

# Simulative Untersuchung dezentraler Steuerungsverfahren komplexer Fördernetze

DIPL.-ING. DIRK LIEKENBROCK

FRAUNHOFER-INSTITUT FÜR MATERIALFLUSS UND LOGISTIK IML, DORTMUND

**Dezentrale Steuerungstechnologien lassen Vorteile sowohl für die Implementierung als auch den späteren Betrieb des Steuerungsverbundes von Stetigfördersystemen erwarten. Gestützt werden solche Konzepte wesentlich durch die RFID-Technologie. Der verringerte Aufwand für Gerätetechnik und Softwarerealisierung bedeutet aber auch, dass das Anlagenverhalten nicht mehr - wie in zentral gesteuerten Systemen - vollständig determiniert ist. In diesem Artikel wird ein simulationsbasiertes Verfahren vorgestellt, mit dem strategieinduzierte Leistungsunterschiede dieser beiden Steuerungskonzepte vereinfachend, aber umfassend untersucht werden können, um die Eignung des dezentralen Konzeptes zu überprüfen.**

## Einführung

Steuerungen von Stückgut-Stetigfördersystemen sind typischerweise hierarchisch organisiert. Durch die Ebenenteilung mit funktional abgegrenzten Bereichen soll eine höhere Verfügbarkeit und vereinfachte Wartung des Steuerungsverbundes sowie gleichzeitig die Integrierbarkeit von Automatisierungskomponenten verschiedener Hersteller erreicht werden. Mit steigender Anlagengröße wächst jedoch die Komplexität, Planung und Beherrschbarkeit des Systemverhaltens werden dadurch erschwert. Um frühzeitig eine leistungsgerechte Systemgestaltung nachweisen zu können und die Implementierung der Transportsteuerung vorzubereiten, sind Auswahl und Bewertung von Steuerungsverfahren für das Leitsystem regelmäßig Bestandteil einer simulationsgestützten Planung. Die Simulation des Materialflusssystemes kann dabei einen deutlichen Anteil innerhalb des Gesamtprojektablaufes ausmachen.

Dezentrale Steuerungsverfahren stellen eine interessante, wissenschaftlich bislang allerdings kaum untersuchte Alternative dar. Bereichsweise autonom operierende Steuerungsknoten vollziehen hierbei einen Steuerungsablauf ohne Einsatz eines übergeordneten Leitsystems durch zyklischen Austausch von Routing- und Belegungsinformationen. Durch die RFID-Technologie lässt sich das dezentrale Konzept zusätzlich verteilen und führt so zu vollständig autonom operierenden Steuerungseinheiten, die steuerungsrelevante Informationen synchron zum Transportgut austauschen [Bramel97]. Trotz einfach beschreibbarer Steuerungsverfahren ist zur Bestimmung durchsatzoptimierender Steuerungsparameter in einem ereignisdiskreten Simulationsmodell allerdings auch hier ein mit zentralisierten Steuerungsverfahren vergleichbar hoher Aufwand erforderlich.

In diesem Artikel wird ein Ansatz vorgestellt, der unter vereinfachenden Modellannahmen eine umfassende Untersuchung verteilter Steuerungsstrategien in komplexen, durch dezentrale Knoten gesteuerte Stückgut-Stetigfördersystemen ermöglicht. Ein auf der Grundlage irreduzibler Transportknoten erweitertes und abstrahiertes Materialflussmodell bildet den Ausgangspunkt zur Entwicklung eines Assistenzsystems, dessen Anwendbarkeit im Folgenden untersucht und bewertet wird.

## Problemstellung

Der Anlagendurchsatz und die Verteilung der Transportzeiten in einem Fördersystem mit einer dezentralen Steuerung im Vergleich zu einem zentral gesteuerten Fördersystem sind durch Simulationen im Vorfeld der Realisierung bestimmbar. Zur Simulation komplexer Fördersysteme eignen sich ereignisdiskrete Materialflusssimulatoren aufgrund ihrer zeitgenauen Abbildung in besonderem Maße. Systemmodelle werden durch vorkonfigurierte Modellelemente schnell erstellt und der Steuerungsablauf modellspezifisch programmiert. Diese Programmierung umfasst das Routing an Verzweigungen und das Sequenzieren von Güterströmen an Zusammenführungen. Beide Programmbestandteile können statisch oder dynamisch sein. Statische Strategien sind ein-

fache Abfertigungsregeln an Zusammenführungen bzw. festeingestellte Routingregeln. Die Anzahl solcher Regeln ist funktionsbedingt begrenzt. Dynamische, d.h. lastadaptive Strategien erfassen zusätzlich Lastzustände in Anlagenteilen, um auf zeitliche Schwankungen des Anlagendurchsatzes reagieren zu können.

Dynamische Strategien können sich deutlich auf durchsatzbezogene Größen auswirken und führen ein - gegenüber statischen Strategien - optimiertes Verhalten herbei. Das Programmieren und die Durchführung der Simulationsläufe mit adaptiven Strategien stellt jedoch eine besondere Herausforderung dar, da iterativ Simulationsläufe und Anpassungen der Grundstrategien erforderlich sind, um ein insgesamt optimiertes Anlagenverhalten einstellen zu können. Bei komplexen Modellen mit einer großen Anzahl von Modellelementen führt diese Vorgehensweise zu aufwändigen Anpassungen und einer entsprechend langen Simulationsdauer [Fowler04].

## Vorgehensweise

Neben einer ereignisdiskreten Modellierung mit einer zeitgenauen Abbildung können Förderprozesse auch ortsdiskret abgebildet werden. Die Strecken eines Fördersystems sind für diese ortsdiskrete Abbildung in  $i$  Segmente der Länge  $l_k$  ( $k \in [1;i]$ ) unterteilt, die mit einem Transportobjekt belegt sein können. Ein Förderprozess wird durch ein getaktetes Verschieben eines Transportobjektes entlang der Segmente ausgeführt. Da die Länge der Segmente beliebig klein wählbar ist, kann prinzipiell eine im Vergleich zur ereignisdiskreten Abbildung ähnlich hohe Abbildungsgenauigkeit im Orts- und Zeitbereich eingestellt werden. Die Zeitbasis  $T$  dieser Verschiebung ist konstant und wird für alle Segmente synchron ausgeführt, die in einem Segment  $k$  eingestellte Fördergeschwindigkeit  $v_k$  entspricht dann

$$v_k = \frac{l_k}{T} . \quad (1)$$

Berechnungsvorgänge in einem ortsdiskreten Modell können bei Vergrößerung der Segmentlänge aufgrund der verringerten Ereignishäufigkeit deutlich reduziert werden, allerdings lässt diese Abstraktion auch eine geringere Abbildungsgenauigkeit erwarten. Die Abbildungsgenauigkeit ortsdiskreter Modelle von Stückgut-Stetigfördersystemen muss daher im direkten Vergleich mit der ereignisdiskreten Simulation bewertet werden, um die Anwendbarkeit auf praxisbezogene Fragestellungen zu prüfen.

Für diese Untersuchung wird das Modell der irreduziblen Transportknoten [vgl. Großschallau84] zugrunde gelegt (Abb. 1), das für die Modellierung von Förderelementen die drei Elemente Strecke, Weiche und Zusammenführungen unterscheidet.

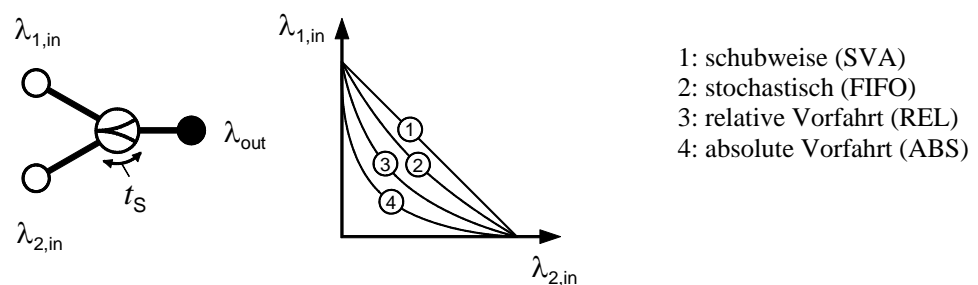


Abb. 1: Größen an einer Zusammenführung und Auswirkung der Strategien auf den Durchsatz

Während bei Strecken und Weichen bei vorgegebenen Fördergeschwindigkeiten durch die ortsdiskrete Modellierung lediglich ein zeitlicher Versatz der Förderzeiten im Vergleich zu ereignisdiskret modellierten Förderprozessen mit kontinuierlichem Ablauf auftritt, ist bei Zusammenführungen aufgrund der eingestellten Abfertigungsstrategie ein Unterschied der Durchlauf- und Wartezeiten von Stückgütern (Transportobjekten) vor dem Element zu erwarten und infolgedessen auch ein signifikanter Einfluss auf die Verteilung dieser Zeitanteile in einem aus vielen Knoten

erstellten komplexeren Modell. Zentraler Untersuchungsgegenstand ist damit zunächst das Zusammenführungselement.

Modelliert wird eine Zusammenführung mit zwei Eingangsstrecken, auf denen Gütersequenzen mit zufällig verteilten Zwischenankunftszeiten eingelastet sind, und die vom Zusammenführungselement strategiespezifisch abgefertigt werden. Für jedes Transportobjekt können die Zeitpunkte des Modelleintritts und -austritts bestimmt und damit Durchlauf- und Wartezeiten bestimmt werden (Abb. 2).

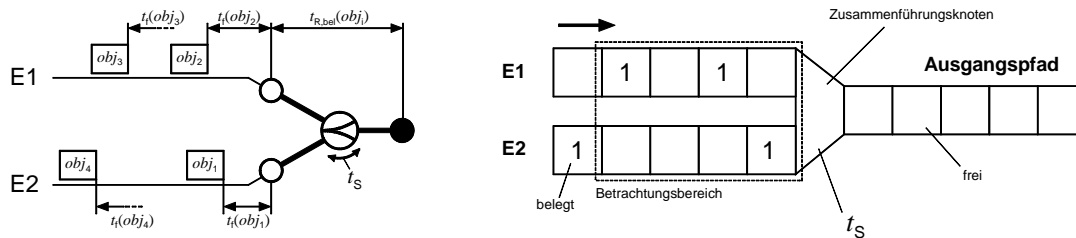


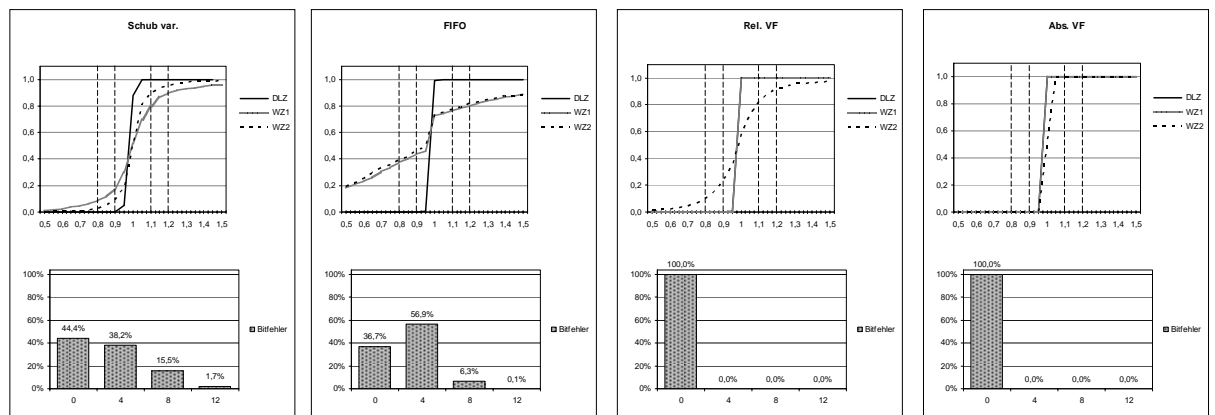
Abb. 2: Gegenüberstellung kontinuierliches und ortsdiskretes Modell

Das simulierte Behälterfördersystem enthält Behälter gleicher Länge, für das ortsdiskrete Modell ist die Segmentlänge auf eine Behälterlänge eingestellt.

Die Eingangssequenzen an den Pfaden E1 und E2 werden als kontinuierliche, zufallsverteilte Eintrittszeiten mit einer mittleren Zwischenankunftszeit  $\lambda m$  zwischen zwei Objekten erzeugt. Für das ortsdiskrete Modell sind die Eintrittszeiten auf ganzzahlige Werte der Zeitbasis  $T$  umgerechnet. Die erzeugten Eingangssequenzen werden jeweils unter vier Strategien (vgl. Abb. 1) für beide Fälle simuliert. Als Ergebnisse können die Gesamtdurchlaufzeit DLZ sowie die Summe der pfadbezogenen Wartezeiten WZ1 und WZ2 ausgewertet werden.

## Ergebnisse

Die kumulierte Verteilung der relativen Abweichungen von ortsdiskreter zu kontinuierlicher Simulation dieser drei Größen als Abszisse zeigt Abbildung 3 auf. Im ortsdiskreten Fall steigt bei sinkender Zwischenankunftszeit die Wahrscheinlichkeit, dass zwei Behälter zeitgleich an der Zusammenführung ankommen. Für die stochastische und schubweise Abfertigung ist dann nur eine Abfertigung nach dem Zufallsprinzip möglich. Infolgedessen kann sich die Ausgangssequenz beider Simulationsfälle jeweils paarweise unterscheiden. Die Bitfehlerrate als Indikator für die paarweise an der Zusammenführung vertauschten Behälter gibt die Häufigkeit dieser Vertauschungen bei gegebenen Eingangssequenzen an.



Parameter: 2 x 20 Objekte,  $\lambda m = 2$  s,  $t_S = 1$

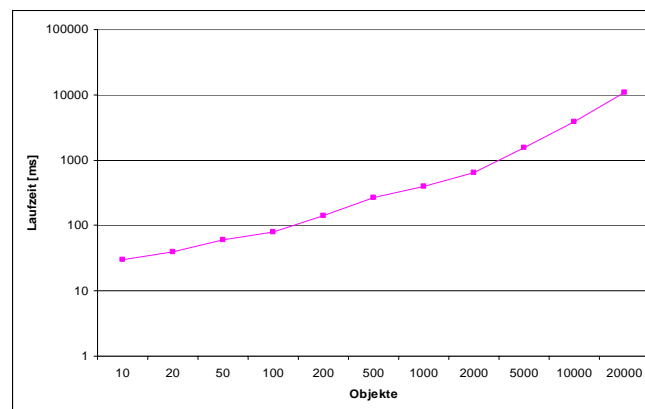
Abb. 3: Relative Abweichungen und Bitfehler von DLZ und WZ der ortsdiskreten Simulation (kum.)

Aufgrund der geringen Anzahl von Vertauschungen im ortsdiskreten Fall stellt sich für einzelne Transportobjekte an einer Zusammenführung nur eine geringfügige objektbezogene Abweichung der Durchlauf- bzw. Wartezeit im Bereich eines Segmentes gegenüber der ereignisdiskreten Simulation ein. In den betrachteten Fällen liegt die Anzahl der Bitfehler maximal bei zwölf, d.h. jeweils sechs Transportobjekte auf beiden Eingangspfaden wurden in der falschen Reihenfolge abgefertigt und liefern in der ortsdiskreten Simulation einen Fehler der DLZ und WZ von  $\pm 1$  Segmentlänge. Dieser Effekt trägt wesentlich zu den Verläufen der dargestellten Häufigkeitsverteilung bei: im Idealfall bilden die Verteilungen unter allen Strategien Sprungfunktionen, d.h. das Verhältnis der Zeiten im ortsdiskreten und kontinuierlichen Fall ist immer gleich 1. Dies ist prinzipbedingt nur bei der absoluten Vorfahrt gegeben.

## Weitere Arbeiten

Die gewonnenen Ergebnisse stellen die Größenordnung der zu erwartenden Abweichungen bei verschiedenen Eingangssequenzen, Zwischenankunftszeiten und Abfertigungsstrategien an einer Zusammenführung dar. Weiterhin zeigen erste vergleichende Simulationen an Netzwerken mit mehreren Weichen und Zusammenführungen Abweichungen der objektbezogenen Durchlauf- bzw. Wartezeiten gegenüber der ereignisdiskreten Simulation in einem Bereich unterhalb von 10% auf. Da zwischen den Abfertigungsstrategien „Schubweise Abfertigung“ und „Absolute Vorfahrt“ an nur einer Zusammenführung bereits Unterschiede in der Gesamtdurchlaufzeit von 100% auftreten und die Verteilung der Wartezeiten noch höhere Abweichungen aufweisen kann, ist die prinzipielle Anwendbarkeit des Verfahrens gegeben.

Exemplarische Untersuchungen Segmenten zeigen auf, dass dieses Verfahren auch in großen Netzen anwendbar ist. Der betrachtete Fall ist ein Modell mit 406 äquidistanten Segmenten, in dem 22 unabhängig parametrierbare Zusammenführungen als strategierelevante Elemente enthalten sind. Die erforderliche Berechnungsdauer zur Simulation von Förderprozessen ist proportional zur Anzahl der Modellsegmente, die benötigte Laufzeit kann anhand der Segmentanzahl in anderen Modellen linear umgerechnet werden. Um das Laufzeitverhalten zu illustrieren, wurden entlang einer Transportrelation im Modell Eingangssequenzen mit unterschiedlichen Objektanzahlen an einer Quelle in das Modell eingelastet und jeweils die Simulationsdauer aufgenommen (Abb. 4):



INTEL Pentium M; 1,8 GHz, 1GB

Abb. 4: Berechnungsdauer in Abhängigkeit von der Objektanzahl (kontinuierliche Einlastung)

Im betrachteten Fall kann die ereignisdiskrete Simulation damit zur umfassenden Simulation aller statischen Strategiekombinationen an den Zusammenführungen in endlicher Laufzeit herangezogen werden. Unter Einbeziehung von Lastzuständen auf Strecken ist damit die Untersuchung dynamischer, lastadaptiver Strategien zentralisierter Leitsysteme möglich. Eine Erweiterung des Assistenzsystems sieht die Simulation eines autonomen Objektverhaltens vor, bei dem Steuerungsentscheidungen lokal an Weichen und Zusammenführungen getroffen werden. Auf diese Weise sind zentrale und dezentrale Steuerungskonfigurationen bei identischen Einlastsequenzen unmittelbar zu vergleichen und zu bewerten.

## Literatur

- [Bramel97] Bramel, Julien; Simchi-Levi, Daniel: The logic of logistics - Theory, algorithms, and applications for logistics. (Springer series in operations research). Springer Verlag, 1997
- [Fowler04] Fowler, John W.; Rose, Oliver: Grand Challenges in Modeling and Simulation of Complex Manufacturing Systems, SIMULATION, Vol. 80, Nr. 9, Sept. 2004, S. 469- 476
- [Großeschallau84] Großeschallau, Werner; Jünemann, Reinhard (Hrsg.): Materialflußrechnung, Springer Verlag, 1984