

Modellierung und Steuerung kleinskaliger Fördermodule mittels Zellulärer Automaten

*Dipl.-Ing. Tobias Krühn, Dipl.-Ing. Gerd Heiserich,
Prof. Dr.-Ing. Ludger Overmeyer
Leibniz Universität Hannover
Institut für Transport- und Automatisierungstechnik*

Abstract: Kleinskalige, multidirektionale Transportmodule bieten ein Höchstmaß an Flexibilität in Förderanlagen. Werden mehrere dieser Module zu einer Matrix verbunden, beherrscht die Matrix alle Funktionen herkömmlicher Stückgutförderer. Funktionalitäten wie das Sortieren, Transportieren oder Drehen der Transporteinheiten können an jedem beliebigen Ort im System realisiert werden. Zur Lösung komplexer Transportaufgaben müssen sich mehrere Module zu Gruppen zusammenschließen und kooperieren.

Um die Herausforderung der Steuerung dieser Modulmatrix zu bewältigen, wird das System als Zellulärer Automat modelliert. Jedes Modul entspricht einer Zelle und agiert aufgrund eigener Sensorinformationen und der Zustände benachbarter Module. Die Regeln jeder einzelnen Zelle sind dabei einfach, erzeugen in der Summe aber ein komplexes und zielgerichtetes Verhalten des Gesamtsystems. Durch die Modellierung als Zellulärer Automat wird eine vollständig dezentrale und selbstorganisierende Steuerung erreicht und so der Konfigurationsaufwand minimiert.

1 Einleitung

Intralogistiksysteme stehen heute vor neuen Herausforderungen. Kleiner werdende Losgrößen und Liefermengen durch zunehmende Individualisierung der Produkte (Mass Customization) stellen erhebliche Anforderungen an den innerbetrieblichen Materialfluss [Cox98, Wil08]. Gleichzeitig 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. Eine kurzfristige Anpassung des Layouts einer Förderanlage verursacht hohe Kosten und Stillstandzeiten. Darüber hinaus sind Layout-Änderungen bestehender Systeme mit einer Rekonfiguration der Steuerung verbunden. Neue technische Lösungen müssen daher flexibler auf neue Anforderungen reagieren.

In diesem Beitrag werden Steuerungsstrategien für Materialflusssysteme beschrieben, die aus gleichartigen, kleinskaligen Transportmodulen aufgebaut sind. Die Förderelemente sind hierbei deutlich kleiner als die zu transportierenden Güter. Das Ziel ist es, mit Hilfe dieser Module Materialflusssysteme aufzubauen und zu betreiben, die eine höchstmögliche Flexibilität hinsichtlich des Anlagenlayouts und des Durchsatzes bieten. Dieser Beitrag beschreibt, wie Routingstrategien auf das Problem der

Steuerung der Module angepasst werden können und wo wesentliche Unterschiede zum Routing in Kommunikationsnetzen existieren.

2 Kleinskalige, multidirektionale Fördermodule

Ein Konzept für ein hochflexibles Transportsystem wird in [Ove09] vorgestellt. Es basiert auf dem Ansatz, die fördertechnischen Grundfunktionen des Bewegens, Pufferns und der Orientierungsänderung auf ein und dasselbe Grundelement zurückzuführen. Ein solches Element muss in der Lage sein, aufliegende Stückgüter in jede beliebige Richtung in der horizontalen Ebene zu beschleunigen. Diese Anforderungen werden hier durch kleinskalige, multidirektionale Fördermodule umgesetzt.

In [Ove10] 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 cm x 7 cm und sind ca. 20 cm hoch (Abbildung 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.

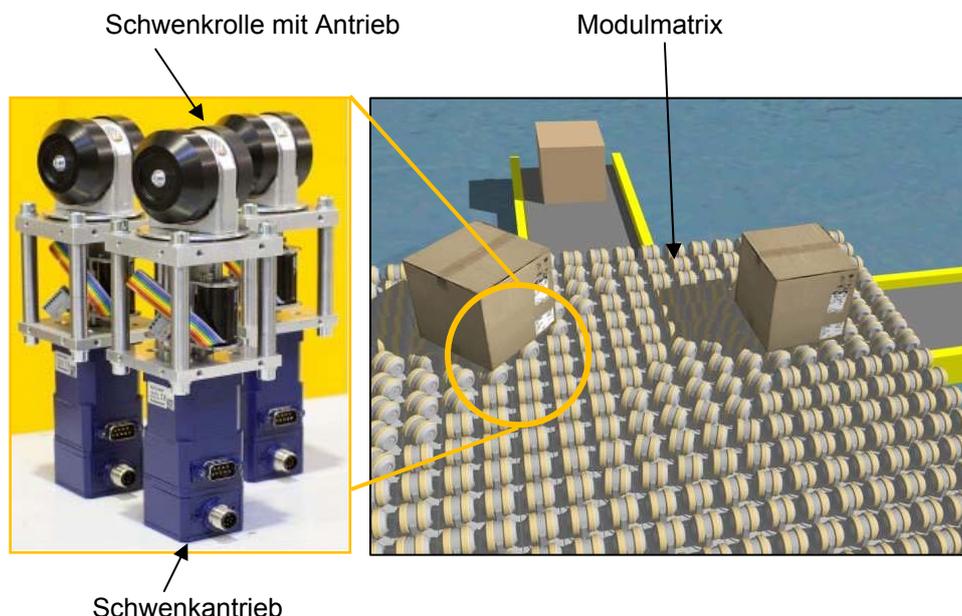


Abbildung 1: Prototyp des kleinskaligen Fördermoduls und Einsatz in der Modulmatrix

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 (Abbildung 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.

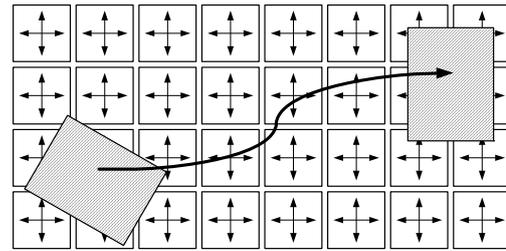


Abbildung 2: Bewegung einer Transporteinheit auf der Modulmatrix

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 Module 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 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 n Module zu einer Matrix verschaltet, ergibt sich ein Zustandsraum mit 8^n 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 Beschreibungskomplexität jedes einzelnen Moduls sinkt und nicht von der Größe des Gesamtsystems abhängt. 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 [Bar06].

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.

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. Abbildung 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 agierenden Gruppen zusammenfinden und eine synchrone Bahnsteuerung umsetzen.

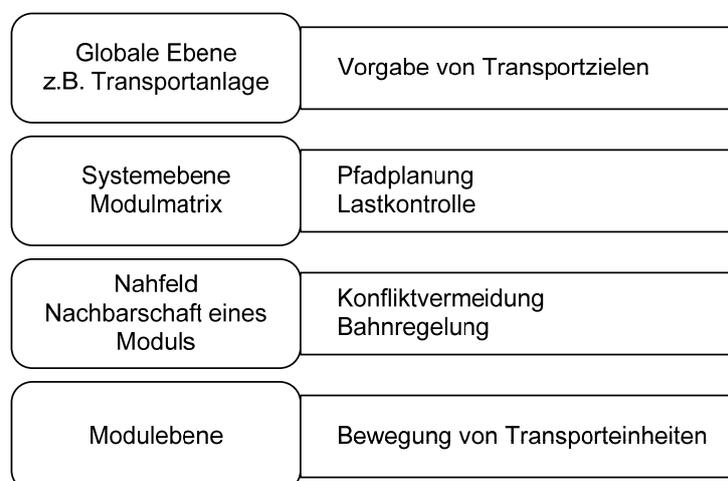


Abbildung 3: Aufgaben auf verschiedenen Hierarchieebenen

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 [Ila02, Wol86]. Das System ist zeitdiskret und der Zustand jeder Zelle zum Zeitpunkt $t+1$ hängt vom eigenen Zustand und von den Zuständen der Nachbarzellen zum Zeitpunkt t sowie 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. Abbildung 4 zeigt entsprechende Beispiele.

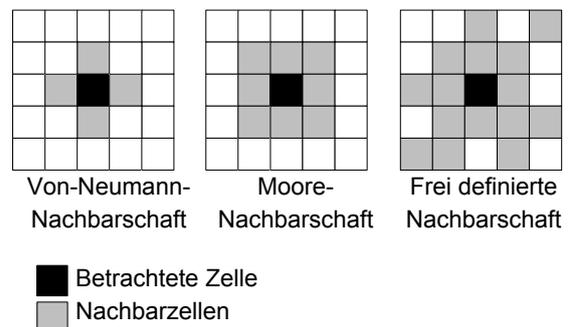


Abbildung 4: Nachbarschaften in zellulären Automaten

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, das sich mit einem Computer berechnen lässt. [Ila02]

Ein weiteres verwandtes Forschungsfeld ist das Schwarmverhalten von Individuen. Auch hier kann aus sehr einfachen Regeln komplexes Verhalten in Gruppen von Individuen entstehen. In [Rey87] wird das Schwarmverhalten von Vogel- oder Fischschwärmen 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.

Die Beispiele zeigen, dass es möglich ist, ein komplexes Systemverhalten mit sehr wenigen, einfachen Regeln zu erzeugen. Das Ziel ist es, einen möglichst einfachen 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 finden die Gruppenfindung und die Synchronisation der Module statt, um eine Transporteinheit gezielt zu bewegen. Das Finden der Gruppenzugehörigkeit wird über die Weitergabe der Identifikation der Transporteinheit von Modul zu Modul implementiert. Der genaue Mechanismus wird in [Krü10] beschrieben.

Zur Berechnung der Transportrichtung einer Transporteinheit werden Skalarfelder verwendet. Für n mögliche Ziele werden in der Modulmatrix n Skalarfelder φ_i mit $i \in \{1..n\}$ definiert, in denen Routen berechnet und auf denen die Transporteinheiten bewegt werden. Der Skalar hat für die Modulmatrix eine ähnliche Bedeutung wie die geschätzten Restkosten bis zum Ziel in Routingalgorithmen für Kommunikationsnetze, weswegen der Skalarwert d_i in einem Modul im folgenden auch als dessen Restkosten bezeichnet wird.

Der Skalar d_i wird in jeder Zelle und in jedem Zeitschritt berechnet durch Gleichung 2. Der Term $f_d(N)$ stellt die Entfernung der Zelle vom Zielpunkt der Transporteinheit dar und berechnet sich aus dem minimalen Wert der Nachbarzellen plus eins. Der Term p_F definiert zusätzliche Kosten, die durch die Bewegung von mehreren Transporteinheiten im Feld verursacht werden. Hierdurch entsteht eine Kopplung zwischen der Bewegung aller Transporteinheiten im System. Wie später gezeigt wird, verändern reservierte Routen die Werte in φ_i , und nehmen somit auf die Planung weiterer Routen und die Bewegung von Transporteinheiten Einfluss.

$$d_i = f_d(N) + p_F(v, \underline{r}, \varphi_i) \quad i \in \{1..n\} \quad (2)$$

Insbesondere wird hiermit der Fall berücksichtigt, dass eine Transporteinheit einen Weg für andere Einheiten blockiert. Reserviert eine Transporteinheit einen 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 [Alo08] 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 . Hierzu summieren alle in einer Gruppe bzw. in der Nachbarschaft N_T zusammengefassten Module die Gradienten in jedem Modul auf und begrenzen den resultierenden Vektor 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:

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

Der Zustand $s \in S$ jedes Moduls setzt sich folglich zusammen aus einer Kostenabschätzung d_i für alle n bekannten Transportziele, der Identifikation (ID) der derzeit getragenen Transporteinheit, einem Richtungsvektor r und der Transportgeschwindigkeit v , mit der der Vorschub einer Transporteinheit erfolgt:

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

In Simulationen konnten wir zeigen, dass sich ein System aus den beschriebenen Modulen stabil verhält. 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. Es konnte auch gezeigt werden, dass ein System ohne Pfadplanung und –reservierung grundlegende Schwierigkeiten wie die Bildung von Deadlocks besitzt.

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. 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 Verklebung gegeben. Abbildung 5 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. Darüber hinaus werden Verklebungen an Kreuzungen möglich, die in üblichen Fördersystemen so nicht vorkommen.

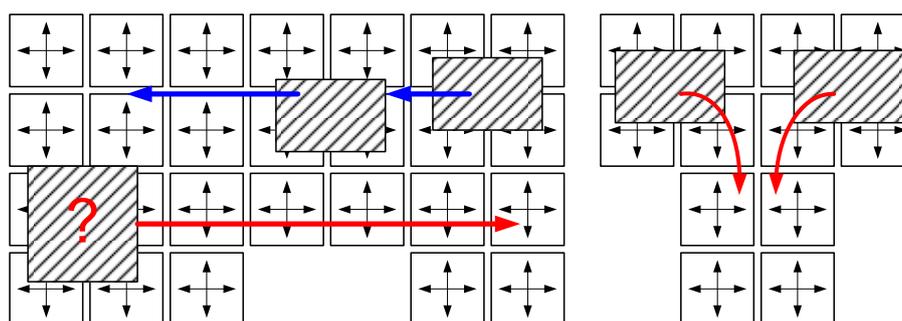


Abbildung 5: Beispiele für Probleme beim Routing von Transporteinheiten auf kleinskaligen Fördermodulen

Ein weiterer Unterschied zu den meisten Kommunikationsnetzen besteht darin, 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. Ohne eine Reservierung von Pfaden im System würden auch hierdurch Verklebungen begünstigt.

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 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 [May09].

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. Derzeit bekannte Routing-Metriken beschäftigen sich mit Fragen der Fairness, Wartezeiten, Auslastung und Kosten [Bau07], aber nicht mit Problemen wie dem physischen Platzbedarf von Transporteinheiten. Dies stellt einen grundsätzlichen Unterschied dar, herkömmliche Routingverfahren sind also nicht direkt übertragbar.

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 werden nun so geplant, dass es zu möglichst wenigen Konflikten zwischen Transporteinheiten kommt. Mit diesem Verfahren können in einem System Transporteinheiten verschiedener Größe effizient transportiert werden. So ist es beispielsweise möglich, kleine Transporteinheiten nebeneinander zu transportieren, während größere nur hintereinander eine Strecke passieren. Analog ermöglicht dies, dass eine genügend breite Förderstrecke von kleinen Transporteinheiten in verschiedene Richtungen gleichzeitig verwendet wird.

Da sich der Zustand des Modulsystems permanent ändert, ist die Fähigkeit des Systems wichtig, Routen neu zu planen und bisherige zu ersetzen. In unseren Simulationen können wir zeigen, dass dies mit den bisher entwickelten Metriken möglich ist. Abbildung 6 stellt drei Momentaufnahmen aus einer Simulation dar. Im ersten Bild sind zwei Transporteinheiten mit den dazugehörigen reservierten Pfaden zu sehen. Nun wird eine weitere Transporteinheit eingefügt. Das System versucht daraufhin, einen Weg für die neue Transporteinheit zu reservieren, was eine Neuplanung der bisherigen Route auslöst. Auf dem nächsten Bild (Abbildung 6, Mitte) ist zu sehen, dass eine neue Route geplant wird. Sobald die neue Route reserviert wurde, wird die Reservierung für die bisher bestehende aufgehoben und die neue Transporteinheit kann bewegt werden. Sofern Alternativrouten verfügbar sind, wird durch die Neuplanung von Routen verhindert, dass eine dichte Folge von Transporteinheiten auf einer bereits geplanten Route die Bearbeitung eines anderen Transportauftrages beliebig lange verzögert.

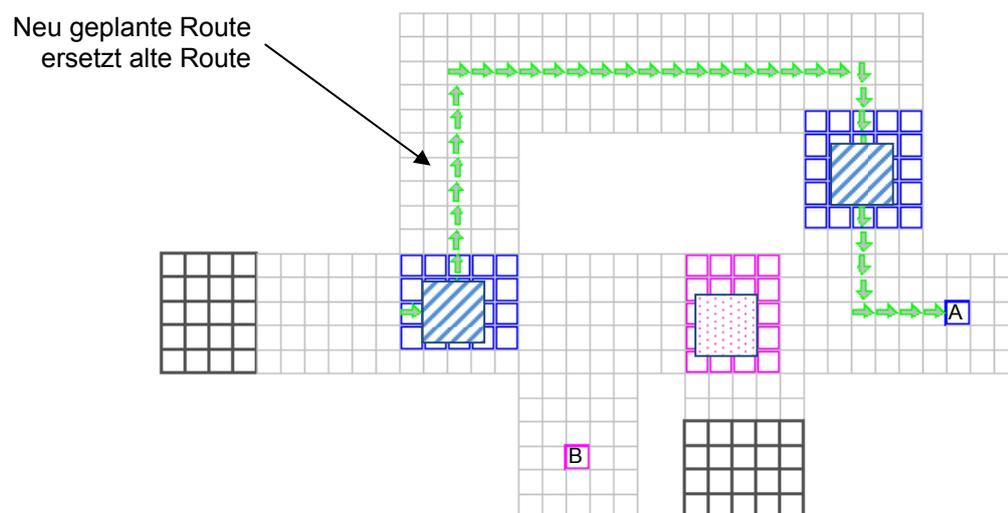
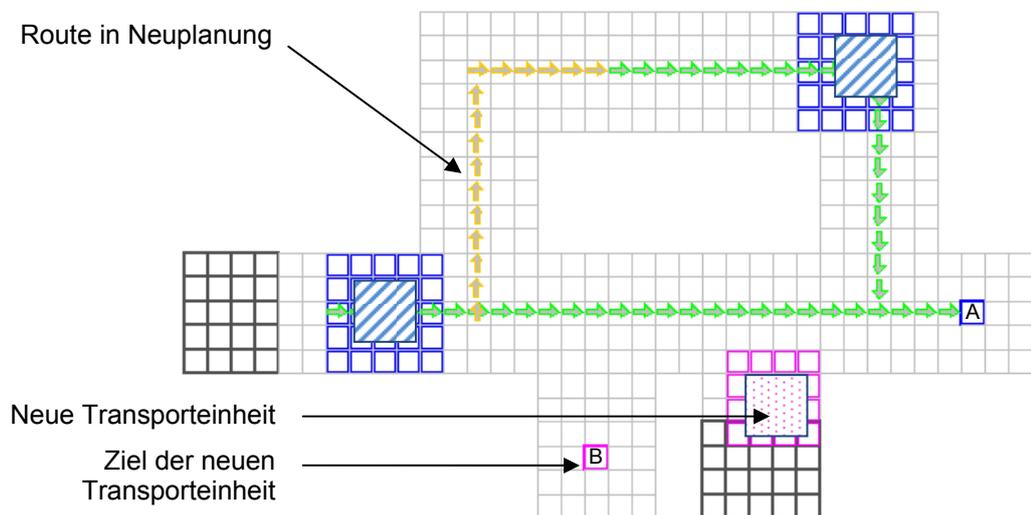
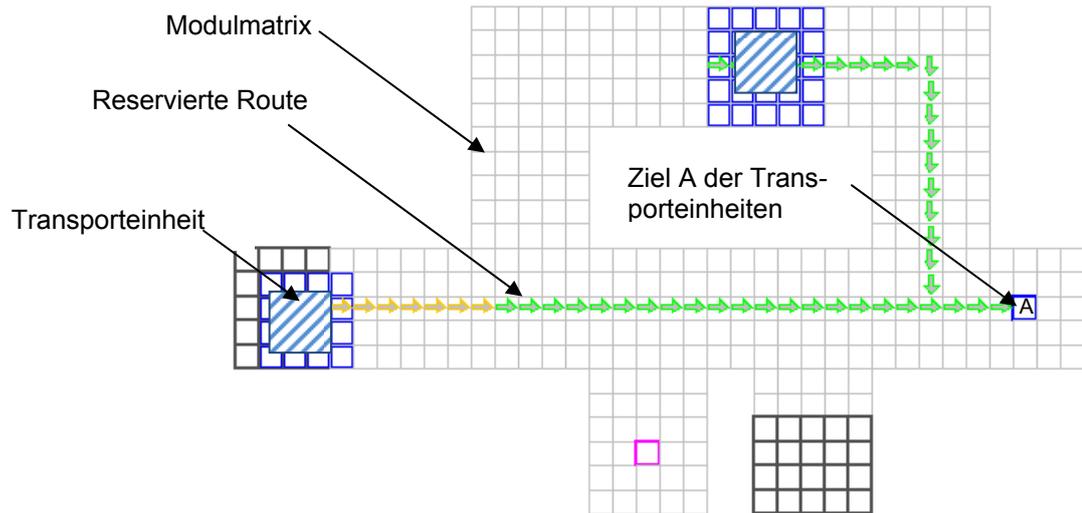


Abbildung 6: Neuplanung einer Route nach dem Einfügen einer weiteren Transporteinheit, gezeigt sind die reservierten oder in Planung befindlichen Routen für das Transportziel A

6 Schnittstellen zu anderen Systemen

Beim Betrieb von Intralogistiksystemen müssen die kleinskaligen Fördermodule mit anderen Teilsystemen interagieren. Auch in Hinblick auf ein Einführungsszenario 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 (Abbildung 7). Aufgrund der wenigen Informationen (Ziel der Transporteinheit), die die Schnittstelle zwischen dem Modulsystem und der Umgebung benötigt, ist die softwareseitige Kopplung einfach zu realisieren.

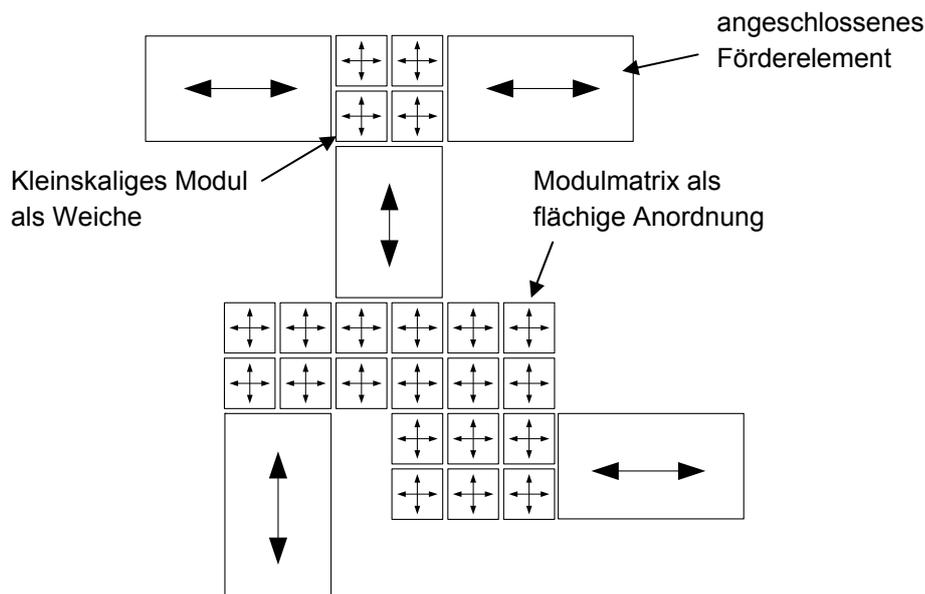


Abbildung 7: Einbauszenarien für kleinskalige Fördermodule

Zu jeder Transporteinheit, die sich auf der Modulmatrix bewegt, entsteht im Modulsystem ein Informationsschatten (Abbildung 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 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 [Bul07], sondern durch das Modulsystem wei-

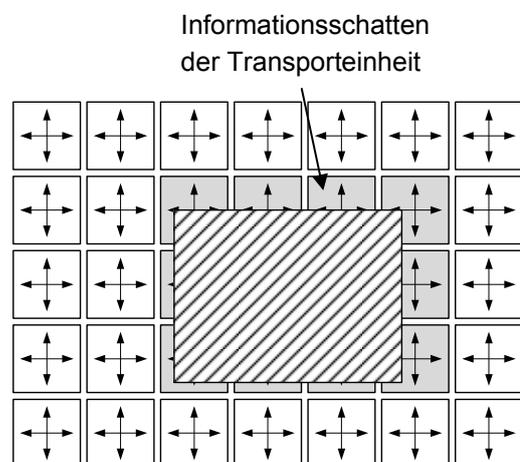


Abbildung 8: Jede Transporteinheit besitzt einen Informationsschatten

tergegeben. 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 (Abbildung 7). 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. Dies hat zur Folge, dass bekannte Routingalgorithmen nicht direkt auf die Modulmatrix übertragbar sind. Des Weiteren wurde gezeigt, dass eine Reservierung eines Transportweges mit der Möglichkeit der späteren Umplanung notwendig ist, um Deadlocks zu verhindern.

Zum Transport einer Transporteinheit müssen sich jeweils mehrere Module zu Gruppen zusammenfinden und gemeinsam agieren. 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

- [Alo08] Alonso-Sanz, Ramón: Cellular automata with memory: Philadelphia, Pa.: Ed. des Archives Contemporaines; Old City Publ., 2008. – ISBN 978-2-914610-80-3
- [Bau07] Baumann, Rainer; Heimlicher, Simon; Strasser, Mario; Weibel, Andreas: A Survey on Routing Metrics. ETH-Zentrum, Switzerland: 2007.

- [Bar06] Barth, Thomas; Schüll, Anke: Grid Computing: Konzepte - Technologien - Anwendungen. Friedr. Vieweg & Sohn Verlag Wiesbaden, 2006 - ISBN 978-3-8348-9101-3
- [Bul07] Bullinger, Hans-Jörg; ten Hompel, Michael: Internet der Dinge. Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag, 2007.
- [Cox98] Cox, W. Michael; Alm, Richard: The right stuff: America's move to mass customization. In: Federal Reserve Bank of Dallas, Annual Report, S. 3-26, 1998.
- [Ila02] Ilachinski, Andrew: Cellular automata: A discrete universe. Reprinted. World Scientific Singapore, 2002. - ISBN 981-02-4623-4
- [May09] Mayer, Stephan; Furmans, Kai (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.
- [Ove10] Overmeyer, Ludger; Falkenberg, Sascha; Krühn, Tobias; Venz, Kai: Kleinskalige, multidirektionale Transportmodule für den Einsatz in der Intralogistik. In: 19. Deutscher Materialfluss-Kongress, VDI-Berichte 2094, S. 231-248, 2010.
- [Ove09] Overmeyer, Ludger; Heiserich, Gerd; Falkenberg, Sascha; Jungk, Andreas: Automatische Konfiguration und Optimierung von Materialflusssystemen durch kognitive Logistikmodule. In: 18. Deutscher Materialfluss-Kongress, VDI-Berichte 2066, 2009. S. 197-208
- [Rey87] Reynolds, Craig: Flocks, Herds, and Schools: A Distributed Behavioral Model. In: Special Interest Group on Graphics and Interactive Techniques (SIGGRAPH), 21(4), S. 25-34, 1987.
- [Wil08] Wilke, Michael: Dezentral steuern, zentral kommunizieren - Ein Steuerungskonzept für wandelbare Materialflusssysteme. In: Logistics Journal, 2008.
- [Wol86] Wolfram, Stephen: Theory and Application of Cellular Automata. In: Advanced series on complex systems 1, World Scientific Publ. Singapore, 1986. – ISBN 9971-5-0123-6
- [Krü10] Krühn, Tobias; Falkenberg, Sascha; Overmeyer, Ludger: Decentralized Control for Small-Scaled Conveyor Modules with Cellular Automata. Proceedings of the 2010 IEEE International Conference on Automation and Logistics August 16-20 2010, Hong Kong and Macau, S. 237-242. IEEE, 2010.