

# 1. Einführung

„I conclude that there are two ways of constructing a software design: One way is to make it so simple that there are obviously no deficiencies and the other way is to make it so complicated that there are no obvious deficiencies.“

- C.A.R. Hoare  
THE 1980 ACM TURING  
AWARD LECTURE

## 1.1 Problemstellung

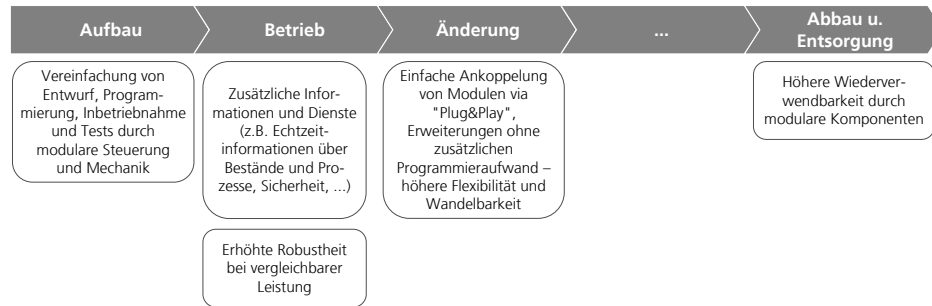
Die Steuerung von Materialflusssystemen in der Intralogistik zählt zu den umfangreichsten Software- und Datenbankanwendungen ([tH08b], S. 322)<sup>1</sup>. Deren Komplexität wird sich in Zukunft aller Voraussicht nach weiter erhöhen<sup>2</sup>. Dabei treten bei den heute üblichen zentralen Materialflussteuerungen in einigen Bereichen Probleme auf. Insbesondere kann sich eine schlechte Flexibilität und Skalierbarkeit, die durch die hohe Komplexität der Software bedingt ist, als problematisch erweisen (vgl. [GCK08a], S. 422, [tHN08], S. 2, [SRFR<sup>+</sup>05], S. 167). Vom Anwender erfordert dies oft, dass entweder für jede Applikation mit hohem Aufwand eine individuelle Prozessarchitektur abgebildet wird oder dass der Anwender seine Prozesse einem vorgegebenem Standard unterwirft ([tH08b], S. 323). Manche Autoren sprechen in diesem Zusammenhang auch von einer Komplexitätsfalle ([GCK08a], S. 422).

Seit einiger Zeit wird die Dezentralisierung der Materialflussteuerung untersucht, oft unter dem Begriff *Internet der Dinge in der Intralogistik* (vgl. beispielsweise [BtH07], [GCK08a], [Mik08], [SRFR<sup>+</sup>05], [SRBBW07] und [tH06b]). Grundlage dafür ist die Weiterentwicklung von Identifizierungstechnologien<sup>3</sup>, die eine Synchronisierung von Material- und Informationsfluss ermöglichen [Mik08].

<sup>1</sup> Ähnlich auch [Hal07], S. 105, der Gepäckförderanlagen an Flughäfen zu den komplexesten und größten Systemen der gesamten Luftfahrtindustrie zählt. Laut [Jen01], S. 35 ist die Entwicklung von Software für industrielle Anwendungen eine der schwierigsten Aufgaben, die Menschen überhaupt in Angriff nehmen.

<sup>2</sup> [tH08b], S. 323 erwähnt beispielsweise, dass der Datenbestand eines durchschnittlichen Distributionszentrums in den letzten zehn Jahren um den Faktor 1.000 gewachsen ist.

<sup>3</sup> Vor allem RFID, vgl. hierzu [Lan08], S. 11 und [o.V08].



**Abbildung 1.1.** Vorteile des Internets der Dinge im Lebenszyklus eines Materialflusssystemes

So können Informationen bezüglich des Ziels, der Bearbeitungsschritte und des Routings direkt auf die Prozessebene verlagert werden ([GCK08a], S. 423f). Dieses Konzept verspricht zum Teil deutliche Vorteile über den gesamten Lebenszyklus eines Materialflusssystemes (siehe Abbildung 1.1).

Wesentlich ist die erhöhte Flexibilität bzw. Wandelbarkeit selbstorganisierter Materialflusssysteme (vgl. [FHSR04], S. 24, [JGL<sup>+</sup>06], [Koh08], S. 44, [SRFR<sup>+</sup>05], S. 167, [SRBBW07], S. 182, [tH06b], S. 4, [tHFR08], S. 24), die sich daraus ergibt, dass die Steuerung des Systems emergent nach dem Einschalten entsteht und nicht vorab entworfen werden muss<sup>4</sup>. Notwendige Änderungen können so mit geringerem Aufwand durchgeführt werden, als bei einem zentral gesteuerten Materialflusssystem. Dadurch entstehende Effizienzgewinne selbstorganisierter Materialflusssysteme wurden allerdings bisher kaum untersucht und insbesondere nicht quantifiziert<sup>5</sup>.

Daraus ergibt sich das Problem, dass einer der grundlegenden Vorteile selbstorganisierter Materialflusssysteme bisher nicht quantifizierbar ist und somit auch nicht wirtschaftlich bewertet werden kann. Im Gegensatz dazu sind jedoch viele Kosten, die in Folge der Einführung selbstorganisierter Systeme entstehen, eindeutig zu bestimmen<sup>6</sup>. Diese Situation ist unbefriedigend; die Entwicklung einer geeigneten Bewertungsmethodik für Wandelbarkeit in der Intralogistik ist daher eine wichtige Grundlage für den weiteren Erfolg des Internets der Dinge in der Intralogistik<sup>7</sup>.

<sup>4</sup> [tH06b], S. 4 vergleicht dies mit der *Plug and Play*-Funktionalität heutiger Computer.

<sup>5</sup> So beschreibt [SRBBW07], S. 182 Flexibilität als „nicht direkt quantifizierbare Größe“. [GCK08c], S. 558 sieht diese als „funktionalen Vorteil“ im Gegensatz zu wirtschaftlichen Vorteilen in der Aufbauphase.

<sup>6</sup> Beispielsweise die Kosten für RFID-Tags bei offenen Systemen oder die Entwicklungskosten selbstorganisierter Steuerungen.

<sup>7</sup> Im Zusammenhang mit flexiblen Fertigungsanlagen merkt z.B. [Cor91], S. 48 an: „When a flexible capacity investment has to be justified, it is often done on no more than strategic-qualitative supporting grounds. It is an argument which calls loudly to the entrepreneur to take the risk, in fact the lack of concrete financial savings in hard figures is replaced by an intuitive, strategic vision which certainly cannot afford to be wrong.“. Ähnlich auch [Ger93], S. 401f., [SWF05], S. 1, [ALW06], S. 1 und [Mö108], S. 67.

## 1.2 Ziel der Untersuchung

Das Ziel dieser Untersuchung ist der Entwurf einer Methodik zur Quantifizierung von Effizienzgewinnen durch Wandelbarkeit bei Materialflusssystemen in der Intralogistik. Die Methodik soll insbesondere zur Untersuchung selbstorganisierter Systeme geeignet sein und die Grundlage für eine quantitative und umfassende Beurteilung des Einsatzes des Internets der Dinge in der Intralogistik bilden.

Mit Hilfe der entwickelten Methodik sollen anschließend mögliche Effizienzgewinne selbstorganisierter Systeme anhand eines realistischen Beispiels untersucht werden. So soll die praktische Anwendung der Methodik verdeutlicht und der Einsatz des Internets der Dinge in der gewählten Anwendung bewertet werden.

## 1.3 Gang der Untersuchung

In Kapitel 2 werden die für den weiteren Verlauf der Untersuchung relevanten Grundlagen erläutert. Abschnitt 2.1 stellt das Konzept der Selbstorganisation und des Internets der Dinge in Materialflusssystemen vor und gibt einen Überblick über den Stand der Forschung in diesem Gebiet. Darauf aufbauend werden in Abschnitt 2.2 mögliche Auswirkungen des Einsatzes selbstorganisierter Systeme auf die Effizienz eines Materialflusssystems im Lebenszyklus diskutiert. Dazu werden in der Literatur häufig erwähnte Vorteile selbstorganisierter Systeme vorgestellt und untersucht. Es wird herausgearbeitet, dass selbstorganisierte Systeme vor allem hinsichtlich der Flexibilität bzw. Wandelbarkeit deutliche Vorteile gegenüber herkömmlichen Steuerungsmethoden bieten können.

Die Begriffe *Flexibilität* und *Wandelbarkeit* werden jedoch in der Literatur sehr unterschiedlich verwendet. Zudem stammen viele der Definitionen und Methoden zur Quantifizierung von Flexibilität und Wandelbarkeit aus dem Produktionsbereich und sind nicht ohne Weiteres auf die Intralogistik übertragbar. Abschnitt 2.3 gibt einen Überblick über den Stand der Forschung zur Definition und Messung von Flexibilität und Wandelbarkeit und grenzt diese Begriffe voneinander ab. Dabei wird besonders auf die (wenigen) Arbeiten aus der Intralogistik eingegangen.

Abschnitt 2.4 bewertet die gewonnenen Erkenntnisse hinsichtlich ihrer Eignung zur Untersuchung von Effizienzvorteilen selbstorganisierter Materialflusssysteme, grenzt den Untersuchungsbereich der Arbeit ab und ordnet sie in das Forschungsgebiet ein.

Aufbauend darauf wird in Kapitel 3 eine Methodik entwickelt, mit der sich Vorteile einer erhöhten Wandelbarkeit über den Lebenszyklus von Materialflusssystemen quantifizieren lassen. Diese wird im weiteren Verlauf für einen Vergleich herkömmlicher mit selbstorganisierten Materialflusssystemen verwendet. Sie eignet sich aber auch zur Quantifizierung von Wandelbarkeit in der Intralogistik, die sich aus anderen Gründen ergibt<sup>8</sup>.

<sup>8</sup> Beispielsweise durch einen modularen Aufbau der Fördertechnik oder die örtliche Mobilität von Materialflusssystemen.

Zunächst werden dafür in Abschnitt 3.1 Anforderungen an die Methodik herausgearbeitet. In Abschnitt 3.2 wird darauf aufbauend eine für den Untersuchungsgegenstand geeignete Methodik entworfen. Diese beruht im Wesentlichen auf einer Betrachtung der durch die Wandelbarkeit beeinflussten Auszahlungen im Lebenszyklus und einer dynamischen Optimierung der notwendigen Anpassungen von Durchsatz, Layout und Fördergut.

In Kapitel 4 werden grundlegende Eigenschaften von Wandelbarkeit und ihrer Quantifizierung mit Hilfe der gewählten Methodik untersucht. Aufgrund der durchgängigen mathematischen Formulierung können wichtige Zusammenhänge in Form geschlossener Formeln angegeben werden.

Zunächst wird in Abschnitt 4.1 ein *Wert der Wandelbarkeit*  $\mathcal{W}$  definiert. In Abschnitt 4.2 wird für den eindimensionalen Fall der funktionale Zusammenhang zwischen  $\mathcal{W}$  und den Investitionsfixkosten durchzuführender Änderungen untersucht. Wichtige Grenzfälle dieses Zusammenhangs werden geschlossen hergeleitet: Dies erlaubt eine einfache Analyse der Vorteilhaftigkeit von Wandelbarkeit für eine Vielzahl praktischer Probleme.

Abschnitt 4.3 untersucht den (Regel-)Fall einer ungewissen Zukunft und verdeutlicht den Zusammenhang zwischen dem Wert der Wandelbarkeit und einer unbekanntem Zukunft. Es wird gezeigt, dass in diesem Fall Wandelbarkeit wichtiger ist als im Falle einer bekannten Zukunft.

Die vorgeschlagene Methodik erlaubt die Untersuchung der Wandelbarkeit von Materialflusssystemen in mehreren Dimensionen. Dies ist beispielsweise wichtig, wenn die Auslegung eines Materialflusssystemes sowohl vom Durchsatz als auch der Anzahl an Quellen und Senken abhängig ist. Abschnitt 4.4 erläutert die Behandlung mehrdimensionaler Probleme und illustriert wichtige Implikationen anhand des zweidimensionalen Falls.

Abgesehen von den in Abschnitt 4.2 behandelten Grenzfällen müssen reale Probleme in der Regel numerisch gelöst werden. Abschnitt 4.5 erläutert den mit der numerischen Lösung verbundenen Rechenaufwand.

Kapitel 5 untersucht schließlich Effizienzvorteile durch erhöhte Wandelbarkeit selbstorganisierter Materialflusssysteme anhand einer praktischen Anwendung. Als Referenzbeispiel wurden Gepäckförderanlagen von Flughäfen gewählt. Dabei wird die herkömmliche Steuerung einer Gepäckförderanlage mit zwei selbstorganisierten Varianten verglichen. Für die quantitative Analyse wurden realitätsnahe Daten verwendet, die mit Hilfe einer umfassenden Literaturrecherche, der Auswertung einer Vielzahl von öffentlichen und nicht-öffentlichen Quellen sowie Expertengesprächen mit den Herstellern und Betreibern von Gepäckförderanlagen gewonnen wurden. Die Betrachtung beinhaltet eine umfassende Sensitivitätsanalyse.

Kapitel 6 fasst die Untersuchung und ihre Ergebnisse zusammen. Darüber hinaus werden mögliche Richtungen für weitergehende Untersuchungen aufgezeigt.

Abschließend ein Hinweis zur Lektüre dieser Arbeit: Diese ist so aufgebaut, dass nicht die gesamte Arbeit gelesen werden muss, falls lediglich Interesse an bestimmten Teilaspekten besteht.

Bei besonderem Interesse an dem praktischen Beispiel und dessen Ergebnissen wird empfohlen, zunächst das Kapitel 3 zu lesen. Mit den dort erläuterten Grundlagen ist das Beispiel in Kapitel 5 unabhängig von anderen Kapiteln verständlich. Bei Interesse an der Definition, Bewertung und Quantifizierung von Wandelbarkeit werden der Abschnitt 2.3 sowie das Kapitel 3 nahe gelegt. Kapitel 4 baut auf diesem auf und beleuchtet wichtige Eigenschaften der vorgeschlagenen Methodik quantitativ.

Für eine Analyse der Vorteile selbstorganisierter Materialflusssysteme und des Internets der Dinge in der Intralogistik werden die Abschnitte 2.1, 2.2, 5.5 sowie das Kapitel 6 empfohlen.

Details zu Gepäckförderanlagen sind schließlich in Kapitel 5 und insbesondere in Tabelle A.3 zu finden.