

GridSorter – Logische Zeit in dezentral gesteuerten Materialflusssystemen

GridSorter – Logical Time in Decentralized Controlled Material Handling Systems

Zázilia Seibold und Kai Furmans

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

Der GridSorter ist ein dezentral gesteuertes, modulares Fördersystem, das zur effizienten und platzsparenden Warensortierung genutzt werden und flexibel an wechselnde Anforderungen angepasst werden kann. In diesem Artikel wird ein neues Steuerungsverfahren für Routenreservierung und Durchführung des Ladungsträgertransports vorgestellt, das auf dem Prinzip der logischen Zeit basiert. Dadurch wird ein effizientes und Deadlock-freies Systemverhalten gewährleistet.

[Schlüsselwörter: Fördertechnik, dezentral gesteuert, modular, logische Zeit, Deadlock-Vermeidung]

The GridSorter is a decentralized controlled, modular conveyor system for efficient and space-saving sorting of goods. It can be flexibly adapted to changing requirements. In this article, we present a new control algorithm for route reservation and execution of the carrier transport which is based on the principle of logical time. Thereby, efficient and deadlock-free system behavior is guaranteed.

[Keywords: conveying system, decentralized controlled, modular, logical time, deadlock avoidance]

1 EINLEITUNG

„Industrie 4.0“ bezeichnet die vierte industrielle Revolution, in der die deutsche Produktion unter anderem durch Cyber-Physische Systeme wandlungs- und wettbewerbsfähig gemacht werden soll [KWH12]. Im Bereich der Intralogistik wird schon seit einigen Jahren an flexibler, anpassungsfähiger Fördertechnik geforscht. Als Unstetigförderer entstehen Fahrerlose Transportsysteme, die multifunktional und autonom ihre Aufgaben erledigen [FSTS14, KSKtH12]. Im Bereich der Stetigfördertechnik gibt es mehrere Ansätze für modulare Systeme mit dezentraler Steuerung. In beiden Bereichen ist das Ziel möglichst geringe Infrastrukturänderungen vorzunehmen und eine kurze und einfache Inbetriebnahme zu gewährleisten [FSG10]. Am Institut für Fördertechnik und Logistiksysteme des Karlsruher Instituts für Technologie werden diese Systeme Plug&Play-Fördertechnik genannt, weil sie vom Benutzer umgebaut und sofort in Betrieb genommen werden können.

Der FlexFörderer [May09], ein in sich abgeschlossenes Modul mit eigener Steuerung, ist Grundlage für die modulare Stetigfördertechnik. Doch warum dieses Modul „nur“ zum Fördern von Ware nutzen?

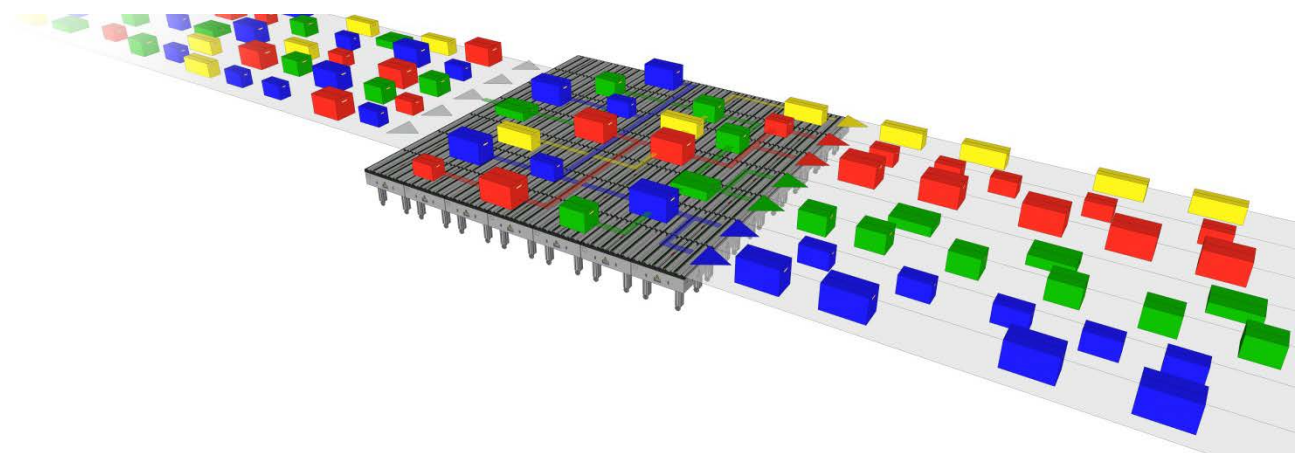


Abbildung 1. Schematische Darstellung des GridSorters – Ware wird nach Farbe sortiert

Durch den modularen Aufbau kann man Förderlay-outs generieren, die auch für andere Aufgaben der Intra-logistik geeignet sind. Wie in Abbildung 1 dargestellt, wird mit einem dicht zusammenhängenden Layout ein Sorter, der sogenannte GridSorter, aufgebaut, der sowohl in Durchsatz als auch Form des Layouts flexibel ist.

Durch das dichte Layout ergeben sich für jeden einzelnen Ladungsträger viele mögliche Wege zum Ziel; die Routingentscheidungen werden komplexer. Dabei besteht die Herausforderung, dass die Entscheidungen von den einzelnen Modulen nur durch Kommunikation mit den Nachbarn getroffen werden. Ziel ist die Entwicklung eines Steuerungsalgorithmus, der ein Deadlock-freies und effizientes Systemverhalten garantiert, robust gegenüber Fehlern ist und auf möglichst einfachen, nachvollziehbaren Entscheidungen basiert.

Dieser Artikel ist folgendermaßen strukturiert: Im zweiten Kapitel wird einen Überblick über Forschungsprojekte im Bereich der dezentral gesteuerten Stetigför-dertechnik gegeben und das Prinzip der logischen Zeit eingeführt. Kapitel 3 beschreibt den Aufbau und die daraus resultierenden Fähigkeiten des GridSorters. In Kapitel 4 wird das Prinzip der logischen Zeit auf den GridSorter übertragen. Es wird beschrieben, wie damit Routing und Transport der Ladungsträger Deadlock-frei umgesetzt werden können, bevor Kapitel 5 mit einem Fazit und einem Ausblick auf weitere Funktionalitäten und Einsatzgebiete des GridSorters schließt.

2 GRUNDLAGEN

Im folgenden Abschnitt wird zunächst ein Überblick über Forschungsprojekte im Bereich der dezentral gesteuerten, modularen Fördertechnik gegeben. Daraufhin wird das Prinzip der logischen Zeit vorgestellt, das unter anderem für die Synchronisierung verteilter Multiprozessor-Systeme verwendet werden kann.

2.1 DEZENTRAL GESTEUERTE, MODULARE STETIGFÖRDERTECHNIK

Im Internet der Dinge sind Objekte intelligent und kommunizieren miteinander [BtH07]. In [Roi12] wird eine Agentifizierung der Intra-logistik angestrebt: Modulare, lernfähige Fördertechnikmodule passen sich mithilfe einer agentenbasierten Steuerung an die jeweilige Situation an. Der Algorithmus, der auf dem Verhalten von Ameisen basiert, findet für jedes Paket eine individuelle Strecke und ist auf Layouts mit unidirektionalen Förderstrecken beschränkt.

Auch [BK10a] und [BK10b] gehen von einem Fördernetzwerk mit unidirektionaler Streckennutzung aus. Mit dem beschriebenen Algorithmus wird für jede Quelle-Senke-Beziehung, also nicht für jeden Ladungsträger, eine aktuell gültige Strecke bestimmt. Das Routing geschieht

zeitabhängig basierend auf Schätzwerten, die per Nachrichtenversand zwischen den Modulen ausgetauscht werden. In beiden beschriebenen Steuerungen werden Deadlocks durch Kreisschlüsse nicht betrachtet.

Der FlexFörderer (siehe Abbildung 2) ist ein dezentral gesteuertes Fördersystem, bei dem unterschiedliche Module einfach zusammengesteckt werden können. Die Strecken sind bidirektional nutzbar und eine Deadlock-Vermeidung durch Kreisschlüsse ist in [MF10] beschrieben. Wie bei Lego gibt es inzwischen unterschiedlich geformte FlexFörderer-Module, wie z.B. lange gerade Strecken oder Kurven [fle14].



Abbildung 2. Schematische Darstellung des FlexFörderers

Der Cognitive Conveyor (siehe Abbildung 3) hat das Alleinstellungsmerkmal der Kleinskaligkeit der Module: ein Ladungsträger kann nur von vielen Modulen gemeinsam getragen und transportiert werden. Dadurch entstehen hochfunktionale Intra-logistikknoten [KRSO13], die Ladungsträger omnidirektional bewegen können. Wegen der Kleinskaligkeit wird zwischen der Vermeidung globaler und lokaler Deadlocks unterschieden.

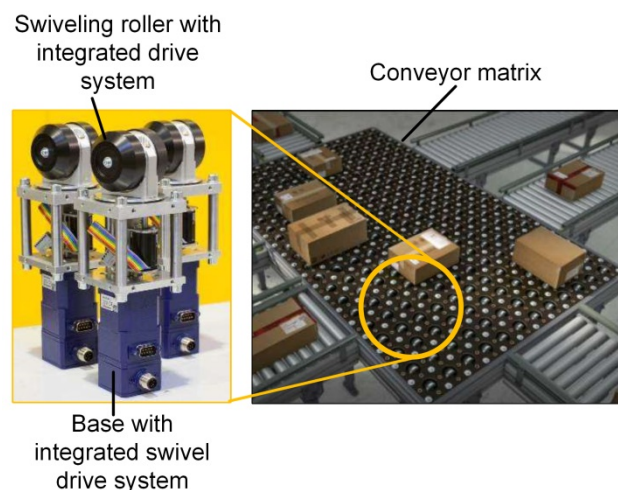


Abbildung 3. Der Cognitive Conveyor

In [GFSU14, GUF12] werden drei Systeme beschrieben, die auf der technischen Funktionalität des FlexFörderers basieren. Alle drei Systeme sind schematisch in Abbildung 4 dargestellt.

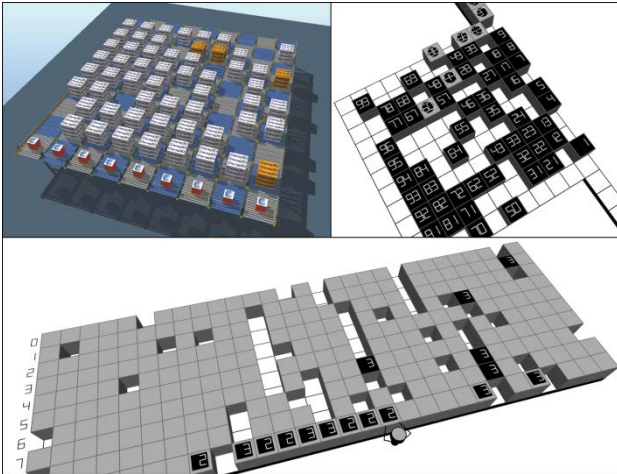


Abbildung 4. GridStore (oben links), GridSequence (oben rechts) und GridPick (unten)[GFSU14]

Durch Anwendung unterschiedlicher Steuerungsalgorithmen ergeben sich neue Funktionalitäten: GridStore ist ein hochdichtes, durchsatzstarkes Lagersystem. GridSequence stellt eine bestimmte Sequenz innerhalb der Ladungsträger her. GridPick ist ein dynamisches Kommissioniersystem, das die Wege der Mitarbeiter verkürzt und dadurch die Leistung erhöhen soll.

2.2 LOGISCHE ZEIT IN DER SYNCHRONISIERUNG VERTEILTER SYSTEME

Leslie Lamport stellt in [Lam78] das Prinzip der logischen Zeit bei verteilten Systemen vor. Er nutzt dieses Prinzip unter anderem zur Synchronisierung verteilter Prozesse, die gemeinsame Ressourcen nutzen wollen.

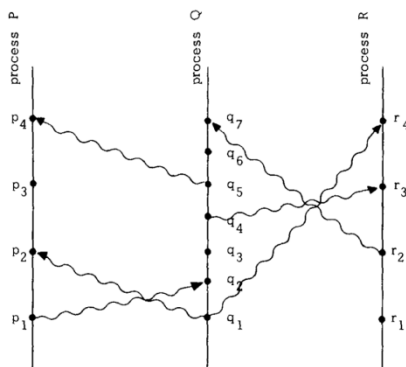


Abbildung 5. Drei parallele Prozesse mit Ereignissen und „happened-before“-Relationen [Lam78]

Mit Abbildung 5 beschreibt er mehrere parallele Prozesse, auf denen nacheinander Ereignisse geschehen. Zwischen den Ereignissen eines Prozess herrschen „happened before“ Relationen, d.h. es kann bestimmt werden, in welcher Reihenfolge die Ereignisse stattfinden. Zwischen den parallelen Prozessen können Nachrichten verschickt werden, wobei das Senden der Nachricht durch den einen Prozess vor dem Empfang der Nachricht durch den ande-

ren Prozess stattfindet. Der Versand der Nachrichten stellt also eine „happened before“-Relation zwischen einzelnen Ereignissen dieser beiden parallelen Prozesse her. Durch die Gesamtheit der „happened before“-Relationen wird eine partielle Reihenfolge aller Ereignisse hergestellt. In Abbildung 5 geschieht z.B. Ereignis p_1 vor q_3 , aber über die Reihenfolge von Ereignis p_3 und q_3 kann keine Aussage getroffen werden, weil dazwischen keine Folge von „happened-before“-Relationen besteht.

Leslie Lamport führt logische Uhren mit der folgenden Bedingung ein:

„Clock Condition. For any events a, b:
 if $a \rightarrow b$ then $C(a) < C(b)$.“

wobei „ \rightarrow “ die „happened before“-Relation beschreibt und $C(a)$ der ganzzahlige Zeitstempel von Ereignis a ist. Diese Uhrenbedingung besagt also, dass ein Ereignis a, welches vor Ereignis b geschieht, einen geringeren Zeitstempel haben muss.

3 DER GRIDSORTER

Der GridSorter ist aus rechteckigen Modulen aufgebaut, die ein dicht zusammenhängendes Netzwerk bilden. Jedes der Module ist mechanisch ein herkömmlicher Umsetzer und kann mit den Aktoren aufliegende Waren in vier Richtungen fördern. Mit optischen Tastsensoren an allen vier Seiten erkennt das Modul die Position der geförderten Ware und kann so den Transportvorgang steuern. Mithilfe der Steuerung, auch FlexBox genannt, kann das Modul eigenständig Informationen verarbeiten und Entscheidungen treffen. Zu den vier direkten Nachbarmodulen gibt es eine physische, elektrische und elektronische Verbindung. Zwei benachbarte Module können somit Informationen in Form von Nachrichten austauschen.

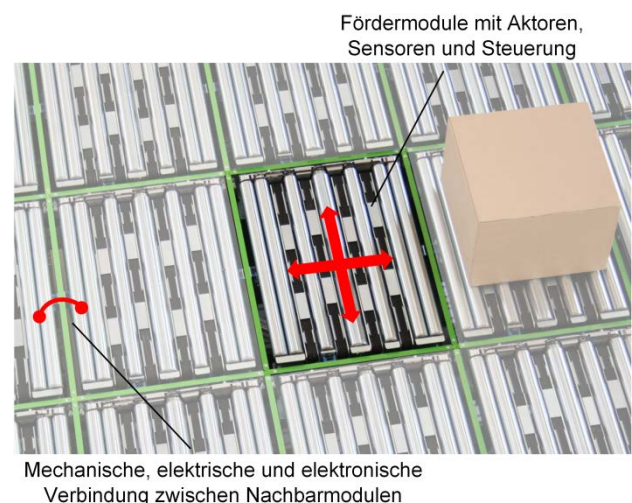


Abbildung 6. Grundlegender technischer Aufbau des GridSorters

Der GridSorter besitzt keine zentrale Steuerung; es gibt somit keinen zentralen Taktgeber. Auch die Topologie des Netzwerks ist den Modulen erst nach einem dezentralen Erkennungsprozess bekannt: Nachdem jedes Modul die Kennung der Nachbarn erfragt hat, wird die Information über das ganze Netzwerk verbreitet. Damit erstellt jedes Modul eine Adjazenzmatrix des Netzwerks, mit der z.B. kürzeste Wege berechnet werden können. Informationen über die Ware wie z.B. ihr Ziel können auf unterschiedliche Weise erlangt werden: Die relevante Information kann entweder aus einem Barcode/RFID-Chip ausgelesen werden oder sie wird bei Warenübergabe von einem externen System bereitgestellt. Sobald das Einschleusmodul das Ziel des aufliegenden Ladungsträgers kennt, startet es den Reservierungsprozess und daraufhin den Transportprozess. Die Steuerung dieser beiden Prozesse wird im folgenden Kapitel näher beschrieben.

4 DEZENTRALER STEUERUNGsalGORITHMUS

Nachdem die Herausforderungen beim Routing in dezentral gesteuerten Materialflusssystemen dargestellt werden, wird das Prinzip der logischen Zeit auf die Steuerung des GridSorters übertragen. Abschließend werden Vorteile diskutiert.

4.1 HERAUSFORDERUNGEN

Auch [May09] hat schon unterschiedliche Möglichkeiten des Routings beschrieben:

- Schrittweise Entscheidung über die Richtung des nächsten Transports eines Ladungsträgers
- Reservierung der Route bis zum nächsten Entscheidungspunkt. Dies entspricht beim GridSorter der schrittweisen Reservierung, weil jedes Modul ein Entscheidungspunkt ist.
- Reservierung der Route von Quelle bis Ziel
- Zeitfensterbasierte Reservierung der Route von Quelle bis Ziel (mit physischer Zeit)

Die *schrittweise Entscheidung* kann in Fördernetzwerken, die mit dem FlexFörderer aufgebaut werden, leicht zu Deadlocks führen, da sich entgegenkommende Ladungsträger behindern. In dichten Netzen wie dem GridSorter ist ein schrittweises Routing möglich, aber die Deadlock-Freiheit ist aufgrund lokaler Entscheidungen schwierig zu beweisen. Bei GridStore, GridPick und GridSequence kommen solche schrittweisen Entscheidungsalgorithmen zum Einsatz.

Die *Reservierung der Route von Quelle bis Ziel* kommt beim FlexFörderer und den Cognitive Conveyors zum Einsatz. Entgegengesetzte Routen können dadurch verhindert werden. Trotzdem ist während des Transports zusätzlich ein komplexes Deadlock-Handling notwendig, um Kreisschlüsse zu verhindern. Beim GridSorter würde

das Deadlock-Handling ein hohes Kommunikationsaufkommen verursachen und den Durchsatz negativ beeinflussen, weil aufgrund der Charakteristika der Layouts eine Vielzahl an Kreisschlüssen möglich ist.

[May09] nennt als großen Nachteil der *Zeitfensterbasierten Reservierung von Quelle bis Ziel* den Kommunikationsaufwand, der zum einen für die Synchronisierung der Zeit und zum anderen für die Anpassung der Zeitfenster bei Störungen der Transporte benötigt würde. Er geht hier von einer Zeitfensterbasierten Reservierung mithilfe von physikalischer Zeit aus.

Was ist die Herausforderung bei der Vermeidung von Deadlocks, die zu komplexen Steuerungsverfahren führt?

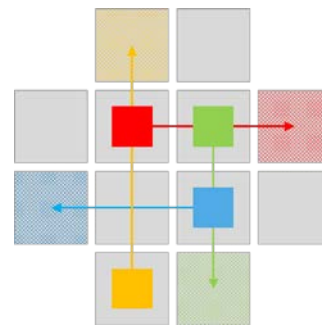


Abbildung 7. Kreisschluss mit Deadlock-Gefahr

Abbildung 7 stellt eine typische Deadlock-kritische Situation vor. Würde der gelbe Ladungsträger als nächstes transportiert werden, würden alle Ladungsträger darauf warten, dass der vorgelagerte Ladungsträger wegtransportiert wird, bevor sie selbst transportiert werden können. Ein Kreisschluss der „happened-before“-Relation entsteht, der mit Zeitstempeln der logischen Uhren aufgedeckt werden könnte.

4.2 DAS PRINZIP DER LOGISCHEN ZEIT BEIM GRIDSORTER

Wie kann das Prinzip der logischen Zeit auf ein Materialflusssystem wie den GridSorter übertragen werden? Im Folgenden werden Parallelitäten zwischen einem verteilten System, wie von Lamport beschrieben, und dem GridSorter hergestellt:

- Mehrere Ladungsträger, die sich gleichzeitig im System befinden, stellen die *parallelen Prozesse* dar.
- Die einzelnen Transportschritte, die nötig sind, um den Ladungsträger ans Ziel zu bringen, stellen die *Ereignisse dieses Prozesses* dar.
- Zwischen diesen Ereignissen gibt es eine kausale „happened-before“-Relation, die sich aus der physischen Bewegung des Ladungsträgers ergibt.

- Falls sich die Routen zweier Ladungsträger überschneiden, stellt dieses Fördermodul eine *gemeinsame Ressource* dar.
- Zwischen den Transporten auf diesem Fördermodul gibt es eine kausale „*happened-before*“-Relation.
- Zwischen Ladungsträgern, deren Routen sich nicht überschneiden, gibt es keine Relationen. Es stellt sich eine *partielle Reihenfolge* ein.

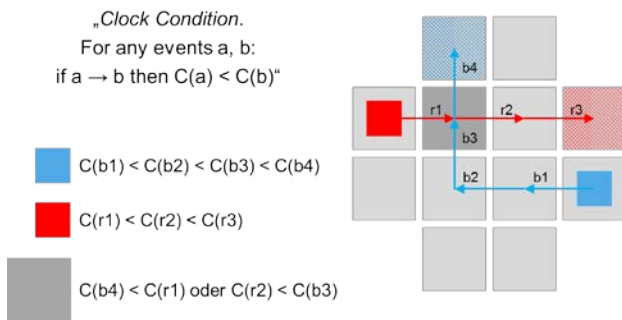


Abbildung 8. Beispielsituation mit Uhrenbedingungen

Abbildung 8 zeigt eine Beispielsituation des GridSorters, auf die das Prinzip der logischen Uhren angewandt wird. Wie schon beschrieben, gibt es zwei Arten der kausalen Relation: Die Transportschritte des roten und des blauen Ladungsträgers ergeben jeweils eine Reihenfolge. Die Transportereignisse auf dem dunkelgrau markierten Fördermodul müssen in eine Reihenfolge gebracht werden, sodass entweder der rote Ladungsträger das Modul verlassen hat *bevor* der blaue ankommt, oder umgekehrt.

Zusammenfassend ergeben sich daraus die zwei folgenden Implementierungsregeln für die Zeitstempel der logischen Zeit beim GridSorter:

1. Die Transportschritte eines Ladungsträgers müssen ansteigende Zeitstempel haben.
2. Auf einem Modul muss ein ausgehender Transport einen früheren Zeitstempel haben als der darauffolgende eingehende Transport.

Wie können diese Implementierungsregeln umgesetzt werden und was bedeutet das für die Routenreservierung und die Steuerung der Ladungsträgertransporte? Der nächste Abschnitt beschreibt die Aufgaben der dezentralen Steuerung jedes Fördermoduls.

4.3 STEUERUNG DES RESERVIERUNGS- UND TRANSPORTPROZESSES

Wie in Abbildung 9 dargestellt, gibt es für jeden Ladungsträger zwei aufeinanderfolgende Prozesse: Während des Reservierungsprozesses wird eine Reservierungsanfrage in Form einer Nachricht von Modul zu Modul zum Ziel geschickt. Die beteiligten Fördermodule legen so ent-

sprechend der beiden Implementierungsregeln aus Abschnitt 4.2 die Zeitstempel für die einzelnen Transportschritte zum Ziel fest. Jeder Transportschritt ist durch einen ausgehenden Transport beim sendenden Modul und einen eingehenden Transport beim empfangenen Modul gekennzeichnet. Beide Module verständigen sich auf den gleichen Zeitstempel.

Ist die Route gefunden und bestätigt, beginnt der Transportprozess. Hierbei führen die beteiligten Module die Transportschritte entsprechend der partiellen Reihenfolge durch, die beim Reservierungsprozess festgelegt wurde.

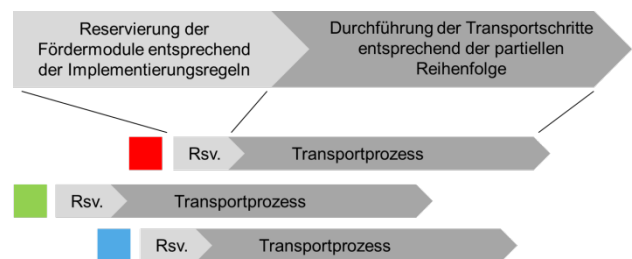


Abbildung 9. Darstellung der parallelen Prozesse mehrerer Ladungsträger

Sowohl am Reservierungs- als auch am Transportprozess sind mehrere Module beteiligt. Da sich mehrere Ladungsträger im System befinden, finden parallel mehrere Reservierungs- und Transportprozesse statt.

Daher besitzt jedes Modul einen Reservierungs- und einen Transportmanager, um die Prozesse zu steuern, an denen es beteiligt ist. Außerdem hat jedes Modul eine logische Uhr, die nur vorwärts laufen darf und den aktuellen Zeitstempel speichert. Beide Manager haben Zugriff auf die logische Zeit und beeinflussen sich dadurch gegenseitig. Abbildung 10 stellt den Zusammenhang zwischen dem Reservierungsmanager, dem Transportmanager und der logischen Uhr dar.

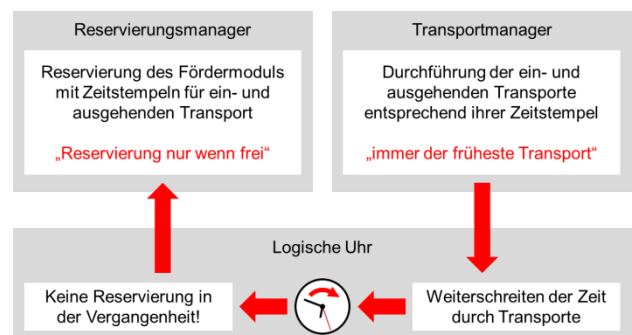


Abbildung 10. Zusammenhang zwischen Reservierungsmanager, Transportmanager und logischer Uhr eines Fördermoduls

Der Reservierungsmanager entscheidet bei Reservierungsanfragen basierend auf schon getätigten Reservierungen, ob diese Anfrage akzeptiert werden kann. Es akzeptiert die Anfrage nur, wenn das Modul frei ist, d.h. der

ausgehende Transport des vorherigen Ladungsträgers einen kleineren Zeitstempel und der eingehende Transport des nächsten Ladungsträgers einen größeren Zeitstempel hat. Ist dies der Fall, wird die Anfrage ans nächste Modul weitergeleitet. Falls nicht, muss eine alternative Route gesucht oder eine Wartezeit eingeplant werden.

Der Transportmanager sorgt dafür, dass die reservierten Transporte auf diesem Modul in der festgelegten Reihenfolge stattfinden. Ein eingehender Transport darf also nur durchgeführt werden, wenn davor kein anderer Transport geplant ist. Die Durchführung der Transporte lässt die logische Uhr weiterschreiten. Dies wiederum ist wichtig für den Reservierungsmanager: Da ein Rückwärtsschreiten der Uhr nicht gestattet ist, dürfen keine Reservierungen in der Vergangenheit angenommen werden. Jedes Modul verharrt in der Zeit des letzten durchgeführten Transports. Es gibt also keine zentral gültige Zeit. In einem stark genutzten Netzwerk synchronisieren sich die Module miteinander, weil viele Transporte stattfinden.

4.4 VORTEILE DER LOGISCHEN ZEIT

Das Prinzip der logischen Zeit kann grundsätzlich in jedem dezentral gesteuerten, modularen Materialflusssystem eingesetzt werden. Vor allem bei Fördersystemen mit bidirektional genutzten Strecken und komplexen Routing-Entscheidungen hat es Vorteile.

Leistung und Robustheit: Durch die Erstellung der partiellen Reihenfolge der Transportschritte und deren Einhaltung beim Transport werden Deadlocks schon bei der Routenfindung ausgeschlossen. Durch das Reservieren von Zeitfenstern können Wartezeiten bei der Reservierung berücksichtigt und dadurch Routenalternativen besser bewertet werden. Da die logische Zeit in diskreten Schritten fortschreitet, ist das System robust gegenüber Schwankungen in Transportzeiten. Es müssen keine Ankunftszeiten angepasst werden wie in [May09] befürchtet. Allerdings kann ein Systemstillstand ausgelöst werden, falls ein geplanter Transportschritt nicht ausgeführt werden kann und dadurch die logische Uhr dieses Fördermoduls nicht voranschreitet. Dies kann z.B. bei Verklemmen des Ladungsträgers oder Ausfall des Förderantriebs vorkommen. Das betroffene Modul bzw. die Nachbarmodule erkennen einen solchen Fall und reagieren darauf, indem sie z.B. die reservierten Routen der die betroffenen Ladungsträger neu geplant werden.

Kommunikationsaufwand: Bei der Reservierung mit Zeitstempeln logischer Zeit entsteht mehr Kommunikationsaufwand als bei der Reservierung der Route von Quelle bis Ziel, weil der Suchbaum größer ist. Es müssen Entscheidungen über Route und Zeitstempel und nicht nur über Route getroffen werden. Da der Reservierungsprozess vor Einschleusen des Ladungsträgers stattfindet, kann dem z.B. mit einem frühzeitigen Identifizieren der Ladungsträger begegnet werden. Das resultierende Systemverhalten ist davon unabhängig. Während des Trans-

portprozesses entsteht ein klar begrenzter, lokaler Kommunikationsaufwand zwischen den beiden Fördermodulen, die jeweils am Transportschritt beteiligt sind. Der physische Transport der Ladungsträger überschreitet in jedem Fall die Dauer dieses Nachrichtenaustauschs und wird daher nicht verzögert. Für die Synchronisierung der logischen Uhren der Module wird keine zusätzliche Kommunikation benötigt, wie bei dem Einsatz physischer Zeit nötig wäre [May09].

5 EINSATZSZENARIEN DES GRIDSORTERS

Der GridSorter kann grundsätzlich überall dort eingesetzt werden, wo Stückgüter wie Kisten, Kartons oder Behälter gefördert werden. Der Steuerungsalgorithmus hängt nicht von der Modulgröße ab, d.h. es ist auch eine Übertragung auf Palettenfördertechnik denkbar.

Einsatzbereiche gibt es dort, wo herkömmliche Sorter eingesetzt werden, z.B. im Paketumschlagzentrum oder in der Kommissionierung. Durch die Skalierbarkeit ist ein Einsatz aber auch dort denkbar, wo sich bisher der Einsatz eines automatisierten Systems nicht lohnt. Auf dichten Layouts kann durch den Einsatz verschiedener Steuerungsalgorithmen sehr unterschiedliches Systemverhalten entstehen, wie in Abschnitt 2.1 deutlich wird. Es kann demnach mit dem gleichen System nicht nur Ware sortiert, sondern auch gepuffert oder sogar sequenziert werden. Ein Einsatzgebiet könnte hier die Lagervorzone, also der Bereich zwischen Lager und Kommissionierarbeitsplätzen, sein. Hier besteht die Anforderung, dass Behälter entsprechend der Kommissionieraufträge in der richtigen Reihenfolge an unterschiedliche Arbeitsplätze geliefert werden. Durch eine Erweiterung der Steuerung des GridSorters könnten diese Anforderung erfüllt und der Einsatz zusätzlicher Sequenzierer gespart werden.

6 FAZIT

Mit dem GridSorter wurde ein neues Konzept für die Warensortierung entwickelt. Durch die Modularität können Topologien jeglicher Form mit Ein- und Ausschleusungen an unterschiedlichen Positionen aufgebaut werden.

Für die Steuerung des GridSorters wurde das Prinzip der logischen Zeit aus dem Bereich der verteilten Systeme angewandt. Es gewährleistet einen Deadlock-freien und effizienten Betrieb des dezentral gesteuerten Systems. Die Funktionsweise wurde in Simulation und auf realer Hardware getestet; ein analytischer Beweis steht noch aus.

Der GridSorter hat das Potenzial, viele weitere Funktionen zu erfüllen, wie man an ähnlich modular aufgebauten Systemen wie den Cognitive Conveyors oder Grid-Flow erkennt. Neben dem Sortieren kann der GridSorter auch Ladungsträger puffern oder sequenzieren. Beim Ausfall einzelner Module werden die Routen betroffener

Ladungsträger neu geplant. Auch Ladungsträger, die größer sind als ein Modul, können transportiert werden.

Neben der Entwicklung weiterer Funktionen und der Verbesserung bestehender Algorithmen, gilt es zu untersuchen, in welchen Einsatzszenarien der GridSorter mit bestehender Sortiertechnik konkurrieren kann.

LITERATUR

- [BK10a] Baier, Georg, und Konstantin Keutner. „Lastabhängiges Routing in Materialflusssystemen“ DE200910033600, (2010).
- [BK10b] Baier, Georg, und Konstantin Keutner. „System zur dezentralen Materialflussteuerung“ DE102009031137, (2010).
- [BtH07] Bullinger, Hans-Jörg, und Michael ten Hompel. „Internet der Dinge.“ Berlin ua (2007).
- [fle14] www.flexlog.de, aufgerufen am 29.09.2014.
- [FSG10] Furmans, Kai, Frank Schönung, und Kevin R. Gue. „Plug-and-Work Material Handling Systems.“ Proceedings of the International Material Handling Research Colloquium. 2010.
- [FSTS14] Furmans, Kai, Zäzilia Seibold, Andreas Trenkle, Thomas Stoll. „Future requirements for small-scaled autonomous transportation systems in production environments“ Proceedings of the 7th International Scientific Symposium on Logistics, 2014.
- [GFSU14] Kevin R. Gue, Kai Furmans, Zäzilia Seibold, and Onur Uludag, GridStore: A Puzzle-Based Storage System with Decentralized Control, IEEE Transactions on Automation Science and Engineering 11:2, 429–438, 2014.
- [GUF12] Kevin R. Gue, Onur Uludağ, and Kai Furmans, A High-Density System for Carton Sequencing, 6th International Scientific Symposium on Logistics, Hamburg, Germany, 2012.
- [KSKtH12] Kirks, T., Stenzel, J., Kamagaew, A., & ten Hompel, M. (2012). Zellulare Transportfahrzeuge für flexible und wandelbare Intralogistiksysteme. Logistics Journal, 2192 (9084), 1.
- [KWH12] Kagermann, Henning, Wolfgang Wahlster, und Johannes Helbig. „Umsetzungsempfehlungen für das Zukunftsprojekt Industrie 4.0–Abschlussbericht des Arbeitskreises Industrie 4.0.“ Forschungsunion im Stifterverband für die Deutsche Wissenschaft. Berlin (2012).
- [Lam78] Lamport, Leslie. "Time, clocks, and the ordering of events in a distributed system." Communications of the ACM 21.7 (1978): 558-565.
- [May09] Mayer, Stephan. "Development of a completely decentralized control system for modular continuous conveyors." Dissertation (2009).
- [MF10] Mayer, Stephan, und Kai Furmans. "Deadlock Prevention in a Completely Decentralized Controlled Materials Flow Systems." Logistics Research 2.3-4 (2010): 147-158.
- [Roi12] Roidl, Moritz. „Agentifizierung in der Intra-logistik“. BVL-Schlussbericht des Vorhaben 16270 (2012).
- [KRSO13] Krühn, T.; Radosavac, M.; Shchekutin, N.; Overmeyer, L. (2013): Decentralized and Dynamic Routing for a Cognitive Conveyor, International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics (AIM), S. 436-441. Wollongong, Australia: IEEE/ASME

Dipl.-Ing. Zäzilia 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).

Erreichbar unter: seibold@kit.edu und furmans@kit.edu