 3-20 werden für Abfragen von wiederkehrenden Aktionen gelbe Rauten verwendet. Die grünen Vierecke sollen dem Verständnis helfen und zeigen die Tätigkeiten, die ein Fahrzeug zwischen den einzelnen Schritten durchführt. Der rote Pfeil verweist auf die Berechnung einer Stichprobe, die so oft durchgeführt wird bis die Abbruchkriterien erfüllt sind.

Mit diesem Ergebnis wird ebenfalls die Fahrzeit berechnet, die nicht nur vom Weg, sondern auch von der Anzahl der angefahrenen Stationen abhängt. Damit wird der Durchsatz für ein solches System mit einem Fahrzeug als Leistung berechnet.

Im Anhang befindet sich der dazu passende formulierte MathCad Code mit Kommentaren und Überprüfungen der Konvergenz des Verlaufes von dem Ergebnis. Der nächste Schritt der Materialflussrechnung wird mit einem Prototyp zur Simulation von Kollisionen im folgenden Kapitel erklärt.

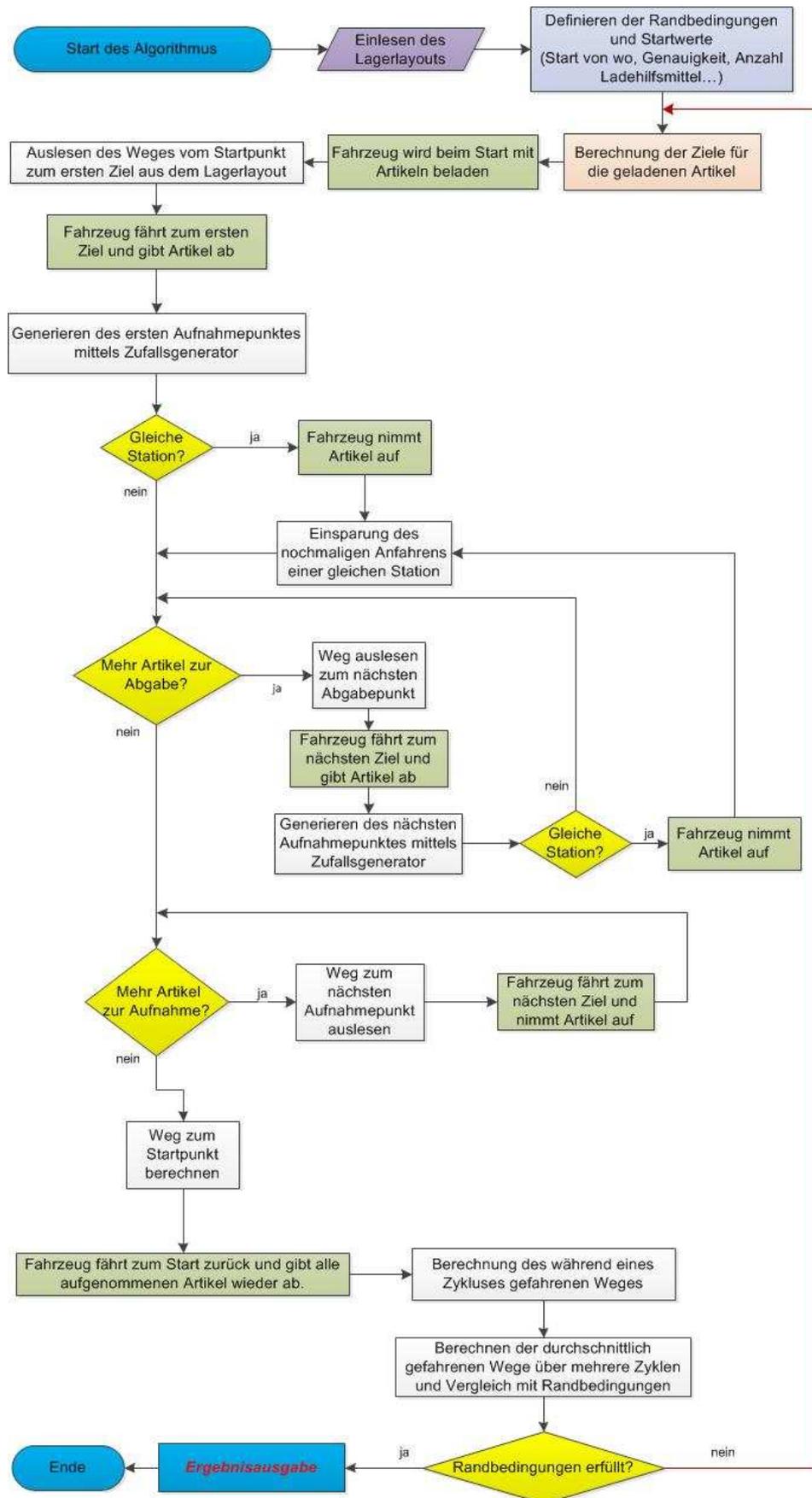


Abbildung 3-20: Strukturbild des Algorithmus

3.2.4 Prototyp einer Kollisionssimulation

Im Kapitel 3.2.3 wurde eine Herangehensweise zur Berechnung der Grenzleistung für verschiedene Lager präsentiert. Diese wurde mit der Annahme berechnet, dass sich die Fahrzeuge im Lager nicht behindern und jedes seinen maximalen von Weg und Geschwindigkeit abhängigen Durchsatz erreicht. Dadurch ergibt sich eine Steigerung der Leistung mit jedem zusätzlichem Fahrzeug. Eine solche statische Durchsatzberechnung ist jedoch wenig realistisch, da es mit mehr Fahrzeugen zu mehr Interaktionen der einzelnen Fahrzeugen untereinander kommt, sowohl auf den Fahrstrecken als auch bei den Übergabestationen. Daher wurde ein Prototyp für ein Zählen von Kollisionen in dem Programm MATLAB entwickelt.

Folgende Ausgangssituation wurde für diesen Prototyp gewählt. In einem System werden 8 Übergabestationen und zwei Zwischenstationen aufgebaut. In Abbildung 3-21 sind die Übergabestationen mit roten Kreuzen und die Zwischenstationen mit grünen Dreiecken dargestellt. Für die Wege, die von den Fahrzeugen gefahren werden, gibt es drei Möglichkeiten. Wenn die Zielstation sich in der gegenüberliegenden Reihe befindet, ist der Weg die direkte Verbindung von Start zu Ziel. In dem Fall, dass sich Start und Ziel in dergleichen Reihe befinden und dazwischen keine Station liegt, ist der Weg ebenfalls die direkte Verbindung. Befindet sich zwischen den beiden Stationen allerdings eine andere Station, wird zuerst die Zwischenstation angefahren und dann die Zielstation. Der Grund dafür ist, dass die Fahrzeuge auf ihren Transportwegen nicht direkt durch die Bereiche anderer Stationen fahren sollen.

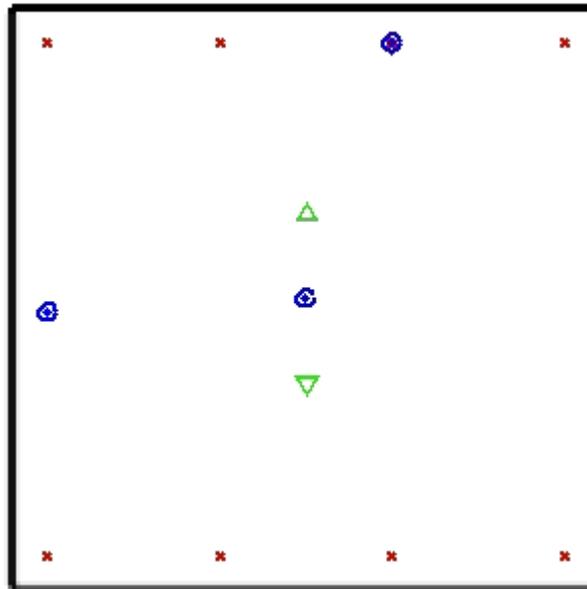


Abbildung 3-21: Darstellung des Prototypen zur Kollisionsszählung

Wo sich der Startpunkt befindet und welche Station als nächstes Ziel ausgewählt wird, wird über einen Zufallsgenerator ausgewählt. Die Fahrstrategie, die dieser Simulation zu Grunde liegt, ist auf Einzelfahrten aufgebaut. Die beliebig vielen Fahrzeugen, die eingesetzt werden können, fahren von einer

Startstation mit einer Ladung zur Zielstation, gibt dort eine Ware ab und nimmt gleichzeitig wieder eine auf. Die Zielstation wird zum Start eines neuen Auftrages. Dabei wurde die Annahme getroffen, dass bei jeder angefahrenen Zielstation bereits ein Artikel für einen weiteren Transport bereit liegt und es dadurch zu keinen Leerfahrten oder Wartezeiten kommt.

In dieser Simulation werden die Kollisionen der Fahrzeuge gezählt. Das wird durch eine Kollisionsbedingung getestet. In dem Prototyp werden die Fahrzeuge als Punkte und ihr Aktionsradius als Kreise dargestellt. Der Aktionsradius ist jener Radius der zum Manövrieren benötigt wird. Sobald sich ein Fahrzeug innerhalb dieses Bereiches eines anderen Fahrzeuges befindet, werden von beiden Fahrzeugen Ausweichalgorithmen gestartet um eine Kollision zu verhindern. Dabei werden die Geschwindigkeiten reduziert und eine Kurs zum Ausweichen von dem internen Fahrkursrechner erstellt. Dieser Algorithmus ist in dem Prototyp nicht realisiert. Die Abfrage wird durch die Berührbedingung (siehe Gl. 3-5) zweier Kreise realisiert.

$$\sqrt{(x_{ma} - x_{mb})^2 + (y_{ma} - y_{mb})^2} \leq 2 \cdot \text{rad} \quad \text{Gl. 3-5}$$

x_{ma} ... x-Koordinate erstes Fzg
 x_{mb} ... x-Koordinate zweites Fzg
 y_{ma} ... y-Koordinate erstes Fzg
 y_{mb} ... y-Koordinate zweites Fzg
 rad ... Aktionsradius

Durch die festgestellte Anzahl der Kollisionen wird ein Faktor errechnet, der die Fahrzeiten erhöht um daraus einen Einfluss der Kollisionen auf die Leistung darzustellen. Angenommen wird, dass die Kollisionen überall die gleiche Verzögerung verursachen. Der daraus angepasste Durchsatz errechnet sich laut Gleichung Gl. 3-6.

$$\lambda_{kor} = \frac{n \cdot 3600}{\frac{s}{v} + \frac{\alpha}{100} \cdot t_{wart}} \quad \text{Gl. 3-6}$$

λ_{kor} ... korrigierter Durchsatz
 n ... Anzahl der Fahrzeuge
 s ... durchschnittlicher Fahrweg
 v ... Fahrgeschwindigkeit
 α ... Kollisionen pro Fahrt in [%]
 t_{wart} ... Wartezeit aufgrund Kollision

Aufgrund der Formel Gl. 3-6 wird erwartet, dass sich der Durchsatz mit jedem weiteren Fahrzeug nicht linear verhält, da die Anzahl der Kollisionen und somit α auch ansteigt.

4 Auswirkung der Maßnahmen

In den vorhergehenden Kapiteln wurden die Probleme und die Notwendigkeiten zur Bewertung eines Systems von frei agierenden Fördermitteln erläutert. Das Kapitel 3.2 beschreibt die Entwicklung von Methoden mit welcher die Kennzahlen ermittelt werden können um einen Vergleich mit anderen Systemen durch zu führen. Diese aufgestellten Theorien und Methoden werden in diesem Kapitel angewendet. Verschiedene Szenarien werden definiert. Mit den Methoden können Aussagen über diese getroffen werden. Auch hier werden die ersten Schritte auf einzelne Bereiche von Anlagen übertragen um mit jedem weiteren Schritt weitere und aufwendigere Situationen aufnehmen zu können.

4.1 Allgemeines

Im Kapitel 3.2.3.1 wird eine Anlage frei geschnitten und in zwei relevante Bereiche unterteilt. Die beiden Bereiche sind die Übergabestation und die Strecke. Der deutliche Unterschied liegt darin, dass sich in einer Übergabestation immer nur ein Fahrzeug aufhalten kann, auf der Strecke hingegen können sich bis zu einer bestimmten Grenzleistung mehrere Fahrzeuge aufhalten.

Zuerst soll die *Übergabestation* mit ihrer Leistung, die in Gleichung Gl. 3-1 formell beschrieben wird, genauer betrachtet werden. Das Diagramm in Abbildung 4-1 stellt den Verlauf des Durchsatzes über die gesamte Zeit der Übergabe dar.

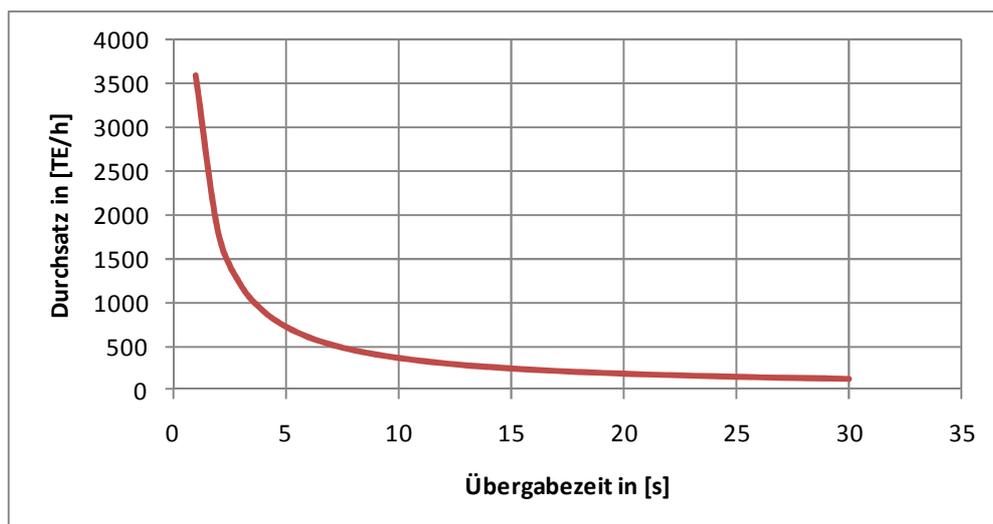


Abbildung 4-1: Durchsatz einer Übergabestation

In dem Diagramm wird deutlich, dass sich der Durchsatz wie die rationale Funktion $1/x$ verhält. Bei einer kürzeren Dauer der Übergabe können mehr Fahrzeuge bedient werden. Je länger diese Tätigkeit dauert, desto weniger ändert sich der Durchsatz, der sich im Unendlichen Null nähert. Die technische

Machbarkeit beschränkt den maximalen Durchsatz, da eine Übergabe immer eine gewisse Zeit dauert.

Eine Möglichkeit den Durchsatz für ein System zu steigern, trotz einer gegebenen Dauer der Übergabe, ist ein Parallelisieren. Dabei würden n Übergabestationen in Verwendung kommen um theoretisch einen n -fachen Durchsatz zu ermöglichen. Die Frage des Durchsatzes für eine Station wäre damit geklärt. Allerdings gilt zu beachten, dass die Fahrzeuge diese Stationen auch ohne Behinderungen anfahren müssen.

Eine Station braucht einen gewissen Annäherungsbereich, damit das Fahrzeug sich so genau wie nötig positionieren kann, und einen Abfahrtsbereich. Wenn diese Bereiche nicht getrennt sind, müssen die nachfolgenden Fahrzeuge weiter entfernt warten um die Abfahrt des anderen Fahrzeuges nicht zu behindern. Dieser Raumbedarf für das Manövrieren ist jeder einzelnen Station dazu zu zählen. Dieser ist bei einem Parallelisieren zu berücksichtigen und kann aufgrund von Fahrregeln für Fahrzeuge sehr komplex werden.

Als Gedankenbeispiel können hier Einstiegs- und Ausstiegszonen in den U-Bahnstationen helfen. In erster Linie müssen die Personen aussteigen, damit andere einsteigen können. Die Aussteigenden benötigen Platz. Daher sollen die Personen, die auf den Einstieg warten, einen Korridor bilden. Dieser gewährleistet ein schnelles Entfernen von den Türen und somit können die Wartenden ebenfalls schnell und geordnet einsteigen.

Von der Fahrzeugseite betrachtet, wird also genügend Platz zum Annähern und Entfernen von Stationen benötigt. Wenn dieser gegeben ist, kann durch Parallelisieren der Durchsatz erhöht werden.

Der zweite Blickwinkel ist von Seiten der Station. Diese braucht eine Anbindung an Infrastruktur oder Fördertechnik um die Waren an ihr endgültiges Ziel zu befördern. Ist das Ziel räumlich weiter davon entfernt aufgrund der parallelen Übergabestationen gibt es wiederum einen Transport, der gesteuert und berechnet werden muss.

Schließlich wird der Durchsatz durch n -Stationen nicht linear ansteigen, da der Platzbedarf und die Entfernung der Stationen wieder größer werden.

Das Verhalten des Durchsatzes auf der *Strecke* wurde in der Theorie in Kapitel 3.2.3.1.2 allgemein erklärt. Hier wird das Verhalten besonders auf die frei agierenden Fördermittel beleuchtet. Die Gleichung Gl. 3-2 erfordert hierfür konkrete Zahlen für die Berechnung einer Grenzleistung auf einer Strecke für die Fahrzeuggruppe der autonomen Fördermittel. Dabei werden die Werte aus der Tabelle 4-1 beispielhaft angenommen. Der Durchsatz ist geschwindigkeitsabhängig.

Eigenschaft	Variable	Zahlenwert
Reaktionszeit	t_0 in [s]	0,01
Länge Transporteinheit	l_{TE} in [m]	1,35
Notbremskonstante	b_n in [m/s ²]	2

Tabelle 4-1: Werte zur Berechnung der Grenzleistung einer Strecke

Aus diesen Werten ergibt sich ein maximaler Grenzdurchsatz für eine Strecke in welche die Fahrzeuge einzeln einfahren von 3071 TE/h. Dieser würde bei einer optimalen Geschwindigkeit von 2,3 m/s erreicht werden. Das Diagramm in Abbildung 4-2 zeigt den Verlauf und das Maximum der Funktion.

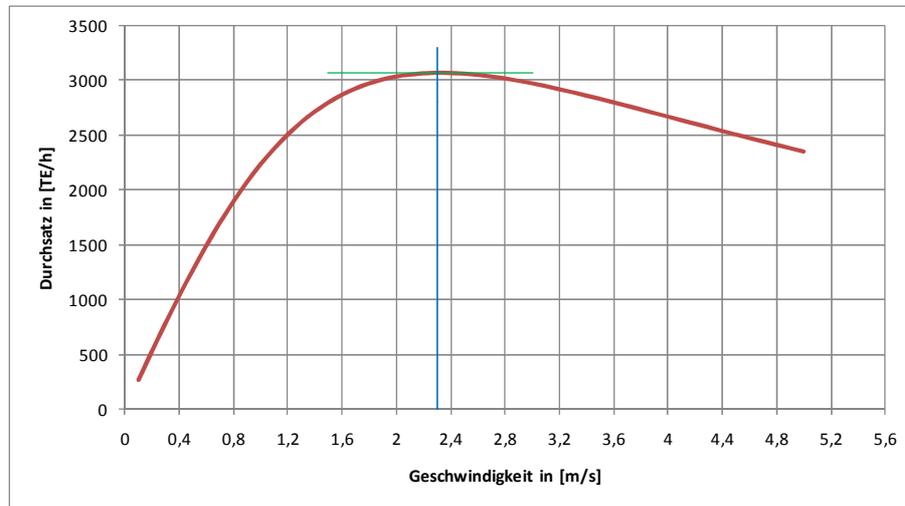


Abbildung 4-2: Grenzleistung von Strecken

Die Grenzleistungen von Strecke und Übergabestation müssen kontrolliert werden, damit es nicht zu einer Überlastung einer der beiden Bereiche kommt. Wie in Abbildung 4-1 und Abbildung 4-2 ersichtlich, kann auf der Strecke mit den Eigenschaften aus Tabelle 4-1 für ein Fahrzeug ein Durchsatz erreicht werden, der für eine einzelne Station nur durch eine Übergabezeit von unter 1,2 Sekunden überschritten wird. Diese 1,2 Sekunden sind mit dem heutigen Stand der Technik nicht möglich.

Zu beachten ist der Grenzwert der Strecke, wenn mehrere Stationen bedient werden und die Fahrzeuge über denselben Weg ihre Ziele erreichen.

Bemerkenswert ist, dass diese Betrachtung der Strecke für FTF vorgenommen wurde. Diese Fahrzeuge können einander nicht überholen und folgen vorbestimmten Wegen. Für frei agierende Fahrzeuge könnten sich durch die Fähigkeit des Ausweichens andere Werte ergeben. Jedoch können auch andere Probleme entstehen. Der von den Fahrzeugen verwendete Platz wird ein zu grenzen sein, ansonsten könnten sich Blockierungen über die ganze Wegbreite ergeben. Allerdings können auch Wege eingeplant werden, auf welchen die Fahrzeuge schneller fahren könnten. Diese Möglichkeiten sind aufgrund der hohen Flexibilität vielfältig und könnten in weiterführenden Studien betrachtet werden.

4.2 Szenarien

Das Unterteilen von Transportwegen in dem Kapitel 4.1 stellt ein Basisverständnis dar. Zur Berechnung von Kennzahlen werden in diesem Unterkapitel verschiedene beispielhafte Szenarien dargestellt und in dem folgenden Kapitel ausgewertet. Damit können Aussagen zu dem Verhalten von autonomen Fördermitteln im System getroffen werden. Die Szenarien beginnen mit einfachen Fahrstrategien und werden schrittweise komplexer. Es werden auch die Grenzen der oben definierten Methoden dargestellt und eine Möglichkeit zu weiteren Studien präsentiert.

4.2.1 700er Lager

In Zusammenarbeit mit der Firma wurde ein Standardlager definiert, welches in erster Linie zum Generieren verschiedener Fahrstrategien verwendet wird. Es handelt sich um ein klassisches Distributionslager, wie es in Abbildung 1-1 bereits grob skizziert ist. In dem Lager sind zwei unabhängige Schleifen vorhanden. Die erste bearbeitet die Lagerbehälter. Diese sind sortenrein und lagern die Waren. Bei der Schleife handelt es sich um die Auffüllung und das Retournieren von leeren Behältern. Im Wareneingang (WE) werden die Artikel im System erfasst und Behältern zugeteilt und an ihre Lagerposition gebracht. Wenn während eines Kommissioniervorganges ein Lagerbehälter leer wird, wird dieser zurück zum Wareneingang gebracht um wieder aufgefüllt zu werden. In Abbildung 4-3 sind die Bereiche detailliert dargestellt.

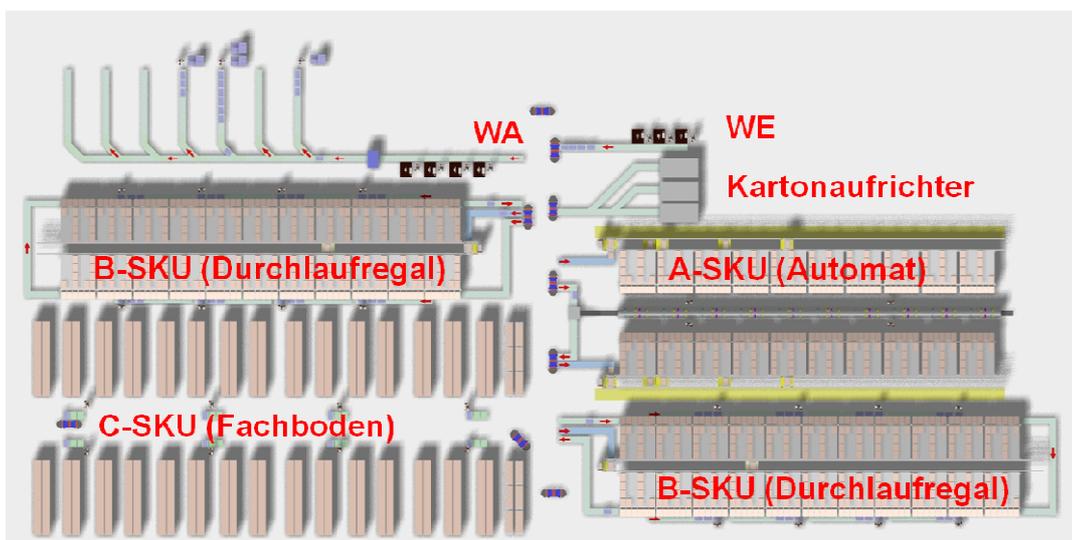


Abbildung 4-3: 700er Lager

Die zweite Schleife transportiert Auftragsbehälter. Diese werden vom Auftragsstart zu den unterschiedlichen Kommissionierplätzen gebracht. Diese Plätze sind standardmäßig in einer Entfernung von 10m zueinander aufgestellt. In Abbildung 4-4 wird der Auftragsfluss in einem Sankey-Diagramm dargestellt. Das 700er Lager erhält seinen Namen von den 700 TE/h die bearbeitet werden

sollen. Der Auftragsstart (AS) findet beim Kartonaufrichter (Abbildung 4-3) statt. Von dort müssen alle 700 Aufträge zum A-Dreher Lager (A-SKU) um dort Waren zu empfangen. In A-SKU steht das A für die jeweilige Zugriffshäufigkeit und SKU bedeutet „stock keeping unit“ also frei übersetzt Lager. Nachdem hier alle Aufträge bearbeitet wurden werden 300 direkt zum Warenausgang (WA) gebracht. Die restlichen 400 müssen in der Schleife weiter zur B-Dreher Kommissionierung. Von hier werden wieder 250 direkt zum Warenausgang geleitet. 150 Auftragsbehälter holen im Langsamdreherbereich (C-SKU) Waren ab und werden durch das ganze Lager transportiert.

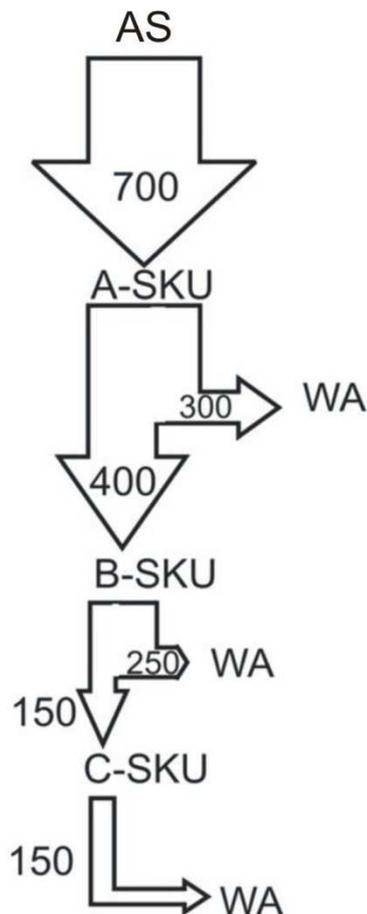


Abbildung 4-4: Auftragsfluss 700er Lager

Die höchste Belastung in diesem Lager findet im Warenausgang statt. Dort werden die Aufträge kontrolliert, verpackt und mit Sortern den einzelnen Zielen zugewiesen. Um eine Aussage über den Einsatz von autonomen Fördermitteln in diesem Lager treffen zu können müssen nun die verschiedenen Fahrstrategien definiert werden. Diese werden in den folgenden Unterkapiteln beschrieben. Dabei wird mit einfachen Strategien begonnen und die Komplexität gesteigert.

4.2.1.1 Einfache Schleifen

Das Lager wurde oben definiert und erklärt. Zwischen den einzelnen Kommissionier- und Tätigkeitsbereichen werden die Waren transportiert. Diesen Transport können die autonomen Fördermittel übernehmen. In der ersten Variante der Fahrstrategien wird den Fahrzeugen jeweils eine einfache Schleife zugewiesen. Die Fahrzeuge verlassen diese Schleifen nicht. Also ist eine gewisse Anzahl von Fahrzeugen für den Transport der Auftragsbehälter vom Auftragsstart AS zum A-SKU verantwortlich. Eine Strecke wird zum Transport genutzt, die Rückfahrt ist eine Leerfahrt. Ebenso sind Fahrzeuge nur für die Auftragsbehälter zuständig, die vom A-SKU zum B-SKU gebracht werden müssen. In Abbildung 4-5 sind alle auftretenden Schleifen dargestellt. In Summe werden in dieser Variante 6 einzelne voneinander unabhängige Schleifen notwendig sein.

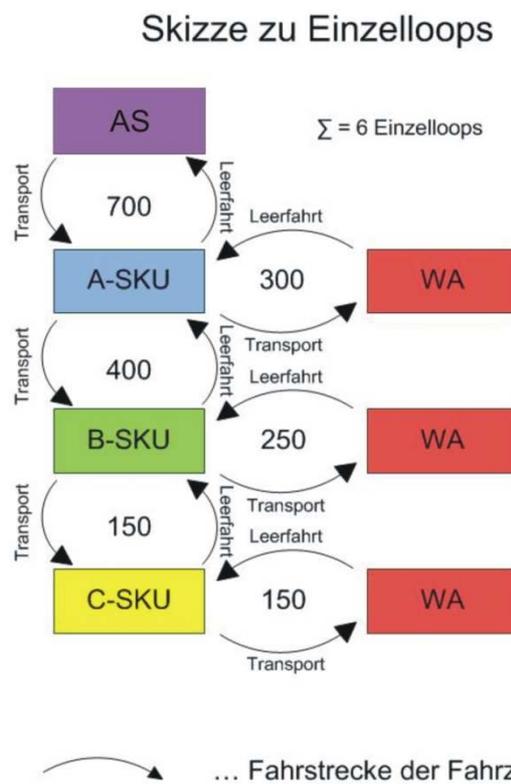


Abbildung 4-5: Skizze zu Einzelloops im 700er Lager

Der Vorteil dieses Szenarios liegt in der Einfachheit der Berechnung. Für jede Schleife kann die Anzahl der Fahrzeuge berechnet werden, die notwendig ist um den Durchsatz sicherstellen zu können.

Der Nachteil des Szenarios befindet sich in der Effizienz. Nach jedem Transport findet eine Leerfahrt statt, deswegen ist die Ausnutzung der Fahrzeuge gering. Durch andere Fahrstrategien können diese Leerfahrten vermindert werden.

In dem Kapitel zur Auswertung dieses Szenarios wird die Anzahl der Fahrzeuge berechnet und ein Vergleich mit der hier notwendigen stetig Fördertechnik gebracht.

4.2.1.2 Mehrfache Schleifen

Die erste Möglichkeit der Fahrstrategien hat einen deutlichen Schwachpunkt aufgezeigt. Fahrzeuge, die zum Ausgangspunkt der Route zurückkehren und dabei keine Waren transportieren, verbringen viel Zeit mit Leerfahrten. Die zweite Variante ist ebenfalls auf Schleifen aufgebaut. Die Fahrzeuge sind den Schleifen wieder zugeteilt und können keine anderen Wege fahren. Abbildung 4-6 stellt die Strategie schematisch dar. Ein Fahrzeug würde somit einen Auftragsbehälter bearbeiten. Beginnend im Auftragsstart AS zum A-SKU, von hier zum Warenausgang und vom Warenausgang wieder retour zum Auftragsstart. Die anderen Schleifen werden ebenso bearbeitet. Hier würde es nur eine Leerfahrt vom Warenausgang zum Auftragsstart geben und diese Fahrt könnte zum Transport von Leerbehältern benutzt werden. Diese Variante müsste in Summe drei Schleifen berücksichtigen. Die Fahrzeuge behindern sich hier auch zwischen den Schleifen nicht, es gibt also beim A-SKU für jede Schleife eigene Übergabestationen.

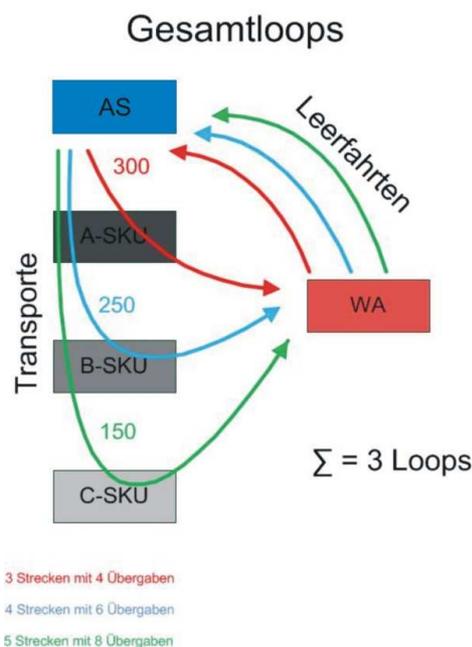


Abbildung 4-6: 700er Lager mit Gesamtschleifen

Auch in dieser Variante der Fahrstrategien ist das Verhalten vorbestimmt und kann einfach berechnet werden. Die Fahrzeuge befinden sich innerhalb ihrer Schleifen und arbeiten die Aufträge ab. Die Leerfahrten sind je nach Lagerlayout minimiert worden, da nur ein Weg ohne Transport gefahren wird und selbst dieser kann genutzt werden um Leerbehälter zum Auftragsstart zu bringen.

Nachteilig an dieser Variante ist die Annahme, dass die Waren immer schon bereit stehen für die Fahrzeuge an den jeweiligen Übergabestationen. Das Fahrzeug würde nicht auf den Behälter warten, welcher gerade abgegeben wurde, sondern den bereits bearbeiteten übernehmen. Bei dieser Annahme kann es zu Problemen kommen, wenn keine Behälter bei der Station zum Weitertransport warten. Die Fahrzeuge müssen dann ebenfalls auf den nächsten Auftrag warten. Diese Wartezeiten sind deterministisch nicht abzuschätzen.

4.2.1.3 Allgemeine Situation

Die beiden oben erstellten Fahrstrategien basieren auf den Annahmen, dass die Aufträge vorher bekannt sind und die Fahrzeuge sich auf vorbestimmten Routen bewegen. Autonome Fördermittel würden in diesen Strategien aufgrund ihrer Eigenschaften überdimensioniert sein. Diese können flexibel auf Transportanfragen reagieren. Da die Aufträge in einer statistischen Verteilung erstellt werden, können daher auch unterschiedliche Start und Ziel Stationen für den Auftrag gelten.

Mit vorbestimmten Strategien können nur diese berechnet werden. Das zufällige Auftreten der Transporte erfordert eine andere Methode um einen Durchsatz berechnen zu können. In der Literatur (siehe Kapitel 2.3.1) wird die Wahrscheinlichkeitsrechnung benutzt um eine Häufigkeit der Fahrwege und der Transporte von verschiedenen Punkten zu erstellen. Damit werden die Leistungen von Systemen berechnet. In dieser Arbeit wird die Monte – Carlo Simulation verwendet um einen durchschnittlichen Weg aus einem Lagerlayout und einer Fahrstrategie zu ermitteln. Zur Verdeutlichung wird die Situation über die Abbildung 4-7 beschrieben.

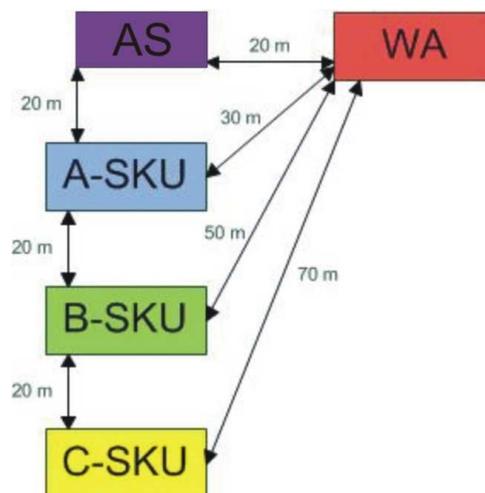


Abbildung 4-7: 700er Lager Layoutsituation

Durch die Flexibilität von frei agierenden Fördermitteln, können die Aufträge von jeder Station beginnen und zu jeder Station die näher zum Warenausgang liegt führen. Also kann ein Auftrag genauso von der A-SKU zu der C-SKU lauten. Ebenso können Leerbehältertransporte in Auftrag gegeben werden. Die vielen verschiedenen Möglichkeiten der Transporte und der Zufall machen Vorhersagen nicht möglich. Eine statistische Verteilung kann sagen, welche Stationen wie oft angefahren werden müssen, jedoch nicht in welcher Reihenfolge. Hier wird durch die Monte – Carlo Methode jeder mögliche Fall errechnet. Durch die hohe Anzahl von Stichproben spielt jeder Fahrweg in die Berechnung eines durchschnittlichen Transportweges mit ein. Mit diesem Wert kann die Leistung eines Fahrzeuges nachfolgend berechnet werden und Auslegungen können mit Vorkenntnis des Lagerlayouts und der Auftragsverteilung errechnet werden.

4.2.2 Zentrallager A

Es wurde auch eine andere Art von Lager identifiziert, für welches der Einsatz von frei agierenden Fördermitteln interessant ist. Dabei handelt es sich um ein Lager mit einem geringen maximal Durchsatz in einer zentralen Station und mehreren linear verteilten Stationen, die von dem Lager beliefert werden. Abbildung 4-8 stellt das Szenario mit den Materialflüssen und dem Layout dar.

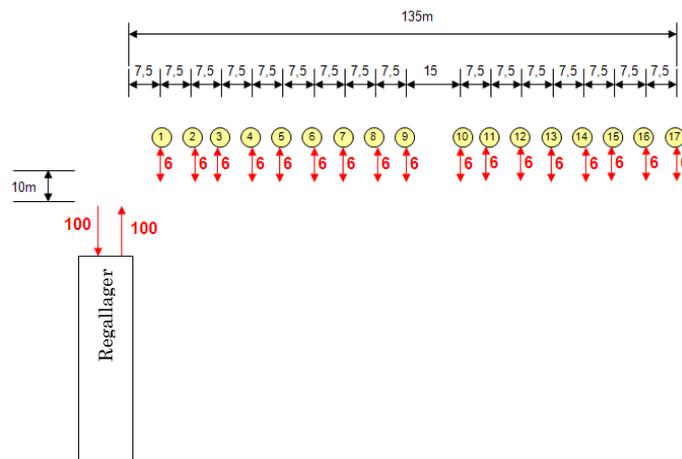


Abbildung 4-8: Layout und Materialfluss des Zentrallagers A

Nachdem jede Station mit gleich vielen Waren während einer Stunde beliefert werden muss, kann man hier von gleichverteilten Fahraufträgen sprechen. Um die Leistung eines Fahrzeuges bestimmen zu können, müssten die verschiedenen Fahrrouten errechnet werden und ein Durchschnittswert gebildet werden. Genau dieses Vorgehen wird durch die Monte – Carlo Methode realisiert. Bei diesem Szenario kann auch der Einfluss von mehrfacher Lastaufnahme gut beobachtet werden. Das Strukturdiagramm aus Abbildung 3-20 wurde in erster Linie für dieses Szenario programmiert und später schrittweise für die verschiedenen Fahrvarianten und Szenarien angepasst. In Abbildung 4-9 ist beispielhaft eine Fahrstrategie für das Zentrallager dargestellt.

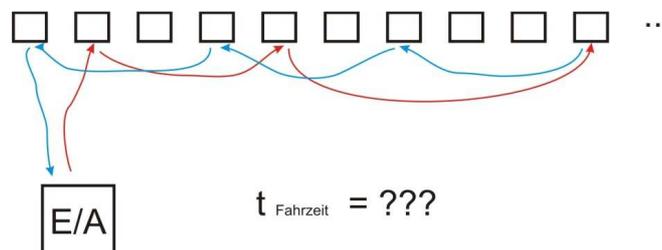


Abbildung 4-9: Beispiel für eine Fahrstrategie des Zentrallagers A

Dabei kann das Fahrzeug drei Waren transportieren. Jede angefahrene Station wird von einem Zufallsgenerator ausgewählt. Zuerst werden die geladenen Waren zu den Zielstationen in aufsteigender Reihenfolge abgeladen (rote Pfeile), danach werden die Waren, die zurück gebracht werden sollen, in der Rückfahrt aufgeladen und retourniert (blaue Pfeile).

4.2.3 Allgemeine Läger

Die bisher beschriebenen Situationen sind aus vordefinierten Lägern entstanden. Um allgemeine Ergebnisse zu erhalten ist ein Lagerlayout skizziert worden, welches in allen Parametern veränderbar ist. Dabei können alle Stationen als Ziel und als Startstationen verwendet werden. Dieses Lager wird mit drei sehr allgemein gehaltenen Fahrstrategien berechnet und ausgewertet. Die Abbildung 4-10 zeigt das Layout und eine erste formulierte Fahrstrategie. Das Lager ist auch das Vorbild für den Prototyp der Kollisionsbeschreibung aus Kapitel 3.2.4. Es besteht aus 8 Stationen welche in zwei Reihen angeordnet sind. Der Abstand zwischen den Stationen beträgt zehn Meter und die Entfernung der Reihen zueinander ist 30 Meter.

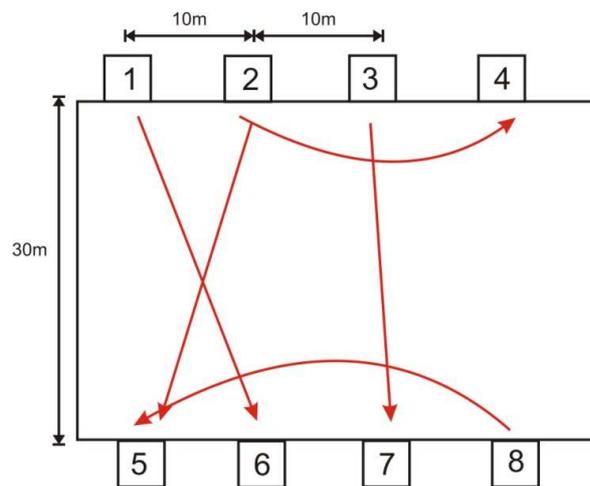


Abbildung 4-10: Allgemeines Lager mit zufälligen Fahrwegen

Die erste Fahrstrategie, die in Abbildung 4-10 dargestellt ist, berechnet einfache *Einzelfahrten*. Dabei wird eine zufällige Station als Start eine andere als Ziel ausgewählt. Das Fahrzeug transportiert die Ware auf dem identifizierten Weg. Diese Situation wird mittels der Monte – Carlo Methode sooft gerechnet bis sich ein durchschnittlicher Fahrweg ergibt. Der Algorithmus wurde, so wie alle bis auf den Prototyp der Kollisionsberechnung im Programm MathCad geschrieben und ist im Anhang zu finden.

Da diese erste Fahrstrategie ein sehr vereinfachtes Problem darstellt, wurde in der nächsten ein Mehrfachspiel implementiert. Diese *Mehrfachfahrstrategie* hat mehr Parameter welche variiert werden können. Das Formulieren eines Start- und eines Zielpunktes für die Varianten hat sich als nicht eindeutig definierbar erwiesen. Für die Artikel sind diese Punkte klar erkennbar. Ein Transport startet beim momentanen Standpunkt und endet bei einem Ziel. Ein Fahrzeug hingegen kann besonders mit einer Mehrfachlastaufnahme eine unendliche Reihe von Start und Zielpunkten haben. Denn wenn während einer Fahrt mit zwei geladenen Artikeln einer davon abgegeben wird, ist ein Ladeplatz frei. Dann wäre es möglich, dass während der Fahrt zum Ziel der anderen Ware, ein neuer Artikel mit einem anderen Ziel aufgenommen wird und so fort. Damit hätte das Fahrzeug keine definierten Start und Zielpunkte. Damit die hier behandelten

Strategien berechenbar und überschaubar bleiben wurden für die einzelnen Fahrten immer Start und Zielstationen definiert. In Abbildung 4-11 sind vier dieser Fahrten in dem schon oben erwähnten Lager dargestellt. Die unterschiedlichen Farben stellen dabei immer eine neue Fahrt dar, welche von der Monte – Carlo Simulation berechnet wird.

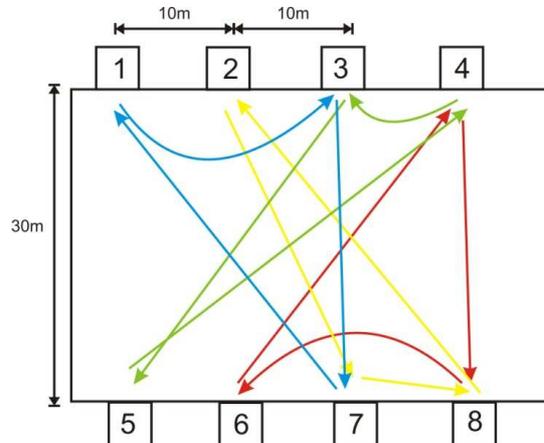


Abbildung 4-11: Allgemeines Lager mit Doppelspiel Fahrstrategie

Das hier eingesetzte Fahrzeug befördert ein Ladehilfsmittel und fährt im Falle der roten Fahrt mit einem Artikel von der Station 4 zur Station 8, gibt die Ware dort ab, fährt leer zur Station 6 und transportiert den nächsten Behälter zur Station 4. Dies wäre eine Stichprobe, von welcher unzählige möglich sind. Die Parameter die in diesem Szenario verändert werden sind:

- Fahrgeschwindigkeit
- Übergabezeit
- Anzahl Ladefähigkeit
- Größe des Lagers

Das letzte Szenario welches mit dem Lagerlayout berechnet wird, ist mit einer Möglichkeit ausgestattet verschiedene Verteilungen zu realisieren. Abbildung 4-12 zeigt die Fahrwege in dieser Variante. Dabei wird eine der Stationen 1, 2

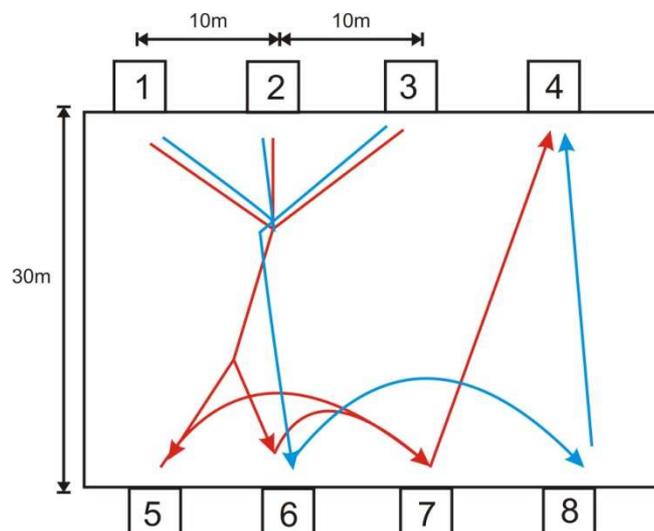


Abbildung 4-12: Allgemeines Lager mit spezieller Fahrstrategie

oder 3 als Startstation zufällig ausgewählt. Die Anfahrhäufigkeit der Stationen 5 und 6 ist doppelt so groß wie die der Stationen 7 und 8. Als Ziel wird immer die Station 4 ausgewählt. Hier wird eine Art Rundfahrt realisiert wie sie vergleichbar ist mit der Ausgangssituation des oben erwähnten 700er Lagers. Allerdings sind die Stationen nicht vorher bestimmt sondern werden über den Zufallsgenerator ausgewählt.

Erneut muss erwähnt werden, dass die hier beschriebenen Szenarien nur die Werte für jeweils ein Fahrzeug berechnen. Daher gehören diese immer noch zur statischen Materialflussrechnung.

4.2.4 Szenario zur Berechnung von Kollisionen

Der Vollständigkeit halber wird in diesem Kapitel Szenarien die Berechnung der Kollisionen abermals erwähnt. Dieser Schritt ist die logische Schlussfolgerung aus der statischen Materialflussrechnung. Die Vorgehensweise und die Berechnung wird im Detail im Kapitel 3.2.4 beschrieben und wird hier nicht abermals wiederholt.

Es soll aber darauf hingewiesen werden, dass das verwendete Lagerlayout mit dem Szenario des allgemeinen Lagers und der Einzelfahrstrategie zusammenpasst. In der Auswertung werden die Ergebnisse aus den Berechnungen dieser beiden Fälle kombiniert um schlussendlich zu einer Aussage des Einflusses der Kollisionen zu kommen.

5 Bewertung der Maßnahmen

In den bisherigen Kapiteln sind die Vorgehensweise und die Szenarien für Untersuchungen eines Systems von frei agierenden Fahrzeugen beschrieben worden. Dabei wurden in erster Betrachtung Annahmen getroffen, die im Verlauf an Komplexität zu genommen haben.

Dieses Kapitel beschäftigt sich in erster Linie mit der Auswertung der Betrachtungen an den definierten Szenarien. Im Weiteren werden reale Beispiele angeführt, welche während der Arbeit für den Einsatz von autonomen Fördermitteln in Betracht gezogen worden sind. Das Kapitel schließt mit einer Bewertung der Durchführung der Arbeit.

5.1 Ergebnisauswertung

Die vorhergehenden Kapitel beschreiben einige Situationen welche mit den Methoden aus Kapitel 3.2.3 bewertet werden können. Hier findet die Auswertung dieser Szenarien statt. Im ersten Teil der Ergebnisauswertung wird die statische Materialflussrechnung betrachtet. Im Anschluss werden die Aussagen des Prototyps zur Kollisionszählung dargestellt.

5.1.1 Allgemein

Die Hauptaussage welche bei der allgemeinen Betrachtung einer Transportstrecke getroffen werden kann, ist dass der Durchsatz von einigen Hauptfaktoren abhängt. Diese sind:

- Übergabezeit
- Fahrstrecke und
- Anzahl der eingesetzten Fahrzeuge.

Das Diagramm in Abbildung 5-1 zeigt dieses Verhalten auf unterschiedlichen

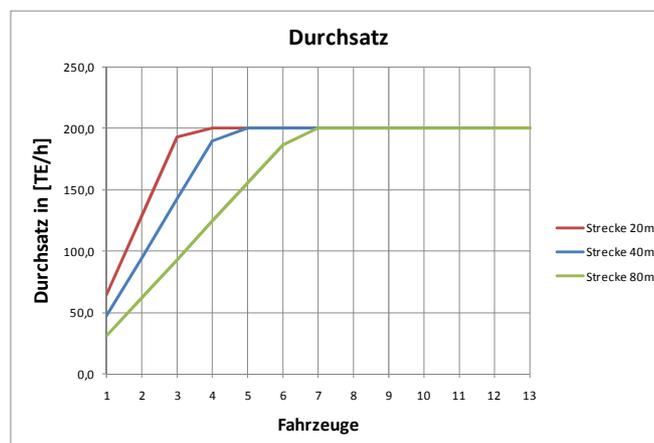


Abbildung 5-1: Durchsatz auf verschiedenen Strecken über Fahrzeugen

Streckenlängen. Die gewählte gesamte Übergabezeit beträgt 18 Sekunden, als maximaler Durchsatz resultiert folglich aus der Gleichung Gl. 3-1 200 TE/h. Die Anzahl der für diesen Durchsatz notwendigen Fahrzeuge hängt von der Fahrstrecke und der Fahrgeschwindigkeit ab. Als Fahrgeschwindigkeit wurden 2 m/s gewählt. Die Gleichungen Gl. 5-1 und Gl. 5-2 stellen die Berechnung für die notwendige Anzahl der Fahrzeuge dar.

$$\#Fzg = \frac{\text{gesamte Fahrzeit}}{\text{Übergabezeit}} = \frac{t_{ges}}{t_{\ddot{u}ges}} \quad \text{Gl. 5-1}$$

$$t_{ges} = 2 \cdot t_{\ddot{u}ges} + 2 \cdot t_s + t_{wart} \quad \text{Gl. 5-2}$$

t_{ges} ... gesamte Fahrzeit
 $t_{\ddot{u}ges}$... gesamte Übergabezeit
 t_s ... Fahrzeit
 t_{wart} ... Wartezeit

Ab einer gewissen Anzahl entstehen Wartezeiten für die Fahrzeuge an der Station, dadurch sinkt der Auslastungsgrad. Dafür ist die Station voll ausgelastet. Jedes weitere Fahrzeug kann den Durchsatz jedoch nicht weiter steigern, es wird nur die Wartezeit erhöht. Diese einfache erste Berechnung der Flottengröße ist aus diesen Methoden ersichtlich. Bei einer Strecke von 20 m steigt der Durchsatz für die ersten 3 Fahrzeuge noch linear an, ab dem vierten ist die maximale Auslastung der Übergabestation erreicht und die Fahrzeuge müssen warten bis sie bedient werden. Ein fünftes Fahrzeug würde den Durchsatz nicht mehr steigern können. Dieselbe Aussage wurde durch die Zeitachse in den Abbildung 3-16 und Abbildung 3-17 ebenfalls getroffen.

5.1.2 Auswertung der Szenarien im 700er-Lager

Mit den gewonnenen Erkenntnissen wurde das oben erklärte 700er Lager berechnet und mit den Klassen von Stetigförderern aus Kapitel 2.2 verglichen. Dafür sind drei Fahrzeugvarianten ausgewählt worden. Die Unterschiede liegen in der Anzahl der Lastaufnahmen und parallelen Übergabestationen. Die Eigenschaften sind in Tabelle 5-1 aufgelistet.

	Fahrgeschwindigkeit (m/s)	Übergabezeit [s]	Ladefähigkeit	Preis [€]	Übergabestellen
Variante 1	2	10	1	15.000.-	1
Variante 2	2	10	2	15.000.-	1
Variante 3	2	10	1	15.000.-	2

Tabelle 5-1: Eigenschaften der eingesetzten Fahrzeugvarianten im Lager 700

In Tabelle 5-2 wird die Berechnung der Fahrstrategie mit den einzelnen Schleifen durchgeführt.

Die Lösung mit der ersten Fahrzeugvariante kann für den geforderten Durchsatz für die erste Schleife vom Auftragsstart zum A-Dreher nicht erfüllen.

700 Lager	Einzelloops										Gesamt	
	WE->A	A->B	B->C	C->WA	A->WA	B->WA						
Förderstrecke [m]	20	20	20	20	70	20	50					200
Fahrtzeit einfache [s]	30	30	30	30	55	30	45					
Fahrtzeit Hin- retour [s]	40	40	40	40	90	40	70					
Wartezeit an der Station [s]	0	0	0	0	0	0	0					
Anzahl Fahrzeuge [#]	4	4	4	2	4	4	5					23
Kosten [€]	60000	60000	60000	30000	60000	60000	75000					345000
erreichbarer Durchsatz [TE/h]	360	360	360	180	160	360	257					360
geforderter Durchsatz [TE/h]	700	400	400	150	150	300	250					700
Fahrtzeit einfache [s]	30	30	30	30	55	30	45					
Fahrtzeit Hin- retour [s]	40	40	40	40	90	40	70					
Wartezeit an der Station [s]	0	0	0	0	0	0	0					
Anzahl Fahrzeuge [#]	4	3	3	1	2	2	3					15
Kosten [€]	60000	45000	45000	15000	30000	30000	45000					225000
erreichbarer Durchsatz [TE/h]	720	540,00	540,00	180,00	261,82	360,00	308,57					720
geforderter Durchsatz [TE/h]	700	400	400	150	150	300	250					700
Fahrtzeit einfache [s]	30	30	30	30	55	30	45					
Fahrtzeit Hin- retour [s]	40	40	40	40	90	40	70					
Wartezeit an der Station [s]	6	10	10	0	0	0	0					
Anzahl Fahrzeuge [#]	8	5	5	2	4	4	5					28
Kosten [€]	120000	75000	75000	30000	60000	60000	75000					420000
erreichbarer Durchsatz [TE/h]	720	450	450	180	160	360	257					720
geforderter Durchsatz [TE/h]	700	400	400	150	150	300	250					700
Kosten	24000	24000	24000	24000	84000	24000	60000					240000
Förderrech II Kosten	28000	28000	28000	28000	98000	28000	70000					280000
Förderrech III Kosten	32000	32000	32000	32000	112000	32000	80000					320000

Tabelle 5-2: Erster Vergleich von 3 Fahrzeugvarianten im 700er Lager mit stetiger FT

Die Dauer der Übergabe limitiert den Durchsatz auf 360 TE/h. Genauso kann die geforderte Leistung der Schleife A-Dreher nach B-Dreher nicht erbracht werden. Für die restlichen Schleifen können die Transporte mit den Fahrzeugen durchgeführt werden. Trotz des angenommenen Preises für die Fördermittel würde die Anzahl die Kosten für das System dennoch über die Kosten des Einsatzes einer stetigen Fördertechnik heben. Diese erste Variante schneidet aus diesen Gründen schlechter ab als die Fördertechnik I. Die Fördertechnik I entspricht derjenigen mit dem geringsten Preis, welche den Durchsatz hier fördern kann.

Die zweite Fahrzeugvariante mit der Möglichkeit 2 Waren zu transportieren, kann die geforderte Leistung erbringen. Sie schneidet knapp besser ab als die Fördertechniken.

Die dritte Fahrzeugvariante, die mehr eine Variation des Systems mit dem ersten Fahrzeug darstellt, kann die notwendigen Waren transportieren. Hier unterstützt eine zweite Schleife die Bereiche die in der ersten Lösung, den Durchsatz nicht erreicht haben. Dadurch kann eine höhere Anzahl von Fahrzeugen eingesetzt werden, was jedoch den Preis deutlich über den der Fördertechniken anhebt.

Zusammenfassend kann gesagt werden, dass die Variante 2 (aus Tabelle 5-2) die einzige sinnvolle Lösung darstellt. Jedoch ist zu erwähnen, dass sowohl der Preis für ein Fahrzeug als auch die Dauer der Übergaben, mit dem derzeitigen Stand der Technik nicht erreicht werden. Außerdem ist diese Fahrstrategie nicht unbedingt eine optimale. Zum Vergleich wurden die gleichen Strecken für die Fördertechnik gerechnet. Diese fährt die gleichen Wege wie die Fahrzeuge sie fahren. Also zum Beispiel auch Abkürzungen vom A-Dreher Bereich zum Warenausgang.

In Tabelle 5-3 wird die Fahrstrategie mit den Gesamtschleifen, wie in Abbildung 4-6, mit der stetigen Fördertechnik verglichen. Dabei werden jedoch nur die ersten beiden Fahrzeugvarianten verwendet, da es sich in der Strategie um eine Art der Parallelisierung handelt. Die Leistung kann mit beiden Lösungen erbracht werden. Beide können jedoch mit den Kosten nicht mit der Fördertechnik mithalten. Das Problem für die Lösung mit den Fahrzeugen mit der doppelten Lastaufnahme liegt in den zugewiesenen Routen. Die kleinste Schleife ist durch die vier Fahrzeuge nicht ausgelastet, könnte sie sich ein Fahrzeug mit der längsten Schleife teilen, würde sich auch der Preis mit diesen Annahmen ausgeben. Die erste Fahrzeugvariante liegt beim doppelten Preis von der leistungsfähigsten Fördertechnik und wäre in diesem Fall völlig unbrauchbar. Besonders weil das System mit 30 Fahrzeugen der Annahme, dass diese sich gegenseitig nicht behindern, nicht genügen kann.

Der Weg für die stetige Fördertechnik wurde nur für die Schleife verwendet. Die Strecke von Warenausgang zurück zum Wareneingang wurde nicht berücksichtigt, da diese nur als Leerfahrt der Fahrzeuge betrachtet ist.

Abschließend zu diesem Szenario ist zu sagen, dass der Vergleich mit der stetigen Fördertechnik mit den Randbedingungen nicht zulässig ist. Diese kann viel

höhere Leistungen fahren als sie in diesen Fahrstrategien notwendig sind. Dazu werden im Szenario des Zentrallagers A nochmals konkrete Aussagen getroffen.

	700 Lager		Gesamtloops				parallel		Gesamt
	Förderstrecke [m]	WE -> A -> WA -> WE	WE -> A -> B -> WA -> WE	WE -> A -> B -> C -> WA -> WE	WE -> A -> B -> C -> WA -> WE	WE -> A -> B -> C -> WA -> WE	WE -> A -> B -> C -> WA -> WE		
Fahrzeit [s]		115	175	110	150	150	155	330	
Übergaben		4	6	0	0	8	8		
Wartezeit an der Station [s]		0	0	0	0	0	0		
Anzahl Fahrzeuge [#]		10	13	7	7	30	30		
Kosten [€]		150000	195000	105000	105000	450000	450000		
erreichbarer Durchsatz [TE/h]		313,0434783	267,43	162,58	162,58	313,0434783	313,0434783		
geforderter Durchsatz [TE/h]		300	250	150	150	700	700		
Fahrzeit [s]		75	115	155	155				
Übergaben		4	6	8	8				
Wartezeit an der Station [s]		0	0	0	0				
Anzahl Fahrzeuge [#]		4	4	4	4	12	12		
Kosten [€]		60000	60000	60000	60000	180000	180000		
erreichbarer Durchsatz [TE/h]		384	250,43	185,81	185,81	384	384		
geforderter Durchsatz [TE/h]		300	250	150	150	700	700		
Kosten 300-700		60000	108000	156000	156000	156000	156000		
Kosten 700 - 1000		70000	126000	182000	182000	182000	182000		
Kosten >1000		80000	144000	208000	208000	208000	208000		

Tabelle 5-3: Zweiter Vergleich von 2 Fahrzeugvarianten im 700er Lager mit stetiger FT

5.1.3 Zentrallager A

Dieses Lager wurde in Kapitel 4.2.2 genau beschrieben und die Fahrstrategien erklärt. Die Ergebnisse aus der Berechnung zu dem Szenario sind in den Diagrammen von Abbildung 5-2 und Abbildung 5-3 dargestellt. In dem linken Diagramm von Abbildung 5-2 sind die Fahrzeit und der Durchsatz über der Fahrgeschwindigkeit des Fahrzeuges aufgetragen. Dabei nähern sich sowohl Fahrzeit als auch Durchsatz Grenzwerten, die von der Übergabezeit abhängig sind. Der Verlauf selbst ist logisch, da bei höheren Geschwindigkeiten die Fahrzeit sinkt. In derselben Abbildung rechts sind Fahrzeit und Durchsatz über die gesamte Übergabezeit dargestellt. Hier sind die Verläufe vertauscht, da bei einer längeren Dauer, natürlich die Fahrzeit steigt und der Durchsatz sinkt. Die Ergebnisse stimmen mit den Erwartungen aus den vorher gewonnenen Erkenntnissen überein.

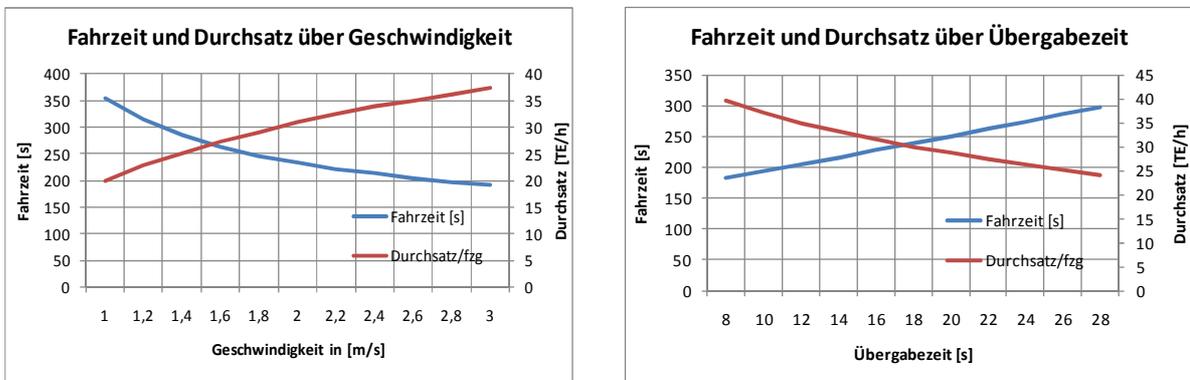


Abbildung 5-2: Auswertung Zentrallager A

In Abbildung 5-3 sind die Verläufe von Fahrweg, Fahrzeit und Durchsatz über der Anzahl geladener Waren auf einem Fahrzeug dargestellt. Der Weg, den ein Fahrzeug für die Durchführung eines Fahrauftrages durchschnittlich abfährt, nähert sich mit steigender Ladefähigkeit dem gesamten Weg von 290 m an. Die Fahrzeit steigt, aufgrund der öfter stattfindenden Übergaben und der Durchsatz steigt ebenfalls. Eine Berücksichtigung von größerem Aktionsradius aufgrund der gesteigerten Ladefähigkeit des Fahrzeuges wird hier nicht gemacht.

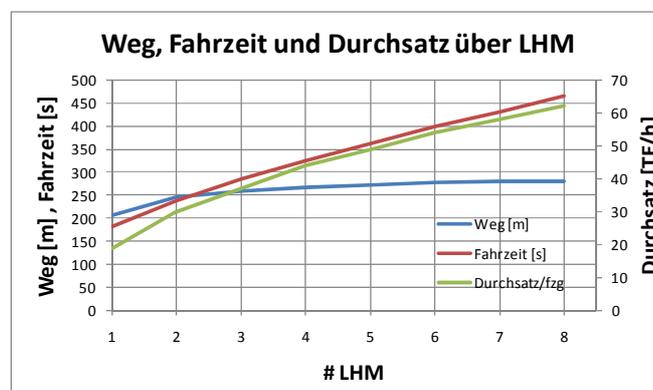


Abbildung 5-3: Auswertung Zentrallager A über Ladehilfsmittel

Um einen Vergleich zwischen den Kosten für stetige Fördertechnik und autonomen Fördermitteln treffen zu können, werden die Ergebnisse des Zentrallagers A weiterverwendet. Die zu erreichende Leistung in diesem Lager sind 100 TE/h von und zu dem Regallager. In Abbildung 5-4 ist diese mit der blauen vertikalen Linie markiert. Bei einem Einsatz von frei agierenden Fördermitteln mit einer möglichen Lastaufnahme kann ein einzelnes Fahrzeug einen Durchsatz von 19 TE/h erreichen. Für den Einsatz sind folglich 6 Fahrzeuge notwendig. Bei einem Preis von € 30.000.— pro Fahrzeug würden dann Kosten von € 180.000.— entstehen. Dieser Preis ist ein Wert zwischen dem der Fahrzeuge, welche im LKH Klagenfurt eingesetzt werden, und dem der in der Berechnung aus Kapitel 5.1.2 als zu niedrig identifiziert wurde.

Wenn Fahrzeuge mit doppelter Lastaufnahme eingesetzt werden, können diese 30 TE/h transportieren. Daraus folgt es würden 4 Fahrzeuge benötigt werden, welche Kosten von € 120.000.— verursachen.

Die stetige Fördertechnik müsste hier immer eine Strecke von 290m abdecken. Eine Leistung von 100 TE/h wird von der Fördertechnik der ersten Leistungsklasse bereits erreicht. Der Preis würde hier bei € 348.000.— liegen. Allerdings ist diese für Leistungen zwischen 300 bis 700 TE/h ausgelegt und hier überdimensioniert.

Die autonomen Fördermittel würden diese Leistung entweder nicht erreichen, oder dabei viel höhere Kosten verursachen, bei diesem Preis pro Fahrzeug.

In Abbildung 5-4 ist dieser Sachverhalt in einem Diagramm dargestellt, wobei die Fahrzeuge eine Stufenfunktion darstellen, da mit jedem neuen Fahrzeug ein Preissprung erfolgt und der Durchsatz für eine gewisse Anzahl von Fahrzeugen begrenzt ist. Die Annahme, dass mit jedem Fahrzeug der Durchsatz gesteigert werden kann, ist hier der Einfachheit halber getroffen worden. Im weiteren Verlauf wird sich zeigen, dass dies nicht der Fall ist und dieser Vergleich nur für eine erste Abschätzung verwendbar ist.

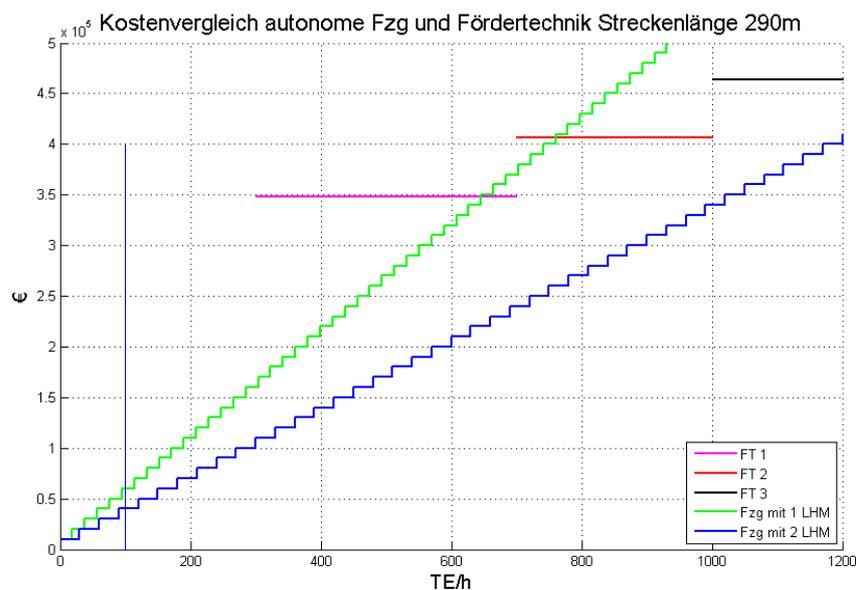


Abbildung 5-4: Vergleich autonomer Fördertechnik mit stetiger Fördertechnik im Zentrallager A

5.1.4 Allgemeine Läger

In diesem Abschnitt werden die Ergebnisse aus dem in Kapitel 4.2.3 definierten Lager und Fahrstrategien angegeben. Nachdem das Verhalten teilweise sehr ähnlich ist, sind nur besondere Werte ausgewählt. Die gesamten Auswertungsdaten werden im digitalen Anhang geliefert.

5.1.4.1 Einzelfahrstrategie

Die erste Fahrstrategie, welche in diesem Szenario betrachtet wurde, war die Einzelfahrstrategie. Die genaue Beschreibung findet sich in oben genanntem Kapitel. Die Verläufe von Fahrzeit und Durchsatz über Geschwindigkeit und Übergabezeit sind in Abbildung 5-5 zu sehen und ähneln denen vom Zentrallager A. Die Unterschiede lassen sich aus dem Lagerlayout erklären.

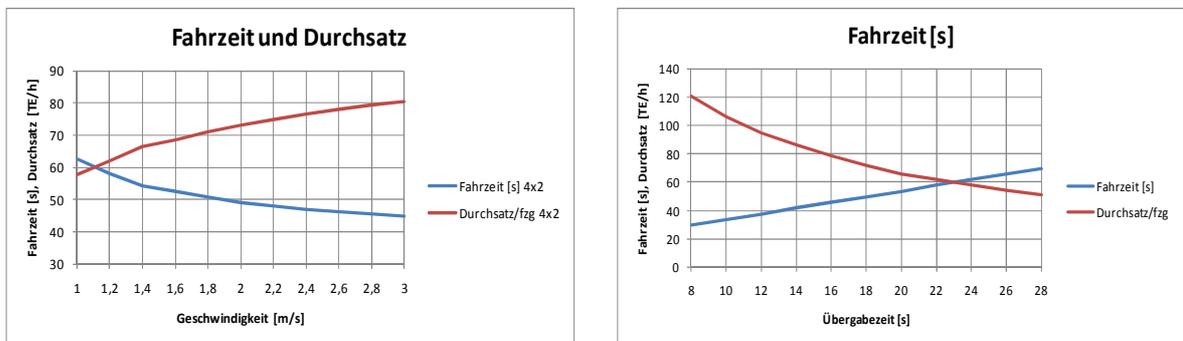


Abbildung 5-5: Auswertung Einzelfahrt

Das Verhalten der Kennzahlen bei einer Änderung der Lagergröße wird in dem Diagramm von Abbildung 5-6 dargestellt. Die Verläufe sind logisch nachzuvollziehen. Bei größeren Lägern steigen Weg und Fahrzeit für ein Fahrzeug. Der Durchsatz sinkt demnach. Die Bezeichnungen der Lager beziehen sich auf zwei Abstände. Die erste Zahl ist der Abstand der einzelnen Stationen innerhalb einer Reihe, die zweite Zahl ist die Entfernung der beiden Reihen zueinander.

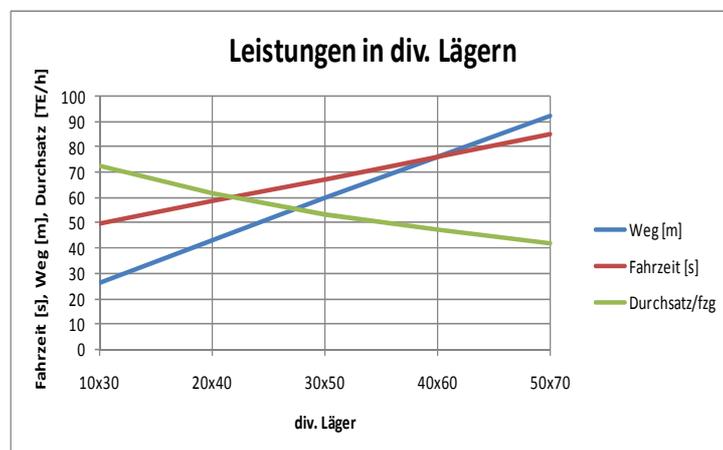


Abbildung 5-6: Auswertung Einzelfahrt in unterschiedlichen Lagergrößen

5.1.4.2 Mehrfachfahrstrategie

Die Erklärungen zur Mehrfachfahrstrategie in einem allgemein definierten Lager finden sich in Kapitel 4.2.3. Der Unterschied in den Ergebnissen zur Einzelfahrstrategie basiert auf der Anzahl geladener Waren. Die Verläufe der Kennzahlen gleichen denen der Einfachfahrstrategie. Für die gesamten Werte wird hier auf den digitalen Anhang verwiesen.

Eine weitere Auswertung, welche dieses Szenario ermöglicht ist die Darstellung von den Kennzahlen über die Anzahl der Ladehilfsmittel. Dabei zeigt sich, dass sich der Fahrweg, wie auch bei dem Szenario des Zentrallagers A, einem Grenzwert nähert. Die Fahrzeit und der Durchsatz steigen stetig, jedoch nicht linear. Da sich die Übergabezeit auf den Durchsatz auswirkt, liegt keine Verdoppelung des Durchsatzes mit doppelter Ladefähigkeit vor.

Abbildung 5-7 zeigt diese Verläufe für 1 bis 10 Ladehilfsmittel, welche vom Fahrzeug aufgenommen werden können.

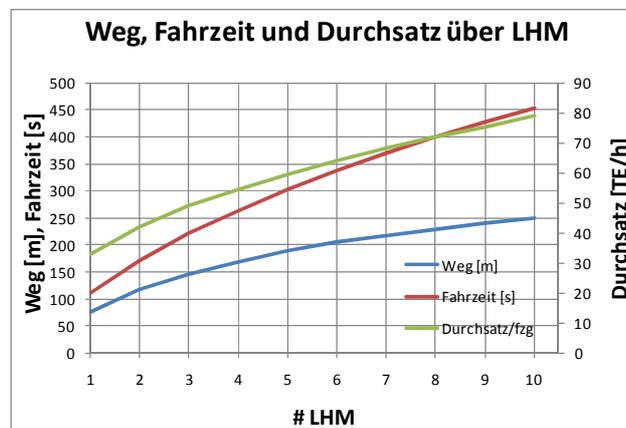


Abbildung 5-7: Auswertung allgemeines 2x4 Lager über Ladehilfsmittel

5.1.5 Kollisionsalgorithmus

Die bisherigen Ergebnisse basieren auf der Auswertung von Szenarien mit einem Fahrzeug. Diese Werte müssen bisher für ein System mit mehr Fahrzeugen linear gerechnet werden. In dem Kapitel 3.2.4 wird ein Prototyp zur Kollisionssimulation eingeführt. Er wird auf das allgemein definierte Lager aus Kapitel 4.2.3 mit der Einfachfahrstrategie angewandt. Für diese Berechnung werden drei Fahrzeuge im System eingesetzt. Einige Ergebnisse werden in Abbildung 5-8 und Abbildung 5-9 präsentiert. Der Grund, dass sich die Anzahl der Kollisionen mit steigender Übergabezeit einem Grenzwert nähert, hängt mit den zwei Möglichkeiten des Stattfindens einer Kollision zusammen. Diese können auf der Fahrstrecke und in Stationen vorkommen. Wenn die Dauer der Übergabe steigt, werden dort mehr Kollisionen stattfinden als auf der Strecke und diese Anzahl an Kollisionen ist begrenzt. Das Verhalten wird in Abbildung 5-8 dargestellt.

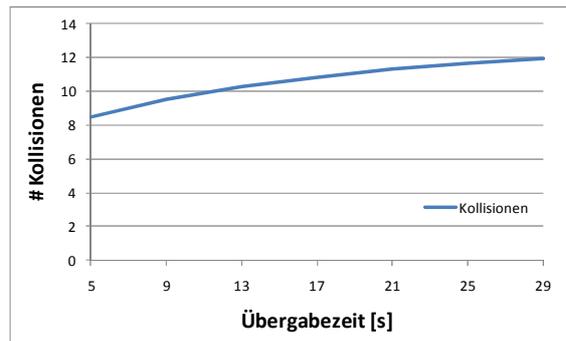


Abbildung 5-8: Auswertung Prototyp Simulation Kollisionen über Übergabezeit

Im Laufe der Auswertung wurden auch die Parameter: Aktionsradius, Fahrgeschwindigkeit und die Lagergröße verändert. Der Aktionsradius ist der Bereich, welchen das Fahrzeug zum Manövrieren benötigt. Bei den Ergebnissen zeigt sich der logische Trend, dass sich mit größerem Aktionsradius und höherer Fahrgeschwindigkeit die Anzahl der Kollisionen erhöhen. Wird hingegen durch ein größeres Lager mehr Platz zur Verfügung gestellt, kommt es auch zu weniger Behinderungen zwischen den Fördermitteln. Die detaillierten Daten befinden sich im digitalen Anhang dieser Arbeit.

In Abbildung 5-9 links, ist die Anzahl der Kollisionen über der Anzahl der eingesetzten Fahrzeuge in einem Szenario dargestellt. Wenn in dieser Anlage die Anzahl der Fahrzeuge erhöht wird, kommt es zu einem quadratischen Anstieg an Kollisionen. In derselben Abbildung rechts wird dieses Verhältnis in Prozent dargestellt. Bei 4 Fahrzeugen in dem getesteten Lager kommt es bei 24 % der Fahrten zu einer Kollision. Werden über 14 Fahrzeuge zum Transport verwendet, kommt es bereits bei jeder Fahrt zu einer Kollision. Diese Kollisionen haben einen Einfluss auf die Fahrtzeit der einzelnen Fahrzeuge.

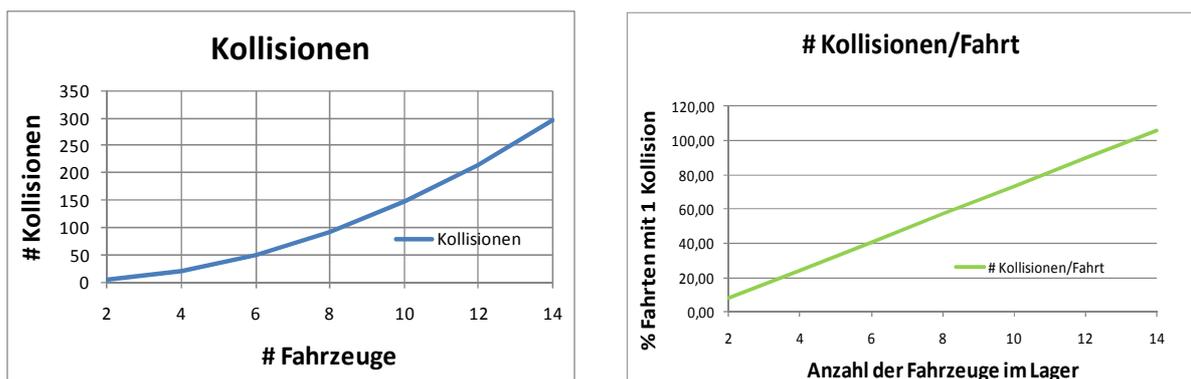


Abbildung 5-9: Auswertung der Kollisionssimulation

Bei dieser Auswertung sind die Möglichkeiten der Kollision nicht unterschieden. Diese Betrachtung würde für weitere Studien in Betracht zu ziehen sein. Bei einer Unterscheidung der Kollisionen in Ausweichmanöver auf der Fahrstrecke und Wartezeiten bei Stationen, könnte der tatsächliche Durchsatz genauer dargestellt werden. Ebenfalls einzubauen wäre die Darstellung der Wartezeit und eine Auswertung nach Dead-lock Situationen.

Durchsatzvergleich

Mit Hilfe dieses Prototyps werden alle Kollisionen ohne Wertigkeit gezählt. Diese Anzahl spielt in der Gleichung Gl. 3-6 im Faktor α ein um die Fahrtzeit zu erhöhen. Wird für die Wartezeit in dieser Gleichung eine Zeit von 36 Sekunden angenommen, zeigt die Abbildung 5-10 den Verlauf des korrigierten Durchsatzes im Vergleich zu einer linearen Berechnung.

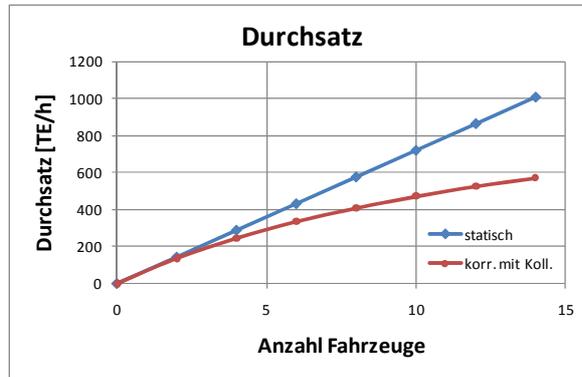


Abbildung 5-10: Verlauf des korrigierten Durchsatzes

5.1.6 Zusammenfassung der Ergebnisauswertung

Abschließend zur Auswertung der Ergebnisse sind noch Tatsachen zu erwähnen, die bisher nicht berücksichtigt wurden.

Bei den genannten Preisen in diesem Unterkapitel handelt es sich um fiktive Zahlen, da keine vergleichbaren Zahlen zur Verfügung gestanden haben. Als Richtwert wurden die FTF des im LKH Klagenfurt eingesetzten Systems verwendet. Weiter handelt es sich bei den Kosten, die für eine Anlage von autonomen Fahrzeugen berechnet wurde, nur um Investitionskosten. Die Wartungs- und Betriebskosten wurden nicht berücksichtigt, da diese Arbeit erste Aussagen zum Einsatz und dem Einsatzgebiet dieser Technologie treffen soll.

In den Auswertungen verhalten sich die Verläufe der Kennzahlen so wie es sich in der Theorie bereits abgezeichnet hat. Dabei lassen sich die Ergebnisse folgenderweise zusammenfassen:

Eine höhere Fahrgeschwindigkeit hat nur bis zu einem optimalen Wert Sinn. Darüber hinaus lässt sich der Durchsatz nicht mehr signifikant steigern, da die restliche Fahrtzeit von der Übergabezeit an den Stationen limitiert wird.

Die Übergabezeit sollte so kurz wie möglich gestaltet werden, um so viele Fahrzeuge wie möglich bearbeiten zu können.

Eine höhere Ladefähigkeit hat positive Auswirkungen auf den Durchsatz, jedoch wirkt sie sich nicht linear darauf aus. Das bedeutet ab einer gewissen Zahl von transportierbaren Waren wirkt sich jede Weitere immer weniger auf den Durchsatz aus.

5.2 Anwendungsbeispiele

Im Zuge dieser Arbeit wurden drei reale Anwendungen für autonome Fördermittel bearbeitet. Dabei handelte es sich bei der ersten besprochenen um einen Aufbau zu Präsentations- und Versuchszwecken. Bei den anderen beiden Projekten wurde der Einsatz in einem bestehenden System überprüft und bewertet. Eine tatsächliche Realisierung hat sich jedoch nur im ersten Fall ergeben. In den Unterkapiteln werden diese Realfälle näher betrachtet.

5.2.1 Versuchsaufbau

Die Firma hat einen Versuchsaufbau realisiert, welcher den Transport von Standardbehältern mit frei agierenden Fahrzeugen präsentiert hat. Fünf Fahrzeuge wurden hier in Betrieb genommen, wobei immer drei die Transporte durchgeführt haben und zwei wurden an Batterieladestationen mit verschiedenen Ladestrategien geladen.

Die Auswertung einer Log Datei wird hier in Abbildung 5-11 als Zeitachse dargestellt. Der Versuch ist länger als 13 Stunden in Betrieb gewesen. Nach ungefähr 10 Stunden ist ein Fehler aufgetreten (Markierung in der Zeitachse). Danach waren nur noch 2 Fahrzeuge aktiv bis es zum Stillstand gekommen ist. Als möglicher Grund kann hier keine definitive Aussage gegeben werden, da der Stand fremd betreut wurde und die Daten dafür nicht übermittelt worden sind. In den Zeiten, in welchen die Roboter nicht als aktiv in der Zeitachse gekennzeichnet sind, werden die Batterien geladen bis ein anderer Roboter die Batterieladestation benötigt.

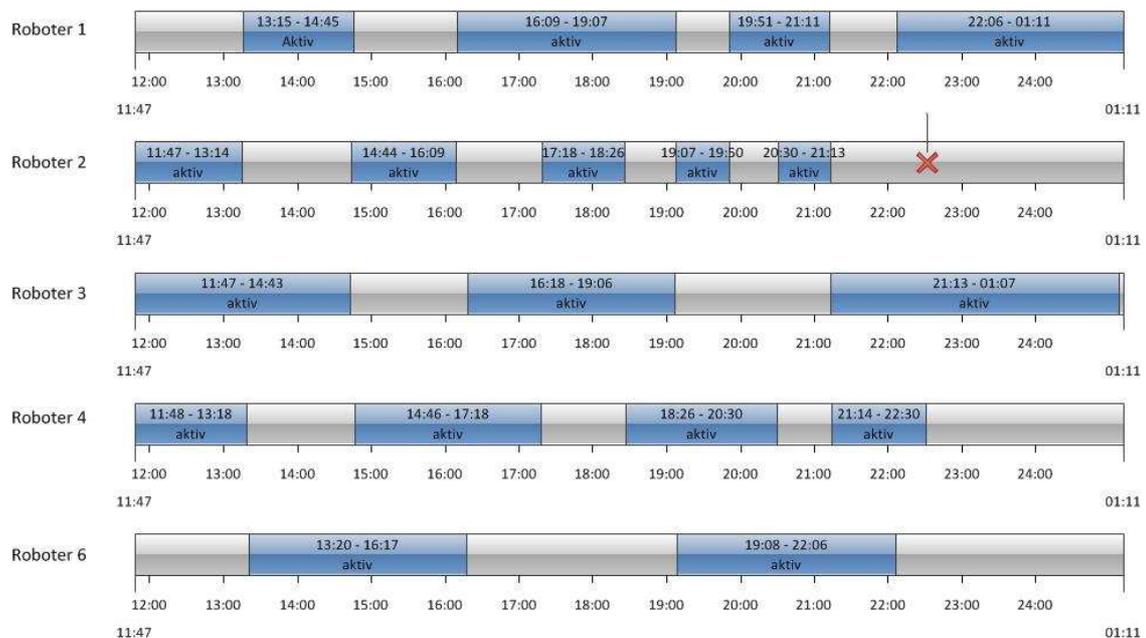


Abbildung 5-11: Zeitachse der Einsatzzeit der Roboter am Versuchsaufbau

Der Fahrweg für einen Transport beträgt knappe 9 Meter und dauert von Annahme der Ware bis zur Zuteilung des nächsten Auftrages rund 52 Sekunden.

5.2.2 Projekt A

Dieses Projekt ist als Erweiterung eines bestehenden Montagebetriebes von der Firma geplant gewesen. Dabei sollen Bauteile von einem Regalbediengerät zu der Endmontage transportiert werden. Im Moment werden die Teile manuell auf kleinen Regalen mit mehreren Behältern bei Bedarf zwischen den beiden Bereichen hin und her transportiert. Die Durchlaufregale, welche die Entnahmepunkte an dem Regalbediengerät darstellen, müssten für eine Automatisierung angepasst werden.

Nach einem Besuch des Montagebetriebes hat sich die Durchführung des Projektes als mit weiter erhöhtem Aufwand erkennbar gemacht. Die Behälter werden nicht einzeln oder in den verschiebbaren Regalen transportiert, sondern es kommt auch zu Mischtransporten. Diese bestehen aus Gütern und Behältern, welche auf Paletten bereitgestellt werden. Es bedarf hierfür eines Fahrzeugtypen mit Gabeln. Aus diesen Gründen wurde das Projekt in diesem Stadium mit einem zu hohem Anpassungsaufwand als nicht durchführbar abgeschlossen.

5.2.3 Projekt B

Das Projekt B wurde so wie Projekt A von der Firma als möglicher Einsatz für autonome Fördermittel definiert. Dabei soll durch den Einsatz eine automatisierte Nachlieferung von fehlenden Artikeln in fehlerhaft kommissionierten Aufträgen ermöglicht werden. Die Transportwege sind im Layout in Abbildung 5-13 durch Pfeile dargestellt. Durch die schwarzen Kreise sind die Stationen der Kommissionierung gekennzeichnet, diese bilden den Auftragsstart für die Fahrzeuge. Das Ziel, durch einen roten Kreis markiert, ist die Kontrollstation wo die Aufträge vor dem Warenausgang auf Vollständigkeit geprüft werden. Im Moment werden diese Fehlartikel manuell zur Kontrollstation transportiert. Es handelt sich bei diesem Projekt um eine Erweiterung der bestehenden Anlage.

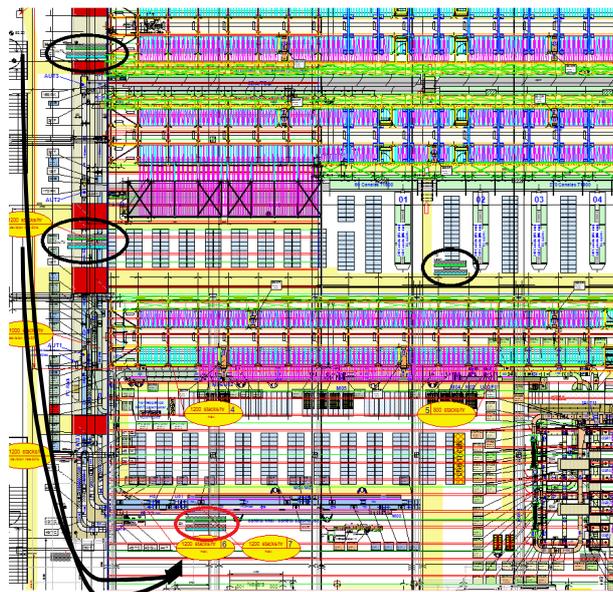


Abbildung 5-13: Layout von Projekt B

Nach Auswertung der Daten der beiden Stationen, werden maximale Leistungen von 36 TE/h von der oberen und 52 TE/h von der unteren identifiziert. Diese Leistungen könnten von einem frei agierenden Fördermittel erbracht werden. Nach einer Aufschlüsselung auf Minutenbasis zeigten sich bei der unteren Station Spitzenwerte von bis zu 23 Aufträgen in fünf Minuten. Diese Aufträge können, aufgrund einer Unterteilung des Standardbehälters in Viertel, in 6 Fahrten untergebracht werden. Der Transport der Artikel ist allerdings zeitkritisch und sollte innerhalb von 5 Minuten nach Stattfinden des Fehlers durchgeführt werden. Bei der Wegstrecke (40m) und den Eigenschaften der Fahrzeuge (2m/s) können allerdings nur knapp 4 Fahrten durchgeführt werden. Ebenso verhält es sich bei der oberen Station, hier müssen Spitzen von 4 Fahrten in 5 Minuten abgedeckt werden. Aufgrund einer größeren Entfernung kann ein Fahrzeug diese Spitzen nicht abdecken. Also sind in Summe und aufgrund der vorhandenen Datenbasis vier Fahrzeuge für die Automatisierung dieser Eilaufträge notwendig.

5.2.4 Zusammenfassung der Projekte

Bei der Planung der Projekte und einem Einsatz von autonomen Fördermitteln können die Flexibilität der Fahrzeuge ausgespielt werden. Jedes Projekt muss einzeln betrachtet werden. Die Fahrzeuge und das System bedürfen Anpassungen, damit ein automatischer Transport mit Robotern verwirklicht werden kann. Die in dieser Arbeit aufgestellten Berechnungen können für eine Abschätzung der Flottengröße verwendet werden und die kritischen Punkte können durch die gewonnenen Erfahrungen ebenfalls rascher identifiziert werden.

Abschließend soll erwähnt werden, dass mit Hilfe von autonomen Fördermitteln bestehende Anlagen in gewissen Bereichen einfach erweitert werden können. Ausschlaggebend sind dabei jedoch, dass die geforderten Leistungen und der Platzbedarf mit den Anforderungen der Fahrzeuge zusammenpassen.

5.3 Bewertung der Maßnahmen

In dieser Arbeit wurden zwei Methoden verwendet um Kennzahlen zu berechnen, die zum Vergleich von Systemen aus stetiger Fördertechnik und frei agierenden Fördermitteln dienen. Als Ausgangsrechnung wurde die statische Durchsatzberechnung verwendet, deren Grenzen ausgearbeitet wurden. Für die Ermittlung von Fahrwegen in bestimmten Lagerszenarien und Fahrstrategien wurde die Monte-Carlo Methode angewandt. Die Ergebnisse konnten nicht mit einer anderen Methode oder durch Versuche verifiziert oder validiert werden. Eine Vergleichsrechnung durch den Kooperationspartner ergab jedoch Ergebnisse dergleichen Größenordnung. Eine schlüssige Erklärung aller Werte ist möglich und diese können das angenommene Verhalten der Fördermittel wiedergeben.

Besonders dieses Verhalten ist zu beachten, da die angenommenen Werte Annahmen von nicht realisierten Fahrzeugen und Lagersituationen darstellen.

Für eine genauere Bewertung der Monte-Carlo Methode wird auf GASPERIN (vgl. [Gas09]) verwiesen. Da diese Methode in der vorliegenden Arbeit nicht im Zentrum der Aufmerksamkeit gestanden hat, sondern zur Anwendung gekommen ist.

Die Berücksichtigung der Kollisionen in der Fahrtzeit wurde in dieser Arbeit als Prototyp erarbeitet und sollte in weiterführenden Studien vertieft werden. Die Notwendigkeit dieser Berücksichtigung wird bei einem Vergleich der Rechnungen deutlich. Die statische Methode berechnet Leistungen, die mit einer Berücksichtigung von Interaktionen der Fahrzeuge mit der Umwelt keine realistischen Werte ergeben. Dieser Weg zur Berechnung des Durchsatzes sollte weitergeführt werden.

6 Zusammenfassung

Es wurden viele Bereiche aus der Intralogistik und der Technik frei agierender Fördermittel in dieser Arbeit beleuchtet. In den ersten Kapiteln ist das Einsatzfeld und der Stand der Technik definiert worden. Bereits im Einsatzgebiet ist die Flexibilität der autonomen Fahrzeuge als wichtiges Kriterium erkannt worden. Die Technologie, die in Verwendung kommt, umfasst sehr viele unterschiedliche Themen. Bei der Betrachtung sind die Varianten des Fahrwerks, der Lastaufnahmemittel und der Energiebereitstellung erwähnt worden. Diese haben eine große Auswirkung auf die Leistungsfähigkeit.

Nach dieser Betrachtung wurden Kennzahlen erkannt, mit welchen das Ziel der Arbeit erreicht werden kann. Ein Vergleich von stetiger Fördertechnik und mobilen Robotern mit Transportaufgaben kann nur durchgeführt werden wenn ein systemischer Durchsatz berechnet werden kann. Dafür wurden Methoden entwickelt. Begonnen wurde damit einen Transport in einzelne Tätigkeiten zu untergliedern, in die Übergabe und in die Strecke. Die nächsten Schritte haben die Grenzleistung von verschiedenen Fahrstrategien auf Szenarien berechnet. Zur Anwendung ist hierbei die Monte-Carlo Methode gekommen um einen repräsentativen Fahrweg aus einem Lagerlayout berechnen zu können. Daraus resultiert der maximale Durchsatz für ein eingesetztes Fördermittel. Diese Rechnungen haben ein lineares Verhalten von eingesetzten Fahrzeugen zu erreichbarer Leistung angenommen. Die Annahmen gingen davon aus, dass sich die Fahrzeuge untereinander nicht behindern würden. Durch Erkenntnisse in einem Versuchsaufbau und der Entwicklung eines Prototyps zur Kollisionszählung ist deutlich geworden, dass diese Annahme nur für eine geringe Anzahl von Fahrzeugen in einem bestimmten System gültig ist. Sobald das Verhältnis von Platzangebot, Anzahl der Fahrzeuge und Anzahl der Stationen sich durch mehr Fahrzeuge verändert, steigt die Kollisionshäufigkeit. Als schließende Aussage wurde in der Arbeit, ein Vergleich zwischen der linearen Berechnung des Durchsatzes und einer durch Kollisionen korrigierten Berechnung des Durchsatzes gemacht. Es ist deutlich zu erkennen, dass eine lineare Skalierbarkeit für ein System nur bis zu einem bestimmten Punkt durchführbar ist. Ab diesem Punkt können weitere Fahrzeuge, die eingesetzt werden den Durchsatz nicht mehr steigern. Dann müssten weitere Anpassungen getroffen werden um dieses zu erreichen. Die Anpassungen sind allerdings sicher leichter zu realisieren als in einem System mit Stetigförderern, da es darum geht mehr Stationen zur Übergabe einzubauen. Diese Maßnahme funktioniert natürlich ebenfalls nur solange, bis das Platzangebot die Menge der Fahrzeuge nicht mehr bewältigen kann.

Im Zuge der Arbeit wurden auch einige reale Projekte und Situationen für einen Vergleich zwischen stetiger Fördertechnik und den Fahrzeugen herangezogen. Die Herausforderung hierbei lag an den unbekanntem Eigenschaften der Vehikel. Von diesen Eigenschaften hängt ein wirtschaftlicher Einsatz grundlegend ab. Die getroffenen Annahmen haben sich an Richtwerte bestehender Prototypen gehalten.

Nach der Literaturrecherche dieser Arbeit lässt sich eine vorangetriebene Idee erkennen, die die autonomen Fördermittel in flexible, dezentral organisierte Systeme zusammenschließt. Von einer Art Plug&Play Anwendung wird gesprochen, was den Einsatz erleichtern soll. Dabei werden jedoch die Anforderungen an die Software und die Kommunikation erhöht. Die Einzelkomponenten bekommen mehr Entscheidungsfreiheit und die künstliche Intelligenz muss ebenfalls verbessert werden. Dadurch steigt die Komplexität der Steuerung welche eine Hemmschwelle für Anwender darstellen kann. Aufgrund der Abgabe der Kontrolle durch dezentrale Steuerungen muss auch die Leistung dieser Steuerungsalgorithmen kritisch beobachtet werden. Besonders die Frage, wie hoch die Leistung von dezentral gesteuerten Systemen ist, muss genau beantwortet werden können um den Aufwand wirtschaftlich rechtfertigen zu können.

Die zukünftige Entwicklung der Technologie frei agierender Fördermittel kann sich in jedem einzelnen Bereich vollziehen. Aus den Erkenntnissen dieser Arbeit, haben sich wichtige Punkte zur weiteren Studie kristallisiert.

In der Mechanik ist der Bedarf weiterführender Betrachtungen hauptsächlich auf das Fahrwerk konzentriert. Durch einen Ausbau der Fähigkeiten des Fahrwerks hinsichtlich der Feinpositionierung zu Übergabestationen kann hier Zeit eingespart werden und dadurch der Durchsatz gesteigert werden. Auch die Durchführung der Übergabe kann durch Weiterentwicklungen optimiert werden.

Die zweite Baugruppe eines frei agierenden Fördermittels, die nach einer weiteren Studie verlangt, ist die Energiebereitstellung. Dieses Thema bleibt jedoch allzeit aktuell und sollte mit jeder neuen Entwicklung optimiert werden.

Die direkt an diese Arbeit anknüpfende Studie sollte hinsichtlich des Verhaltens und des Interagierens der Fahrzeuge untereinander und der Umwelt stattfinden. Mit dem Prototyp der Kollisionszählung wurde dafür bereits ein Grundstein gelegt. Die nächsten Entwicklungen sollten eine Unterscheidung der stattfindenden Kollisionen ermöglichen. Als nächstes können Ausweichalgorithmen in den Fahrwegen implementiert werden und die Wartezeiten an den Übergabestationen können ebenfalls berücksichtigt werden. Daraus lässt sich voraussichtlich auch eine Blockierungssituation vorhersagen.

Das Ziel dieser zukünftigen Studien soll eine Möglichkeit sein, die Leistungsfähigkeit einer Anlage mit frei agierenden Systemen darstellen oder berechnen zu können. Die Herausforderung dabei besteht sicherlich in den vielen Parametern die in diesen Systemen variiert werden können.

6.1 Auslegungsregeln

Als Abschluss dieser Arbeit werden Auslegungsregeln formuliert, welche bei der Projektierung von neuen Anlagen Unterstützung geben sollen. Bei diesen Auslegungsregeln werden Erkenntnisse, die während dieser Arbeit gemacht worden sind wiederholt und nochmals kurz begründet. Dabei wird eine Untergliederung in Bereiche getroffen, die ein Zusammenspiel des Systems unterstützen. Folgende Punkte werden näher betrachtet: die Übergabestation, die Strecke, Kollisionen und die Fahrzeuge.

Betrachtung der Übergabestationen:

- *Die Dauer der Übergabe limitiert den Durchsatz.* Die Übergabe wurde in der Arbeit als Flaschenhals für den Transport über eine Strecke identifiziert. Es kann nur eine begrenzte Anzahl an Waren in das System von Fahrzeugen übergeben werden.
- *Durch eine Parallelisierung von Übergabestationen kann der limitierende Faktor einer einzelnen Übergabestation reduziert werden.* Dabei ist zu berücksichtigen, dass der Aufbau einer Station viel Platz benötigt. Dieser Platzbedarf kommt von zwei Seiten. Einerseits muss die Station an die Peripherie angebunden werden. Andererseits brauchen die Fahrzeuge genügend Platz zum Manövrieren, Ausweichen und Warten vor der Station, sowie zum Wegfahren nach der Übergabe. Das bedeutet, dass eine Parallelisierung von Stationen den Bedarf an Fahrregeln für die Fahrzeuge um keine Blockierungen zu verursachen erhöht.

Betrachtung der Strecke:

- *Für längere Transportwege sind mehr Fahrzeuge notwendig um einen geforderten Durchsatz leisten zu können.* Durch höhere Fahrgeschwindigkeiten kann diesem Umstand entgegengewirkt werden. Diese haben jedoch auch Einfluss auf das Fahrzeug, siehe unten. Die Grenzleistung der Strecke hängt von Fahrgeschwindigkeit und Größe der Fahrzeuge ab. Nachdem die Fahrzeuge Hindernissen ausweichen können, wird die standardmäßige Grenzleistung kein Limit darstellen solange genügend Platz zum Ausweichen zur Verfügung steht.
- *Eine höhere Fahrgeschwindigkeit kann die Verluste, die bei der Übergabe an der Station entstehen nicht wieder aufholen.*

Kollisionen:

- *Zwei Arten von Kollisionen müssen beachtet werden, die auf der Strecke und die bei den Stationen.* Auf der Strecke muss genügend Platz für ein Ausweichen gegeben sein. An den Stationen ist eine Balance zwischen freier Fahrwegwahl und Vorfahrtsregeln zu finden um Blockierungen zu vermeiden.

Fahrzeug:

- *Eine Steigerung der Ladefähigkeit erhöht den Durchsatz nicht linear.* Bei Doppelspielen sind weitere Wege notwendig, da die Waren nicht die gleichen Ziele haben müssen. Der Aktionsradius wird durch den größeren Aufbau beeinflusst und damit die Kollisionen und die Übergabezeit. Nicht nur ein Nebeneinander der Lastaufnahme auch ein Übereinander wirkt sich auf den Aktionsradius aus, dabei ist das Schlagwort Ladungssicherung und Kippstabilität bei Kurvenfahrten zu erwähnen.
- *Die Eigenschaften des Fahrzeuges spielen eine große Rolle.* Ein flächenbewegliches Fahrwerk positioniert schneller. Die Energiebereitstellung wirkt sich auf die Verfügbarkeit aus und damit direkt auf die wirtschaftliche Effektivität.

7 Verzeichnisse

7.1 Literaturverzeichnis

- [BMM01] Bronstein, I.N., et al. 2001. *Taschenbuch der Mathematik*. Thun und Frankfurt: Harri Deutsch, 2001.
- [BuH07] Bullinger, Hans-Jörg und ten Hompel, Michael. 2007. *Internet der Dinge*. Berlin Heidelberg: Springer, 2007.
- [DUD97] 1997. *Duden - Fremdwörterbuch*. Mannheim Leipzig Wien Zürich: Dudenverlag, 1997.
- [ELB02] Elbracht, Dietrich. 2002. *Geschichte, Entwicklung und Zukunft des rechnergeführten Flurförderzeugs Teil I*. s.l.: Fördern und Heben Band 52 (2002) Heft 9, Seite 563-565, 2002.
- [FaB04] Farahvash, Pooya und Boucher, Thomas. 2004. *A multi-agent architecture for control of AGV systems*. New Jersey: Robotics and Computer-Integrated Manufacturing 20, 473 - 483, 2004.
- [FHW09] Furmans, K., Huber, C. und Wisser, J. 2009. *Modellierung von Blockiervorgängen in manuellen Kommissioniersystemen mittels Bedientheorie*. Universität Karlsruhe: Logistics Journal , 2009. ISSN: 1860-5923.
- [Gas09] Gasperin, Simon. 2009. *Diplomarbeit - Gewöhnliche-Monte-Carlo-Simulation zur Mehrfachaufnahme in der Lagertechnik*. Graz: s.n., 2009.
- [GER07] Gerl, Bernhard. 2007. *Schnelle Stromdepots*. s.l.: Pictures of the Future (Herbst 2007), S. 74, 2007.
- [GUD05] Gudehus, Timm. 2005. *Logistik - Grundlagen, Strategien, Anwendungen*. Berlin: Springer, 2005.
- [GüH10] Günthner, Willibald und ten Hompel, Michael. 2010. *Internet der Dinge in der Intralogistik*. Heidelberg, Dordrecht, London, NewYork: Springer, 2010.
- [GHT10] Günthner, Willibald, et al. 2010. *Auf dem Weg zur zellularen Fördertechnik*. Berlin: Hebezeuge Fördermittel, Band 50, S.78-79, 2010.
- [HLi09] Ho, Ying-Chin und Liao, Ta-Wei. 2009. *Zone design and control for vehicle collision prevention and load balancing in a zone control AGV system*. Taiwan: computers and industrial engineering 56, 417 - 432, 2009.
- [HoL09] Ho, Ying-Chin und Liu, Hao-Cheng. 2009. *The Performance of load-selection rules and pickup-dispatching rules for multiple-load AGVs*. Taiwan: Journal of Manufacturing Systems 28, S. 1 - 10 , 2009.
- [KOJ02] Koo, Pyung-Hoi und Jang, Jaejin. 2002. *Vehicle Travel Time Models for AGV Systems under Various Dispatching Rules*. The International Journal of Flexible Manufacturing Systems, 14: s.n., 2002. S. S. 249 - 261.

- [KJS05] Koo, Pyung-hoi, Jang, Jaejin und Suh, Jungdae. 2005. *Estimation of Part waiting time and fleet sizing in AGV systems*. s.l.: The International Journal of Flexible Manufacturing Systems, 16, 211 - 228, 2005.
- [LeS06] Lee, Jim und Srisawat, Teerachat. 2006. *Effect of manufacturing system constructs on pick-up and drop-off strategies of multiple-load AGVs*. Volume 44: 4, S. 653-673: International Journal of Production Research, 2006.
- [Qui11] Logistics, Quiet. 2011. www.quietlogistics.com. [Online] Quiet Logistics, 2011. [Zitat vom: 2. August 2011.] <http://www.quietlogistics.com/>.
- [RaS98] Rajota, S., Shanker, K. und Batra, J. L. 1998. *An heuristic for configuring a mixed uni/bidirectional flow path for an AGV system*. s.l.: International Journal of Production Research, 36: 7, 1779 - 1799, 1998.
- [RSB98] Rajotia, S., Shanker, K. und Batra, J. L. 1998. *Determination of optimal AGV fleet size for an FMS*. s.l.: International Journal of Production Research, 36: 5, 1177 - 1198, 1998.
- [SaH06] Sachs, Lothar und Hedderich, Jürgen. 2006. *Angewandte Statistik*. Berlin: Springer, 2006.
- [SBB08] Schulze, L., Behling, S. und Buhrs, S. 2008. *AGVS in logistics systems - state of the art, applications and new developments*. Tel Aviv Leibniz Universität Hannover (PSLT): International Conference on industrial logistics, 2008.
- [Ste07] Steland, Ansgar. 2007. *Basiswissen Statistik*. Berlin - Heidelberg: Springer, 2007.
- [HoK11] ten Hompel, Michael und Kamagaew, Andreas. 2011. *Zellulare Intralogistik - In Zukunft nur noch Multishuttles?* München: 20. Deutscher Materialfluss-Kongress, 2011.
- [HSN07] ten Hompel, Michael, Schmidt, Thorsten und Nagel, Lars. 2007. *Materialflusssysteme*. Berlin Heidelberg: Springer Verlag, 2007.
- [UCL09] Um, Insup, Cheon, Hyeonjae und Lee, Hongchul. 2009. *The Simulation design and analysis of a Flexible Manufacturing System with Automated Guided Vehicle System*. Seoul: Journal of Manufacturing Systems 28 115 - 122, 2009.
- [VDI05] VDI. 2005. *VDI-Richtlinie 2510 Fahrerlose Transportsysteme*. Düsseldorf: VDI - Verein Deutscher Ingenieure - Richtlinie, 2005.
- [WAN06] Wanka, Rolf. 2006. *Approximationsalgorithmen*. Wiesbaden: Teubner, 2006.
- [YSC05] Yoo, Jung-woon, et al. 2005. *An algorithm for deadlock avoidance in an AGV System*. London: International Journal for Advanced Manufacturing Technology 26: 659 - 668, 2005.

7.2 Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1-1: Darstellung Lagerbereiche	1
Abbildung 1-2: Ware zum Mann Lager (nach [GUD05] S. 699, Abb. 17.4)	3
Abbildung 1-3: Mann zu Ware Lager (nach [HSN07] S. 270, Abb 5.27).....	4
Abbildung 1-4: Beispielhafte 80/20 ABC Verteilung	4
Abbildung 1-5: Entwicklung der FTS-Technik von 1963 bis in die 90er Jahre (nach [ELB02] , Abb.1)	7
Abbildung 1-6: Illustration eines Beispiels zum Vergleich von zentralistischer und dezentraler Organisation (nach [BuH07] , S. 95, Abb. 2.)	9
Abbildung 2-1: Transport A -> B mit autonomen Fahrzeug	15
Abbildung 2-2: FTS im LKH Klagenfurt.....	16
Abbildung 2-3: Zur Wartung geöffnetes Fahrzeug	17
Abbildung 2-4: AGV-System mit Personenverfolgung (nach [SBB08] , Fig.1)....	18
Abbildung 2-5: links: Maschinen-motivierte-Auswahl, rechts: Fahrzeug-motivierte-Auswahl (nach [KOJ02] Fig. 2)....	19
Abbildung 2-6: Feldaufteilung in "Mann zu Ware" Lager (nach [FHW09] , Abb. 4)	23
Abbildung 2-7: Verlauf pro Kommissionierer (nach [FHW09] , Abb. 10)	24
Abbildung 2-8: Zuteilung der Zeiten in einem Transport (nach [KJS05] , fig. 1, S. 212)	26
Abbildung 2-9: Vergleich der Eigenschaften von FT und Fahrzeug.....	27
Abbildung 3-1 Definition mobiler flurgebundener Fördermittel (nach [VDI05] , Bild 3, S. 3).....	30
Abbildung 3-2: FTF mit 2 LAM zur mehrfachen Lastaufnahme (nach [VDI05] , Fig. 6)	31
Abbildung 3-3: Winkelfehler und Verkeilen	32
Abbildung 3-4: Baugruppen eines FTF (nach [VDI05] , Bild 8, S.14).....	33
Abbildung 3-5: Unterfahrschlepper Kiva von QuietLogistics (nach [Qui11])	34
Abbildung 3-6: links: Rollenförderer; rechts: Rollerswitch	35
Abbildung 3-7: Aufstellung verschiedener Fahrwerksvarianten (nach [VDI05] , Bild 9, S. 16).....	36
Abbildung 3-8: Vergleich von Batterietechnologien (nach [GER07] , S. 74)	38

Abbildung 3-9: Prototyp eines Auswahlkasten für einen Kennzahlgenerator....	40
Abbildung 3-10: Das Multi-Shuttle Move	41
Abbildung 3-11: open-shuttle von KNAPP.....	43
Abbildung 3-12: Karis am Stand der WGTL auf der CeMAT 2011	44
Abbildung 3-13: BInE (links) und KaTe (rechts) vom Messestand der WGTL ...	45
Abbildung 3-14: AutoStore (links) von Swisslog und FTF von Trilogiq (rechts).	46
Abbildung 3-15: Einsatzgebiet von autonomen Fördermitteln	48
Abbildung 3-16: Zeitachse Einzellloop 20m Strecke, optimale Anzahl von Fahrzeugen	51
Abbildung 3-17: Zeitachse zu Einzellloops mit einem Fahrzeug mehr als optimal	53
Abbildung 3-18: Zeitachse zu Einzellloops mit einem Fahrzeug weniger als optimal.....	54
Abbildung 3-19: Streckengrenzleistung für div. Fahrzeuge über Geschwindigkeit (nach [GUD05] , Abb. 13.5, S. 485)	57
Abbildung 3-20: Strukturbild des Algorithmus	62
Abbildung 3-21: Darstellung des Prototypen zur Kollisionszählung.....	63
Abbildung 4-1: Durchsatz einer Übergabestation	65
Abbildung 4-2: Grenzleistung von Strecken	67
Abbildung 4-3: 700er Lager	68
Abbildung 4-4: Auftragsfluss 700er Lager	69
Abbildung 4-5: Skizze zu Einzellloops im 700er Lager	70
Abbildung 4-6: 700er Lager mit Gesamtschleifen	71
Abbildung 4-7: 700er Lager Layoutsituation.....	72
Abbildung 4-8: Layout und Materialfluss des Zentrallagers A.....	73
Abbildung 4-9: Beispiel für eine Fahrstrategie des Zentrallagers A	73
Abbildung 4-10: Allgemeines Lager mit zufälligen Fahrwegen.....	74
Abbildung 4-11: Allgemeines Lager mit Doppelspiel Fahrstrategie.....	75
Abbildung 4-12: Allgemeines Lager mit spezieller Fahrstrategie	75
Abbildung 5-1: Durchsatz auf verschiedenen Strecken über Fahrzeugen	77
Abbildung 5-2: Auswertung Zentrallager A.....	82
Abbildung 5-3: Auswertung Zentrallager A über Ladehilfsmittel.....	82

Abbildung 5-4: Vergleich autonomer Fördertechnik mit stetiger Fördertechnik im Zentrallager A.....	83
Abbildung 5-5: Auswertung Einzelfahrt	84
Abbildung 5-6: Auswertung Einzelfahrt in unterschiedlichen Lagergrößen	84
Abbildung 5-7: Auswertung allgemeines 2x4 Lager über Ladehilfsmittel.....	85
Abbildung 5-8: Auswertung Prototyp Simulation Kollisionen über Übergabezeit.....	86
Abbildung 5-9: Auswertung der Kollisionssimulation	86
Abbildung 5-10: Verlauf des korrigierten Durchsatzes	87
Abbildung 5-11: Zeitachse der Einsatzzeit der Roboter am Versuchsaufbau	88
Abbildung 5-12: virtuelle Umgebung des Versuchsaufbau.....	89
Abbildung 5-15: Layout von Projekt B.....	90

7.3 Tabellenverzeichnis

Tabelle 2-1: Leistungstabelle derzeit eingesetzter Fördertechnik.....	15
Tabelle 3-1: Eigenschaften des Multi-Shuttle Move von Dematic (vgl [HoK11])	42
Tabelle 3-2: Daten zum CeMat Aufbau des Dematic Multi-Shuttle Move	42
Tabelle 3-3: Eigenschaften des open-shuttle von KNAPP.....	43
Tabelle 3-4: Daten des KNAPP Aufbau der CeMAT 2011	44
Tabelle 3-5: Eigenschaften des KARIS.....	45
Tabelle 4-1: Werte zur Berechnung der Grenzleistung einer Strecke	66
Tabelle 5-1: Eigenschaften der eingesetzten Fahrzeugvarianten im Lager 700.	78
Tabelle 5-2: Erster Vergleich von 3 Fahrzeugvarianten im 700er Lager mit stetiger FT.....	79
Tabelle 5-3: Zweiter Vergleich von 2 Fahrzeugvarianten im 700er Lager mit stetiger FT.....	81

7.4 Gleichungsverzeichnis

$\lambda_{st} = \frac{v_F}{e_{st}} \dots \left[\frac{1}{s} \right]$	Gl. 2-1	13
$\lambda = \frac{3600}{2 \cdot t_{FP} + t_{Auf} + \frac{s_{Hin}}{v_F} + t_{Ab} + \frac{s_{Rück}}{v_F}} \dots \left[\frac{TE}{h} \right]$	Gl. 2-2	14
$p = (1 - u^n)$	Gl. 2-3	20
$N = \left[\frac{T_l + T_e + T_{wb}}{T_a} \right]^+$	Gl. 2-4	25
$\lambda = \frac{c \cdot 3600}{t_p + t_j + t_E} \dots \left[\frac{TE}{s} \right]$	Gl. 3-1	56
$\lambda = \frac{3600}{t_0 + \frac{1 \cdot TE + v_S}{v_S} \dots \left[\frac{TE}{s} \right]}$	Gl. 3-2	56
$E(x) = \int_{-\infty}^{+\infty} x \cdot f(x) dx \approx \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i$	Gl. 3-3	58
$ \bar{x}_i - \bar{x}_{i-n} \leq \varepsilon$	Gl. 3-4	59
$\sqrt{(x_{ma} - x_{mb})^2 + (y_{ma} - y_{mb})^2} \leq 2 \cdot rad$	Gl. 3-5	64
$\lambda_{kor} = \frac{n \cdot 3600}{\frac{s}{v} + \frac{\alpha}{100} \cdot t_{wart}}$	Gl. 3-6	64
$\#Fzg = \frac{\text{gesamte Fahrzeit}}{\text{Übergabezeit}} = \frac{t_{ges}}{t_{Üges}}$	Gl. 5-1	78
$t_{ges} = 2 \cdot t_{Üges} + 2 \cdot t_s + t_{wart}$	Gl. 5-2	78

Anhang

A veröffentlichter Kurztext

Publizierte Kurzfassung der Arbeit aus dem TUG-online – System in deutscher und englischer Sprache.

A-1 Deutsch

Die vorliegende Diplomarbeit trifft eine Aussage über den effizienten Einsatz von autonomen Fördermitteln. Dafür wird nach einer umfangreichen Literaturstudie der Stand der Technik dargelegt und das Problemfeld beschrieben. Im Weiteren werden logistische Kennzahlen für ein System definiert und berechnet. Schließlich werden Auslegungsregeln geliefert.

Erfahrungen von der Logistikmesse CeMat 2011 werden ebenfalls geschildert und verschiedene Lösungen von Herstellern vorgestellt.

Ein System von frei agierenden Fahrzeugen hat viele Freiheitsgrade und jeder Bereich der Technik findet Einfluss, es werden die mechanischen Komponenten beleuchtet und logistische Kennzahlen bestimmt. Der mechanische Aufbau ist abhängig vom Einsatzbereich. Die Lastaufnahmemittel müssen je nach Größe und Automatisierungsgrad an die Waren und die Anlage angepasst werden. Genauso wird die Energiebereitstellung davon abhängen und die Ladestrategie beeinflussen. Für eine Positionierung des Fahrzeuges bei der automatischen Übergabe kann mit einem flächenbeweglichen Fahrwerk viel Zeit eingespart werden. Jedoch ist das linienbewegliche Fahrwerk günstiger in Konstruktion und Kosten.

Nach der Betrachtung der Fahrzeuge wird das ganze Transportsystem in die einfachsten Teile, die Station zur Übergabe der Waren und die Transportstrecke, unterteilt. Die Grenzleistungen dieser Bereiche werden bestimmt. Die Abhängigkeiten des Durchsatzes von den Eigenschaften der Fahrzeuge bei Übergabe der Waren und auf der Strecke werden gezeigt. Beispielhaft werden verschiedene Lagervarianten definiert. Der Durchsatz dieser wird berechnet und mit den Werten der stetigen Fördertechnik verglichen. Mit dem Monte-Carlo Algorithmus wird der durchschnittliche Fahrweg berechnet. Hier wird die Abhängigkeit des Durchsatzes von Fahrweg, Fahrzeit und der Anzahl der geladenen Waren verdeutlicht. Außerdem wird mit Hilfe einer MATLAB Simulation die Anzahl der Kollisionen in den Lagerszenarien gezählt und der Verlauf der Kollisionsanzahl über verschiedene Parameter dargestellt.

Beim Auslegen eines Systems von autonomen Fahrzeugen müssen schließlich einige Punkte beachtet werden, die im Laufe der Arbeit herausgearbeitet werden und zum Schluss zusammengefasst als Auslegungsregeln formuliert werden.

A-2 Englisch

This thesis is a study about the efficient use of autonomous conveyor systems. An extensive literature review presents the state of the art and shows the problem areas. The characteristics of such a system are defined and calculated. In the last section some designing rules are given.

The Experiences made at the logistic exhibition CeMAT 2011 are described and manufacturer's solutions are discussed.

A system of freely operating vehicles has many grades of freedom and every technical domain takes part in the performance. Some mechanical components will be examined and the logistic characteristics set. The mechanical assembly depends on the operation conditions. The load handling device has to be adapted to the size and the grade of automation of the goods and the system. Just as well has the energy supply and the strategy of energy charging it's effects. At an automated transfer of the goods, the vehicle has to position itself at the station. This action can be fulfilled faster with a chassis which can move and maneuver freely on a surface. But this chassis is more expensive than a more simply one, which just can move along a line.

The next step in this thesis is the calculation of the material flow in a transporting system. Therefore a closer look at the single actions of a transport will be made. The transfer-station and the road are taken separately and their limiting performance is calculated. The effects of the vehicle's behavior at the goods transfer and on the road on the performance are shown. Some exemplary warehouse layouts will be defined. For those the throughput is evaluated and compared to the continuous conveyor systems. To calculate the average route, the Monte-Carlo method is used. Therewith the dependency of throughput on traveling time and path is illustrated. A simulation prototype counts the collisions of vehicles in a warehouse scenario. Some parameters are varied and they show the trend of the collisions.

At last some rules for designing the transporting systems are set up.

B Kennzahlengenerator

B-1 Read-Me Datei

readme

Kennzahlengenerator für frei agierende Fördermittel:

notwendige Dateien im selben Ordner:

Morphologischer_Kasten_v31.xlsm
Auswertung.dotm

In der vorliegenden Version ist der Kennzahlengenerator erst als Morphologischer Kasten realisiert. Das bedeutet, dass eine Auswahl von verschiedenen Baugruppen getroffen werden kann. Die Auswertung ist nicht vollständig und kann in der Registerkarte "Daten" der *.xlsm Datei ausgefüllt werden. Hier ist zu beachten, dass nur die auszufüllenden Zellen verändert werden sollen, damit eine reibungslose Anwendung möglich ist.

Im finalen Zustand sollte, durch eine Auswahl eine Bewertungszahl des Fahrzeuges ermittelt werden. Mit dieser Zahl könnten die unterschiedlichen Fahrzeuge verglichen werden. Dieser Schritt sollte in einer weiterführenden Studie durchgeführt werden.

Nachdem der Morphologische Kasten geöffnet wurde, kann eine Auswahl getroffen werden. Mit Bestätigen der Auswahl erscheint ein Auswertungsfenster, das die Auswertung darstellt. Durch einen Klick auf den "nach Word exportieren" Knopf, werden die in diesem Fenster präsentierten Daten in eine Word Datei transferiert. Hier kann eine individuelle weitere Bearbeitung durchgeführt werden.

VORSICHT! Bei Änderungen im Code oder der Dateinamen muss der Quellcode des *.xlsm Blattes korrigiert und angepasst werden. Kann sehr kompliziert werden.

Die Dateien befinden sich im digitalen Anhang im Unterordner zum dritten Kapitel.

C MathCAD Programmcodes

C-1 Berechnung mittels des Zentrallagers A

Berechnung Zentrallager A mit Monte-Carlo
1 Fahrzeug n Lastaufnahmemittel

Matrix mit Wegstrecken:

M_lay :=
...M_layout.xls

M_lay =

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	0	17.5	25	32.5	40	47.5	55	62.5	70	77.5
2	17.5	0	7.5	15	22.5	30	37.5	45	52.5	60
3	25	7.5	0	7.5	15	22.5	30	37.5	45	52.5
4	32.5	15	7.5	0	7.5	15	22.5	30	37.5	45
5	40	22.5	15	7.5	0	7.5	15	22.5	30	37.5
6	47.5	30	22.5	15	7.5	0	7.5	15	22.5	30
7	55	37.5	30	22.5	15	7.5	0	7.5	15	22.5
8	62.5	45	37.5	30	22.5	15	7.5	0	7.5	15
9	70	52.5	45	37.5	30	22.5	15	7.5	0	7.5
10	77.5	60	52.5	45	37.5	30	22.5	15	7.5	0
11	92.5	75	67.5	60	52.5	45	37.5	30	22.5	15
12	100	82.5	75	67.5	60	52.5	45	37.5	30	22.5
13	107.5	90	82.5	75	67.5	60	52.5	45	37.5	30
14	115	97.5	90	82.5	75	67.5	60	52.5	45	37.5
15	122.5	105	97.5	90	82.5	75	67.5	60	52.5	45
16	130	112.5	105	97.5	90	82.5	75	67.5	60	52.5

Konstanten:

Positionier und Übergabezeit: $t_{p\ddot{u}} := 18s$

reine Übergabezeit: $t_{\ddot{u}} := 3s$

Fahrgeschwindigkeit: $v := 1.9 \cdot \frac{m}{s}$

Berechnung der durchschnittlichen Wegstrecke:

1 Fahrzeug, mehrere LAM, Abfahren der Punkte in aufsteigender Reihenfolge:

```

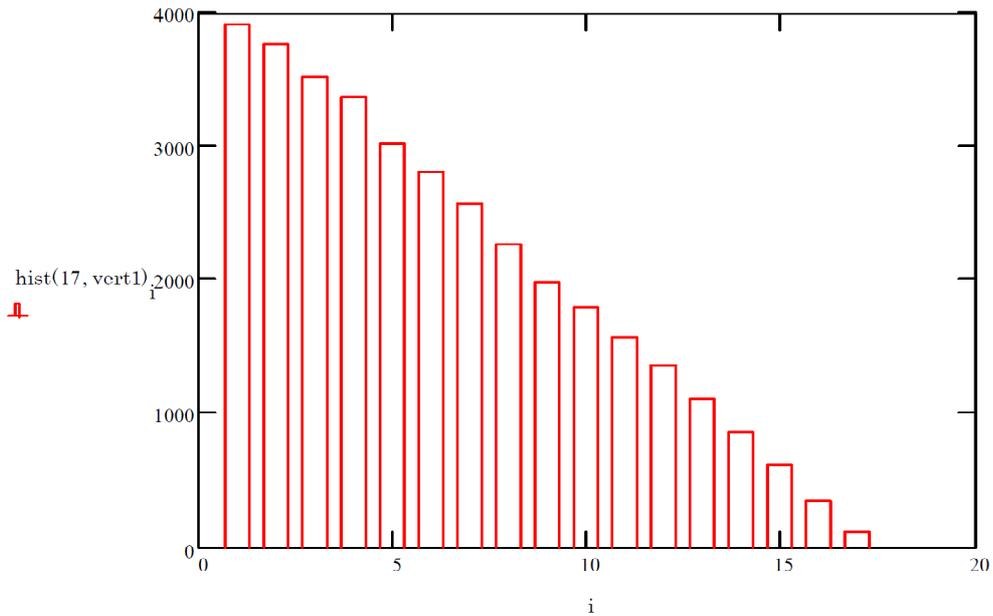
s_quer(start, lam, max, min, genau) :=
  durch ← 0
  return "Lastaufnahmemittel muß größer gleich 1 sein!!!" if lam < 1
  for n ∈ 1 .. max
    ind_1 ← round(runif(lam, 1, 19))
    b ← sort(ind_1)           Erstellen des
                              Zielvektors
    while b_1 = 1 ∨ b_last(b) = 19   bei Aufnahme bekannt.
      ind_1 ← round(runif(lam, 1, 19))
      b ← sort(ind_1)
    for p ∈ 1 .. lam
      loes_n,p ← b_p
    loes_n,2:lam+1 ← M_lay_start,b_1   Eintragen der Abgabepunkte
                                      und der Wege dorthin in die
                                      Lösungsmatrix
    ind_2 ← round(runif(1, 1, 19))
    c_1 ← ind_2_1
    while c_1 = 1 ∨ c_1 = 19         Die Aufnahmepunkte werden
                                      bei jedem Abgabepunkt
                                      abgefragt um gleiche
                                      Aufnahmepunkte zu koordinieren.
      ind_2 ← round(runif(1, 1, 19))
      c_1 ← ind_2_1
    for k ∈ 1 .. lam - 1             if lam > 1
      loes_n,2:lam+1+k ← M_lay_b_k,b_{k+1}
      ind_2 ← round(runif(1, 1, 19))   Bei Mehrfachaufnahme müssen
      c_{k+1} ← ind_2_1                die restlichen Wege eingetragen
      while c_{k+1} = 1 ∨ c_{k+1} = 19   und weitere Abgabepunkte
        ind_2 ← round(runif(1, 1, 19))   definiert werden
        c_{k+1} ← ind_2_1
    for i ∈ 1 .. lam
      for k ∈ 1 .. i                Umschreiben des Aufnahmevektors
        d_k ← 0 if b_i = c_k          um doppeltes Anfahren von
        d_k ← c_k otherwise           Stationen zu vermeiden.
    c_rev ← reverse(sort(c))
    d ← reverse(sort(d))            Kontrolle ob gleiche Ziele am Weg
    for i ∈ 1 .. lam                liegen und Verarbeitung der Kontrolle
      loes_n, lam+i ← d_i
    e ← start if d_1 = 0             Falls der Aufnahmevektor gleich
    e ← d_1 otherwise                den bereits angefahrenen
    loes_n,3:lam+1 ← M_lay_b_last(b),e   Zielen wäre, muss der nächste
                                          Weg zum Ausgangspunkt sein.

```

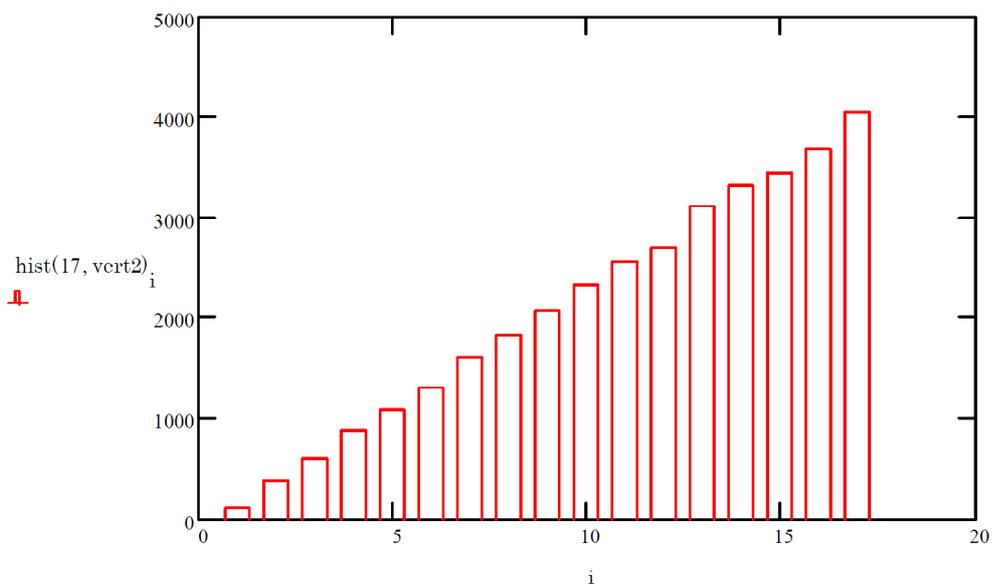

Darstellung der Verteilung

```
vec(mat, spalte) :=
  for i ∈ 1..rows(mat)
    zieli ← mati, spalte
  return ziel
```

```
vert1 := vec(weg_durch, 1)    i := 1..19
```



```
vert2 := vec(weg_durch, 2)
```



Notiz: Wieso lineare Verteilung der angefahrenen Stationen?
Diese werden vor dem anfahren sortiert. Also befinden sich in der ersten Spalte deutlich mehr niedrigere Zahlen als in der zweiten.

Berechnung der Fahrzeiten:

s/v + Positionierzeiten, Abfrage ob Fahrzeug andere Station anfahren musste.

```

zeit(weg, lam) :=
  for i ∈ 1.. rows(weg)
    end ← cols(weg) - 1
    zeiti,1 ←  $\frac{\text{weg}_{i, \text{end}} \cdot m}{v}$ 
    k ← 2
    c ← 2 · (lam - 1)
    for a ∈ 2 · lam + 1 .. 4 · lam
      k ← k + 1 if wegi,a ≠ 0
      c ← c + 1 otherwise
    zeiti,1 ← zeiti,1 + k · tpü + c · tü
    zeiti,2 ←  $\frac{\sum_{n=1}^i \text{zeit}_{n,1}}{i}$ 
    zeiti,3 ← k · s
    zeiti,4 ← c · s
  zeit

```

fahrtzeit := zeit(weg_durch, lam)

fahrtzeit =

	1	2
1	227.947	227.947
2	212.158	220.053
3	187.684	209.263
4	242.947	217.684
5	250.842	224.316
6	258.737	230.053
7	220.053	228.624
8	258.737	232.388
9	250.842	234.439
10	212.158	232.211
11	243.737	233.258
12	258.737	235.382
13	235.053	235.356
14	235.842	235.391
15	219.263	234.316
16	227.158	233.868

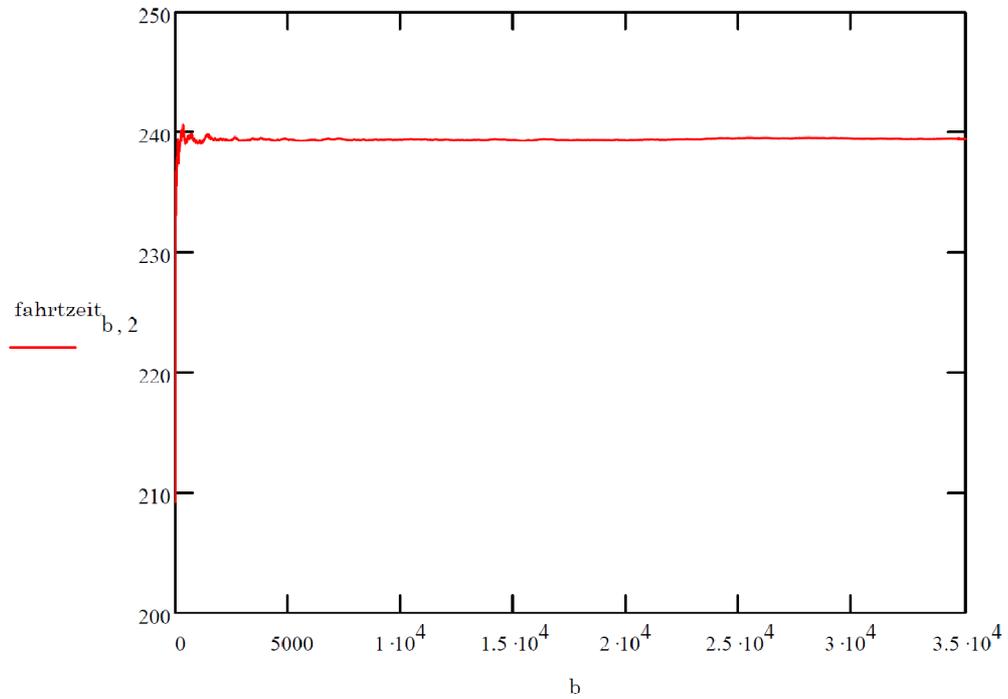
fahrtzeit_{rows(fahrtzeit),2} = 239.446 s

Durchsatz := $\frac{\text{lam}}{\text{fahrtzeit}_{\text{rows}(\text{fahrtzeit}),2}}$

Durchsatz = 30.069 $\frac{1}{\text{hr}}$

```
b := 1 .. rows(fahrtzeit)
```

```
einz_zeit_b := fahrtzeit_b,1 *  $\frac{1}{s}$ 
```



C-2 Berechnung des Allgemeinen Lagers (Einzelfahrstrategie)

*Berechnung des allgemeinen Lagers mit Einzelfahrstrategie:
Monte-Carlo Methode, 1 Ladehilfsmittel.*

Matrix mit Wegstrecken:

M_lay :=
...M_layout_allg.xls

$$M_{\text{lay}} = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 10 & 20 & 30 & 31.623 & 36.056 \\ 0 & 10 & 0 & 10 & 31.623 & 30 & 31.623 \\ 0 & 20 & 10 & 0 & 36.056 & 31.623 & 30 \\ 0 & 30 & 31.623 & 36.056 & 0 & 10 & 20 \\ 0 & 31.623 & 30 & 31.623 & 10 & 0 & 10 \\ 0 & 36.056 & 31.623 & 30 & 20 & 10 & 0 \end{pmatrix}$$

Konstanten:

Positionier und Übergabezeit: $t_{\text{pü}} := 18\text{s}$

reine Übergabezeit: $t_{\text{ü}} := 3\text{s}$

Fahrgeschwindigkeit: $v := 1.4 \cdot \frac{\text{m}}{\text{s}}$

Berechnung der durchschnittlichen Wegstrecke:

1 Fahrzeug, Abfahren der Punkte in Aufsteigender Reihenfolge:

```

s_quer(start, lam, max, min, genau) :=
  durch ← 0
  return "Lastaufnahmemittel muß größer gleich 1 sein!!!" if lam < 1
  for n ∈ 1 .. max
    start ← round(runif(1, 1, cols(M_lay) + 1))
    start ← start_1
    while start = 1 ∨ start = cols(M_lay) + 1
      start ← round(runif(1, 1, cols(M_lay) + 1))
      start ← start_1
    loes_n, 1 ← start
    ind_1 ← round(runif(lam, 1, cols(M_lay) + 1))
    b ← ind_1_1
    while b = 1 ∨ b = cols(M_lay) + 1 ∨ b = start
      ind_1 ← round(runif(lam, 1, cols(M_lay) + 1))
      b ← ind_1_1
    loes_n, lam+1 ← b
    loes_n, 3·lam ← M_lay_start, b
    loes_n, 4·lam ←  $\frac{\sum_{i=1}^n (loes_{i, 3\cdot lam})}{n}$ 
    break if n ≥ min ∧ |loes_n, 4·lam - durch| ≤ genau
  durch ← loes_n, 4·lam
  return loes

```

Eigenschaften der Berechnung

maxi := 350000 mini := 35000 genau := 0.001 lam := 1

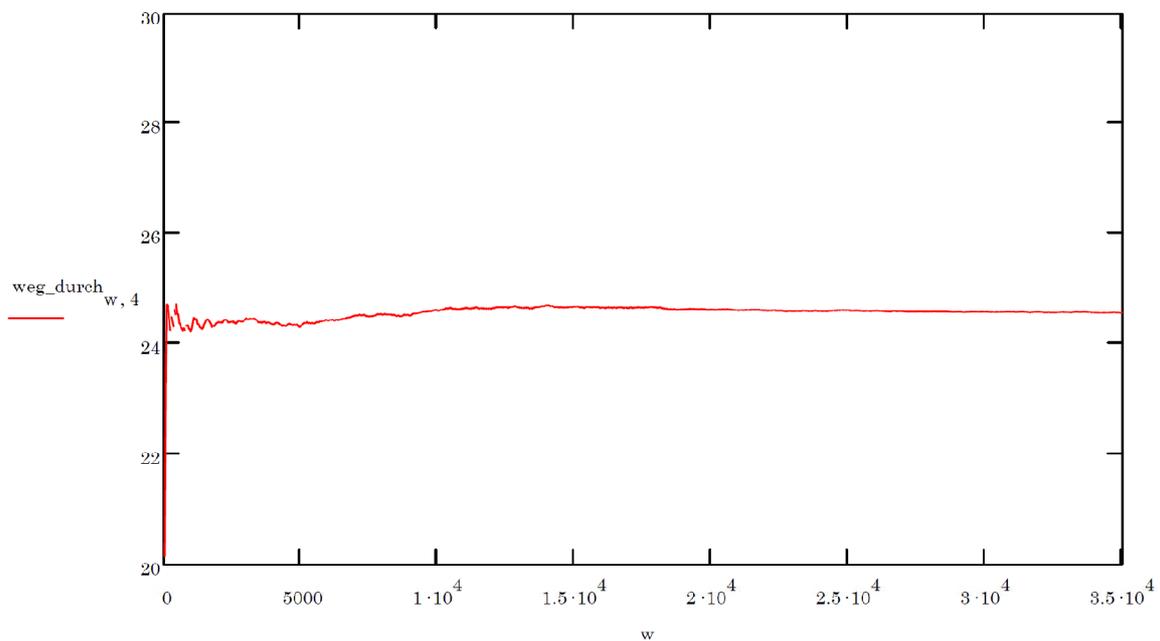
weg_durch := s_{quer}(1, lam, maxi, mini, genau)

weg_durch =

	1	2	3	4
1	7	2	36.056	36.056
2	2	4	20	28.028
3	4	3	10	22.019
4	6	7	10	19.014
5	5	7	20	19.211
6	2	4	20	19.343

loesung := weg_durch_{rows(weg_durch), cols(weg_durch)}

loesung = 24.567 m

Verlauf des durchschnittlichen Weges während der Berechnung

Berechnung der Fahrzeiten:

s/v + Positionierzeiten, Abfrage ob Fahrzeug andere Station anfahren musste.

```

zeit(weg, lam) :=
  for i ∈ 1..rows(weg)
  |
  | end ← cols(weg) - 1
  | zeiti,1 ←  $\frac{\text{weg}_{i,\text{end}} \cdot m}{v}$ 
  | k ← 0
  | c ← 2 · (lam - 1)
  | for a ∈ 2 · lam + 1 .. 4 · lam
  | | k ← k + 1 if wegi,a ≠ 0
  | | c ← c + 1 otherwise
  | zeiti,1 ← zeiti,1 + k · tpü + c · tü
  |  $\sum_{n=1}^i \text{zeit}_{n,1}$ 
  | zeiti,2 ←  $\frac{\quad}{i}$ 
  | zeiti,3 ← k · s
  | zeiti,4 ← c · s
  | zeit
  
```

fahrtzeit := zeit(weg_durch, lam)

	1	2
1	61.754	61.754
2	50.286	56.02
3	43.143	51.728
4	43.143	49.581
5	50.286	49.722
6	50.286	49.816

fahrtzeit = s

fahrtzeit_{rows(fahrtzeit),2} = 53.548 s

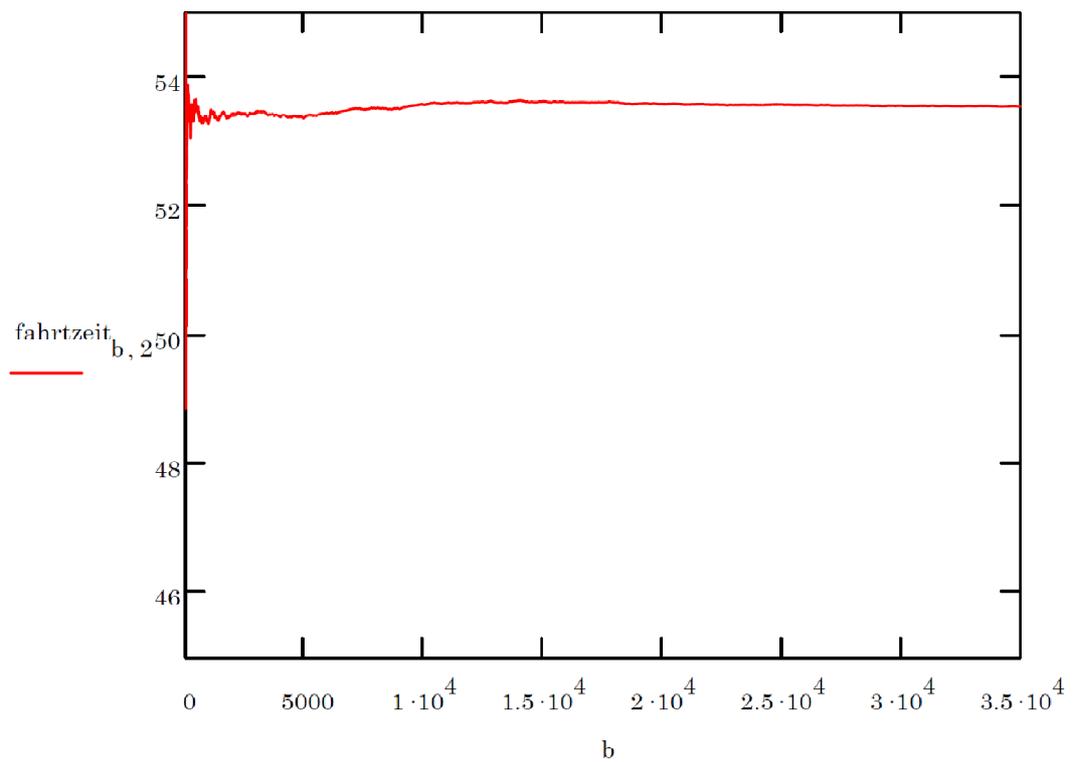
Durchsatz := $\frac{\text{lam}}{\text{fahrtzeit}_{\text{rows(fahrtzeit),2}}}$

Durchsatz = 67.23 $\frac{1}{\text{hr}}$

Darstellung des Verlaufes der Berechnung Fahrtzeit

```
b := 1..rows(fahrtzeit)
```

```
einz_zeit_b := fahrtzeit_b,1 ·  $\frac{1}{s}$ 
```



C-3 Berechnung des Allgemeinen Lagers (Mehrfachfahrstrategie)

Berechnung des Weges mit Monte-Carlo 1 Fahrzeug n Ladehilfsmittel, allgemeines Lager

Matrix mit Wegstrecken:

M_lay :=
allg_lager_v1.xls

Konstanten:

Positionier und Übergabezeit: $t_{p\ddot{u}} := 18s$

reine Übergabezeit: $t_{\ddot{u}} := 3s$

Fahrgeschwindigkeit: $v := 1.9 \cdot \frac{m}{s}$

Berechnung der durchschnittlichen Wegstrecke:

1 Fahrzeug, mehrere LAM, Abfahren der Punkte in Aufsteigender Reihenfolge:

```

s_quer(lam, max, min, genau) :=
  durch ← 0
  return "Lastaufnahmemittel muß größer gleich 1 sein!!!" if lam < 1
  for n ∈ 1 .. max
    start ← round(runif(1, 1, cols(M_lay) + 1))
    start ← start1                                     Allgemeinen Start
                                                         definieren
    while start = 1 ∨ start = cols(M_lay) + 1
      start ← round(runif(1, 1, cols(M_lay) + 1))
      start ← start1
    loesn,1 ← start
    ind_1 ← round(runif(lam, 1, cols(M_lay) + 1))
    b ← sort(ind_1)                                     Erstellen des
                                                         Zielvektors
    while b1 = 1 ∨ blast(b) = cols(M_lay) + 1        bei Aufnahme bekannt.
      ind_1 ← round(runif(lam, 1, cols(M_lay) + 1))
      b ← sort(ind_1)
    for p ∈ 1 .. lam
      if bp = start
        ers ← round(runif(1, 1, cols(M_lay) + 1))
        while ers1 = 1 ∨ ers1 = (cols(M_lay) + 1) ∨ ers1 = start
          ers ← round(runif(1, 1, cols(M_lay) + 1))
        bp ← ers1
        loesn,p+1 ← bp
    loesn,2..lam+2 ← M_layb1,start
    ind_2 ← round(runif(1, 1, cols(M_lay) + 1))
    c1 ← ind_21
    while c1 = 1 ∨ c1 = cols(M_lay) + 1 ∨ c1 = start
      ind_2 ← round(runif(1, 1, cols(M_lay) + 1))
      c1 ← ind_21
    for k ∈ 1 .. lam - 1                               if lam > 1
      loesn,2..lam+2+k ← M_laybk,bk+1
      ind_2 ← round(runif(1, 1, cols(M_lay) + 1))
      ck+1 ← ind_21
      while ck+1 = 1 ∨ ck+1 = cols(M_lay) + 1 ∨ ck+1 = bk+1
        ind_2 ← round(runif(1, 1, cols(M_lay) + 1))
        ck+1 ← ind_21
    for i ∈ 1 .. lam
      for k ∈ 1 .. i
        dk ← 0 if bi = ck
        dk ← ck otherwise
    c_rev ← reverse(sort(c))

```

Wenn ein Abgabepunkt gleich dem Startpunkt ist muss ein neuer gefunden werden

Eintragen der Abgabepunkte und der Wege dorthin in die Lösungsmatrix

Bei Mehrfachaufnahme müssen die restlichen Wege eingetragen und weitere Abgabepunkte definiert werden

Die Aufnahmepunkte werden bei jedem Abgabepunkt abgefragt um gleiche Aufnahmepunkte zu koordinieren.

Umschreiben des Aufnahmevektors um doppeltes Anfahren von Stationen zu vermeiden.

```

-
d ← reverse(sort(d))
for i ∈ 1 .. lam
    loesn, lam+1+i ← di
e ← start if d1 = 0
e ← d1 otherwise
loesn, 3·lam+2 ← Mlayblast(b), e
for j ∈ 1 .. lam - 1
    loesn, 3·lam+2+j ← Mlaydj, dj+1 if dj > 0 ∧ dj+1 > 0
    loesn, 3·lam+2+j ← 0 otherwise
f ← last(d)
while df = 0
    break if f ≤ 1
    f ← f - 1
df ← blast(b) if df = 0
locsn, 4·lam+2 < Mlaydf, start if locsn, lam+2 ≠ 0
loesn, 4·lam+3 ← ∑o = 2·lam+24lam+2 loesn, o
loesn, 4·lam+4 ←  $\frac{\sum_{i=1}^n (loes_{i, 4lam+3})}{n}$ 
break if n ≥ min ∧ |loesn, 4·lam+4 - durch| ≤ genau
durch ← loesn, 4·lam+4
return loes

```

Kontrolle ob gleiche Ziele am Weg liegen und Verarbeitung der Kontrolle,

Falls der Aufnahmevektor gleich den bereits angefahrenen Zielen wäre, muss der nächste Weg zum Ausgangspunkt sein.

if lam > 1

In der Lösungsmatrix sollen nur Wege eingetragen werden welche wirklich gefahren werden müssen!

MC Algorithmus mit Abfrage der Genauigkeit

Eigenschaften der Berechnung

maxi := 35000 mini := 35000 genau := 0.001 lam := 3

weg_durch := s_{quer}(lam, maxi, mini, genau)

weg_durch =		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
	1	2	3	8	9	6	3	3	10	31.623	10
	2	6	2	2	5	6	4	3	30	0	30
	3	4	2	5	9	8	2	0	20	30	30

- 1 ... Start
- 2 ... lhm+1 ... Abgabepunkte
- lhm+1...2*lhm+1 ... Aufnahmepunkte
- 2*lhm+2...3*lhm+2 ... Fahrstrecken
- 4*lhm+2 ... Weg zurück zum Start
- 4*lhm+3 ... Gesamter Weg
- 4*lhm+4 ... Durchschnittlicher Weg von der n-ten Wiederholung

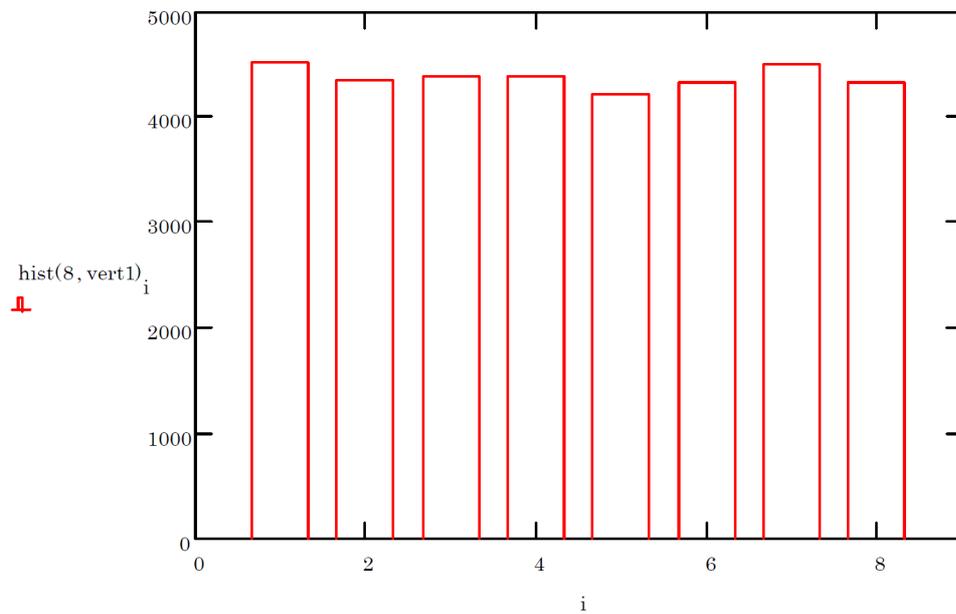
```
loesung := weg_durch_rows(weg_durch), cols(weg_durch)
```

```
loesung = 146.442
```

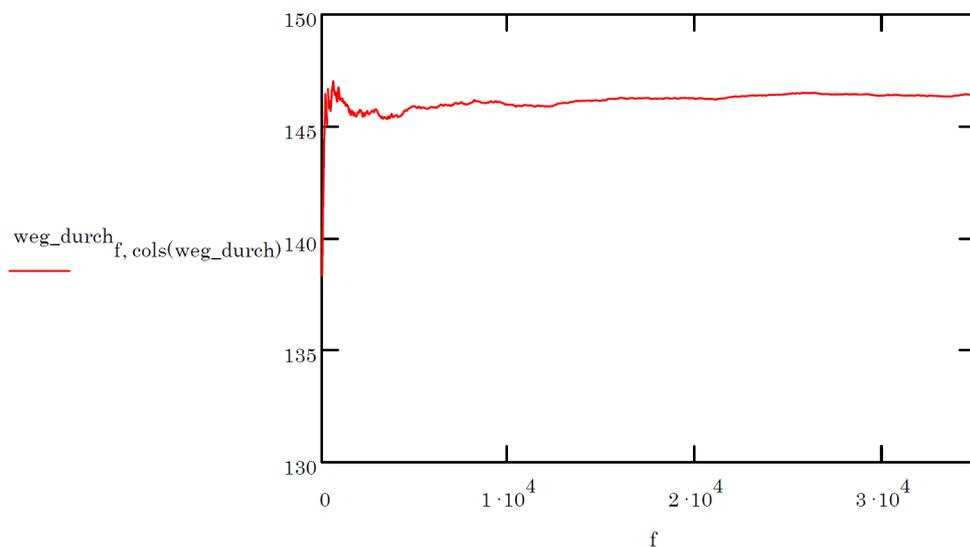
Darstellung der Auswahlverteilung für die Startposition

```
vec(mat, spalte) :=  $\left\{ \begin{array}{l} \text{for } i \in 1 \dots \text{rows}(\text{mat}) \\ \text{ziel}_i \leftarrow \text{mat}_{i, \text{spalte}} \\ \text{return } \text{ziel} \end{array} \right.$ 
```

```
vert1 := vec(weg_durch, 1)      i := 1 .. cols(M_lay) + 1      cols(M_lay) = 9
```



Darstellung der Konvergenz des durchschnittlichen Fahrweges



Berechnung der Fahrzeiten:

s/v + Positionierzeiten, Abfrage ob Fahrzeug andere Station anfahren musste.

```

zeit(weg, lam) :=
  for i ∈ 1.. rows(weg)
    end ← cols(weg) - 1
    zeiti,1 ←  $\frac{\text{weg}_{i,\text{end}} \cdot m}{v}$ 
    k ← 2
    c ← 2 · (lam - 1)
    for a ∈ 2 · lam + 1 .. 4 · lam
      k ← k + 1 if wegi,a ≠ 0
      c ← c + 1 otherwise
    zeiti,1 ← zeiti,1 + k · tpü + c · tü
    zeiti,2 ←  $\frac{\sum_{n=1}^i \text{zeit}_{n,1}}{i}$ 
    zeiti,3 ← k · s
    zeiti,4 ← c · s
  zeit

```

fahrtzeit := zeit(weg_durch, lam)

	1	2
1	220.866	220.866
2	235.792	228.329
3	217.871	224.843
4	186.026	215.139
5	210.532	214.217
6	215.961	214.508
7	228.453	216.5

fahrtzeit = s

fahrtzeit_{rows(fahrtzeit),2} = 220.816 s

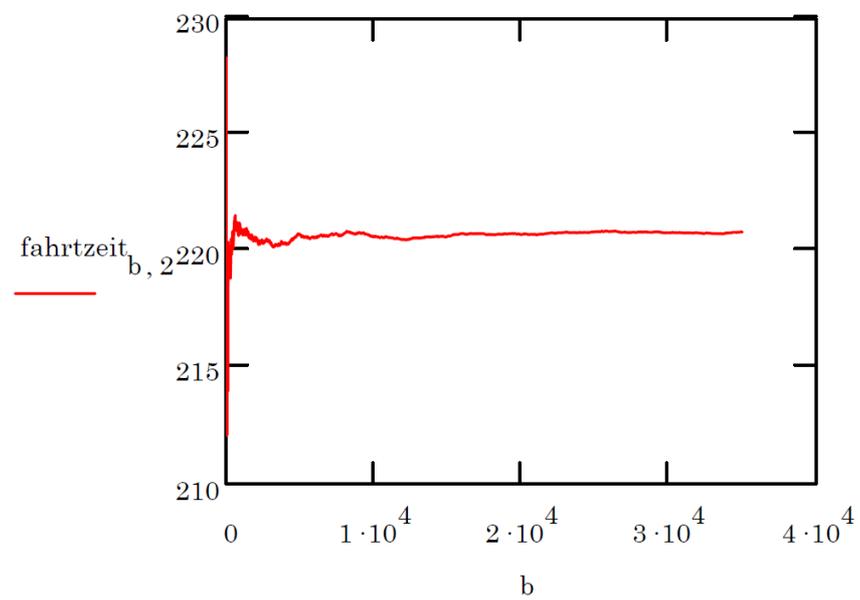
Durchsatz := $\frac{\text{lam}}{\text{fahrtzeit}_{\text{rows}(\text{fahrtzeit}),2}}$

Durchsatz = 48.909 $\frac{1}{\text{hr}}$

Darstellung der Konvergenz der Fahrtzeit

```
b := 1 .. rows(fahrtzeit)
```

```
einz_zeitb := fahrtzeitb,1 ·  $\frac{1}{s}$ 
```



C-4 Berechnung des Allgemeinen Lagers (spezielle Verteilung)

*Monte Carlo Berechnung mit zugeteilter Anfahrfähigkeit.
Angewendet auf ein 2x4 Lager.*

Szenario: Fahrzeug bekommt Artikel bei einer der ersten 3 Stationen und liefert die Artikel häufiger an Stationen 4 und 5. Der Zyklus endet nach wieder Aufnahme von Artikel und Abgabe an Station 4.

Wege :=
allg_lager_v1.xls

<p>weg algo(lam, maxi, mini, ende, genau) :=</p> <p>gleichverteilte Startpositionen (1-3)</p> <p>gleichverteilte Zielpositionen mit doppelter Anfahrfähigkeit von (4-5)</p> <p>Vorgehensweise: Berechnen wieviele zufällige Zahlen vom Algorithmus berechnet werden müssen, um den bestimmten Zielen genügend Zahlen zu zuteilen.</p>	<pre> durch ← 0 return "LAM muss eine ganze Zahl größer 1 sein" if lam < 1 for n ∈ 1..maxi start ← round(runif(1, 1, 5)) while start₁ = 1 ∨ start₁ = 5 start ← round(runif(1, 1, 5)) loes_{n,1} ← start₁ ziel ← round(runif(lam, 5, 12)) ziel ← sort(ziel) while ziel₁ = 5 ∨ ziel_{last(ziel)} = 12 ziel ← round(runif(lam, 5, 12)) ziel ← sort(ziel) for m ∈ 1..lam ziel_m ← 6 if ziel_m = 10 ziel_m ← 7 if ziel_m = 11 loes_{n,m+1} ← ziel_m loes_{n,2:lam+2} ← Wege_{start₁,ziel₁} drop ← round(runif(1, 5, 12)) while drop₁ = 5 ∨ drop₁ = 12 drop ← round(runif(1, 5, 12)) drop₁ ← 7 if drop₁ = 11 drop₁ ← 6 if drop₁ = 10 for k ∈ 1..lam - 1 if lam > 1 loes_{n,2:lam+2+k} ← Wege_{ziel_k,ziel_{k+1}} ab ← round(runif(1, 5, 12)) while ab₁ = 5 ∨ ab₁ = 12 ab ← round(runif(1, 5, 12)) ab₁ ← 7 if ab₁ = 11 ab₁ ← 6 if ab₁ = 10 drop_{k+1} ← ab₁ </pre>
---	--

```

for i ∈ 1.. lam
  for k ∈ 1.. i
    auf_k ← 0 if ziel_i = drop_k
    auf_k ← drop_k otherwise
auf ← reverse(sort(auf))
for i ∈ 1.. lam
  loes_n, lam+1+i ← auf_i
c ← auf_1 if auf_1 > 0
e ← ende otherwise
loes_n, 3·lam+2 ← Wege_ziel_last(ziel)^e

for j ∈ 1.. lam-1
  loes_n, 3·lam+2+j ← Wege_auf_j, auf_{j+1} if auf_j > 1 ∧ auf_{j+1} > 1
  loes_n, 3·lam+2+j ← 0 otherwise
f ← last(auf)
while auf_f = 0
  break if f ≤ 1
  f ← f - 1
auf_f ← ziel_last(ziel) if auf_f = 0
loes_n, 4·lam+2 ← Wege_auf_f, ende if loes_n, lam+2 ≠ 0

loes_n, 4·lam+3 ← ∑_{m=2·lam-2}^{4·lam+2} loes_n, m
loes_n, 4·lam+4 ← ∑_{m=1}^n loes_m, 4·lam+3 / n
break if n ≥ mini ∧ |loes_n, 4·lam+4 - durch| ≤ genau
durch ← loes_n 500, 4·lam+4 if n > 500
durch ← 0 otherwise
loes

```

maxi := 35000 mini := 35000 ende := 5 genau := 0.001 lam := 1

erg := weg_algo(lam, maxi, mini, ende, genau)

	1	2	3	4	5	6	7	8
1	4	9	7	31.6	20	36.1	87.7	87.7
2	2	7	0	31.6	36.1	0	87.7	77.7
3	3	7	6	30	10	42.4	82.4	79.3
4	2	6	7	30	10	36.1	76.1	78.5
5	4	9	8	31.6	10	31.6	73.2	77.4
6	2	8	7	36.1	10	36.1	82.1	78.2
7	3	9	6	36.1	30	42.4	108.5	82.5
8	4	8	9	30	10	30	70	81
9	3	6	7	31.6	10	36.1	77.7	80.6

weg := erg_{rows(erg), cols(erg)} · m

weg = 80.913 m

Kontrolle der angefahrenen Stationen:

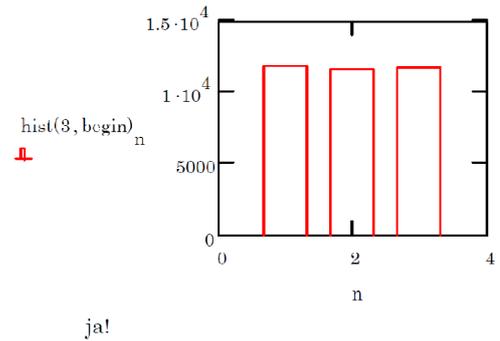
Startpositionen sind gleichverteilt?

i := 1 .. rows(erg)

begin_i := erg_{i, 1}

	1
1	4
2	2
3	3
4	2
5	4
6	2
7	3
8	4
9	3

$$\text{hist}(3, \text{begin}) = \begin{pmatrix} 1.176 \times 10^4 \\ 1.155 \times 10^4 \\ 1.169 \times 10^4 \end{pmatrix}$$

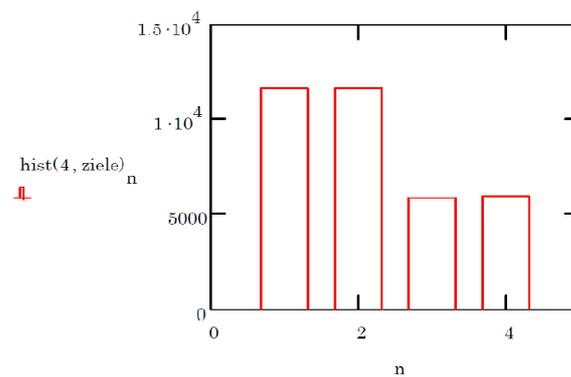


Zielpositionen sollen mit bestimmter Verteilung angefahren werden:

Verteilung der ersten Zielfahrt:

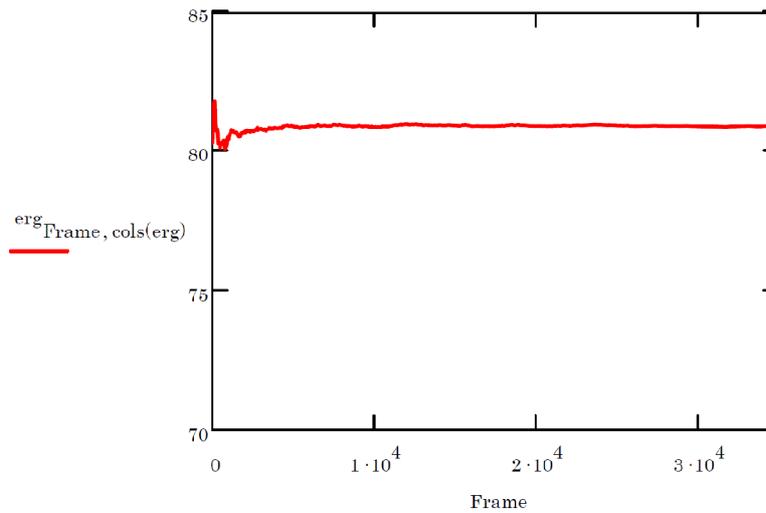
ziele_i := erg_{i, 2}

	1
1	9
2	7
3	7
4	6
5	9
6	8
7	9
8	8
9	6
10	7
11	9
12	6
13	6
14	7
15	6
16	6



check

Darstellung des Verlaufes des durchschnittlichen Weges über die Iterationen:



Algorithmus zur Berechnung von der Fahrzeit und dem Durchsatz:

$$v := 1.9 \frac{\text{m}}{\text{s}} \quad t_{\text{pü}} := 18\text{s} \quad t_{\text{ü}} := 3\text{s}$$

```

zeit_algo(weg, lam) :=
  for i ∈ 1..rows(weg)
    end ← cols(weg) - 1
    zeiti,1 ←  $\frac{\text{weg}_{i,\text{end}} \cdot \text{m}}{v}$ 
    k ← 2
    c ← 2 · (lam - 1)
    for a ∈ 2 · lam + 1 .. 4 · lam
      k ← k + 1 if wegi,a ≠ 0
      c ← c + 1 otherwise
    zeiti,1 ← zeiti,1 + k · tpü + c · tü
    zeiti,2 ←  $\frac{\sum_{n=1}^i \text{zeit}_{n,1}}{i}$ 
    zeiti,3 ← k · s
    zeiti,4 ← c · s
  zeit

```

fahrzeit := zeit_algo(erg, 1)

fahrzeit_{rows(fahrzeit), 2} = 110.407 s

Durchsatz := $\frac{\text{lam}}{\text{fahrzeit}_{\text{rows(fahrzeit), 2}}}$

Durchsatz = 32.607 $\frac{1}{\text{hr}}$

D MATLAB Programmcode

D-1 Prototyp zur Kollisionszählung

1 of 13

26.08.11 00:13 C:\Uni\Diplomarbeit\digitaler Anhang\5-Kapitel\PrototypzurKollisionszählung.m

```
% Für Aufzeichnung der Animation entsprechende Teile entkommentieren, siehe  
% Kennzeichnung
```

```
clear all  
clc  
  
ab = 0; % Abstand zwischen den Stationen  
ent = 0; % Entfernung der einzelnen Reihen  
r=1; % zur Positionierung der Zwischenstationen  
  
%Stationen  
eins = [0,0];  
zwei = [10+ab,0];  
drei = [20+2*ab,0];  
vier = [30+3*ab,0];  
fuenf = [0,30+ent];  
sechs = [10+ab,30+ent];  
sieben = [20+2*ab,30+ent];  
acht = [30+3*ab,30+ent];  
  
ZW1 = [15*r,10];  
ZW2 = [15*r,20+ent];  
  
%Konstante  
  
v_ges = 1.9; % [m/s]  
fzg = 15; % Eingabe der im System befindlichen Fahrzeuge  
schleifen = 10; % Eingabe der von jedem Fahrzeuge zu fahrenden Schleifen  
rad = 0.5; % Aktionsradius des Fahrzeuges [m]  
t_pue = 15; % Positionierungs und Übergabezeit [s]  
anz = 1; % Anzahl der Schleifen zur Berechnung  
  
% Berechnung der Fahrwege
```

26.08.11 00:13 C:\Uni\Diplomarbeit\digitaler Anhang\5-Kapitel\PrototypzurKollisionszählung.m 2 of 13

```

ges = 1;
kollision = zeros(anz,22);
%
% Matrix zum Abfragen der Anzahl der Kollisionen und Einträgen
% wenn mehrere Messreihen gerechnet würden (hier 22)

tic
for ges = 1:anz
% Rechenzeitstart
% für Durchschnittswert der Kollisions bei # Fahrzeugen (MC)

% Schleife für Anzahl Fahrzeuge

fzg_container=[];
for n = 1:fzg
%Startgenerierung

startnr = round(random('unif',0,9,1,1)); % Zufallsgenerator zum Generieren einer Startposition
while startnr == 0 || startnr == 9 % Zahl darf nicht 0 oder 9 sein, --> Gleichverteilt und
startnr = round(random('unif',0,9,1,1)); % nicht an den Rändern halb so groß!!!
end

%Zuweisung der Zahl zu einer Station

if startnr(1)==1
start(1,:) = eins;
elseif startnr(1)==2
start(1,:) = zwei;
elseif startnr(1)==3
start(1,:) = drei;
elseif startnr(1)==4
start(1,:) = vier;
elseif startnr(1)==5
start(1,:) = fuenf;
elseif startnr(1)==6
start(1,:) = sechs;
elseif startnr(1)==7
start(1,:) = sieben;
elseif startnr(1)==8

```

26.08.11 00:13 C:\Uni\Diplomarbeit\digitaler Anhang\5-Kapitel\PrototypzurKollisionszählung.m 3 of 13

```
start(1,:) = acht;
end
start;
k=0;
for m = 1:schleifen
    % Fahrwege
    zeit = [];
    zielnr = round(random('unif',0,9,1,1));
    while zielnr == 0 || zielnr == 9
        zielnr = round(random('unif',0,9,1,1));
    end
    %Zuweisung der Zahl zu einer Station
    if zielnr(1)==1
        ziel(1,:) = eins;
    elseif zielnr(1)==2
        ziel(1,:) = zwei;
    elseif zielnr(1)==3
        ziel(1,:) = drei;
    elseif zielnr(1)==4
        ziel(1,:) = vier;
    elseif zielnr(1)==5
        ziel(1,:) = fuenf;
    elseif zielnr(1)==6
        ziel(1,:) = sechs;
    elseif zielnr(1)==7
        ziel(1,:) = sieben;
    elseif zielnr(1)==8
        ziel(1,:) = acht;
    end
    % Containerspeicherstelle, Zeile (ganze Zahl notwendig)!!
    % Reset Fahrzeit in einer Schleife
    % Ziel Station für 1. Fahrzeug, sowie Startgenerierung
```

26.08.11 00:13 C:\Uni\Diplomarbeit\digitaler_Anhang\5-Kapitel\PrototypzurKollisionszählung.m 4 of 13

```

start_con(m,:)=start;
% Speichern der Startwerte
% um Zufallsgenerator zu kontrollieren

while ziel(1,:)== start(1,:)
    zielnr = round(random('unif',0,9,1,1)); % Ziel Station für 1. Fahrzeug
    while zielnr == 0 || zielnr == 9
        zielnr = round(random('unif',0,9,1,1));
    end
    %Zuweisung der Zahl zu einer Station
    if zielnr(1)==1
        ziel(1,:) = eins;
    elseif zielnr(1)==2
        ziel(1,:) = zwei;
    elseif zielnr(1)==3
        ziel(1,:) = drei;
    elseif zielnr(1)==4
        ziel(1,:) = vier;
    elseif zielnr(1)==5
        ziel(1,:) = funf;
    elseif zielnr(1)==6
        ziel(1,:) = sechs;
    elseif zielnr(1)==7
        ziel(1,:) = sieben;
    elseif zielnr(1)==8
        ziel(1,:) = acht;
    end
end
ziel_con(m,:)=ziel;
% Zielcontainer speichert angefahrenen Ziele zur Kontrolle

if abs(ziel(1,2)- start(1,2)) == 0
    % Wenn Start und Ziel in der gleichen Reihe sind, 2 Möglichkeiten
    if start(1,2) == 0
        % wenn Start in der unteren Reihe ist und
        if abs(start(1,1) - ziel(1,1))<=10
            % keine Station zwischen Start und Ziel ist
            weg(1,:) = ziel(1,:) - start(1,:); % Berechnung Wegvektor
        end
    end
end

```

```

ri = weg/norm(weg);           % Berechnung Richtungsvektor und
win = atan2(weg(2),weg(1));   % Winkel

% Geschwindigkeit in x und y Richtung

v(1) = v_ges*cos(win);       % Darstellung Geschwindigkeit in x-Richtung
v(2) = v_ges*sin(win);       % und y-Richtung

zeit(1)=norm(weg)/v_ges;      % benötigte Zeit für den Weg

for ii = 0.1:0.1:(norm(weg)/v_ges)+0.1 % solange die Zeit nicht um ist
    k=k+1;
    fzg_container(k,2*n-1) = start(1,1) + ii*v(1); % x-Koordinate des Fahrzeuges zum Zeitpunkt ii und
    fzg_container(k,2*n) = start(1,2) + ii*v(2); % y-Koordinate
end

else
    weg(1,:) = ZW1 - start(1,:); % wenn eine Station zwischen Start und Ziel ist
    win = atan2(weg(2),weg(1)); % und beides in der unteren Reihe stattfindet, wird die
    v(1) = v_ges*cos(win); % Zwischenstation angefahren.
    v(2) = v_ges*sin(win); % sonst gleiche Bezeichnungen wie oben.

zeit(1)=norm(weg)/v_ges;

for ii = 0.1:0.1:(norm(weg)/v_ges)+0.1 % zur Zwischenstation
    k=k+1;
    fzg_container(k,2*n-1) = start(1,1) + ii*v(1);
    fzg_container(k,2*n) = start(1,2) + ii*v(2);
end

weg(1,:) = ziel(1,:)-ZW1; % von Zwischenstation zu Ziel
win = atan2(weg(2),weg(1));
v(1) = v_ges*cos(win);

```

26.08.11 00:13

C:\Uni\Diplomarbeit\digitaler Anhang\5-Kapitel\PrototypzurKollisionszählung.m

6 of 13

```

v(2) = v_ges*sin(win);
zeit(2)=norm(weg)/v_ges;
for ii = 0.1:0.1:(norm(weg)/v_ges)+0.1
    k=k+1;
    fzg_container(k,2*n-1) = ZW1(1,1) + ii*v(1);
    fzg_container(k,2*n) = ZW1(1,2) + ii*v(2);
end
end
elseif start(1,2) == 30 % gleiches Prozedere wie oben nur für die obere Reihe
if abs(start(1,1) - ziel(1,1))<=10 % Abstand zu der nächsten Station; Abfrage ob keine
    weg(1,:) = ziel(1,:) - start(1,:); % Station dazwischenliegt
    ri = weg/norm(weg);
    win = atan2(weg(2),weg(1));
v(1) = v_ges*cos(win);
v(2) = v_ges*sin(win);
zeit(1)=norm(weg)/v_ges;
for ii = 0.1:0.1:(norm(weg)/v_ges)+0.1
    k=k+1;
    fzg_container(k,2*n-1) = start(1,1) + ii*v(1);
    fzg_container(k,2*n) = start(1,2) + ii*v(2);
end
else % Weg über Zwischenstation 2
    weg(1,:)= ZW2 - start(1,:);
    win = atan2(weg(2),weg(1));
    v(1) = v_ges*cos(win);
    v(2) = v_ges*sin(win);

```

26.08.11 00:13

C:\Uni\Diplomarbeit\digitaler Anhang\5-Kapitel\PrototypzurKollisionszählung.m

7 of 13

```

zeit(1)=norm(weg)/v_ges;

for ii = 0.1:0.1:(norm(weg)/v_ges)+0.1
    k=k+1;
    fzg_container(k,2*n-1) = start(1,1) + ii*v(1);
    fzg_container(k,2*n) = start(1,2) + ii*v(2);
end

weg(1,:) = ziel(1,:)-ZM2;           % von Zwischenstation 2 zu Ziel
win = atan2(weg(2),weg(1));
v(1) = v_ges*cos(win);
v(2) = v_ges*sin(win);

zeit(2)=norm(weg)/v_ges;

for ii = 0.1:0.1:(norm(weg)/v_ges)+0.1
    k=k+1;
    fzg_container(k,2*n-1) = ZM2(1,1) + ii*v(1);
    fzg_container(k,2*n) = ZM2(1,2) + ii*v(2);
end
end
end

else
    % direkter Fahrweg zwischen den Stationen verschiedener Reihen
    weg(1,:) = ziel(1,:) - start(1,:);
    ri = weg/norm(weg);
    win = atan2(weg(2),weg(1));

    % Geschwindigkeit in x und y Richtung
    v(1) = v_ges*cos(win);
    v(2) = v_ges*sin(win);

    zeit(1)=norm(weg)/v_ges;

```

26.08.11 00:13 C:\Uni\Diplomarbeit\digitaler Anhang\5-Kapitel\PrototypzurKollisionszählung.m 8 of 13

```

for ii = 0.1:0.1:(norm(weg)/v_ges)+0.1
    k=k+1;
    fzg_container(k,2*n-1) = start(1,1) + ii*v(1);
    fzg_container(k,2*n) = start(1,2) + ii*v(2);
end

end
for ii = 0.1:0.1:t_pue
    k = k+1;
    fzg_container(k,2*n-1) = ziel(1,1);
    fzg_container(k,2*n) = ziel(1,2);
end

start = ziel;
if n == 1
    fahrzeit(ges,m) = sum(zeit(1,:));
end

end
end

% Ende Schleifen-schleife (m = 1 : schleifen)
% Ende Fahrzeugschleife (n = 1 : fzg)

%% Berechnung der Kollisionen

%%Berechnung von Schnittpunkten (symbolisch)
%
% %%Kreisgleichungen symbolisch für jeden Schritt mit allen anderen Fzg
% %%untereinander durchzuführen. s...Laufvariable von 0 bis Ende des
% %%fzg_container
%
% syms x y
%
% kreis1 = '(x-fzg_container(s,1))^2+(y-fzg_container(s,2))^2';
% kreis2 = '(x-fzg_container(s,4))^2+(y-fzg_container(s,3))^2';
%
% [x,y] = solve(kreis1,kreis2);
%
% %% eval(y) .... zur numerischen Darstellung der Lösung
%
% %% 4 Möglichkeiten: x = x ---> Kreise ident

```

26.08.11 00:13 C:\Uni\Diplomarbeit\digitaler Anhang\5-Kapitel\PrototypzurKollisionszählung.m 9 of 13

```

%%
%% Y = komplex --> keine Beruehrung
%% x = x1; y = y1 ---> 2 Schnittpunkte Kreise schneiden einander
%% x = x1; y = y1 ---> Ein Beruehrpunkt!!
%%
%% FAZIT: symbolische Rechenweise dauert unverhältnismäßig lange,
%% stattdessen, Kontrolle ob die Berührbedingung der Kreise überhaupt
%% zutrifft.
[l,b] = size(fzg_container); % Abfrage Größe des fzg_containers
u=0; % Reset Kollisionsspalte
coll = []; % Reset Kollisionsabfragevektor (ob Kollision 1 oder 0)
for m = 1:2:b-2 % Start Schleife zum abfragen ob zu einem Zeitpunkt
% eine Kollision auftritt
    for o = m:2:b-2 % z.B. bei 3 Fzg, zwischen 1-2,1-3 und 2-3
        u=u+1;
        for n = 1:l % für Alle Zeitschritte
            dis = norm([fzg_container(n,m) - fzg_container(n,o+2),fzg_container(n,m+1)-fzg_container(n,o+3)]);
            % Berechnen der Distanz zwischen zwei Fahrzeugen
            if dis <= 2*rad % Distanz kleiner doppeltem Radius.... Kollision
                coll(n,u) = 1;
            else
                coll(n,u) = 0;
            end
        end
    end
end % Ende der Abfrage zwischen allen nachfolgenden Fahrzeugen
end % Ende aller Zeitschritte

count_coll = 0; % reset Auswertung Kollisionsabfrage
if u == 0
    bre = 0; % Größen bestimmung
else
    [lan, bre] = size(coll);
end

```

26.08.11 00:13 C:\Uni\Diplomarbeit\digitaler Anhang\5-Kapitel\PrototypzurKollisionszählung.m 10 of 13

```

for t = 1:bre
for k = 2:lan
    if coll(k,t) == 1 && coll(k-1,t) == 0 % Erfassung nur von Änderungen
        count_coll = count_coll + 1;
    end
end
%disp('Spalte der Kollisionszählung'); disp(t);

if coll(1,t) == 1
    %disp('Fahrzeuge haben gleichen Startpunkt');
    count_coll = count_coll + 1;
end
if coll(lan,t) == 1
    count_coll = count_coll - 1;
end
%disp('Anzahl der Kollisionen' ); disp(count_coll);
kollision(ges,2*r-1) = kollision(ges,2*r-1) + count_coll; % Speichern der Anzahl; r nicht von Bedeutung, s.u.
count_coll = 0; % Nullsetzen, damit nächste Spalte von 0 beginnt
end

Summe = sum(kollision(1:ges,2*r-1),1); % Summieren der Anzahl um

kollision(ges,2*r) = Summe/ges;
% Ende Durchschnittberechnungsschleife
toc

%AUSWERTUNGEN

for h = 1:anz
    fahrsh(h,1) = sum(fahrzeit(h,:))/20;
    mit(h,1) = sum(fahrsh(1:h,1))/h;
end

```

26.08.11 00:13 C:\Uni\Diplomarbeit\digitaler Anhang\5-Kapitel\PrototypzurKollisionszählung.m 11 of 13

```

durch = sum(fahrsch(:,1))/5000;
disp('Durchschnittliche Fahrzeit beträgt:');
disp(durch);
figure(2)
plot(1:h,mit);

% Darstellung des Verlaufes der
% durchschnittlichen Fahrzeit

[ende1,ende2] = size(kollision);
kollision(1,1);
disp('Gesamtanzahl der Kollisionen = '); disp(kollision(ende1,2*r));
r=r+1;

%% DARSTELLUNG

figure (1)

set(gcf,'Color','w')
axis off
hold on

%Rahmen

SW = [eins(1)-2;reins(2)-2];
SO = [vier(1)+2;vier(2)-2];
NW = [fuenf(1)-2;fuenf(2)+2];
NO = [acht(1)+2;acht(2)+2];

h = figure(1);
s = [40,40];

aviobj = avifile('FTS15.avi','fps',15,'quality',100,'compression','Cinepak'); %!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!

tic
for ii = 1:2:length(fzg_container)
figure(1)
hold on

```

26.08.11 00:13 C:\Uni\Diplomarbeit\digitaler Anhang\5-Kapitel\PrototypzurKollisionszählung.m 12 of 13

```

axis off
%Rahmen
line(SO,SW,'Color','k','LineWidth',3)
line(SW,NW,'Color','k','LineWidth',3)
line(NW,NO,'Color','k','LineWidth',3)
line(NO,SO,'Color','k','LineWidth',3)

%Stationen
plot(eins(1),eins(2),'x','Color','r','LineWidth',2);
plot(zwei(1),zwei(2),'x','Color','r','LineWidth',2);
plot(drei(1),drei(2),'x','Color','r','LineWidth',2);
plot(vier(1),vier(2),'x','Color','r','LineWidth',2);
plot(fuenf(1),fuenf(2),'x','Color','r','LineWidth',2);
plot(sechs(1),sechs(2),'x','Color','r','LineWidth',2);
plot(sieben(1),sieben(2),'x','Color','r','LineWidth',2);
plot(acht(1),acht(2),'x','Color','r','LineWidth',2);
plot(ZW1(1),ZW1(2),'v','Color','g','LineWidth',2);
plot(ZW2(1),ZW2(2),'^','Color','g','LineWidth',2);
axis equal
for n = 1:fszg
    circle= rsmak('circle',rad,[fszg_container(ii,2*n-1),fszg_container(ii,2*n)]);
    fnplt(circle);
    plot(fszg_container(ii,2*n-1),fszg_container(ii,2*n),'b','Linewidth',2);
end
axis square
Mov(ii)=getframe(gcf);
clf
aviobj = addframe(aviobj,Mov(ii)); %!!!!!!!!!!!!!!

end
toc
close all
aviobj = close(aviobj); %!!!!!!!!!!!!!!

```