

GridSorter – Dezentral gesteuertes Materialflusssystem zum Transport unterschiedlich großer Ladungsträger

GridSorter – Decentralized controlled material handling system for the transport of goods of different sizes

Dominik Colling, Zázilia Seibold und Kai Furmans

*Institut für Fördertechnik und Logistiksysteme (IFL)
Karlsruher Institut für Technologie (KIT)*

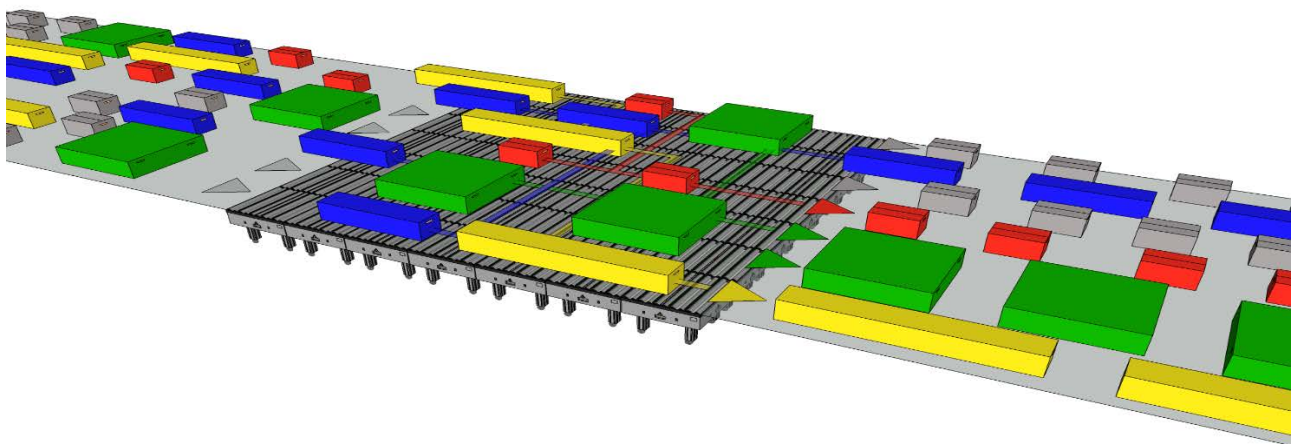


Abbildung 1. Schematische Darstellung des GridSorters bei der Sortierung der Transportgüter nach ihrer Farbe

Der GridSorter ist ein neuartiges Fördersystem zur effizienten und platzsparenden Sortierung von Gütern. Durch seine dezentrale Steuerung und den modularen Aufbau aus baugleichen rechteckigen Fördermodulen lässt er sich leicht an sich verändernde Anforderungen anpassen. In diesem Artikel wird ein neuer Reservierungsalgorithmus vorgestellt, welcher den Transport von Ladungsträgern erlaubt, die größer sind als ein Fördermodul. Dadurch wird nicht nur die Menge an möglichen Transportgütern erweitert, sondern es kann, wie in einer Simulation gezeigt wird, auch eine Effizienzsteigerung durch eine Verringerung der Modulgröße erreicht werden.

[Schlüsselwörter: Fördertechnik, Sorter, dezentral gesteuert, modular, Durchsatzanalyse]

The GridSorter is a novel conveyor system for efficient and space-saving sorting of goods. Due to its decentralized controllers and its structure composed of identical rectangular conveyor modules, it can easily adapt to changing requirements. In this article, we present a new reservation algorithm. It enables the GridSorter to transport goods which are larger than one conveyor module. As a simulation shows, it is possible to

transport a wider range of goods as well as to increase GridSorter's efficiency by reducing the size of the conveyor modules.

[Keywords: conveying system, sorting goods, decentralized control, modular, network analysis]

1 EINLEITUNG

Durch kürzere Produktlebenszyklen und eine steigende Variantenvielfalt sind Betriebe einem wachsenden Zeit- und Kostendruck ausgesetzt. Um sich an die schnell ändernden Rahmenbedingungen anzupassen, benötigen Firmen flexible Materialflusssysteme, die man leicht und günstig (re-)konfigurieren kann. Konventionelle Fördertechnik ist dafür nicht geeignet. Die komplexen zentralen Steuerungsprogramme sind auf ihre jeweilige Situation angepasst und lassen sich nur mit hohem Aufwand wiederverwenden [BtHV14]. Eine Lösung stellt die Modularisierung der Fördertechnik dar. Um eigenständig agieren zu können, müssen die einzelnen Fördertechnikmodule mechanisch, energetisch und steuerungstechnisch gekapselt sein [Wil08].

Mit diesen Anforderungen im Blick, wurde am KIT zunächst der FlexFörderer [May09] und in einem weiteren Schritt der GridSorter [SF14, SSF13] entwickelt. Der GridSorter besteht aus baugleichen dezentral gesteuerten Modulen, die nach dem Lego-Prinzip zusammengesteckt, gemeinsam ein hochdichtes und hochperformantes Sortiersystem bilden.

Bisher ist es damit möglich, Ladungsträger zu transportieren, die maximal so groß sind wie ein Modul. Ziel dieses Beitrags ist es, einen neuen Reservierungsalgorithmus vorzustellen, der es erlaubt, auch Ladungsträger zu transportieren, die größer sind als ein Modul, und diesen auf seine Leistungsfähigkeit zu untersuchen. Durch den neuen Algorithmus ist es nicht nur möglich, größere Ladungsträger zu transportieren, sondern auch die Größe der Fördermodule zu verringern, da diese nicht mehr durch den größten zu transportierenden Ladungsträger nach unten beschränkt ist.

Ein Anwendungsfall wäre beispielsweise in einem Paketumschlagzentrum zu finden. Dort müssen Pakete mit unterschiedlichsten Längen und Breiten sortiert werden. Würde man die Größe der GridSorter-Module auf die jeweiligen maximalen Längen und Breiten auslegen, würde man ohne den neuen Reservierungsalgorithmus beim Transport von Standardpaketen Platz verschwenden und die Sortierleistung des Sorters verringern. Würde man die Modulgröße auf die Größe der Standardpakete anpassen, könnte man keine größeren Pakete transportieren. Mit dem neuen Algorithmus wäre die Anpassung der Modulgröße möglich.

Der Artikel gliedert sich folgendermaßen: In Kapitel 2 werden verwandte Arbeiten aus dem Bereich der dezentral gesteuerten Intralogistik vorgestellt. In Kapitel 3 wird die Funktionalität des GridSorters näher beschrieben. In Kapitel 4 wird der neue Algorithmus präsentiert und in Kapitel 5 auf seine Leistungsfähigkeit getestet. In Kapitel 6 folgen eine Zusammenfassung und ein Ausblick.

2 VERWANDTE ARBEITEN

In Abbildung 2 wird der FlexFörderer dargestellt. Der FlexFörderer ist ein dezentral gesteuertes Materialflusssystem, bei dem die Fördermodule nach dem Lego-Prinzip zusammengesteckt werden können. Die Module können ohne eine zentrale Steuerungseinheit die Topologie erkennen, Strecken reservieren und den anschließenden Transport durchführen. Ursprünglich wurden dafür baugleiche Module mit quadratischer Grundfläche verwendet, die in alle 4 Richtungen fördern können. Mittlerweile kann konventionelle Fördertechnik eingesetzt werden, bei der jedes Fördermodul um eine Steuereinheit, die sogenannte FlexBox, erweitert wird [fle15].

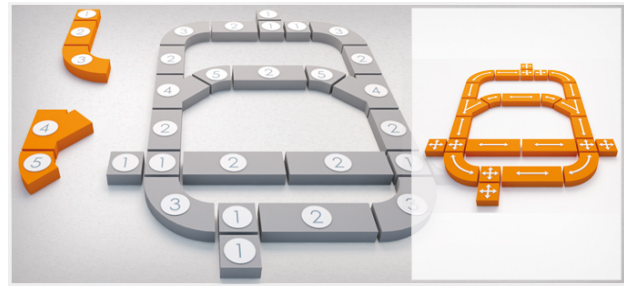


Abbildung 2. Der FlexFörderer [fle15]

GridStore, GridSequence und GridPick [GFSU14, GUF12] sind drei Systeme, die auf der Hardware des FlexFörderers aufbauen. Innerhalb der Systeme werden die Waren wie in einem Verschiebepuzzle bewegt. Bei GridStore handelt es sich um ein hochdichtes Lagersystem, bei GridSequence um ein Sortiersystem zur Sequenzbildung. GridPick ist ein mehrfachtiefes Lagersystem in der Kommissionierung, das jeweils dem Kommissionierer das nächste Gut am Gang zur Verfügung stellt. So werden sowohl Platzbedarf in der Kommissionierung als auch Laufwege des Kommissionierers reduziert, wodurch der Systemdurchsatz erhöht wird.

Der CognitiveConveyor [KRSO13] ist ebenfalls ein dezentral gesteuertes Materialflusssystem, das aus multidirektionalen Fördereinheiten besteht (siehe Abbildung 3). Die Besonderheit in diesem System ist, dass für jede Bewegung des Ladungsträgers mehrere Fördereinheiten benötigt werden, die sich dafür gruppieren müssen, weil die Ladungsträger größer sind als die einzelnen Fördermodule. Das System ermöglicht nicht nur den Transport, sondern auch das Drehen von Gütern.

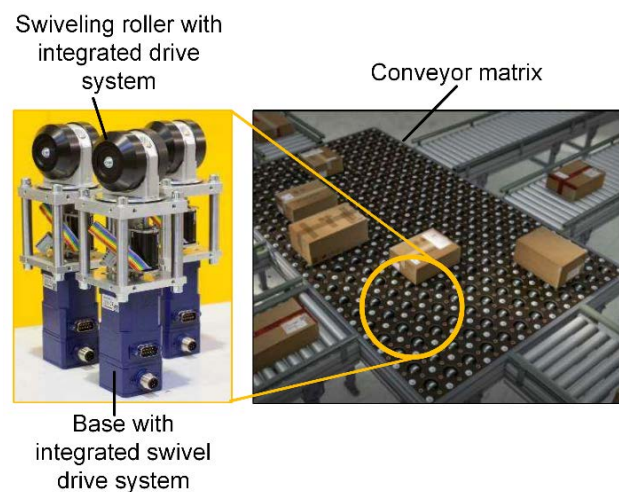


Abbildung 3. Der Cognitive Conveyor [KRSO13]

3 DER GRIDSORTER

3.1 HARDWARE

Ein GridSorter besteht aus mehreren baugleichen rechteckigen Fördermodulen. Dabei handelt es sich um Umsetzer, die in alle 4 Richtungen fördern können. Der GridSorter besitzt keine zentrale Steuerung, sondern jedes Modul besitzt eine eigene, die FlexBox. Benachbarte Module werden mechanisch, elektrisch und elektronisch verbunden. Über die elektronischen Verbindungen können die Module mit Nachrichten miteinander kommunizieren. Die Topologie des Netzwerks wird mit einem Link-State-Algorithmus ermittelt. Dafür erhält jedes Modul von jedem Nachbarn dessen Kennung und verteilt diese wiederum an alle anderen Nachbarn, solange bis jedes Modul die Informationen besitzt, welche anderen Module sich im Netzwerk befinden und wie diese miteinander verbunden sind. Damit erstellt jedes Modul anschließend eine Adjazenzmatrix und ermittelt mit dem Dijkstra-Algorithmus [Dij59] die kürzesten Wege zu allen anderen Modulen.

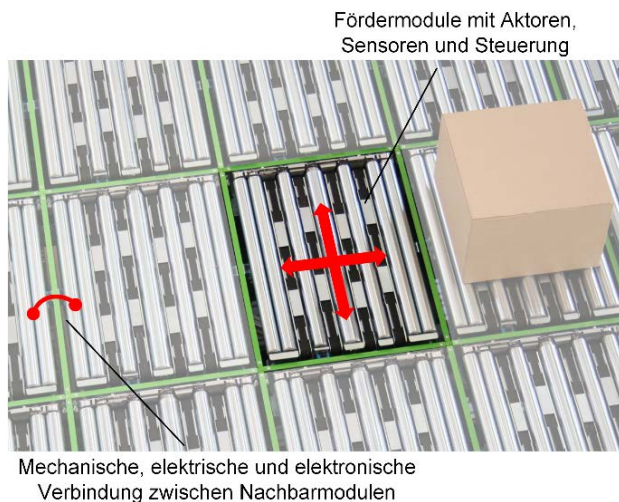


Abbildung 4. Grundlegender technischer Aufbau des Grid-Sorters

Informationen über einen zu transportierenden Ladungsträger, wie beispielsweise dessen Zielstelle, können entweder bei der Einschleusung durch das Lesen eines RFID-Chips, eines Barcodes oder über eine externe Schnittstelle zu einem Materialflussrechner erhalten werden. Sind diese Informationen bekannt, erfolgt zunächst die Reservierung des Weges, anschließend der tatsächliche physische Transport.

An jeder Außenkante eines Moduls befindet sich eine Lichtschranke. Dadurch kann die Position der Ladungsträger bestimmt und der Transportprozess überwacht werden.

3.2 RESERVIERUNGSGRUNDALGORITHMUS

Für die Wegfindung wird eine iterative Tiefensuche verwendet. Der Algorithmus ist zeitenfensterbasiert, d.h. Module werden nur für den Zeitraum reserviert, in dem sich ein Ladungsträger auf ihnen befindet.

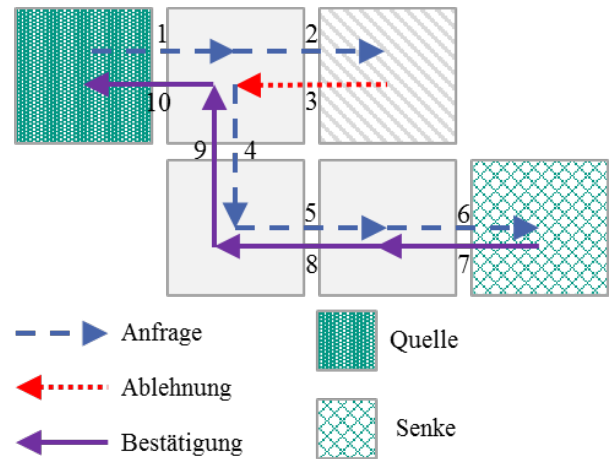


Abbildung 5. Ablauf der Routenreservierung

Der Reservierungsprozess beginnt bei der Quelle. Von dort ausgehend wird zu dem Modul, das in Richtung des kürzesten Weges zur Senke liegt, eine Reservierungsanfrage für den nächsten Zeitschritt gesendet.

Nach Erhalt der Nachricht wird von diesem Modul geprüft, ob ein Empfang des Ladungsträgers zum gewünschten Zeitpunkt möglich ist und zu welchem nächsten Modul der Ladungsträger weitergeleitet werden kann, sodass die Durchlaufzeit minimiert wird. Kann die Anfrage positiv beantwortet werden, wird das Modul für den Zeitraum reserviert und die Nachricht an das nächste Modul auf dem Weg gesendet. Dieser Prozess wiederholt sich so lange, bis die Senke erreicht ist. Die Route der Nachrichten entspricht also der Route, die später der Ladungsträger nehmen wird.

Muss eine Reservierungsanfrage wegen bereits bestehender Reservierungen von einem Modul abgelehnt werden, wird die Anfrage nicht weitergeleitet, sondern das Modul antwortet mit einer Ablehnung. Diese enthält dann entweder die Information, wann das Modul wieder einen Ladungsträger empfangen kann oder dass dieser Weg aufgrund von anderen Reservierungen nicht in der vorgegebenen Zeit zum Ziel führt. Das Vorgängermodul sucht dann mit den neuen Erkenntnissen eine alternative Route.

Ist die Senke erreicht, wird von dort aus eine Bestätigung zurückgesendet. Diese verfolgt in entgegengesetzter Richtung den Weg der zuvor gesendeten Anfragen bis zurück zur Quelle. Sie bestätigt den Modulen jeweils die vorgenommenen Reservierungen endgültig und signalisiert der Quelle, dass der Reservierungsprozess erfolgreich abgeschlossen wurde.

4 NEUER RESERVIERUNGSLGORITHMUS

In diesem Kapitel wird der Reservierungsalgorithmus für den Transport von Ladungsträgern unterschiedlicher Größe vorgestellt.

4.1 KOORDINIERUNGS- UND HILFSMODULE

Wie im bereits entwickelten Algorithmus müssen die Module vor dem Transport für den jeweiligen benötigten Zeitabschnitt reserviert werden. Der Unterschied besteht darin, dass ein Ladungsträger nun jeweils mehrere sendende und empfangende Module pro Zeiteinheit belegt.

Die Abstimmung zwischen diesen Modulen wird von einem Koordinierungsmodul geleitet. Die anderen zu diesem Zeitpunkt beteiligten Module heißen Hilfsmodule (siehe Abbildung 6). Beim Koordinierungsmodul handelt es sich immer um das Modul, das später zum jeweiligen Zeitpunkt von der vorderen linken Ecke des Ladungsträgers bedeckt wird. Als vorne wird dabei der Teil des Ladungsträgers betrachtet, der als erstes die Sortierfläche befährt.

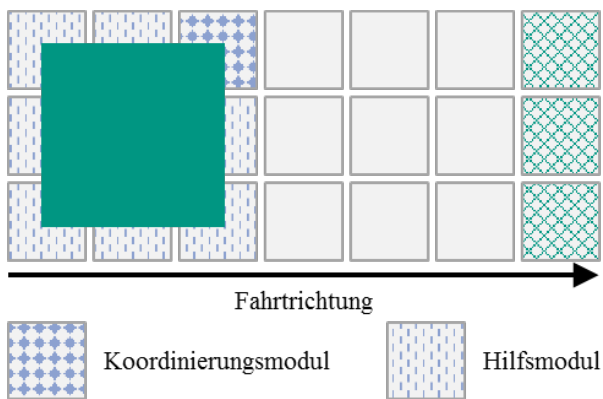


Abbildung 6. Position des Koordinierungs- und der Hilfsmodule

4.2 NACHRICHTENARTEN

Es gibt zwei verschiedene Arten von Nachrichten: Reservierungs- und Koordinierungsnachrichten. Reservierungsnachrichten erlauben die Kommunikation zwischen Koordinierungsmodulen. Ihre Aufgabe entspricht den Nachrichten aus dem bereits entwickelten Algorithmus. Da sie nur zwischen Koordinierungsmodulen verschickt werden, nehmen sie den Weg über die Module, die später durch die linke vordere Ecke des Ladungsträgers belegt werden.

Koordinierungsnachrichten ermöglichen die Kommunikation zwischen einem Koordinierungsmodul und seinen Hilfsmodulen. Sie ermöglichen das Erstellen und Löschen von Reservierungen auf den Hilfsmodulen sowie die Abfrage nach dem nächsten freien Zeitpunkt.

Koordinierungsnachrichten werden in Anfragen und Antworten getrennt. Anfragen werden vom Koordinierungsmodul aus „nach hinten“ und „nach rechts“ versendet. Alle Hilfsmodule entlang der Vorderseite, die ein weiteres Hilfsmodul „rechts“ neben sich haben, werden Knoten genannt. Sie senden die Anfragen ebenfalls „nach hinten“ und „nach rechts“. Alle anderen Hilfsmodule senden die Anfragen nur „nach hinten“, und zwar so lange, bis alle Hilfsmodule eine Anfrage erhalten haben. Von dort aus werden die Nachrichten als Antworten wieder „nach vorne“ versendet. Sie werden an den Knoten gesammelt, in einer Nachricht zusammengefasst und „nach links“ weitergeschickt, bis schließlich wieder das Koordinierungsmodul erreicht ist (siehe Abbildung 7).

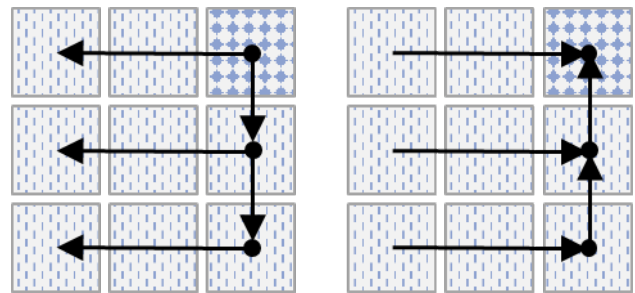


Abbildung 7. Wege der Koordinierungsnachrichten bei Anfragen (links) und Antworten (rechts)

Die zwei Arten wechseln sich immer ab. Erst kommunizieren zwei Koordinierungsmodule, dann kommuniziert das Koordinierungsmodul mit seinen Hilfsmodulen (siehe Abbildung 8).

4.3 ANGEPASSTER RESERVIERUNGSPROZESS

Der Reservierungsprozess beginnt immer durch das Versenden einer Reservierungsanfrage an das Modul auf dem Sorter, das als erstes von der vorderen linken Ecke des Ladungsträgers belegt ist. Dieses prüft, ob es selbst im geplanten Zeitfenster empfangsbereit ist, und bestimmt das nächste Koordinierungsmodul. Anschließend wird die Reservierungsanfrage gespeichert und Koordinierungsnachrichten an die Hilfsmodule geschickt. Sind diese alle empfangsbereit und können den Ladungsträger in die vom Koordinierungsmodul vorgegebene Richtung weiterleiten, werden die Hilfsmodule reserviert und das Koordinierungsmodul schickt die Reservierungsanfrage weiter. Dieser Prozess wiederholt sich, bis die Senke erreicht ist.

Ist die Senke erreicht, wird von dort aus eine Reservierungsnachricht zurückgesendet. Diese verfolgt in entgegengesetzter Richtung den Weg der zuvor gesendeten Reservierungsnachrichten bis zum Quellmodul. Sie bestätigt jeweils die vorgenommenen Reservierungen endgültig und signalisiert schließlich dem Quellmodul, dass der Transport beginnen kann. Die Hilfsmodule müssen nicht mehr benachrichtigt werden.

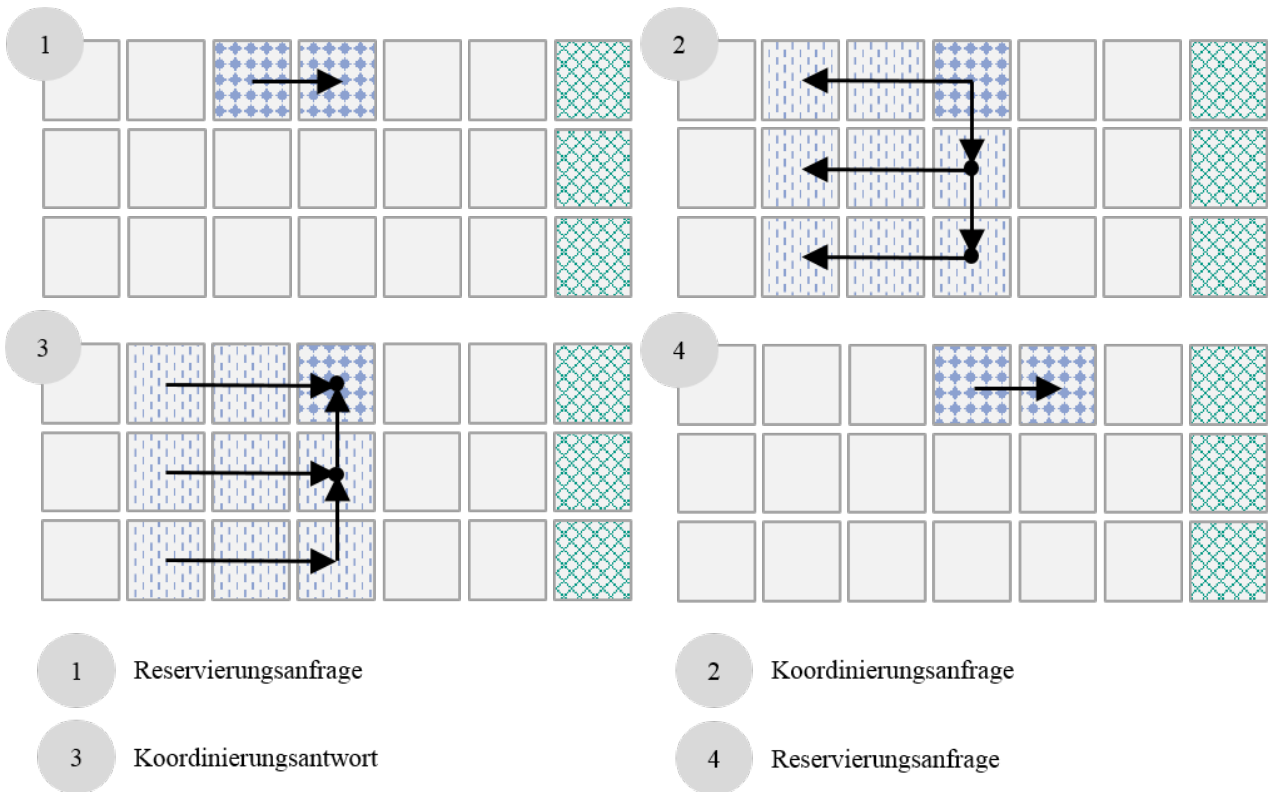


Abbildung 8. Ablauf der neuen Routenreservierung

Ist eine Reservierung auf einem Koordinierungsmodul wegen einer bereits bestehenden anderen Reservierung nicht möglich, sendet dieses die Reservierungsnachricht nicht weiter, sondern speichert sie. Anschließend schickt es Anfragen an die Hilfsmodule, ab welchem danach liegenden Zeitpunkt diese einen Ladungsträger empfangen können, und wartet auf die Antworten. Haben alle Module geantwortet, wird die Reservierungsanfrage geladen und mit der Information, wann in diese Richtung wieder transportiert werden kann, zurück an das Vorgängermodul gesendet.

Ist ein Koordinierungsmodul empfangsbereit, aber eines seiner Hilfsmodule nicht, bricht dieses Hilfsmodul die Anfrage ab. Das bedeutet, dass es die Anfrage nicht weiterleitet, sondern eine Ablehnung in Richtung Koordinierungsmodul zurückschickt. Durch sie werden alle bereits vorgenommenen Reservierungen auf dem Rückweg zum Koordinierungsmodul wieder gelöscht. Alle Knoten auf dem Rückweg, die von anderen Modulen eine Bestätigung erhalten haben, benachrichtigen diese vom Abbruch der Reservierung (siehe Abbildung 9). Alle Module bei denen die Reservierung gelöscht wurde, übermitteln mit der Antwort, wann sie wieder empfangsbereit sind. Sind alle Antworten beim Koordinierungsmodul eingegangen, berechnet dieses, zu welchem nächsten Zeitpunkt ein Ladungsträger empfangen werden kann, und schickt diese Information an das Vorgängermodul zurück.

Erhält ein Koordinierungsmodul eine Ablehnung, wird ein alternativer Weg gesucht. Der Ablauf entspricht

dem Ablauf beim Empfang einer Ablehnung im bereits bekannten Reservierungsalgorithmus. Allerdings muss in jedem Fall eine Kommunikation mit den Hilfsmodulen stattfinden, bei der, je nach Ausgang, die zuvor vorgenommenen Reservierungen auf den Hilfsmodulen entweder geändert oder gelöscht werden.

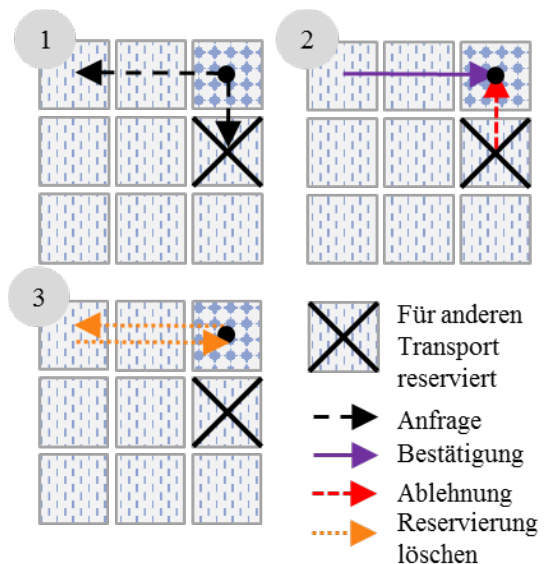


Abbildung 9. Abbruch einer Reservierung

5 LEISTUNGSUNTERSUCHUNG

Um das Verhalten und die Leistungsfähigkeit zu untersuchen, wurde der neue Algorithmus in einer ereignisorientierten Simulation in AnyLogic implementiert und in zwei Versuchen getestet.

Gemessen wurden jeweils der Durchsatz des Sorters und die mittlere Durchlaufzeit der Ladungsträger. Ebenso wurde die mittlere Belegungsrate der Module bestimmt. Diese ergibt sich aus dem Verhältnis der Zeit, zu dem ein Modul genutzt, also von einem Ladungsträger belegt wird, im Verhältnis zur Gesamtversuchszeit.

In beiden Versuchen wurden die Sorter bei maximaler Belegung getestet. Sobald eine Quelle frei wurde, wurde ein neuer Ladungsträger auf sie gelegt. Die Ziele der Ladungsträger wurden zufällig erzeugt. Für die Versuche gab es drei verschiedenen Layouttypen, bei denen die Größe des Sorters als Ganzes bei allen gleich war, sich die Modulgröße aber unterschied. Bei Typ 1 bestand der Sorter aus 6x4, bei Typ 2 aus 12x8 und bei Typ 3 aus 18x12 Modulen.

Nach einer Warmlaufphase von 200 Zeiteinheiten begann die Messung für den Versuch, der dann 1000 Zeiteinheiten dauerte. Eine Zeiteinheit entsprach bei Typ 1 der Transportdauer eines Ladungsträgers von einem Modul zum nächsten, bei Typ 2 bis zum übernächsten und bei Typ 3 bis zum überübernächsten Modul. Die Transportdauer wurde jeweils in alle vier Transportrichtungen als gleich lang angenommen. Je Versuch wurden 20 Replikationen simuliert.

5.1 UNTERSCHIEDLICHE MODULGRÖßEN

5.1.1 AUFBAU

In diesem Versuch wurde untersucht, welchen Einfluss es auf Durchsatz und Durchlaufzeit hat, wenn man die Module im Vergleich zu den Ladungsträgern verkleinert. (siehe Abbildung 10).

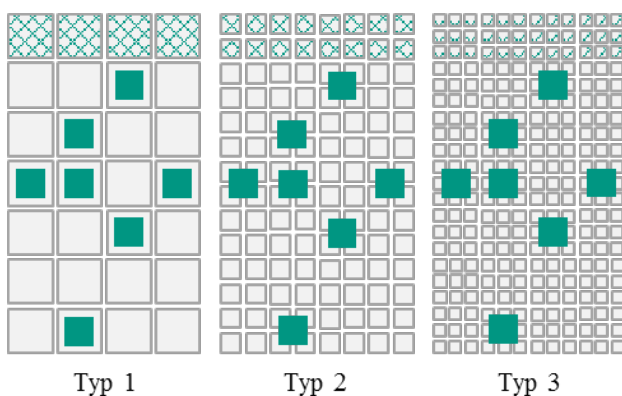


Abbildung 10. Layouts und Ladungsträger beim Versuch „Unterschiedliche Modulgrößen“

5.1.2 ERGEBNISSE

Wenn mehrere Module für den Transport eines Ladungsträgers notwendig sind, nimmt der Durchsatz ab, die Durchlaufzeit steigt. Der Rückgang des Durchsatzes ist hauptsächlich auf die niedrigere Belegungsrate zurückzuführen. Ein Grund dafür kann die zunehmende Komplexität bei der Wegfindung durch die größere Anzahl an Modulen sein, die pro Transportschritt benötigt werden. Die Durchlaufzeit dagegen steigt jeweils. Das beste Ergebnis wird erreicht, wenn Module und Ladungsträger die gleiche Fläche haben. Eine Verkleinerung der Module wirkt sich hier also negativ auf die Leistungsfähigkeit aus.

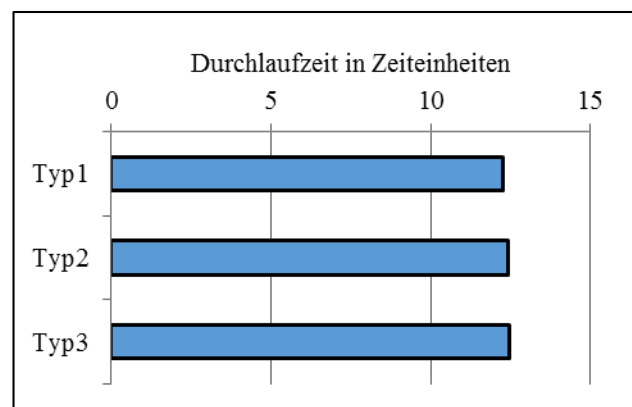
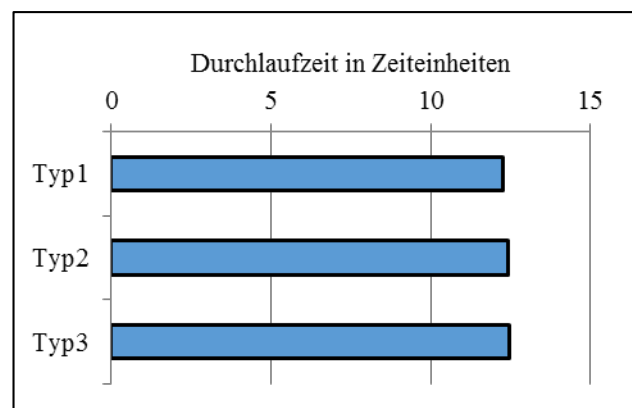
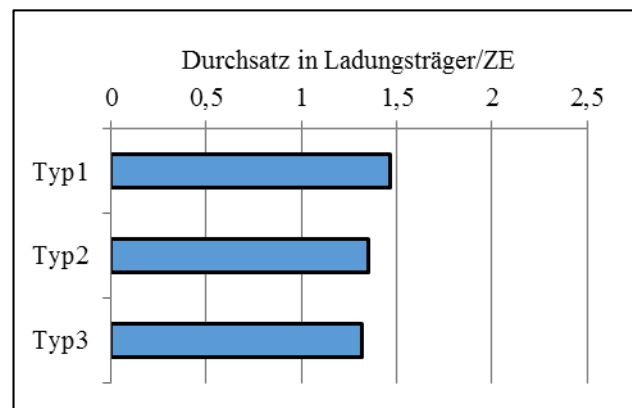


Abbildung 11. Ergebnisse beim Versuch „Unterschiedliche Modulgrößen“

5.2 UNTERSCHIEDLICHE LADUNGSTRÄGERGRÖßEN UND -FORMEN

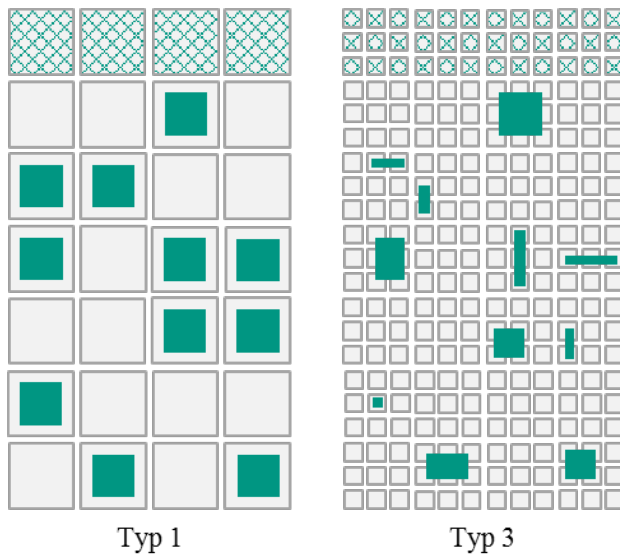


Abbildung 12. Layouts und Ladungsträger beim Versuch „Unterschiedliche Ladungsträgergrößen und -formen“

5.2.1 AUFBAU

In diesem Versuch wurde getestet, wie sich der Durchsatz und die Durchlaufzeit entwickeln, wenn unterschiedliche Ladungsträgergrößen und -formen möglich sind. Es sollte untersucht werden, ob es sich lohnt, kleinere Module zu verwenden, wenn es Ladungsträger gibt, die kleiner sind als ein Typ 1-Modul.

Dafür wurde ein Sorter vom Typ 3 mit Ladungsträgern befüllt, deren Länge und Breite gleichverteilt zwischen einem und drei Typ 3-Modulen lagen. Diese Ergebnisse wurden mit den Ergebnissen des Typ 1-Sorters mit einer reinen Belegung mit Ladungsträgern der Größe eines Typ 1-Moduls verglichen.

5.2.2 ERGEBNISSE

Der Durchsatz ist deutlich höher, wenn die Module kleiner sind. Das liegt unter anderem an der geringeren Durchlaufzeit, die durch die größere Flexibilität bei der Routenfindung ermöglicht wird. Die Belegungsrate sinkt zwar, dennoch heißt das in diesem Fall nicht, dass die absolut belegte Fläche auf dem Sorter geringer ist. Das liegt daran, dass auch ein sehr kleiner Ladungsträger ein ganzes Typ 1-Modul benötigt, was beim Typ 3-Sorter einer Fläche von 9 Modulen entspricht. Die Verkleinerung der Modulgröße wirkt sich hier also positiv aus.

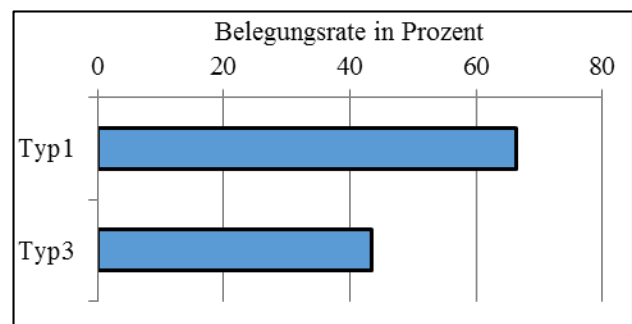
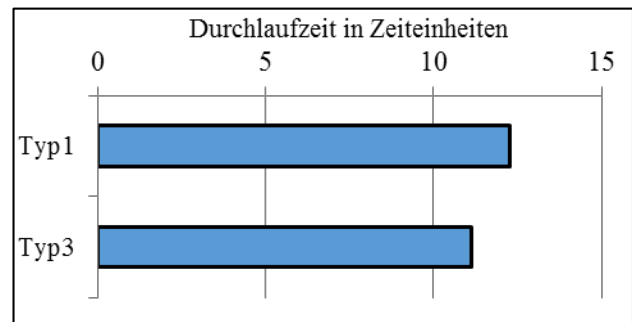
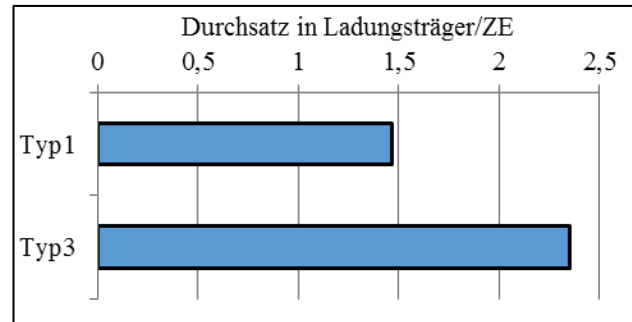


Abbildung 13. Ergebnisse beim Versuch „Unterschiedliche Ladungsträgergrößen und -formen“

5.3 SCHLUSSFOLGERUNG

Es wurde gezeigt, dass der neue Algorithmus funktionsfähig ist. Außer dem Transport von größeren Ladungsträgern ermöglicht er die Verkleinerung der Module. Diese sollte allerdings nur dann ein Ziel sein, wenn dadurch Modul- und Ladungsträgergröße in Übereinstimmung gebracht werden. Sind die Module größer als die Ladungsträger, wird Platz auf dem Sorter verschwendet und dadurch die mögliche Sortierleistung verringert. Sind die Ladungsträger größer als die Module wird ebenfalls ein geringerer Durchsatz erreicht. Das liegt an der größeren Komplexität bei der Wegfindung.

Hat man unterschiedliche Ladungsträgergrößen und -formen kann eine Verkleinerung der Module zu einer deutlichen Leistungssteigerung führen.

6 ZUSAMMENFASSUNG UND AUSBLICK

Der GridSorter stellt ein neuartiges Fördersystem zur Warensortierung da, das durch seinen modularen Aufbau leicht an sich ändernde Anforderungen angepasst werden kann.

In dieser Arbeit wurde ein neuer Algorithmus vorgestellt, der es dem GridSorter ermöglicht, unterschiedlich große Ladungsträger zu transportieren. Dieser wurde anschließend in einer Simulation untersucht. Darin wurde die Funktionsfähigkeit des Algorithmus bewiesen. Die Möglichkeit, Module zu verkleinern, sollte dann genutzt werden, wenn anschließend Modul- und Ladungsträgergröße übereinstimmen. Hat man keine einheitliche Ladungsträgergröße kann dank des neuen Algorithmus die Modulgröße verringert und so bei gleicher Sortierfläche eine größere Sortierleistung erreicht werden.

Weitere Funktionen für den GridSorter sind denkbar und sollten untersucht werden. So ist vorstellbar, den GridSorter, ähnlich wie GridFlow, für das Puffern und Sequenzieren von Ladungsträgern zu nutzen. Beim Ausfall eines Moduls können Routen neugeplant werden, sodass das Gesamtsystem weiterhin einsatzfähig bleibt.

Neben diesen zusätzlichen Funktionen und der Verbesserung der Algorithmen muss außerdem die Leistungsfähigkeit des GridSorters weiter untersucht werden, um ihn besser mit bestehenden Systemen vergleichen zu können.

LITERATUR

- [BtHV14] Bauernhansl, Thomas, Michael Ten Hompel, and Birgit Vogel-Heuser, eds. *Industrie 4.0 in Produktion, Automatisierung und Logistik: Anwendung· Technologien· Migration*. Springer-Verlag, 2014.
- [Dij59] Dijkstra, Edsger W. "A note on two problems in connexion with graphs." *Numerische Mathematik* 1, no. 1 (1959): 269-271.
- [fle15] www.flexlog.de, aufgerufen am 14.08.2015.
- [GFSU14] Gue, Kevin R., Kai Furmans, Zazilia Seibold, and Onur Uludag. "GridStore: a puzzle-based storage system with decentralized control." *Automation Science and Engineering, IEEE Transactions on* 11, no. 2 (2014): 429-438.

- [GUF12] Gue, Kai Furmans Kevin R., Onur Uludag, and K. Furmans. "A high-density system for carton sequencing." In *6th International Scientific Symposium on Logistics, Hamburg, Germany*. 2012.
- [KRISO13] Kruhn, Tobias, Misel Radosavac, Nikita Shchekutin, and Ludger Overmeyer. "Decentralized and dynamic routing for a Cognitive Conveyor." In *Advanced Intelligent Mechatronics (AIM), 2013 IEEE/ASME International Conference on*, pp. 436-441. IEEE, 2013.
- [May09] Mayer, Stephan. "Development of a completely decentralized control system for modular continuous conveyors." Dissertation (2009).
- [SF14] Seibold Z, Furmans K (2014). GridSorter – Logische Zeit in dezentral gesteuerten Materialflusssystemen. *Logistics Journal : Proceedings*, Vol. 2014.
- [SSF13] Seibold, Zazilia, Thomas Stoll, and Kai Furmans. "Layout-optimized sorting of goods with decentralized controlled conveying modules." In *Systems Conference (SysCon), 2013 IEEE International*, pp. 628-633. IEEE, 2013.
- [Wil08] Wilke, Michael. "Control concept for autonomous changeable material flow systems." *Logistics Journal* 1 (2008): 1-6.

M.Sc. Dominik Colling, Wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Fördertechnik und Logistiksysteme (IFL) des Karlsruher Instituts für Technologie (KIT).

Dipl.-Ing. Zazilia Seibold, Wissenschaftliche Mitarbeiterin am Institut für Fördertechnik und Logistiksysteme (IFL) des Karlsruher Instituts für Technologie (KIT).

Prof. Dr.-Ing. Kai Furmans, Institutsleiter am Institut für Fördertechnik und Logistiksysteme (IFL) des Karlsruher Instituts für Technologie (KIT).

Adresse: Institut für Fördertechnik und Logistiksysteme (IFL), Karlsruher Institut für Technologie (KIT), Gotthard-Franz-Str. 8, 76131 Karlsruhe, Germany

E-Mail: colling@kit.edu, seibold@kit.edu, furmans@kit.edu