

Bestimmung der Leistungsverfügbarkeit eines modularen Sorters

Determination of the performance availability of a modular sorter

Benedikt Fuß, Zázilia Seibold, 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 Steuerungsverfahren vorgestellt, welches automatisch auf technische Störungen reagieren kann und somit einen kontinuierlichen Betrieb ermöglicht. Mittels Simulation wird der Einfluss von Defekten einzelner Module auf die Systemleistung untersucht.

[Schlüsselwörter: Fördertechnik, dezentral gesteuert, modular, Simulation, Leistungsverfügbarkeit]

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 control algorithm which automatically detects and reacts to technical disruptions and thus enables continuous operation. The influence of defects of single modules on system performance is determined by simulation.

[Keywords: conveying system, decentralized controlled, modular, simulation, performance availability]

1 EINLEITUNG

Globalisierung und Online-Handel haben die Anforderungen an logistische System in den letzten Jahren verändert. Systeme sollen zugleich eine hohe Performance liefern also auch wandlungsfähig sein, um auf kurzzyklische Veränderungen reagieren zu können. Betreiber logistischer Anlagen geben entsprechende Leistungsversprechen an ihre Kunden. Die in VDI-Richtlinie 4486 [vdi4486] definierte Leistungsverfügbarkeit gibt den Erfüllungsgrad vereinbarter Prozesse an.

Im Bereich der Intralogistik wird schon seit einigen Jahren an flexibler, anpassungsfähiger Fördertechnik geforscht, um den oben genannten Herausforderungen besser begegnen zu können. Am Institut für Fördertechnik und Logistiksysteme des Karlsruher Instituts für Technologie werden entsprechende Systeme Plug&Play-Fördertechnik genannt, weil sie vom Benutzer umgebaut und sofort in Betrieb genommen werden können. Die Untersuchung der Leistungsverfügbarkeit solcher dezentraler Systeme wird in der Richtlinie jedoch nicht behandelt. Dieser Artikel gibt am Beispiel des GridSorters Ansätze hierzu.

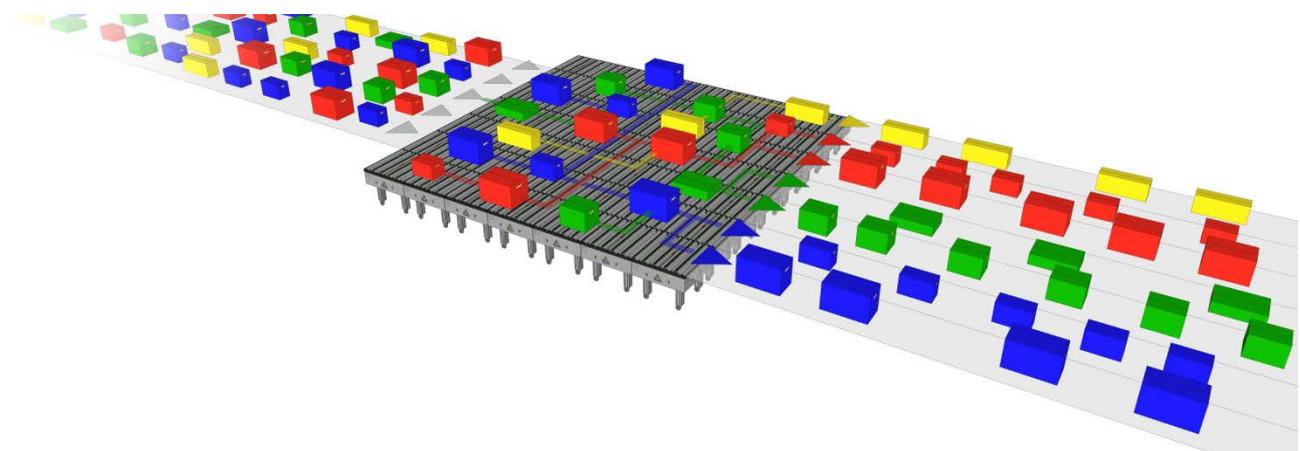


Abbildung 1. Schematische Darstellung des GridSorters – Ware wird nach Farbe sortiert.

Der GridSorter ist eine modulare Fördertechnik zum Sortieren von Stückgütern. Wie in Abbildung 1 dargestellt, wird mit einem dicht zusammenhängenden Layout aus Fördermodulen ein Sorter aufgebaut, der sowohl in Durchsatz als auch Form des Layouts flexibel ist. [SF14] beschäftigt sich mit der Entwicklung eines Steuerungsalgorithmus, der ein Deadlock-freies und effizientes Systemverhalten garantiert, robust gegenüber Fehlern ist und auf möglichst einfachen, nachvollziehbaren Entscheidungen basiert. Dieser Artikel beleuchtet die Robustheit gegenüber Fehlern näher und betrachtet hierbei insbesondere die Leistungsfähigkeit des Systems. Er leistet damit einen Beitrag auf dem Weg zur Bestimmung der Leistungsverfügbarkeit in dezentralen Systemen.

Der Artikel ist folgendermaßen strukturiert: Im zweiten Kapitel wird einen Überblick über Forschungsprojekte im Bereich der dezentral gesteuerten Stetigfördertechnik gegeben und die Funktionsweise des GridSorters erläutert. Die Leistungsverfügbarkeit wird in den Kontext dezentraler Systeme gesetzt und die Leistungskennzahl definiert. Das dritte Kapitel stellt dar, welche technischen Komponenten einzelner Module ausfallen können, wie die Steuerung Ausfälle behandelt und wie eine Instandsetzung erfolgen kann. Im vierten Kapitel wird die Systemleistung bei Auftreten von Ausfällen anhand eines Simulationsmodells bestimmt, bevor der Artikel im letzten Kapitel mit einem Fazit schließt.

2 GRUNDLAGEN

Im folgenden Abschnitt wird zunächst ein Überblick über Forschungsprojekte im Bereich der dezentral gesteuerten, modularen Fördertechnik gegeben. Daraufhin wird die dezentrale Steuerung des GridSorters erklärt.

2.1 DEZENTRAL GESTEUERTE, MODULARE STETIGFÖRDERTECHNIK

In [Roi12] wird eine Agentifizierung der Intralogistik angestrebt: Modulare, lernfähige Fördertechnikmodule passen sich mithilfe einer agentenbasierten Steuerung an die jeweilige Situation an.

Der Cognitive Conveyor hat das Alleinstellungsmerkmal der Kleinskaligkeit der Module: ein Ladungsträger kann nur von vielen Modulen gemeinsam getragen und transportiert werden. Dadurch entstehen hochfunktionale Intralogistiknoten [KRSO13], die Ladungsträger omnidirektional bewegen können.

Der FlexFörderer 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.

Der GridSorter baut technisch auf dem FlexFörderer auf. Der Algorithmus ist auf die Anforderungen der Warenauswahl angepasst. Er verwendet das in [SF14] beschriebene Prinzip der logischen Zeit, welches ein gleichermaßen effizientes und robustes Routing ermöglicht.

In [GFSU14, GUF12] werden drei Systeme beschrieben, die auf der technischen Funktionalität des FlexFörderers basieren. 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.

Mit Ausfällen modularer Fördertechnik beschäftigt sich [FGS12]. Die Autoren zeigen, dass Modulausfälle in GridStore nicht zu Deadlocks des Systems führen. Mittels Simulation wird die Leistung des Systems bei Ausfall zufälliger Module untersucht.

2.2 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.

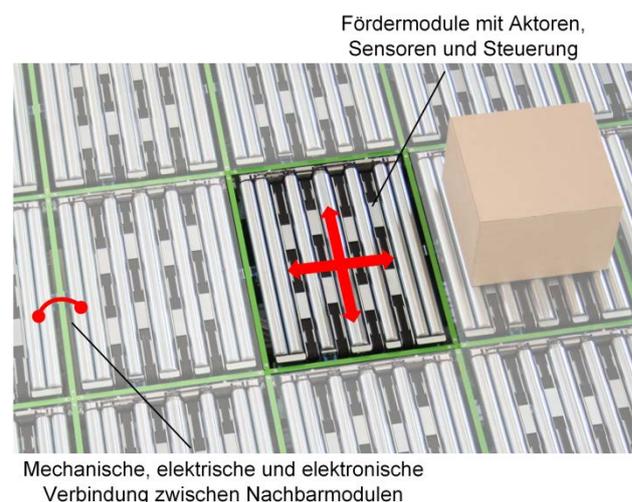


Abbildung 2. Grundlegender technischer Aufbau des GridSorters

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.

2.3 DEZENTRALER STEUERUNGALGORITHMUS DES GRIDSORTERS

Wie in Abbildung 3 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. Basis ist eine zeitfensterbasierte Reservierung mit logischer Zeit, wie sie in [SF14] beschrieben wird und welche Deadlocks verhindert. Die beteiligten Fördermodule legen während des Reservierungsprozesses 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. Module führen die Transportschritte entsprechend der Zeitstempel durch. Führen die Routen mehrerer Ladungsträger über ein Modul, so beachtet das Modul die Reihenfolge, in welcher es die Ladungsträger empfangen werden müssen anhand der Zeitstempel.

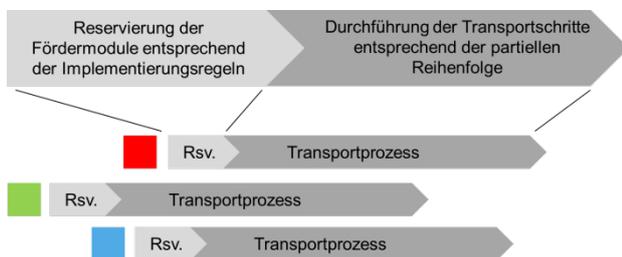


Abbildung 3. Darstellung der parallelen Prozesse mehrerer Ladungsträger

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, auf welche beide Manager Zugriff haben (siehe Abbildung 4). Der Transportmanager führt reservierte Transporte in der festgelegten Reihenfolge durch und lässt die logische Uhr entsprechend weiterschreiten. Dies wiederum ist wichtig für den Reservierungsmanager: Da ein Rückwärtsschreiten der Uhr nicht gestattet ist, dürfen keine Reservierungen in der Vergangenheit angenommen werden.

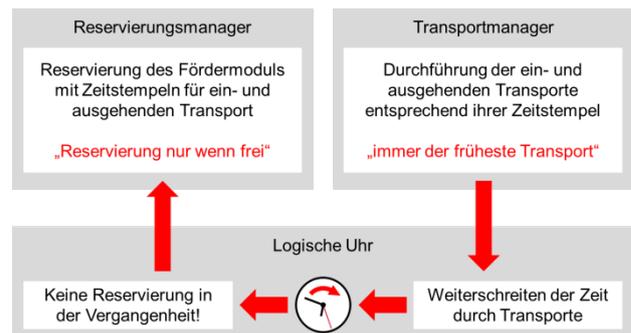


Abbildung 4. Zusammenhang zwischen Reservierungsmanager, Transportmanager und logischer Uhr eines Fördermoduls

Die Zeit schreitet nur bei Transporten voran, jedes Modul verharrt entsprechend in der Zeit des letzten durchgeführten Transports, es gibt keine zentral gültige Zeit. Dies bringt zwei Vorteile mit sich. Erstens ist keine physische Zeit erforderlich, welche aufwändig synchronisiert werden müsste. Zweitens ist das Verfahren robust gegenüber Schwankungen in Transportzeiten.

2.4 LEISTUNGSVERFÜGBARKEIT

Die Leistungsverfügbarkeit wird in VDI 4486 definiert als „anforderungs- und termingerechter Erfüllungsgrad von zwischen Vertragspartnern (Hersteller und Anwender) vereinbarten Prozessen unter Einhaltung der vereinbarten Rahmenbedingungen.“ Sie schlägt ein Verfahren vor, welches „Redundanzen, Leistungsreserven und Pufferkapazitäten bei der Ermittlung der Leistungsverfügbarkeit [berücksichtigt]“.

Der vorgestellte Sorter ist aufgrund seiner dezentralen Steuerung ein hochredundantes System. Der Ausfall eines einzelnen Moduls senkt zwar die Leistung des Gesamtsystems. Es bleibt im Vergleich zu Systemen mit zentraler Steuerung jedoch funktionsfähig (siehe Abbildung 5). Dieser Artikel untersucht, wie sich der GridSorter bei Ausfällen verhält und wie stark die Leistungsfähigkeit herabgesetzt wird.

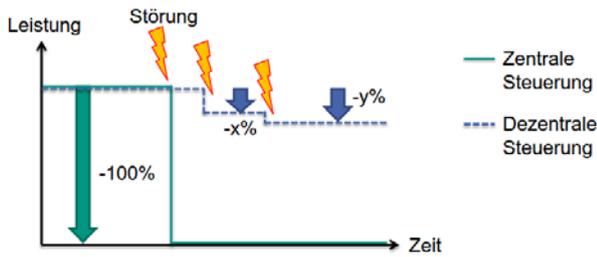


Abbildung 5. Totalausfall bei zentraler Steuerung, Leistungsminderung bei dezentraler Steuerung.

Als Leistungskennzahl wird in dieser Untersuchung der Grenzdurchsatz des Systems bei maximaler Auslastung der Quellen herangezogen. Der Grenzdurchsatz des vollständig intakten Systems wird mit dem Grenzdurchsatz eines Systems mit einem oder mehreren defekten Modulen verglichen. Nicht betrachtet werden die Ausfallwahrscheinlichkeit der Module und die Instandsetzung des Systems.

Zur Bestimmung der Leistungsverfügbarkeit muss eine Reihe von Fragenstellungen beantwortet werden, siehe hierzu auch Abbildung 6. Ausgehend von einem vollständig intakten System mit bekannter Leistung, beantwortet Kapitel 3.1 die Frage, welche technischen Defekte auftreten können und wie diese detektiert werden können. Kapitel 3.3 stellt die Fehlerbehandlung dar. Wann der Betreiber informiert wird, wie das System technisch instandgesetzt wird und welche Strategie verfolgt werden kann, wird in Kapitel 3.4 thematisiert. In Kapitel 4 wird schließlich die Leistungsminderung quantifiziert.

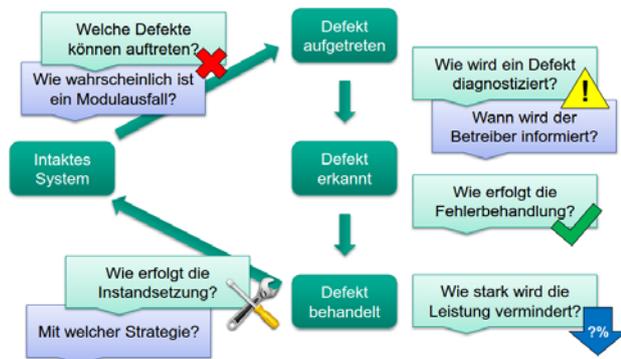


Abbildung 6. Schritte zur Bestimmung der Leistungsverfügbarkeit.

3 MODULAUSFÄLLE

Im folgenden Abschnitt wird zunächst beschrieben, welche Komponenten eines Moduls ausfallen können und wie diese Ausfälle durch die Steuerung detektiert werden können. Anschließend wird auf die Behandlung von Ausfällen und die Instandsetzung von Modulen eingegangen.

3.1 AUSFALLARTEN UND DEREN DETEKTION

Betrachten wir nun, welche technischen Komponenten ausfallen können, und welchen Einfluss diese Ausfälle auf das Netzwerk haben. In Abbildung 7 links oben ist der Netzwerkgraph eines Systems mit 3x3 Modulen dargestellt. Ein Knoten entspricht einem Modul, eine Kante der elektronischen Verbindung zwischen zwei Modulen. Im Folgenden sind die Ausfallarten beschrieben, die durch den Ausfall betroffene Knoten und Kanten sind in selbiger Abbildung mittels eines Kreuzes gekennzeichnet.

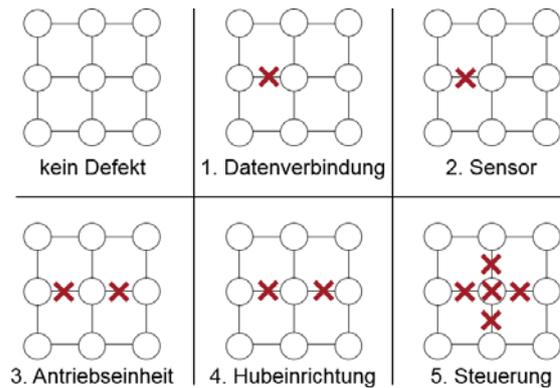


Abbildung 7. Netzwerkgraph eines 3x3-GridSorters. Kennzeichnung der durch Ausfall betroffener Knoten und Kanten durch rote Kreuze in Abhängigkeit der ausgefallenen Komponente.

1. **Datenverbindung:** Module sind mit bis zu vier Nachbarn elektronisch verbunden. Durch zyklisches Versenden von Keep-Alive-Nachrichten zwischen Modulen wird geprüft, ob die Verbindung zum Nachbarmodul besteht. Nur bei bestehender Datenverbindung können Transporte durchgeführt werden. Bleibt eine Keep-Alive-Nachricht unbeantwortet, weiß das sendende Modul, dass sein Nachbar oder die Verbindung zu diesem defekt ist. Es verbreitet diese Information im gesamten Netzwerk und die entsprechende Kante wird aus dem Netzwerkgraphen gelöscht.
2. **Sensor:** An allen vier Seiten der Module befindet sich ein optischer Tastsensor, welcher erkennt, ob sich ein Ladungsträger darüber befindet. Mittels dieser Sensoren wird zum Beispiel gesteuert, wann ein Modul seinen Förderantrieb beim Empfangen eines Ladungsträgers stoppt. Ist der entsprechende Sensor defekt, kann nicht passgenau angehalten werden und der Ladungsträger wird möglicherweise bis auf das nächste Modul befördert. Treten entsprechende Fehler im Transportprozess auf, können diese von den beteiligten Modulen erkannt und korrespondierende Kanten aus dem Graphen gelöscht werden. Übrige Kanten eines Knotens bleiben hiervon unberührt. Somit ist dieser Fall äquivalent zum vorigen.

3. *Antriebseinheit*: Jeder Umsetzer besitzt zwei unabhängige Antriebseinheiten für x- und y-Richtung. Im Beispiel dargestellt ist der Fall, dass die Antriebseinheit für die horizontale Richtung ausfällt. Es sind somit nur zwei Kanten betroffen, eine Förderung in vertikale Richtung ist nach wie vor möglich. Dies setzt voraus, dass Module den Zustand des Umsetzers detektieren können.
4. *Hubeinrichtung*: Ähnlich zu letztem Fall ist der Ausfall der Hubeinrichtung, deren Betätigung für den Richtungswechsel der Förderrichtung der Module zuständig ist. Dargestellt ist der Fall, dass der Umsetzer ausfällt, wenn er sich in der Position für die horizontale Förderrichtung befindet. Dieser Ausfall ist auf Graphen-Ebene äquivalent zum vorigen.
5. *Steuerung*: Bei Ausfall der Steuerung fallen der gesamte Knoten und alle adjazenten Kanten aus. Die Detektion erfolgt ähnlich der Detektion einer defekten Datenverbindung. Im Beispiel würden alle vier Nachbarn des betroffenen Moduls unabhängig voneinander detektieren, dass keine Verbindung mehr besteht. Durch das Löschen aller vier Kanten ist der Knoten des defekten Moduls dann nicht mehr Teil des Netzwerkes.

Dieser Artikel behandelt lediglich Komplettausfälle von Modulen z.B. durch Ausfall der Steuerung. Andere Fälle können wie Komplettausfälle behandelt werden, auch wenn dies nicht die optimale Lösung bezüglich der Leistung des Gesamtsystems ist. Die im nächsten Abschnitt beschriebenen Maßnahmen sind kurzfristiger Natur, um einen Weiterbetrieb des Systems bei Ausfall von Modulen zu gewährleisten. Defekte Module können bei geplanten Stillstandszeiten (zum Beispiel Pausenzeiten, Schichtende) durch intakte ausgetauscht werden und dann repariert werden.

3.2 WEITERE STÖRFÄLLE

Erwähnenswert ist der Fall des Verklemmens eines Ladungsträgers beim Transport von einem Modul auf ein zweites. Dies entspricht dem Totalausfall zweier Module, da für beide keine Förderung möglich ist. Verklemmte Ladungsträger sind deshalb schnellstmöglich durch den Benutzer zu entfernen.

Die verwendeten Umsetzer erlauben lediglich Fördergut mit einer planen Unterfläche (Kisten, Boxen, Behälter, Tablare, Kartons, ...). Auf der Sortierfläche gibt es zudem keinerlei herausragende Bauteile wie beispielsweise Bänder oder Führungen, die ein Verklemmen begünstigen würden. Aus diesen Gründen ist die Wahrscheinlichkeit eines Verklemmens von Ladungsträgern als äußerst gering einzuschätzen und wird in diesem Artikel nicht behandelt.

3.3 BEHANDLUNG VON AUSFÄLLEN

Wie oben beschrieben, wird bei Ausfällen von Modulen oder deren Komponenten die Topologie des Systems automatisch angepasst. Kritisch ist der Ausfall eines Moduls, wenn zum Zeitpunkt des Ausfalls Zeitfenster für den Transport von Ladungsträgern in der Zukunft reserviert sind. Die reservierte Route der betroffenen Ladungsträger muss dann neu geplant werden. Dieser Prozess wird als primäres Rerouting bezeichnet. Das Rerouting kann dazu führen, dass zudem die Durchführung von Routen, die nicht über das defekte Modul führen, unmöglich wird. Auch diese Routen müssen neu reserviert werden, der Prozess wird ansprechend als sekundäres Rerouting bezeichnet. Beide Fälle werden im Folgenden anhand eines Beispiels illustriert.

3.3.1 PRIMÄRES REROUTING

Im Folgenden ist ein Beispiel für primäres Rerouting dargestellt. Betrachtet wird ein System mit zwei Ladungsträgern (Boxen), für welche jeweils eine Route zum Ziel reserviert ist (Abbildung 8). Die Pfeile stehen für die einzelnen Transportschritte, die Zahl neben dem Pfeil kennzeichnet jeweils den Zeitstempel des Transports, auf den sich sendendes und empfangendes Modul geeinigt haben.

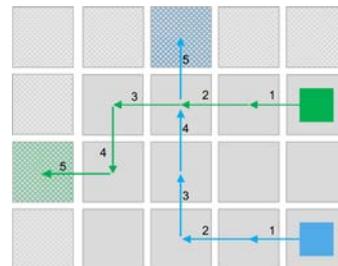


Abbildung 8. System mit reservierten Routen für zwei Boxen vor Auftreten des Defekts.

Dieses intakte System wird durch den Ausfall eines Moduls gestört (Abbildung 9). Benachbarte Module erkennen den Ausfall des Moduls, weil sie keine Keep-Alive-Nachrichten von ihm erhalten. Zum einen wird die Topologie angepasst und alle Module im Netzwerk werden über die geänderte Topologie informiert. Zum anderen werden einige Reservierungsmanager aktiv, weil Reservierungen nicht mehr durchführbar sind und angepasst werden müssen. Das Ergebnis des Reroutings ist in Abbildung 10 zu sehen.

Das Modul, welches die grüne Box zum Zeitpunkt 4 erhalten sollte, initialisiert die Löschung der Reservierung in Richtung des geplanten Transportes, da es die Box nie erhalten wird.

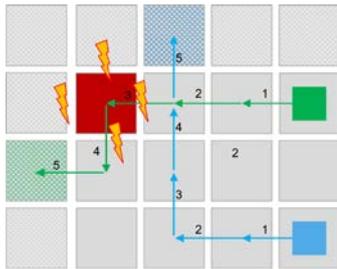


Abbildung 9. Der Modulausfall (dunkelrot) wird durch benachbarte Module erkannt (Blitze). Die grüne Box kann nicht auf ihrer geplanten Route transportiert werden.

Das Modul, welches die grüne Box zum Zeitpunkt 3 senden sollte, löscht einen Transportschritt der entsprechenden Reservierung und sucht nach einer neuen Route. Grundsätzlich wird versucht, nur einen möglichst geringen Teil der Strecke zu löschen und neu zu reservieren. Aufgrund der bereits vorliegenden Reservierung für die blaue Box kann das Modul allerdings keine neue Route finden. Darum löscht es außerdem die Reservierung und informiert das Vorgängermodul. Dieses kann eine neue Route finden. Durch die neue Route wird die grüne Box zwei Zeitschritte später ankommen.

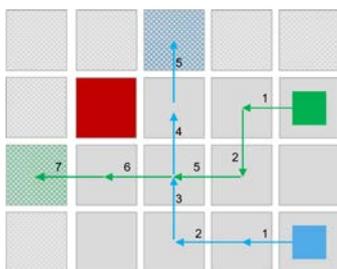


Abbildung 10. Für die grüne Box wurde eine neue Route gefunden.

3.3.2 SEKUNDÄRES REROUTING

Im vorigen Abschnitt wurde das primäre Rerouting gezeigt, bei welchem lediglich Reservierungen von Boxen betroffen sind, welche über ein defektes Modul geleitet werden sollen. Das Beispiel in Abbildung 11 zeigt, dass auch andere Routen betroffen sein können.

Für die beiden Boxen sind Routen in der Form reserviert, dass sich beide Boxen zunächst gemeinsam zwei Module nach links bewegen, bevor sie dann in unterschiedliche Richtungen abbiegen. Die Route der orangefarbenen Box ist offensichtlich nicht direkt durch den Ausfall betroffen, da sie nicht über das ausgefallene Modul führt. Allerdings wird die grüne Box das mittlere Modul nicht wie geplant zum Zeitpunkt 2 verlassen können, weil das nächste Modul ausgefallen ist. Somit kann das mittlere Modul die orangefarbene Box nicht zum Zeitpunkt 2 empfangen.

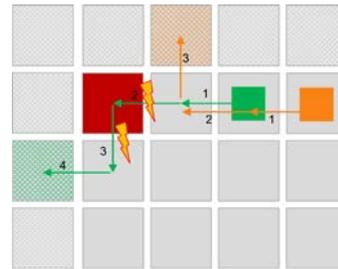


Abbildung 11. Obwohl die Route der orangefarbenen Box nicht über das ausgefallene Modul führt, ist ein Rerouting notwendig.

Für die grüne Box wird (wie im letzten Abschnitt beschrieben) ein primäres Rerouting durchgeführt, für die orangefarbene ein sekundäres Rerouting. Primäres und sekundäres unterscheiden lediglich durch ihren Auslöser, der zugrunde liegende Mechanismus ist derselbe.

Die angepassten Reservierungen sind Abbildung 12 zu sehen. Die grüne Box biegt früher ab und erreicht ihr Ziel zum ursprünglich geplanten Zeitpunkt. Die orangefarbene Box nimmt denselben Weg wie ursprünglich geplant, wartet jedoch nach dem ersten Transportschritt auf die grüne Box und erreicht ihr Ziel deshalb später.

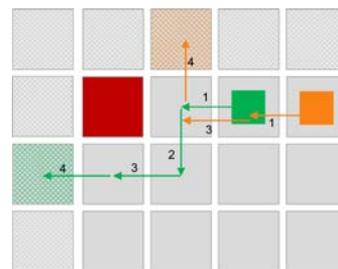


Abbildung 12. Für beide Boxen wurde eine neue Route reserviert.

3.4 INSTANDSETZUNG

Die automatische Behandlung von Ausfällen ermöglicht die Aufrechterhaltung des Betriebs und erhöht damit die Robustheit des Systems. Dies kann jedoch lediglich als kurzfristige Maßnahme gesehen werden. Eine Behebung des Fehlers durch Reparatur der defekten Komponenten ist unabdingbar.

Hierzu muss zunächst der Betreiber des Systems über den Ausfall eines Moduls informiert werden. Eine automatische Abschätzung der Auswirkungen ist schwierig, wie im nächsten Kapitel klar wird. Lediglich das Abschneiden einzelner Quellen oder Senken vom Rest des Layouts können sofortige Maßnahmen erfordern. Im Regelfall bleibt dem Betreiber überlassen, wann er eine Reparatur durchführt.

Für die Reparatur bietet sich das Vorgehen an, nicht die defekte Komponente, sondern das komplette Modul zu tauschen. Dies ist insbesondere dann hilfreich, wenn die

Fehlerursache nicht sofort ermittelt werden kann. Ein Austausch eines Moduls geht einfach vonstatten, da Module nicht verschraubt, sondern nur mechanisch verriegelt sind. Sie können nach oben oder unten entnommen werden.

Kritisch ist die Zugänglichkeit von Modulen in der Mitte des Layouts. Darum bietet sich eine aufgeständerte Bauweise des GridSorters an, sodass alle Module von unten zugänglich sind. Es ist ein Wartungswagen denkbar, welcher zwei Module fassen kann, sodass mit einer einzigen Fahrt ein defektes Modul durch ein mitgeführtes intaktes Modul getauscht werden kann. Auf diese Weise könnte die Instandsetzungszeit reduziert werden. Eine genaue Analyse und Reparatur defekter Module kann anschließend ohne Zeitdruck erfolgen.

Vorteil der vorgestellten Architektur ist, dass eine sofortige Fehlerbehandlung meist nicht erforderlich ist. Instandsetzungsmaßnahmen können gezielt auf geplante Wartungs- und Stillstandszeiten wie während Pausen oder am Schichtende gelegt werden.

4 UNTERSUCHUNG DER LEISTUNGSMINDERUNG MITTELS SIMULATION

Die Leistungsminderung des GridSorters bei Ausfällen von Modulen wird im folgenden Abschnitt beschrieben. Zuerst werden Annahmen des Simulationsmodells und das untersuchte System beschrieben. Anschließend wird auf die Auswirkung des Ausfalls einzelner Module und den Ausfall benachbarter Module eingegangen.

4.1 ANNAHMEN UND UNTERSUCHTES SYSTEM

Grundlage für die in AnyLogic durchgeführte Simulationsstudie ist das in Abbildung 13 dargestellte Layout. Die quadratische Sortierfläche besteht aus 49 Modulen. An den Rändern befinden sich vier Quellen und insgesamt zwölf Senken. Die Simulation untersucht den Grenzdurchsatz des Systems, dieser wird bei maximaler Auslastung der Quellen gemessen. Sobald ein Ladungsträger eine Quelle verlassen hat, wird in der Simulation ein neuer generiert. Dieser Grenzdurchsatz wird als Leistungskriterium definiert. Die Zuweisung zu den Senken erfolgt zufällig auf Basis einer Gleichverteilung. Ferner sind keine Reihenfolge- oder Terminrestriktionen einzuhalten.

Auf Basis dieses Layouts wird ein Arbeitstag mit acht Stunden simuliert, 30 Replikationen werden durchgeführt. Hiermit ergibt sich ein Grenzdurchsatz von 5157 Ladungsträgern pro Stunde (Konfidenzintervall ± 5 Ladungsträger bei Irrtumswahrscheinlichkeit von 5%).

Dieser Durchsatz wird ins Verhältnis gesetzt zum Durchsatz bei Komplettausfall eines oder mehrerer Module. Es wird jede mögliche Position des oder der ausgefallenen Module im Layout betrachtet.

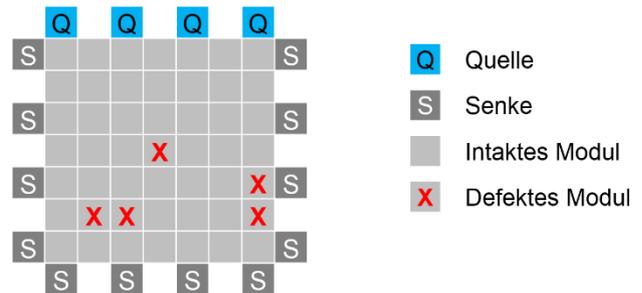


Abbildung 13. Der Simulation zugrunde gelegtes Layout. Beispielhaft dargestellt sind die drei Ausfallarten: einzelnes Modul, zwei horizontal bzw. vertikal benachbarte Module.

4.2 AUSFALL EINES EINZELNEN MODULS

Bei Ausfall eines einzelnen Moduls ergibt sich eine mittlere Leistungsminderung um 3,5%. Zum Vergleich: rein rechnerisch reduziert sich beim Ausfall eines Moduls die Modulanzahl lediglich um 2,0%. Abhängig von der Position des ausgefallenen Moduls lässt sich aus Abbildung 14 ein unterschiedlich starker Einfluss auf das Gesamtsystems ablesen. Module im oberen Bereich des Layouts haben einen stärkeren Einfluss. Dies liegt in der Anordnung der Senken begründet. Die oberste Reihe der Sortierfläche muss von jedem Ladungsträger verwendet werden, die unterste nur von jedem zweiten (die Hälfte der Senken ist nur über diese Zeile erreichbar). Somit ist der obere Bereich des Layouts wesentlich höher frequentiert, Störungen haben eine stärkere Auswirkung.

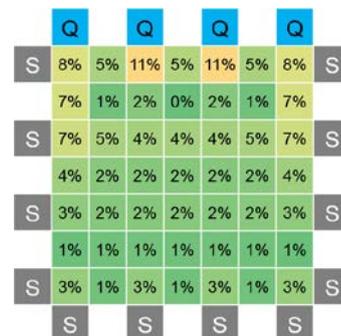


Abbildung 14. Heatmap: prozentuale Leistungsminderung bei Ausfall eines Moduls. Die Zahl in einer Zelle entspricht der Leistungsminderung bei Ausfall des Moduls, welches sich an dieser Stelle im Layout befindet.

Ausfälle in direkter Nachbarschaft zu Quellen haben einen höheren Einfluss, da die Quelle vom Layout abgeschnitten wird und somit keine Einschleusung möglich ist. Dass die Leistung nicht um 25% sinkt, liegt an der Steuerung mit maximaler Quellenauslastung. Bei Wegfall einer Quelle kann ein Teil der Ladungsträger über andere Quellen eingeschleust werden. Dies würde zum Beispiel dem Anwendungsfall entsprechen, wenn ein Strom von aus einem Hochregallager kommenden Ladungsträgern mittels konventioneller Fördertechnik in mehrere Ströme aufgeteilt wird.

4.3 AUSFALL ZWEIER BENACHBARTER MODULE

Die Leistungsminderung bei Ausfall zweier benachbarter Module unterscheidet sich je nach Anordnung der beiden Module zueinander, siehe Abbildung 15. Liegen die beiden Module nebeneinander, so ergibt sich ein stärkerer Einfluss (durchschnittlich 7,0%) als bei Modulen, welche sich untereinander befinden (5,4%). Dies liegt daran, dass im gewählten Layout die Hauptflussrichtung von oben nach unten verläuft.

Fallen zwei Module nebeneinander aus, so wirken diese wie ein Riegel, der Transportwege versperrt und Umwege erforderlich macht. Dies gilt insbesondere bei Ausfall von an Quellen oder Senken grenzenden Modulen. Bei untereinander angeordneten Modulen fallen die Umwege geringer aus, da sich diese parallel zur Hauptflussrichtung befinden.

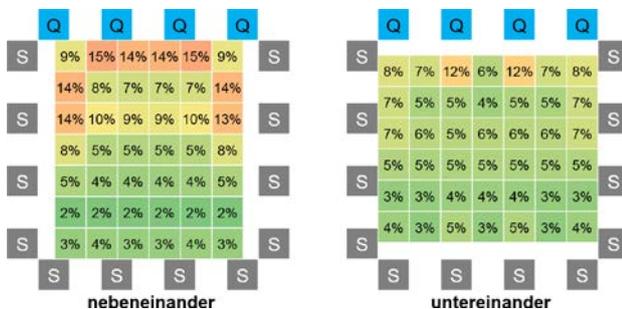


Abbildung 15. Heatmap: prozentuale Leistungsminderung bei Ausfall zweier benachbarter Module. Die 9% in der linken oberen Ecke der linken Abbildung entsprechen beispielsweise der Leistungsminderung bei Ausfall des ersten und zweiten Moduls in der ersten Zeile. Die 15% daneben dem Ausfall des zweiten und dritten Moduls, usw.

4.4 ERGEBNISSE

Gemäß der VDI-Richtlinie 4486 lassen sich mittels störungszeitbasierter Berechnung „große und stark vernetzte Systeme [...] nicht ausreichend genau beschreiben.“ Beim GridSorter handelt es sich um ein extrem stark vernetztes System. Darum existiert stets eine Vielzahl an möglichen Routen für die Sortierung der Ladungsträger. Wie in den beiden vorigen Abschnitten gezeigt wurde, kann nicht im Vorhinein abgeschätzt werden, welchen Einfluss der Ausfall eines Moduls auf den gesamten Sorter hat. Der Leistungsabfall ist stark davon abhängig, welcher Knoten des Netzwerkes ausfällt.

In komplexen Systemen kann die Leistung nur mittels Simulation bestimmt werden. Um die Auswirkungen von Ausfällen oder Störungen zu quantifizieren, ist hierbei eine detaillierte Betrachtung notwendig. Bei den vorliegenden Untersuchungen zeigte sich, dass der Ausfall eines Moduls mit hohem Durchsatz nicht notwendigerweise zu einem höheren Durchsatzverlust führt als der Ausfall eines Moduls mit geringerem Durchsatz. Es muss darum individuell für jedes Modul geprüft werden, welchen Einfluss sein Ausfall

auf den Durchsatz des Netzwerkes hat. Dieses Vorgehen lässt sich auch auf andere stark vernetzte Materialflusssysteme übertragen. Mit einem Simulationsmodell kann der Einfluss des Ausfalls einzelner Knoten des Netzwerkes bestimmt werden. Mittels Heatmaps wie in Abbildung 14 und Abbildung 14 kann anschließend visualisiert werden, welche Knoten kritisch für den Durchsatz des Gesamtsystems sind. Kritische Knoten sind somit auf den ersten Blick erkennbar.

4.5 GRENZEN DES SIMULATIONSMODELLS

Im dargestellten Beispiel werden alle Quellen maximal ausgelastet. In einem realen Anwendungsfall ist die genaue Funktion der Einschleusung zu untersuchen, da die Systemschnittstellen den Durchsatz maßgeblich beeinflussen. Zum Beispiel werden Pufferplätze vor den Zuführungen zum Sorter erforderlich sein. Je nach Auftragsstruktur wird eine unterschiedliche und zeitlich schwankende Zielauslastung auftreten. Weitere Leistungskennwerte wie beispielsweise die Einhaltung einer maximalen Durchlaufzeit sind zu definieren. Für die Bewertung der Leistungsverfügbarkeit sind zudem die Ausfallwahrscheinlichkeit von Modulen und die verwendete Instandsetzungsstrategie zu berücksichtigen.

5 FAZIT

Der GridSorter ist ein leistungsfähiges System zur Sortierung von Ladungsträgern. Die gezeigte Systemkonfiguration mit 49 Modulen erreicht einen Durchsatz von über 5.000 Behältern pro Stunde. Hierdurch ergeben sich Einsatzbereiche überall dort, wo herkömmliche Sorter für Stückgüter wie Kisten, Kartons oder Behälter verwendet werden. Eine adaptierte Version des Steuerungsalgorithmus des GridSorters ermöglicht die Ausschleusung von Ladungsträgern in definierter Reihenfolge, wodurch der Einsatz von Sequenzierern gespart werden könnte.

Durch den modularen Aufbau und die dezentrale Steuerung werden Ausfälle einzelner Komponenten wirksam erkannt und behandelt. Der GridSorter verhält sich robust gegenüber Ausfällen: der Grenzdurchsatz wird zwar gemindert, das System bleibt jedoch einsatzfähig.

Die Untersuchung der Ausfälle zeigt sehr unterschiedliche Auswirkungen eines Modulausfalls auf den Grenzdurchsatz –je nach Position des Moduls innerhalb des Layouts. Die Leistungsminderung kann aufgrund der Komplexität des Systems nicht analytisch bestimmt werden, sondern muss per Simulation ermittelt werden. Die vorgeschlagene Darstellung mittels Heatmaps ermöglicht eine rasche Identifikation systemkritischer Module. Das entwickelte Simulationsmodell dient der Bestimmung der Leistungsminderung und bildet die Grundlage, um in Zukunft die Leistungsverfügbarkeit konkreter Anwendungsfälle bewerten zu können.

LITERATUR

- [FGS12] Furmans, Kai; Gue, Kevin R.; Seibold, Zázilia: Optimization of Failure Behavior of a Decentralized High-Density 2D Storage System. In: Dynamics in Logistics, Springer Berlin Heidelberg, 2013. S. 415-425.
- [GFSU14] Kevin R. Gue, Kai Furmans, Zázilia 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.
- [KRISO13] 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
- [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).
- [SF14] Seibold, Zázilia; Furmans, Kai: GridSorter – Logische Zeit in dezentral gesteuerten Materialflusssystemen. In: Logistics Journal : Proceedings, Vol. 2014. – ISSN 2192-9084.
- [vdi4486] VDI-Richtlinie 4486 : Zuverlässigkeit in der Intra-logistik – Leistungsverfügbarkeit, März 2012.

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

Dipl.-Ing. Zázilia 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: fuss@kit.edu, seibold@kit.edu und furmans@kit.edu