

1 Einleitung

Der anforderungsgerechte Betrieb von Logistiksystemen bedingt in zunehmendem Maße eine optimierte Steuerbarkeit der Güterströme über Systemgrenzen hinweg. Eine solche übergreifende Optimierung impliziert eine genauere zeitliche und örtliche Erfassung der umgeschlagenen Stückgüter. Zudem müssen diese Daten in allen mit dem Umschlagprozess verbundenen Informationssystemen unmittelbar zugreifbar sein.

Mit dem *Internet der Dinge* [Bt07] wird eine neue Architektur für Informationssysteme entwickelt, welche die genannten Anforderungen gesamtheitlich abbildet und zukünftig einen global vereinheitlichten Austausch logistischer Daten ermöglichen wird. In diesem Kontext schaffen bereits heute normierte Datenformate und Basistechnologien günstige Voraussetzungen für eine Integration in bestehende Infrastrukturen.

Bislang nur unzureichend erforscht sind Auswirkungen des Internet der Dinge auf die Gestaltung und den Betrieb von Materialflusssystemen. Als Basistechnologie bilden RFID-Systeme die Grundlage für zukünftige dezentrale Materialflussteuerungen. Mit drahtlosen Sensornetzwerken wird darüber hinaus eine technische Plattform für die Entwicklung vernetzter logistischer Objekte bereit gestellt, die eine Selbstorganisation der Materialflussprozesse realisierbar erscheinen lässt.

Vielfältige Einsatzmöglichkeiten dieser ubiquitären Technologien rücken jedoch auch geeignete Methoden zur Planung solcherart gesteuerter Materialflusssysteme in den Blickwinkel einer wissenschaftlichen Betrachtung. Neben dezentralen Steuerungsalgorithmen ist die drahtlose Kommunikation in der Planung zukünftig besonders zu berücksichtigen. Die vorliegende Arbeit soll mit dem entwickelten Ansatz der Modellierung und Simulation einen Beitrag zur Planung dieser Systeme leisten.

1.1 Ausgangssituation

Auf dem derzeitigen Stand der Technik ist der Informationsfluss in der Automatisierungstechnik von Materialflusssystemen hierarchisch und zentral organisiert. Diese Architektur wird als bewährtes Entwurfsmuster auch in der Planung der Automatisierungstechnik zugrunde gelegt. Zentrales Element ist ein Materialflussrechner, der sensorisch erfasste physische Abläufe eines Systems verarbeitet und so den Materialfluss koordiniert sowie optimiert. Mit jeweils hohem Aufwand für Implementierung und Inbetriebnahme werden systembedingte Nachteile einer zentralen Steuerungsstruktur jedoch offenbar.

2 Materialflusssteuerung im Internet der Dinge

Ubiquitous Computing findet mit dem *Internet der Dinge* eine der ersten Anwendungen industriellen Maßstabs. Im Vordergrund steht die Steigerung der Identifikationsfähigkeit logistischer Objekte und damit eine Optimierung globaler Lieferketten unter Einsatz von RFID-Systemen [Bt07]. Zugleich führt das Internet der Dinge eine neue Architektur der dezentralen Automatisierung innerbetrieblicher Materialflüsse ein. Ausgehend vom Stand der Technik werden RFID-Systeme als Bestandteil der dezentralen Materialflusssteuerung diskutiert und daran die in dieser Arbeit zu behandelnden Forschungsfragen abgeleitet.

2.1 Stand der Automatisierung von Materialflusssystemen

An der Schnittstelle zwischen Lagerung, Kommissionierung und anderen Bereichen ist das Fördern von Stückgütern die verbindende Funktion in einem Materialflusssystem [VDI3628]. Auf dem Stand der Technik kann eine vollständige Automatisierbarkeit für nahezu alle Ausprägungen der Fördertechnik in Materialflusssystemen vorausgesetzt werden.

2.1.1 Eingrenzung des Anwendungsbereiches

Anwendungsbeispiele illustrieren nachfolgend den Einsatz der Automatisierungstechnik in Fördersystemen. Von dieser feldnahen Automatisierung ist die Materialflusssteuerung als funktional übergeordneter Bereich eines Automatisierungsverbunds abzugrenzen.

Automatisierte Funktionen in Materialflusssystemen

Eine elementare Funktion ist die Automatisierung der Bewegung von Fördermitteln bzw. von Gütern auf Fördererelementen. Durch eine *Antriebssteuerung* wird ein Bewegungsablauf vorgegeben, dem mit einer *Antriebsregelung* definierte Beschleunigungsverläufe aufgeprägt werden können. Die Positioniergenauigkeit wird in einer *Lageregelung* durch Erfassen einer Achsposition eingestellt, z. B. bei Regalbediengeräten (RBG) und Kränen. Wie im Falle eines Fahrerlosen Transportfahrzeuges (FTF) erfordert die Lageregelung schlupfbehalteter Antriebe zusätzlich eine Kopplung mit Systemen zur *Spurführungen* oder *Navigation*, um eine ausreichende Positioniergenauigkeit erreichen zu können.

Neben der Steuerung von Fördermitteln ist die Erfassung von Stückgütern ein weiterer Anwendungsbereich der Automatisierung. Für eine Erfassung der *Form- und Lage* werden

3 Planung der Steuerung von Fördersystemen

Automatisierte Gepäckförderanlagen repräsentieren, bemessen an den Anforderungen und der technischen Ausgestaltung, Materialflusssysteme höchster Komplexität. Mit dem Ziel einer Analyse funktionaler Anforderungen bilden sie den Betrachtungsgegenstand dieses Kapitels und werden im ersten Abschnitt eingeführt.

Eine Planung umfasst als übergeordneter Prozess die Auswahl und Konfiguration aller Komponenten eines Systems. Aufgrund wechselseitiger Abhängigkeiten ist die Steuerung eines Materialflusssystems nicht isoliert planbar, vielmehr schließt sie eine Betrachtung der Materialflussplanung mit ein. Grundzüge der Materialflussplanung und ihrer Methoden werden daher im zweiten Abschnitt dargestellt.

Im dritten Abschnitt sind funktionale Anforderungen einer Materialflussteuerung aus den vorhergehenden Darstellungen aggregiert. Als Methode zur Verteilung der Funktionen einer Steuerung werden Agentensysteme eingeführt. Anhand einer Komplexitätsanalyse von Materialflussteuerungen werden zudem mögliche Effekte einer so herbeigeführten Dezentralisierung diskutiert.

3.1 Gepäckumschlag an Flughäfen

Die Abfertigung konstant steigender Passagierzahlen erfordert eine langfristig leistungsfähige Flughafeninfrastruktur. Wichtiger Bestandteil dieser Infrastruktur sind Einrichtungen für den Gepäckumschlag, die im Kontext des Flughafenbetriebs in diesem Abschnitt vorgestellt werden. Der Güterumschlag (Cargo) ist von dieser Betrachtung ausgenommen.

3.1.1 Verkehrsaufkommen in der Personenluftfahrt

Als einziger Verkehrszweig verbindet die Luftfahrt große Reichweiten mit kurzen Reisezeiten, internationale Reiserouten werden zum überwiegenden Teil durch den Luftverkehr bedient. Im Inland tritt der Luftverkehr gegenüber anderen Verkehrsträgern zurück.

Personenverkehre in Deutschland

Das Statistische Bundesamt verzeichnet für 2005 etwa 147 Mio. Passagierbewegungen an allen deutschen Flughäfen [SB06a]. Mit etwa 5% pro Jahr ist der Zuwachs des Passagieraufkommens im weltweiten Personenluftverkehr nach [Eur04b] seit langem konstant,

4 Simulation von Materialflusssystemen

In vielen Gebieten der Ingenieurwissenschaften ist die numerische Simulation als Methode für die Untersuchung dynamischer Modelle verbreitet. Bedeutung in der Materialflusstechnik hat die Simulation aufgrund der Möglichkeit einer visuell unterstützten Systemanalyse und -optimierung. Die Modellierung und Simulation von Materialflusssystemen mittels Multiagentensystemen stellt ein neuartiges Konzept dar, welches anhand von Anwendungsfällen aus anderen Disziplinen und den Ausprägungen dieses Modellierungsparadigmas auf eine Übertragbarkeit untersucht wird.

4.1 Methodische Grundlagen

Die numerische Simulation ist eine Methode zur Unterstützung planerischer und betrieblicher Entscheidungsprozesse. Im Unterschied zu analytischen Methoden kann mit der Simulation die Systemdynamik detailliert untersucht werden [Ral98], allerdings mit einem höheren Zeitbedarf für die Modellierung und Versuchsdurchführung (vgl. Abb. 4.1).

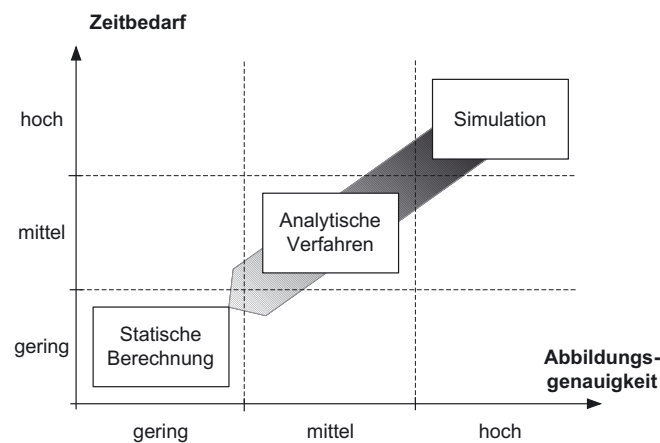


Abbildung 4.1: Aufwand und Abbildungsgenauigkeit verschiedener Planungsmethoden

Während statische Berechnungsverfahren zur groben Dimensionierung eines Materialflusssystems angewendet werden, bilden analytische Verfahren wie beispielsweise die Bedientheorie in begrenztem Umfang auch stochastische Einflüsse ab. Verfahren der Ablaufsimulation finden demgegenüber in allen Phasen der Planung und des operativen Betriebs eines Materialflusssystems durchgängig Anwendung.

5 Ortsdiskrete Modellierung und Simulation

Die im vorangegangenen Kapitel eingeführten zellularen Automaten bieten die technologische Grundlage für eine ortsdiskrete Modellierung von Materialflusssystemen. In diesem Kapitel soll aufgezeigt werden, welche prinzipiellen Unterschiede zur ereignisdiskreten Modellbildung und Simulation bestehen. Daneben werden die erzielbare Abbildungsgenauigkeit sowie das Laufzeitverhalten ortsdiskreter Modelle untersucht.

5.1 Gegenüberstellung mit ereignisdiskreten Systemen

In der Literatur wird als Modellklasse für Simulationen mehrheitlich die Ereignisdiskretisierung vorgeschlagen [Lun06]. Aufgrund der diskreten Erscheinung von Stückgutprozessen zählen Materialflusssimulationen ebenfalls zu dieser Klasse, der ausschließliche Einsatz ereignisdiskreter Ablaufsimulatoren für verschiedene Aufgabenstellungen wird jedoch als nicht ausreichend bewertet [Lul99]. Ein Vergleich orts- und ereignisdiskreter Simulatoren arbeitet die wesentlichen Merkmale beider Prinzipien heraus.

5.1.1 Systemtheoretischer Hintergrund

Anhand systemtheoretischer Ansätze¹ wird einleitend das Verhalten dynamischer Systeme und der darin wechselwirkenden Elemente beschrieben, die hier betrachteten Systeme werden anhand ihrer Merkmale unterschieden.

Begriffsbestimmung

Die Elemente eines *Systems* und damit das System selbst sind zu einem beliebigen Zeitpunkt durch bestimmte Attribute, sog. *Zustandsgrößen* gekennzeichnet, deren Gesamtheit als *Zustand*² bezeichnet wird. In mathematischen Modellen entsprechen diese Größen *Zustandsvariablen*, deren Zusammenwirken durch Gleichungssysteme formulierbar ist.

Die möglichen Ausprägungen der Zustände spannen einen *Zustandsraum* auf. Jede Veränderung einer Zustandsgröße und damit des Zustands über den Zeitverlauf entspricht einem *Prozess*, das Erreichen eines bestimmten Zustands wird als *Ereignis* bezeichnet.

¹ In den Ingenieurwissenschaften sowie der Informatik liefern die *Kybernetik* bzw. die *Informationstheorie* entsprechende Ansätze, vgl. hierzu WIENER und SHANNON.

² Vgl. hierzu auch VDI-Richtlinie 3633.

6 Evaluierung der Anwendbarkeit

In diesem Kapitel wird die Eignung des vorgestellten Modellierungsansatzes an einem Fallbeispiel aus der Praxis diskutiert. Die Vorgehensweise bei der Modellierung und die in der Simulation erzielten Ergebnisse zeigen in direkter Gegenüberstellung mit Betriebsdaten auf, wie das vorgestellte Simulationskonzept angewendet werden kann.

Neben der Untersuchung der Abbildungsgenauigkeit liegt ein weiterer Schwerpunkt der Betrachtung in der Bestimmung des Laufzeitverhaltens sowie der Entwicklung eines Modells, mit dem das Laufzeitverhalten auf andere Modelle übertragbar wird.

6.1 Abbildungsgenauigkeit in der Simulation

Simulationen zur Untersuchung von Materialflüssen sind nur bei ausreichender Abbildungsgenauigkeit anwendbar. Eine Methode zur Bestimmung der Abbildungsgenauigkeit des in Kap. 5 beschriebenen Simulationskonzepts wird in diesem Abschnitt vorgestellt.

6.1.1 Dimensionen der Abbildung

Die Abbildungsgenauigkeit bewertet den Unterschied zwischen einem realen System und dem abstrahierenden Modell. Für diesen Vergleich werden die Aspekte betrachtet, die im Modell eines Systems abgebildet sind. Diese Aspekte lassen sich gliedern in Modellklassen, für die in der Literatur auch der Dimensionsbegriff gebräuchlich ist. Üblich ist eine Unterscheidung der Struktur- sowie der Verhaltensdimension [BS04], zusätzlich wird das Systemverhalten auch nach Funktionen differenziert¹ (siehe u. a. [Dan03]):

Struktur: Eine Strukturanalogie liegt vor, wenn ein Modell die statischen Bestandteile eines Systems korrekt abbildet. Die Struktur eines Materialflusssystemes ist durch das Layout der Förderelemente sowie deren geometrische Eigenschaften beschrieben.

Verhalten: Das Verhalten des Systems ist durch die zeitliche Abfolge von Förderprozessen sowie deren Verlauf im Fördersystem bestimmt, es kann mathematisch beschrieben und damit bewertet werden.

Funktion: Funktionen sind lokale Ausprägungen des Verhaltens und auf Modellelemente oder Elementgruppen bezogen.

¹ Die ebenfalls in der Literatur beschriebene materielle Dimension hat im Zusammenhang mit einer Materialflusssimulation keine Bedeutung.

7 Zusammenfassung und Ausblick

In dieser Arbeit werden Auswirkungen des Internets der Dinge auf die Planung und den Betrieb innerbetrieblicher Fördersysteme untersucht. Den Ausführungen geht die Annahme voraus, dass Technologien wie RFID und Sensornetze veränderte Anforderungen für die Planung eines durch diese Komponenten gesteuerten Materialflusssystems herbeiführen. In diesem Zusammenhang wird der Unterschied zentral und dezentral organisierter Materialflusssysteme in technischen und algorithmischen Aspekten diskutiert. Einflüsse der Architektur auf den Durchsatz werden in den hier betrachteten Stetigfördersystemen analytisch bewertet.

Mit Agentensystemen liegt ein neuartiger Beschreibungsansatz vor, der im Rahmen dieser Arbeit zur Entwicklung eines agentenbasierten Simulationskonzeptes genutzt wird. Die dort vorgenommene Modellierung mittels zellulärer Automaten ermöglicht eine effiziente Simulation auch großer Modelle, wie anhand des evaluierten Praxisbeispiels nachgewiesen wird.

7.1 Ergebnisse der Arbeit

Die vorliegende Arbeit untersucht die Planung und Steuerung von Materialflusssystemen vor dem Hintergrund eines prognostizierten Technologiewandels der Informations- und Steuerungstechnik. Dieser Wandel bedingt erweiterte Simulationsmethoden. Neben der Kopplung zwischen dem Modell eines Materialflusssystems und der realen Steuerungstechnik erscheint die agentenbasierte Modellierung und Simulation als durchgängiger Ansatz vielversprechend. Eine entsprechende Plattform wird in dieser Arbeit vorgestellt.

7.1.1 Agentenbasierte Materialflusssimulation

Das in dieser Arbeit entwickelte Simulationskonzept basiert auf einem Ansatz, der bereits in den Verkehrswissenschaften zur Analyse des Stau- und Flussverhaltens weiträumiger Verkehrsnetze erfolgreich angewendet worden ist. Aufgrund der naheliegenden Analogie wird in der vorliegenden Arbeit eine Erweiterung dieses Ansatzes auf die Simulation von Stetigfördersystemen übertragen.

Die vorgenommene Evaluierung weist eine sehr gute Übereinstimmung mit dem Betriebsverhalten realer Systeme auf. Bereits bei geringem Modellierungsaufwand ist eine hohe Abbildungsgenauigkeit erzielbar. Strukturparameter der Agentensimulation ist die Zellengröße, deren Einfluss auf Abbildungsgenauigkeit und Laufzeit untersucht ist.