

Kooperative Wegplanung für dynamisch konfigurierbare Transportmodule

Cooperative Routing for Dynamically Configurable Transport Modules

Tobias Krühn, Gerd Heiserich, Leibniz Universität Hannover

Zusammenfassung Kleinskalige multidirektionale Transportmodule sind in der Lage, durch dynamische Gruppenbildung eine Vielzahl unterschiedlicher Transportaufgaben zu erfüllen. Stückgüter können auf einer flächig angeordneten Modulmatrix entlang beliebiger Transportwege bewegt werden. Das in diesem Beitrag vorgestellte Verfahren zur kooperativen Wegplanung basiert auf einem vollständig dezentralen Ansatz, bei dem die einzelnen Elemente durch eine einfache Zustandsübergangsfunktion charakterisiert sind, aus der sich

ein effizientes Verhalten des Gesamtsystems ergibt. ▶▶▶

Summary Small-scaled multidirectional conveyor modules are able to fulfill a variety of different transportation tasks by dynamical formation of groups. Packaged goods can be moved along arbitrary routes on a planar array of modules. The cooperative routing method described in this contribution is based on a completely decentralized approach, in which single elements use a simple state transition function, resulting in an efficient behaviour of the overall system.

Schlagwörter Kleinskalige Transportmodule, dezentrale Steuerung, Grid Conveyor ▶▶▶ **Keywords** Small-scaled conveyor modules, decentralized control, grid conveyor

1 Einleitung

Intralogistiksysteme bieten ein großes Potential zur Rationalisierung und stehen gleichzeitig vor neuen Herausforderungen [5; 13]. Kleiner werdende Losgrößen und Liefermengen und große Schwankungen in den nachgefragten Gütermengen stellen erhebliche Anforderungen an den innerbetrieblichen Materialfluss. Auf der anderen Seite sind Materialflusssysteme heute aus mechanischer und steuerungstechnischer Sicht vergleichsweise unflexibel. Die einzelnen Elemente in Fördersystemen sind auf bestimmte Aufgaben wie das Sortieren, Ausschleusen, Drehen oder Transportieren von Gütern spezialisiert. Des Weiteren werden diese Systeme auf das größte auftretende Stückgut ausgelegt, woraus eine geringere Leistungsfähigkeit für kleinere Güter resultiert. Layout-Änderungen in bestehenden Systemen sind mit einer Rekonfiguration der Steuerung verbunden und verursa-

chen hohe Kosten und Stillstandzeiten. Neue technische Lösungen müssen daher flexibler auf diese neuen Anforderungen reagieren.

In diesem Beitrag werden Steuerungsstrategien für Materialflusssysteme beschrieben, die aus gleichartigen, kleinskaligen Transportmodulen aufgebaut sind. Das Ziel ist es, mit Hilfe dieser Module Materialflusssysteme aufzubauen und zu betreiben, die eine höchstmögliche Flexibilität hinsichtlich des Anlagenlayouts und des Durchsatzes bieten.

2 Kleinskalige Fördermodule

Ein Konzept für ein hochflexibles Transportsystem wird in [10] vorgestellt. Es basiert auf dem Ansatz, die fördertechnischen Grundfunktionen des Bewegens, Pufferns und der Orientierungsänderung auf ein und dasselbe Grundelement zurückzuführen. Ein solches Ele-

ment muss in der Lage sein, aufliegende Stückgüter in jede beliebige Richtung in der horizontalen Ebene zu beschleunigen. Diese Anforderungen werden durch kleinskalige, multidirektionale Fördermodule umgesetzt.

In [9] wird eine mechanische Umsetzung des Konzepts in Form einzelner Schwenkrollen gezeigt. Jede dieser Rollen verfügt über einen eigenen Antrieb und eine eigene Steuerlogik. Erste Prototypen demonstrieren die technische Machbarkeit. Jedes Modul ist mit einem Lichttaster ausgestattet, der den aktuellen Belegungszustand ermittelt, und kann über eine Datenschnittstelle mit seinen direkten Nachbarn kommunizieren. Die derzeit entwickelten Module haben eine Grundfläche von $7\text{ cm} \times 7\text{ cm}$ und sind ca. 20 cm hoch (Bild 1).

Die Identifikation einer Transporteinheit erfolgt bei Eintritt in das System durch ein Auto-ID-Verfahren. Eine erneute Identifikation während des Transports über die Matrix ist nicht erforderlich, da die bei Eintritt in das System übergebenen Informationen parallel zur physischen Bewegung von Transportmodul zu Transportmodul über die Datenschnittstelle weitergegeben werden.

Durch Verknüpfung einer großen Anzahl derartiger Module zu einer Modulmatrix wird es möglich, komplexe Materialflussaufgaben zu lösen: Transporteinheiten können auf beliebigen Bahnen in der horizontalen Ebene bewegt werden, wobei gleichzeitig eine Änderung der Orientierung möglich ist (Bild 2). Somit kann eine solche flächige Anordnung von Modulen als Sortiersystem oder auch als Puffer eingesetzt werden. Je nach Größe der Transporteinheiten können diese auch nebeneinander transportiert werden, um das Gesamtsystem besser auszunutzen.

Der Einsatz derartiger Module in großen Stückzahlen ermöglicht eine Massenproduktion und somit geringe Herstellungskosten pro Modul. Da alle Module identisch sind, können sie in der Gesamtanlage einfach ausgetauscht werden. Ebenso ist die Erweiterung einer Anordnung um zusätzliche Module möglich. Die dezentrale Organisation der Modulmatrix ermöglicht Layout-Änderungen, ohne dass die Anpassung einer zentralen Steuerung erforderlich wird. Die Mo-

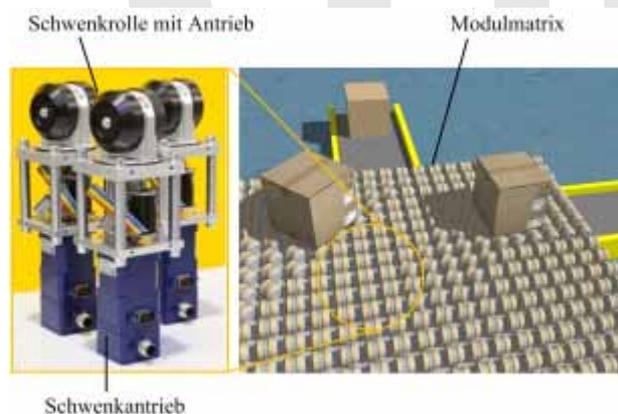


Bild 1 Kleinskaliges Fördermodul in der Modulmatrix.

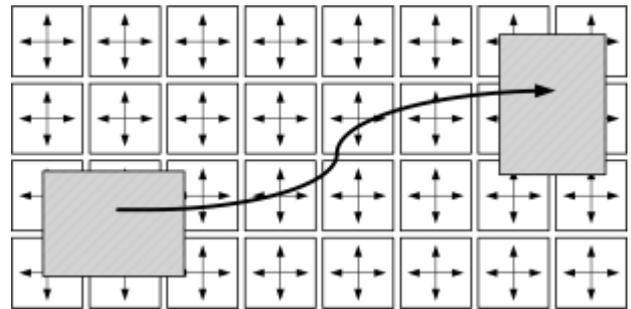


Bild 2 Bewegung einer Transporteinheit auf der Modulmatrix.

dule bieten somit die mechanischen Voraussetzungen für höchstmögliche Flexibilität bei der Gestaltung von Materialflusssystemen und sind in der Lage, flexibel auf sich ändernde Anforderungen zu reagieren.

3 Das Steuerungskonzept – Vom Grid Computing zum Grid Conveyor

Neben der Konstruktion der kleinskaligen Fördermodule stellt die Steuerung eine Herausforderung dar. Eine aus vielen Modulen zusammengesetzte Gesamtanordnung besitzt eine sehr hohe Anzahl von Freiheitsgraden, die eine zentrale Steuerung schwer oder gar nicht realisierbar machen. Zudem stellt sich aufgrund des Rechenaufwands und der Systemkomplexität die Frage nach der Skalierbarkeit einer zentralen Steuerung. Nimmt man für ein einzelnes Modul zur Vereinfachung an, dass die Förderrolle nur in vier verschiedene Richtungen weisen und der Vortrieb ein- oder ausgeschaltet sein kann, so kann ein Modul insgesamt acht verschiedene Zustände annehmen. Werden nun m Module zu einer Matrix verschaltet, ergibt sich ein Zustandsraum mit 8^m Elementen, sodass bereits für eine geringe Anzahl von Modulen das System nicht mehr diskret modellierbar ist.

Eine Alternative ist, jedes Modul mit einer eigenen Mikrosteuerung auszustatten und so eine dezentrale Steuerung zu implementieren. Damit das System skalierbar bleibt, darf jedes Modul nur mit Elementen in seiner nahen Umgebung kommunizieren und nur über lokales Wissen verfügen. Diese Einschränkung führt darüber hinaus dazu, dass die Beschreibungscomplexität jedes einzelnen Moduls sinkt und nicht von der Größe des Gesamtsystems abhängt. Bestehende dezentrale Systeme – wie beispielsweise das Internet – zeigen, dass dieser Ansatz erfolgreich umgesetzt werden kann. Durch kooperatives Verhalten der Module untereinander entsteht trotz der Einfachheit der einzelnen Elemente ein komplexes und zielgerichtetes Systemverhalten.

Aus Nutzersicht ist das Modulsystem einfach zu bedienen. Es werden Förderer zusammengeschlossen und bieten eine Transportleistung an. Sofern genügend Ressourcen im Modulsystem zur Verfügung stehen, werden gestellte Aufgaben vom System gelöst, ohne dass der Nutzer weiß, wie dies im Einzelnen geschieht. Je nach Systemauslastung werden die Transportaufgaben dynamisch im Modulsystem verteilt. In der Computertechnik

werden ähnliche Verfahren als Grid-Computing bezeichnet. Der Ursprung leitet sich vom Begriff des Power Grid (Stromnetz) ab, aus dem jeder Nutzer auf einfache Art und Weise Leistung beziehen kann, ohne sich mit den dahinter stehenden Mechanismen zu beschäftigen [3].

Der dezentrale Ansatz bietet neben der Skalierbarkeit weitere Vorteile gegenüber zentral gesteuerten Systemen: Bei einem Ausfall einer beliebigen Komponente bleibt das System als Ganzes lauffähig. Fällt dagegen bei einem zentral gesteuerten System die Steuereinheit aus, führt dies zu einem Versagen des Gesamtsystems. Des Weiteren muss eine zentrale Steuerung manuell angepasst werden, falls das Fördersystem aufgrund neuer Anforderungen wie beispielsweise höherem Durchsatz verändert wird. Das dezentrale System kommt in diesem Fall ohne eine manuelle Veränderung der Steuerungssoftware aus.

Neben den genannten Vorteilen ergeben sich in einem dezentralen System auch bestimmte Einschränkungen wie der fehlende globale Zugriff auf Informationen und die Notwendigkeit der Konfliktvermeidung und -behebung zwischen Modulen. Die Algorithmen zur Steuerung der Modulmatrix müssen dies berücksichtigen. Die zu entwickelnden Algorithmen werden sich daher an bereits existierenden Lösungen wie z. B. dem Routing in Kommunikationsnetzwerken orientieren.

Im Folgenden wird beschrieben, wie eine dezentrale Steuerung einer Modulmatrix von kleinskaligen Fördermodulen realisiert werden kann. Hierbei kann nach Aufgaben auf verschiedenen Ebenen unterschieden werden (vgl. Bild 3): Auf der globalen Ebene werden für die in die Modulmatrix eingeschleusten Transporteinheiten die jeweiligen Transportziele vorgegeben. Anschließend muss für jede Transporteinheit ein Pfad durch die Modulmatrix geplant werden. Die Lösung dieser Aufgabenstellung betrifft potentiell alle vorhandenen Transportmodule. In einer lokal begrenzten Umgebung um eine Transporteinheit, dem sogenannten Nahfeld, müssen Aufgaben wie Kollisionsvermeidung und die verklemmungsfreie Einfahrt in Kreuzungen gelöst werden. Auf der Ebene der Einzelmodule schließlich müssen sich die Module, die die Transporteinheit tatsächlich tragen, zu gemeinsam agie-

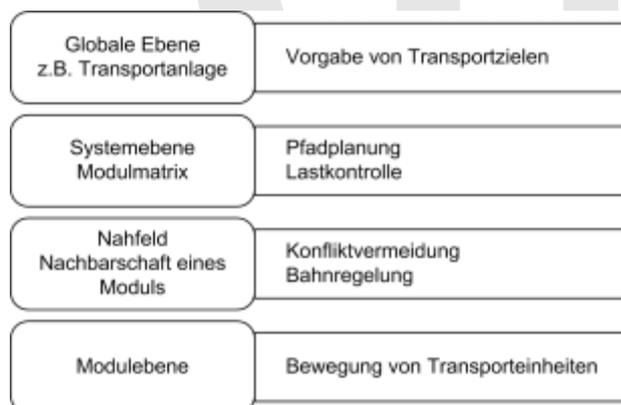


Bild 3 Aufgaben auf verschiedenen Hierarchieebenen.

renden Gruppen zusammenfinden und eine synchrone Bahnsteuerung umsetzen.

Die zu implementierende Steuerung ist prinzipiell unabhängig von den physischen Abmessungen der Transportmodule. So kann das gleiche Steuerungskonzept sowohl für großes Stückgut in Europaletten-Größe als auch für Kleinladungsträger verwendet werden.

4 Dezentrale Steuerung des Modulsystems

Das hier vorgestellte dezentrale Steuerungskonzept basiert auf dem Ansatz, eine Modulmatrix als zellulären Automaten aufzufassen und zu steuern. Ein zellulärer Automat ist ein System aus gleichartigen Zellen, die in einem festen Muster angeordnet sind, beispielsweise in einem zweidimensionalen Gitter mit quadratischen Zellen [6; 14]. Das System ist zeitdiskret und der Zustand jeder Zelle zum Zeitpunkt $t + 1$ hängt von den Zuständen der Nachbarzellen zum Zeitpunkt t und weiteren Eingangsgrößen, wie zum Beispiel durch einen Sensor erfasste Messdaten, ab. Jede Zelle folgt also einer Übergangsfunktion δ mit der Zustandsmenge S , der Nachbarschaft N und der Menge der Eingangsgrößen U :

$$\delta : S \times S^{|N|} \times U \rightarrow S. \quad (1)$$

Die Nachbarschaft einer Zelle kann hierbei grundsätzlich beliebig definiert werden. Häufig werden als Nachbarschaft die direkt angrenzenden Zellen gewählt, aber auch eine Erweiterung auf eine größere Fläche ist denkbar. Bild 4 zeigt entsprechende Beispiele.

In bekannten zellulären Automaten wie dem Game of Life entsteht ein komplexes Systemverhalten aus wenigen, einfachen Regeln. Aus vier Regeln entsteht hierbei ein Automat, der bereits Turing-vollständig ist. Mit der richtigen Startkonfiguration lässt sich damit prinzipiell jedes Problem lösen, dass sich mit einem Computer berechnen lässt. [6]

Ein weiteres verwandtes Forschungsfeld ist das Schwarmverhalten von Individuen. Auch hier kann aus teils sehr einfachen Regeln komplexes Verhalten in Gruppen von Individuen entstehen. In [11] wird das Schwarmverhalten von Vogel- oder Fischeschwärmen beschrieben, wobei jedes Individuum nur drei einfachen Regeln folgt. Das resultierende Verhalten des Schwarms ist im Gegensatz zu den Regeln der einzelnen Individuen sehr komplex.

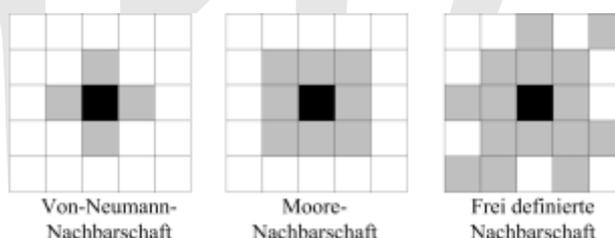


Bild 4 Nachbarschaften in zellulären Automaten: Die betrachtete Zelle ist schwarz, die Nachbarzellen sind grau gefärbt.

Die Beispiele zeigen, dass es möglich ist, ein komplexes Systemverhalten mit sehr wenigen, einfachen Regeln zu erzeugen. Das Ziel ist es, einen Regelsatz zu finden, der für das Modulsystem das gewünschte Verhalten erzeugt.

Die durchgeführten Untersuchungen haben sich bislang auf die unterste Ebene der Zusammenarbeit von Modulen konzentriert. Auf dieser Ebene findet eine Synchronisation der Module statt, um eine Transporteinheit gezielt zu bewegen. Hierzu bilden mehrere Module jeweils eine Gruppe, die durch den Umriss der Transporteinheit definiert wird und wählen gemeinsam die auszuführende Aktion (vgl. Bild 5). Hierbei entstehen zwei Kernaufgaben: Die Feststellung der Gruppenzugehörigkeit und die Einigung auf eine gemeinsame Aktion.

Die Mitgliedschaft eines Moduls zu einer Gruppe wird definiert über die Weitergabe der Transporteinheit-Identifikation (*ID*) von Modul zu Modul und der Belegungserkennung mit Hilfe des moduleigenen Belegungssensors. Alle Zellen, die aneinander grenzen und die gleiche *ID* aufweisen, gehören zu einer Gruppe. Die *ID* in einem Zeitschritt wird mit folgenden Regeln von einem Modul angenommen:

- Letzte *ID*, falls der eigene Sensor weiterhin belegt ist, anderenfalls
- Die *ID* einer beliebigen Zelle *C* in der Von-Neumann-Nachbarschaft, falls der Sensor von *C* belegt ist und *C* eine *ID* hat, anderenfalls
- Die *ID* einer beliebigen Zelle *C* in der Moore-Nachbarschaft, falls der Sensor von *C* belegt ist und *C* eine *ID* hat, anderenfalls
- Keine *ID*.

Dadurch, dass zuerst die Von-Neumann-Nachbarschaft und anschließend deren Obermenge, die Moore-Nachbarschaft, verwendet wird, ergibt sich eine Priorisierung bei der Zuweisung: Zellen aus der Von-Neumann-Nachbarschaft werden bevorzugt.

Zur Berechnung der Transportrichtung einer Transporteinheit berechnet jedes Modul einen Skalar. Der

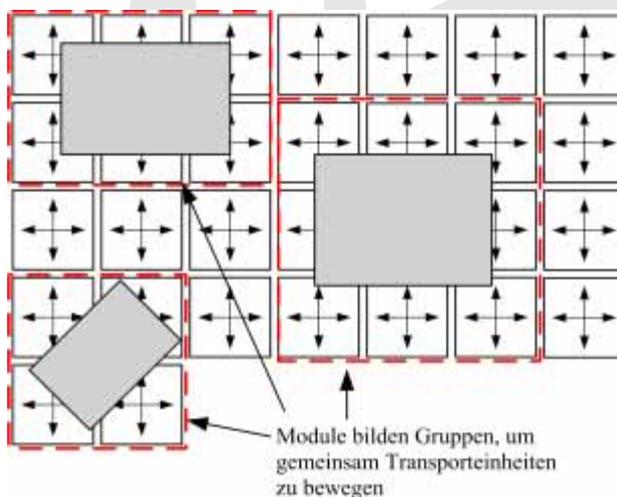


Bild 5 Gruppenbildung.

Skalar hat für die Modulmatrix eine ähnliche Bedeutung wie die geschätzten Restkosten bis zum Ziel in Routingalgorithmen für Kommunikationsnetze, weswegen der Skalarwert in einem Modul im Folgenden auch als dessen Restkosten bezeichnet wird.

Die Skalare der Module können als Stützstellen eines Skalarfeldes betrachtet werden. Im Falle der Modulmatrix ist der Gradient auf diesem Feld nur in den Stützstellen definiert. Im Gegensatz zur kontinuierlichen Definition des Feldbegriffs wird in diesem Artikel der Feldbegriff also nur auf die berechneten Stützstellen bezogen. Für n mögliche Ziele werden in der Modulmatrix n Skalarfelder φ_i mit $i \in \{1..n\}$ definiert, auf denen die Transporteinheiten bewegt werden.

Die Restkosten d_i werden in jeder Zelle und in jedem Zeitschritt berechnet durch Gleichung (2). Der Term $d_{i,j,t-1}$ mit $i \in \{1..n\}$ und $j \in \{1..|N|\}$ stellt dabei die Restkosten des Nachbarn j zum Zeitpunkt $t-1$ dar. Der Term p_{ij} definiert zusätzliche Kosten, die durch die Bewegung von mehreren Transporteinheiten im Feld verursacht werden. Der Parameter \underline{r}_j ist der Richtungsvektor vom gerade betrachteten Modul zum Nachbarn j , φ_i das Skalarfeld für das betrachtete Ziel i . Die Funktion p_{ij} kann beispielsweise so definiert werden, dass keine zusätzlichen Kosten entstehen, sofern \underline{r}_j in die Richtung einer bereits reservierten Route zeigt und sehr hohe Kosten entstehen, falls \underline{r}_j in die entgegengesetzte Richtung einer bereits reservierten Route weist. Dadurch entsteht eine Kopplung zwischen der Bewegung aller Transporteinheiten im System.

$$d_{i,t} = \min_j (d_{i,j,t-1} + p_{ij}(\underline{r}_j, \varphi_i)) \quad (2)$$

Insbesondere wird hiermit der Fall berücksichtigt, dass eine Transporteinheit einen Weg für andere Einheiten blockiert. Bewegt sich eine Transporteinheit auf einem Streckenabschnitt, werden die Kosten für entgegenkommende Transporteinheiten soweit erhöht, dass für diese ein anderer Weg günstiger erscheint. Im Gegensatz dazu werden die Kosten für nachfolgende Transporteinheiten verringert. Dies führt dazu, dass Einheiten, die zum gleichen Ziel transportiert werden müssen, bevorzugt den gleichen Pfad wählen. Um diesen Effekt zu verstärken und zu erhalten, nachdem Transporteinheiten aus dem System entfernt werden, bekommen die Module eine Art Gedächtnis, indem die Bewertung eines Moduls über die letzten Zeitschritte gemittelt wird. Weitere Auswirkungen der Einführung eines Gedächtnisses in Zellulären Automaten – wie z. B. die Begünstigung emergenten Verhaltens – werden in [1] beschrieben.

Je nach Teilaufgabe werden verschiedene Regeln und auch verschiedene Nachbarschaften verwendet. Zur Wahl der Bewegungsrichtung der Module einer Gruppe wird die Nachbarschaft N_T verwendet. Diese wird definiert durch alle Module, die zu einer Gruppe gehören, und verändert sich in jedem Zeitschritt. Für Module, die zu

einem Zeitschritt keiner Gruppe angehören, ist N_T nicht definiert.

Die Wahl der Bewegungsrichtung der Transporteinheit geschieht mittels eines Gradientenverfahrens im Skalarfeld φ_i . Dabei ist der Gradient wie oben beschrieben nur zwischen den berechneten Stützstellen definiert. Hierzu summieren alle in einer Gruppe bzw. in der Nachbarschaft N_T zusammengefassten Module die Gradienten \underline{r} in jedem Modul auf und begrenzen den resultierenden Vektor \underline{r}_o anhand von Randbedingungen wie Systemgrenzen oder Hindernissen in Form von anderen Transporteinheiten. Der resultierende Vektor zeigt in die Richtung, in die die Transporteinheit nun bewegt wird:

$$\underline{r}_o = \sum_{N_T} \underline{r} \quad (3)$$

Der Zustand $\underline{s} \in S$ jedes Moduls setzt sich folglich zusammen aus einer Kostenabschätzung $d_i \in \mathbb{R}$ für alle n bekannten Transportziele, der Identifikation ($ID \in \mathbb{N}$) der derzeit getragenen Transporteinheit, einem Richtungsvektor $\underline{r}_o \in \mathbb{R}^2$, dem Gradienten $\underline{r} \in \mathbb{R}^2$ und der Transportgeschwindigkeit $v \in \mathbb{R}$, mit der der Vorschub einer Transporteinheit erfolgt:

$$\underline{s} = (d_1, d_2, \dots, d_n, ID, v, \underline{r}_o, \underline{r}) \quad (4)$$

In Simulationen konnte gezeigt werden, dass sich ein System aus den beschriebenen Modulen stabil verhält [7]. Insbesondere die Verringerung von Kosten für nachfolgende Einheiten in die gleiche Richtung führt dazu, dass sich nach einiger Zeit ein stabiler Zustand des Systems einstellt. Die beschriebenen Regeln führen allerdings keine Pfadplanung durch, bevor Transporteinheiten durch das System geführt werden. Hierdurch sind Verklemmungen möglich. Um diese zu vermeiden, sind grundsätzlich zwei Wege möglich. Entweder Verklemmungen werden erkannt und gelöst, oder sie werden durch vorherige Pfadplanung und Reservierung verhindert. Letzteres ist effizienter und der zu bevorzugende Weg.

5 Reservierung von Transportwegen

Die beschriebenen Regeln sind von üblichen Routingalgorithmen aus verbindungslosen Kommunikationsnetzen abgeleitet. Hierbei wird in jedem Verbindungsknoten neu entschieden, in welche Richtung ein Datenpaket weitergeleitet wird [12]. Der physische Transport von Gegenständen weist allerdings einige wesentliche Unterschiede auf. So können in Kommunikationsnetzen Datenpakete nach Fehlern verworfen oder bei einer Überfüllung eines Puffers gelöscht werden. Beim Transport von Gegenständen ist durch deren Wechselwirkung miteinander darüber hinaus die Möglichkeit der physischen Verklemmung gegeben. Bild 6 zeigt zwei Beispiele. Insbesondere im Fall der kleinskaligen Fördermodule ist es möglich, dass ein Pfad existiert, die zu bewegende Transporteinheit allerdings zu groß ist, diesen zu nutzen.

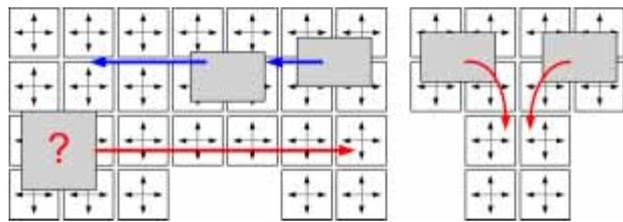


Bild 6 Probleme beim Routing von Transporteinheiten.

Darüber hinaus werden Verklemmungen an Kreuzungen möglich, die in üblichen Fördersystemen so nicht vorkommen. Ein weiterer Unterschied zu den meisten Kommunikationsnetzen ist, dass die Pfade im Fördersystem zwar grundsätzlich in zwei Richtungen verwendet werden können, sobald eine Transporteinheit aber einen Streckenabschnitt belegt, kann dieser von weiteren Transporteinheiten nur in die gleiche Richtung benutzt werden.

Diese Beispiele zeigen, dass eine Pfadplanung und -reservierung notwendig ist. In Kommunikationsnetzen gibt es Anwendungen, in denen Routen für bestimmte Bandbreiten reserviert werden. Hierzu können sogenannte virtuelle Verbindungen implementiert werden, die auf einem Pfad Netzeigenschaften wie Durchsatz oder Latenzzeiten garantieren. Zum Verbindungsaufbau wird ein Datenpaket von der Quelle zum Ziel gesendet. Die passierten Knoten merken sich den Reservierungsversuch. Kommt das Datenpaket am Ziel an, antwortet dieses mit einem Bestätigungspaket, dass auf der gleichen Route zurück gesendet wird. Beispiele für verbindungsorientierte Kommunikationssysteme sind ATM und ISDN. Eine Adaptierung von verbindungsorientiertem Routing für Förderanlagen zeigt der Flexförderer [8].

Im Fall der kleinskaligen Fördermodule kommt als weitere Aufgabe hinzu, dass eine Transporteinheit im Gegensatz zu Datenpaketen im Kommunikationsnetz mehrere Knoten gleichzeitig belegt. Das Routing von Transporteinheiten kann daher nicht unabhängig von ihrer physischen Ausdehnung geschehen. Herkömmliche Routingverfahren sind also nicht direkt übertragbar. Neben Parametern wie der Entfernung zum Zielort und der Auslastung eines Moduls, muss die zu implementierende Routing-Metrik den verfügbaren Platz für Transporteinheiten berücksichtigen. Wird eine Route geplant, wird nicht nur eine logische Verbindung hergestellt, sondern es wird entlang des Pfades auch die nötige Ausdehnung des Pfades berücksichtigt und reserviert. Weitere Routen können nun so geplant werden, dass es zu möglichst wenigen Konflikten zwischen Transporteinheiten kommt. Mit diesem Verfahren können in einem System Transporteinheiten verschiedener Größe effizient transportiert werden. Kleine Transporteinheiten können beispielsweise nebeneinander transportiert werden, während größere nur hintereinander eine Strecke passieren können. Analog ist es möglich, dass eine genügend breite Förderstrecke von kleinen Transporteinheiten in verschiedene Richtungen gleichzeitig verwendet wird.

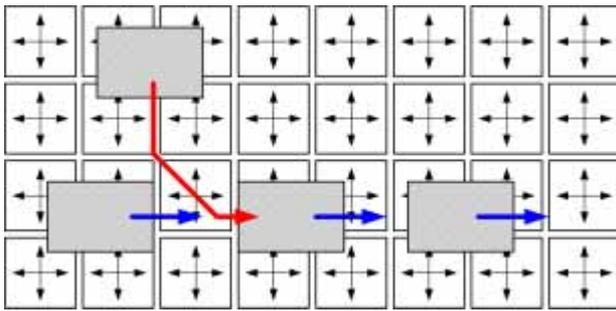


Bild 7 Einfügen einer Transporteinheit in einen Strom.

Untersucht werden muss hierbei der Einfluss der begrenzten Ausbreitungsgeschwindigkeit von Informationen im dezentralen Modulsystem. Wird eine Route reserviert, muss dies den Nachbarn mitgeteilt werden. Diese können anschließend, wie in Gleichung (2) beschrieben, die Metrik anhand der reservierten Routen berechnen. Sind die Transporteinheiten im Vergleich zu den Modulen sehr groß und die zu reservierende Route entsprechend breit, ist dieser Effekt nicht zu vernachlässigen.

Um den zur Verfügung stehenden Raum möglichst gut zu nutzen, müssen Routen auf der einen Seite möglichst überschneidungsfrei geplant werden, auf der anderen Seite darf aber kein Platz verschwendet werden. So ist es beispielsweise zu vermeiden, dass Routen so geplant werden, dass zwischen ihnen einzelne Module frei bleiben und nicht für weitere Routen nutzbar sind. Dies wird von der Routing-Metrik berücksichtigt, sodass geplante und derzeit in der Planung befindliche Pfade eine Anziehungskraft aufeinander ausüben. Derzeit bekannte Routing-Metriken beschäftigen sich mit Fragen der Fairness, Wartezeiten, Auslastung und Kosten [2], aber nicht mit Problemen wie dem physischen Platzbedarf von Transporteinheiten.

Derzeit werden verschiedene Metriken entwickelt, um die genannten Aufgaben zu lösen. Kernfragen sind hierbei die Bewertung des zur Verfügung stehenden Platzes in der Routing-Metrik, die Feststellung und Bewertung von Überschneidungen von Routen und die Behandlung verschiedener Größen von Transporteinheiten.

Neben der Entwicklung passender Metriken ist dabei die effiziente Verteilung von Informationen im Modulsystem von Interesse. Werden mehrere Routen gleichzeitig im System geplant, darf es hierbei nicht zu Verklemmungen oder Widersprüchen kommen. Bisherige Simulationen zeigen, dass die entwickelten Verfahren grundsätzlich funktionieren. Offene Fragen ergeben sich beispielsweise beim Multiplexen von Paketströmen (Bild 7) und bei der Umplanung von bestehenden Routen.

6 Schnittstellen zu anderen Systemen

Beim Betrieb von Intralogistiksystemen müssen die kleinskaligen Fördermodule mit anderen Teilsystemen interagieren. Auch in Hinblick auf ein Einführungsze-

nario dieser Technologie müssen sich die Fördermodule in bestehende Systeme integrieren lassen. Im ersten Schritt lassen sich die Module beispielsweise als Weichen oder Ein- und Ausschleusungspunkte in bestehenden Systemen verwenden (Bild 9). Aufgrund der wenigen Informationen (Ziel der Transporteinheit), die die Schnittstelle zwischen dem Modulsystem und der Umgebung benötigt, ist die softwareseitige Kopplung einfach zu realisieren.

Zu jeder Transporteinheit, die sich auf der Modulmatrix bewegt, entsteht im Modulsystem ein Informationsschatten (Bild 8), der zusammen mit der Transporteinheit von Modul zu Modul weiter gegeben wird. Alle Module, die gemeinsam eine Transporteinheit tragen, erhalten dabei die gleichen Informationen. Zum Betrieb der Modulmatrix ist lediglich das Ziel der Transporteinheit und eine Identifikationsnummer der Einheit notwendig, die zur Unterscheidung der Einheiten voneinander dient. Darüber hinaus können der Modulmatrix zusammen mit

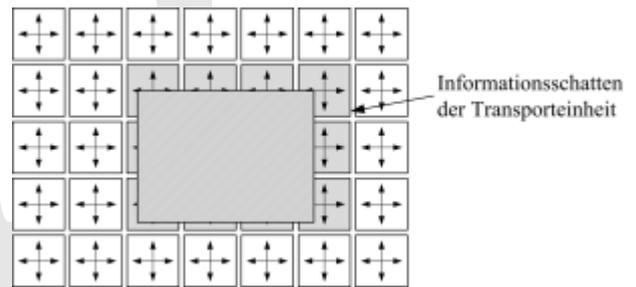


Bild 8 Informationsschatten einer Transporteinheit auf der Modulmatrix.

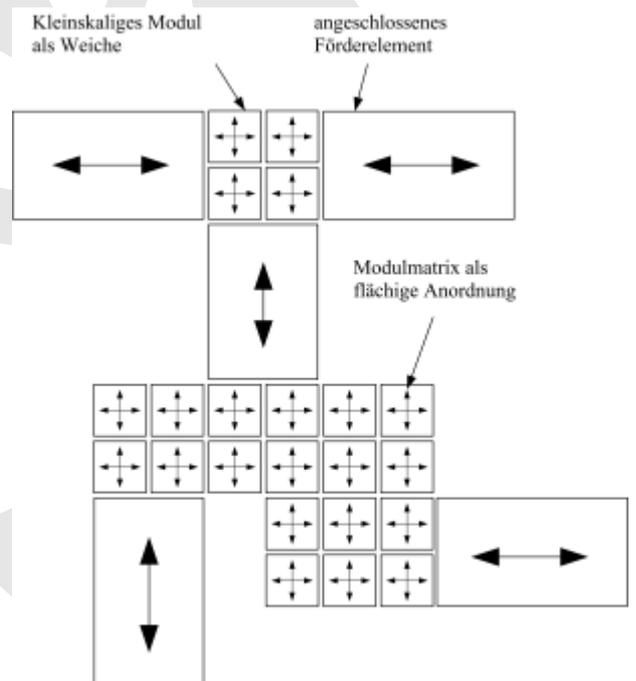


Bild 9 Integration von kleinskaligen Transportmodulen in existierende Fördertechnik.

einer Transporteinheit am Einschleusepunkt beliebige Informationen wie das Gewicht übergeben werden, die dem umgebenen System am Ausschleusepunkt wieder zur Verfügung gestellt werden. Die Informationen werden dabei nicht auf der Transporteinheit selbst gespeichert, wie beispielsweise im Internet der Dinge [4], sondern durch das Modulsystem weitergegeben. Das Modulsystem stellt an die Transporteinheit also nicht die Anforderung, dass auf ihr Daten gespeichert werden müssen. Notwendig ist lediglich ein Unterscheidungsmerkmal wie die *ID* und das Wissen über den Zielort.

Im nächsten Schritt ist die Verwendung der Module für größere Flächen möglich (Bild 9). Hiermit können Transporteinheiten umsortiert, gedreht und gepuffert werden. Des Weiteren ist die dynamische Verteilung von Transporteinheiten auf verschiedene Transportwege möglich, beispielsweise um Lastschwankungen zu kompensieren. Eine flächige Anordnung der Module bietet hierbei größtmögliche Flexibilität.

7 Zusammenfassung und Ausblick

In diesem Beitrag wurde ein vollständig dezentrales Steuerungskonzept für Materialflusssysteme vorgestellt, die aus kleinskaligen multidirektionalen Transportmodulen zusammengesetzt sind. Eine solche flächige Anordnung wird als Modulmatrix bezeichnet und mit Hilfe eines Zustandsvektors und einer Übergangsfunktion für jedes Modul abgebildet, wobei die Übergangsfunktion in Analogie zum Konzept eines zellulären Automaten nur vom Zustand eines Moduls selbst und dem Zustand der benachbarten Module abhängt.

Eine wesentliche Aufgabe der Steuerung ist die Ermittlung von Pfaden für Transporteinheiten durch die Modulmatrix. Der wesentliche Unterschied zum Routing von Datenpaketen in Kommunikationsnetzen ist die physische Ausdehnung der Transporteinheiten. Daraus resultiert, dass sich zum Transport einer Transporteinheit jeweils mehrere Module zu Gruppen zusammenfinden und gemeinsam agieren müssen. Dieser Beitrag zeigt, dass die auftretenden Probleme mittels einer dezentralen Steuerung, in der jedes Element einfachen Regeln folgt, lösbar sind. Hierbei entsteht komplexes und zielgerichtetes Systemverhalten aus wenigen und vergleichsweise einfachen Regeln, die nur lokal vorhandenes Wissen über die Umgebung verwenden. Die dezentrale Steuerung ist daher auch für Systeme mit einer großen Anzahl von Transportmodulen skalierbar.

Literatur

- [1] R. Alonso-Sanz: *Cellular automata with memory*. Philadelphia, Pa.: Ed. des Archives Contemporaines; Old City Publ., 2008 – ISBN 978-2-914610-80-3.
- [2] R. Baumann, S. Heimlicher, M. Strasser, A. Weibel: *A Survey on Routing Metrics*. ETH-Zentrum, Switzerland, 2007.

- [3] T. Barth, A. Schüll: *Grid Computing: Konzepte – Technologien – Anwendungen*. Friedr. Vieweg & Sohn Verlag Wiesbaden, 2006 – ISBN 978-3-8348-9101-3.
- [4] H. Bullinger, M. ten Hompel: *Internet der Dinge*. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2007 – ISBN 978-3-540-36733-8.
- [5] W.M. Cox, R. Alm: *The right stuff: America's move to mass customization*. In: Federal Reserve Bank of Dallas, Annual Report, 1998, S. 3–26.
- [6] A. Ilachinski: *Cellular automata: A discrete universe*. Reprinted. World Scientific Singapore, 2002 – ISBN 981-02-4623-4.
- [7] T. Krühn, S. Falkenberg, L. Overmeyer: *Decentralized control for small-scaled conveyor modules with cellular automata*. IEEE International Conference on Automation and Logistics (ICAL), 2010, S. 237–242
- [8] S. Mayer, K. Furmans (Hrsg.): *Development of a completely decentralized control system for modular continuous conveyors*. Universitätsverlag Karlsruhe. In: Wissenschaftliche Berichte des Institutes für Fördertechnik und Logistiksysteme der Universität Karlsruhe (TH), 2009.
- [9] L. Overmeyer, S. Falkenberg, T. Krühn, K. Ventz: *Kleinskalige, multidirektionale Transportmodule für den Einsatz in der Intralogistik*. In: 19. Deutscher Materialfluss-Kongress, VDI-Berichte 2094, 2010, S. 231–248.
- [10] L. Overmeyer, G. Heiserich, S. Falkenberg, A. Jungk: *Automatische Konfiguration und Optimierung von Materialflusssystemen durch kognitive Logistikmodule*. In: 18. Deutscher Materialfluss-Kongress, VDI-Berichte 2066, 2009, S. 197–208.
- [11] C.W. Reynolds: *Flocks, Herds, and Schools: A Distributed Behavioral Model*. In: Special Interest Group on Graphics and Interactive Techniques (SIGGRAPH), 21(4), 1987, S. 25–34.
- [12] A.S. Tanenbaum: *Computernetzwerke*. 4., überarbeitete Auflage, Pearson, München, 2009 – ISBN 3-8273-7046-9.
- [13] M. Wilke: *Dezentral steuern, zentral kommunizieren – Ein Steuerungskonzept für wandelbare Materialflusssysteme*. Logistics Journal, 2008.
- [14] S. Wolfram: *Theory and Application of Cellular Automata*. In: Advanced series on complex systems 1, World Scientific Publ. Singapore, 1986 – ISBN 9971-5-0123-6.

Manuskripteingang: 15. Juli 2010



Dipl.-Ing. Tobias Krühn arbeitet als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Transport- und Automatisierungstechnik mit dem Schwerpunkt der dezentralen Steuerung von kleinskaligen Fördermodulen.

Adresse: Leibniz Universität Hannover, Institut für Transport- und Automatisierungstechnik, D-30823 Garbsen,
E-Mail: tobias.kruehn@ita.uni-hannover.de



Dipl.-Ing. Gerd Heiserich arbeitet als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Transport- und Automatisierungstechnik im Bereich kooperierender adaptiver Systeme in der Intralogistik.

Adresse: Leibniz Universität Hannover, Institut für Transport- und Automatisierungstechnik, D-30823 Garbsen,
E-Mail: gerd.heiserich@ita.uni-hannover.de