

Dezentrale assistierte Planung: Integrierte Layout- und Systemplanung von Intralogistiksystemen auf Grundlage einer agentenbasierten Software

Decentralized, assisted planning: integrated layout and system planning of intralogistics systems based on a multi-agent software

*Ruben Noortwyck
Timo Müller
Karl-Heinz Wehking
Michael Weyrich*

*Institut für Fördertechnik und Logistik (IFT)
Fakultät für Konstruktions-, Produktions- und Fahrzeugtechnik
Universität Stuttgart*

*Institut für Automatisierungstechnik und Softwaresysteme (IAS)
Fakultät für Informatik, Elektrotechnik und Informationstechnik
Universität Stuttgart*

In diesem Beitrag wird eine dezentral aufgebaute Methodik zur integrierten System- und Layoutplanung vorgestellt. Das Konzept für die Systemplanung basiert auf intelligenten Planungsobjekten, welche die autonomen Einheiten innerhalb der Planung logistischer Systeme darstellen. Diese intelligenten Planungsobjekte werden in einem agentenbasierten Assistenzsystem abgebildet. Basierend auf den intelligenten Planungsobjekten ist das Systembildungskonzept in die Phasen Komposition, Konfiguration und Adaption unterteilt. Diese werden als regelbasierte Interaktionen zwischen den intelligenten Planungseinheiten modelliert. Das Konzept der integrierten Layoutplanung basiert auf der Verwendung eines mathematischen Modells. Hierzu wurden entsprechende Agenten für die Layoutplanung konzipiert. Das im mathematischen Modell beschriebene Optimierungsproblem wird dabei mit Hilfe einer Heuristik gelöst. Ein Agentensystem organisiert die Ausführung des Heuristik-Algorithmus für alle möglichen Layout-Konstellationen und bewertet diese anschließend. So bietet es, in Form eines Assistenzsystems, Unterstützung von der Aufgabenstellung über die Ressourcenauswahl bis hin zur Layoutplanung.

[Schlüsselwörter: Layoutplanung, Systemplanung, Heuristik, Agentensystem, Assistenzsystem]

This article introduces a decentralized methodology for integrated system and layout planning. The concept for system planning is based on intelligent planning objects, which represent the autonomous units within the planning of logistical systems. These intelligent planning

objects are depicted in a multi-agent assistance system. Based on the intelligent planning objects, the system planning concept is divided into the phases composition, configuration and adaption. These are modeled as rule-based interactions between the intelligent planning units. The concept for the integrated layout planning is based on the usage of a mathematical model. Therefore, appropriate agents for the layout planning were designed. The optimization problem described in the mathematical model is solved by using a heuristic. An agent system organizes the execution of the heuristic algorithm for all possible layout constellations and evaluates them. Thus, it offers support from the task description to the resource selection and all the way to layout planning in the form of an assistance system.

[Keywords: Layout planning, system planning, heuristic, multi-agent system, assistance system]

1 EINLEITUNG

Im Rahmen der Planung von Intralogistiksystemen gehört die Grobplanung zu den anspruchsvollen Aufgaben. Trotz der überaus großen Bedeutung von Intralogistiksystemen für die Wettbewerbsfähigkeit eines Unternehmens fehlen bislang rechnergestützte Ansätze sowohl zur funktionsbereichsübergreifenden als auch zur integrierten Layout- und Systemplanung von Intralogistiksystemen. Bisherige rechnergestützte Ansätze beschränken sich entweder auf einzelne Teilsysteme eines Intralogistiksystems [E115] oder die abgebildeten Intralogistiksysteme basieren zu stark auf Abstraktionen, wodurch die realen Gegebenheiten

unzureichend abgebildet werden [Weh12]. Derartige Planungsansätze können zu einer erheblichen Fehlplanung führen, welche letzten Endes den Erfolg eines kompletten Projekts gefährden kann. Aus diesem Grund werden neuartige Konzepte zur rechnergestützten Grobplanung benötigt. Der Planungsprozess von Intralogistiksystemen ist häufig von der Erfahrung des Planers abhängig. Die Entwicklung von Intralogistiksystemen erfolgt individuell basierend auf Kundenwünschen, wobei die Herausforderung darin besteht, die einzelnen Bestandteile (Funktionen, Funktionsbereiche, Ressourcen usw.) so miteinander zu verbinden, dass eine Funktionalität des gesamten Systems vorhanden ist. Des Weiteren bestehen eine Vielzahl von Abhängigkeiten zwischen einzelnen Bestandteilen eines Intralogistiksystems, welche bei der Integration in ein Gesamtsystem berücksichtigt werden müssen. [You+14] Da es sich aufgrund der Abhängigkeiten innerhalb der Intralogistiksysteme um ein höchst komplexes System handelt, muss diese Komplexität entsprechend von rechnergestützten Systemen zur Grobplanung beherrscht werden können. [MST12] beschreibt hierzu das Konzept der Komplexitätsbeherrschung durch Selbstorganisation. Das Paradigma der agentenorientierten Softwareentwicklung (AOSE) kann zur Umsetzung dieser Selbstorganisation herangezogen werden. Es bietet besonders zur Beherrschung komplexer und flexibler Aufgabenstellungen geeignete Hilfsmittel [GW14], [Jen00], [Wei02].

Das Ziel dieses Beitrags besteht in der Beschreibung eines Konzepts zur Layout- und Systemplanung. Dabei soll ein Agentenkonzept dargestellt werden, welches eine dezentral assistierte Planung ermöglicht. Des Weiteren erfolgt die Beschreibung der prototypischen Umsetzung des entwickelten Konzepts.

In den folgenden Kapiteln wird im Stand der Forschung auf die Systemplanung von Intralogistiksystemen sowie auf die Layoutplanung als Optimierungsproblem eingegangen. Darüber hinaus werden die Grundlagen von agentenbasierten Assistenzsystemen erläutert. Im Anschluss an den Stand der Forschung wird ein Konzept für eine dezentrale assistierte Planung im Bereich der integrierte Layout- und Systemplanung dargestellt. Im letzten Teil wird auf die prototypische Umsetzung des beschriebenen Konzepts eingegangen.

2 STAND DER FORSCHUNG

In diesem Kapitel wird der Stand der Forschung im Bereich der Systemplanung von Intralogistiksystemen sowie der Layoutoptimierung und der agentenbasierten Assistenzsysteme dargestellt.

2.1 SYSTEMPLANUNG

Die Systemplanung beschäftigt sich mit der Auswahl geeigneter Ressourcen aus einer Vielzahl von möglichen Anlagen und Betriebsmitteln. Die Ressourcen müssen so

ausgewählt, verknüpft und dimensioniert werden, dass die vorgegebenen Leistungsanforderungen an das Logistiksystem unter Einhaltung aller Rahmenbedingungen möglichst kostenoptimal erreicht werden [Gud10], [Arn+08].

Damit bei der Planung von Logistiksystemen keine möglichen Lösungen außer Acht gelassen werden, ist ein systematisches Vorgehen unerlässlich. In der Literatur lassen sich verschiedene Vorgehensmodelle zur Planung von Logistiksystemen finden. Diese Vorgehensmodelle unterscheiden sich hauptsächlich in der Anzahl der Planungsstufen und im Detaillierungsgrad, nicht jedoch im grundsätzlichen Gesamtinhalt. Die Vorgehensmodelle enthalten alle eine sequentielle Abfolge von Planungsschritten mit jeweils spezifischen Methoden, welche der Bearbeitung der Inputdaten dienen [Job13], [All99]. Unabhängig von der Anzahl der Stufen des jeweiligen Vorgehensmodells beinhaltet der Planungsvorgang folgende Schritte:

IST-Zustand:

Innerhalb des ersten Planungsschritts wird die Aufgabenstellung des Planungsvorhabens präzise definiert. Dabei werden die genauen Planungsziele sowie die Planungstiefe und -weite festgelegt. Des Weiteren findet eine Planungsdatenanalyse statt. Diese besteht aus der Aufnahme, Auswertung, Aufbereitung sowie Darstellung der IST-Daten des bestehenden Systems. Dabei werden Daten über die Auftrags- sowie Artikelstruktur gesammelt und nach logischen Kriterien segmentiert und klassifiziert [HSN07]. Auf der Basis der erzeugten Datensätze wird mit Hilfe von Prognose- und Trendberechnungen der SOLL-Zustand hochgerechnet, damit mögliche Zukunftsentwicklungen in der Planung berücksichtigt werden. Das Resultat dieser Phase ist eine Planungsdatenbank, welche als Grundlage der darauffolgenden Grobplanung dient. [Job13, Jün89]

Grobplanung:

Das Ziel der Grobplanung ist es eine wirtschaftliche, technisch funktionierende sowie leicht zu organisierende Lösung zu erarbeiten. Hierbei werden Prozessvarianten gebildet, welche das Gesamtsystem durch Arbeitsgangfolgen, Transportketten und Materialflussoperationen abbilden. Darauf aufbauend werden den Prozessvarianten unterschiedliche Ressourcen zugeordnet, wodurch technische Lösungen entstehen, die den Anforderungen des SOLL-Zustands gerecht werden sollen. Anschließend werden die Systemvarianten dimensioniert, überprüft und bewertet und eine Vorzugsvariante ausgewählt [HSN07, Jün89].

Feinplanung:

Die innerhalb der Grobplanung gewählte Vorzugsvariante wird detailliert ausgearbeitet und es wird eine Ausschreibung für die Realisierung durchgeführt [Mar16].

Realisierung:

Im Rahmen der Realisierung werden alle geplanten Arbeiten und Maßnahmen zur Umsetzung des ausgearbeiteten Systems von den beauftragten Firmen durchgeführt. Anschließend finden die Abnahme des Systems, die Übergabe an den Betreiber und eventuell ein erforderlicher Umzug sowie Schulungen von Mitarbeitern statt. Die Realisierung endet mit der Inbetriebnahme [Mar16].

Der beschriebene Planungsprozess ist aufgrund seiner Komplexität häufig von den Erfahrungen des Planers abhängig. Diesen zu digitalisieren ist infolge der Komplexität schwer umsetzbar. Innerhalb des Planungsprozesses beeinflussen mehreren Faktoren diese Komplexität. Intralogistiksysteme werden zum einen individuell basierend auf Kundenwünsche entwickelt, wobei die Herausforderung besteht einzelne Bestandteile (Funktionen, Funktionsbereiche, Ressourcen etc.) so miteinander zu verknüpfen, dass die Gesamtfunktionalität des Systems erreicht wird. Zum anderen bestehen zwischen einzelnen Bestandteilen eine Vielzahl von Abhängigkeiten, welche bei der Integration in ein Gesamtsystem berücksichtigt werden müssen [You+14].

2.2 LAYOUTPLANUNG

Die Layoutplanung beschäftigt sich mit der räumlichen, grundrissmäßigen und konkreten Anordnung der hauptsächlich abstrakten Planungsergebnisse der Strukturplanung [Agg90, S. 586]. Dabei werden Ressourcen bzw. Funktionsbereiche, welche in quantifizierbaren Beziehungen zueinanderstehen, angeordnet [AF07].

Neben den Flächen für vorhandene Ressourcen werden innerhalb der Layoutplanung weitere Flächen (z. B. Transport- / Verkehrsflächen, Zwischenlagerflächen usw.) betrachtet. Diese Flächen werden für die Bemaßung des Gebäudes mit einem Aufschlag von 40 % auf die Betriebsmittelflächen berücksichtigt [Sch17].

Die Planung eines Layouts ist von verschiedenen Zielen sowie Rahmenbedingungen abhängig. Aus diesem Grund wird die Layoutplanung häufig als Optimierungsproblem beschrieben [DPH07].

2.2.1 MINIMIERUNG DER TRANSPORTINTENSITÄT

In der Regel ist das Hauptziel einer Layoutplanung die Transportintensität und somit die Transportkosten unter Berücksichtigung von unterschiedlichen Nebenbedingungen zu minimieren, da diese den wesentlichen Kostenfaktor und Schwerpunkt innerhalb der Intralogistik von Lagern und Distributionszentren darstellen. Das Optimierungsproblem des minimalen Transportaufwands kann mit der Formel 2-1 beschrieben werden [Arn+08]. Weitere mögliche Zielfunktionen sind u. a. minimale Raumkosten, minimale Umgestaltungskosten, minimale Stauungen usw. [DPH07.]

$$\min T = \sum_{i=1}^n \sum_{j=i+1}^n I_{ij} d_{ij} \quad (2-1)$$

T : Transportaufwand

I_{ij} : Transportintensität zwischen i und j

d_{ij} : Distanz von i nach j

Neben den genannten Zielfunktionen müssen Nebenbedingungen und layoutspezifische Ziele bzw. Kosten berücksichtigt werden. Wichtige Nebenbedingungen sind z. B. vorhandene bauliche Rahmenbedingungen wie Lage von Toren, Haupttransportwegen und die Verkehrsanbindung, grundlegende Verordnungen, Gesetze, technische Regelungen und Vorschriften, Materialflüsse zwischen Funktionsbereichen, arbeitsbedingter Kontakt zwischen Funktionsbereichen oder organisatorische Zusammengehörigkeit verschiedener Funktionsbereiche usw. [Gud10], [DPH07].

Die Nebenbedingungen sowie layoutspezifische Ziele sind innerhalb jedes Planungsprojekts unterschiedlich und müssen daher vom Planer individuell festgelegt werden.

2.3 ASSISTENZSYSTEME

Die Unterstützung des Menschen durch Computersysteme hat in den letzten Jahren mehr und mehr an Bedeutung gewonnen [Gar13], dies gilt insbesondere für den Bereich der Logistik [Blu+09]. Diese unterstützenden Computersysteme werden auch als Assistenzsysteme bezeichnet. Prominente Anwendungsfälle für Assistenzsysteme sind beispielsweise der Spurhalteassistent in Fahrzeugen sowie die Assistenz für Überwachungsaufgaben [Aie+11] oder für die Ablaufplanung [SB06]. Ein weiterer Anwendungsfall ist die Unterstützung von Anlagenbetreibern bei der Absicherung von Softwareänderungen rekonfigurierbarer Automatisierungssysteme [ZJW18].

Bezüglich der Arten der Entscheidungsunterstützung welche durch Assistenzsysteme geboten werden können, nennt [Blu+09] die folgenden Varianten: (1) Erzeugen und Aufbereiten von Informationen, (2) Erzeugen von Alternativen, (3) Bewerten von Alternativen, (4) Auswählen von Alternativen, (5) Überwachen der Entscheidungsausführung sowie (6) Kontrollieren der Entscheidungsausführung.

Zur Realisierung solcher Assistenzsysteme werden oft Agentensysteme eingesetzt. Im folgenden Unterkapitel werden deshalb Agenten sowie Agentensysteme eingeführt sowie deren Eignung für komplexe Problemstellungen erläutert.

2.3.1 AGENTENBASIERTE ASSISTENZSYSTEME

Agentensysteme bestehen aus einer Menge von Agenten, diese sind in [VDI18] folgendermaßen definiert:

„Ein Agent ist eine abgrenzbare (Hardware- oder/und Software-) Einheit mit definierten Zielen. Ein Agent ist bestrebt, diese Ziele durch selbstständiges Verhalten zu erreichen und interagiert dabei mit seiner Umgebung und anderen Agenten“.

In [VDI18] werden die Eigenschaften von Agenten definiert. In diesem Beitrag wird nachfolgend ein kurzer Überblick über fünf der wichtigsten Eigenschaften gegeben wie sie auch von [Epp13] genannt werden:

- **Autonomie:** Agenten können eigenverantwortlich über ihren internen Zustand und ihr Verhalten entscheiden.
- **Interaktionsfähigkeit:** Agenten sind in der Lage kooperativ und koordiniert zu handeln, um die jeweiligen individuellen Ziele zu erreichen
- **Kapselung:** Zustand, Verhalten, Strategien und Ziele sind Bestandteile, welche innerhalb eines einzelnen Agenten gekapselt werden.
- **Persistenz:** Agenten sind in der Lage ihre inneren Zustände über den gesamten Lebenszyklus hinweg beizubehalten.
- **Reaktivität:** Die Fähigkeit eines Agenten die Umgebung wahrzunehmen und entsprechend auf diese zu reagieren.

Durch diese Eigenschaften eignen sich Agentensysteme dazu komplexe Probleme mit vielen Randbedingungen effektiv zu lösen [You+14]. Aufgrund der Kapselung ihrer Ziele und der losen Kopplung zwischen den einzelnen Agenten bieten sich Agentensysteme für die Lösung von Problemen mit Teilproblemen an. Dies gilt insbesondere dann, wenn sich die Lösungen der einzelnen Teilprobleme gegenseitig beeinflussen. In [Uhl13] werden Agentensysteme als naheliegendes Architekturprinzip für Selbstorganisation genannt, da sie aus Interaktionen heraus Probleme lösen können. In der angeführten Veröffentlichung wird ein Agentensystem genutzt, um eine selbstorganisierende Koordination und Steuerung eines Produktionsablaufs zu erreichen. Die Selbstorganisation kann durch Agentensysteme also derart umgesetzt werden, dass die Agenten jeweils ihre eigenen Ziele verfolgen und so insgesamt im Verbund ein übergeordnetes Ziel erreichen können.

Werden Agentensysteme zur Realisierung eines Assistenzsystems eingesetzt, so wird auch von einem agentenbasierten Assistenzsystem gesprochen. Um den weit verbreiteten Einsatz dieser Assistenzsysteme aufzuzeigen sind nachfolgend einige Beispiele aufgeführt. So setzt [Wag08] Agenten ein um den Ingenieur proaktiv bei der Verwendung von CAx-Tools zu unterstützen. Marks [Mar+17] entwickelte ein agentenbasiertes Assistenzsystem um den Ingenieur bei der Durchführung eines Anpassungsprozesses von automatisierten Produktionsmaschinen zu unterstützen. Dabei erzeugt und bewertet das

Assistenzsystem Anpassungsmöglichkeiten entsprechend eines vorliegenden Produktionsauftrags. Bei [Vög+17] wird ein agentenbasiertes Assistenzsystem verwendet um multiphysikalische Problemstellungen dezentral zu simulieren.

3 KONZEPT FÜR DIE INTEGRIERTE LAYOUT- UND SYSTEMPLANUNG

Im folgenden Kapitel wird das entwickelte Konzept der System- sowie der Layoutplanung beschrieben. Aus den beschriebenen Konzepten wird ein agentenbasiertes Konzept zur Layout- und Systemplanung entwickelt.

3.1 KONZEPT DER SYSTEMPLANUNG

Eine Planungsmethodik, welche auf den agentenorientierten Konzepten beruht, erfordert eine einheitliche sowie modulare Beschreibung zielgerichteter und miteinander interagierender, autonomer Einheiten. Diese autonomen Einheiten werden in der entwickelten Methodik für die Intralogistikplanung durch intelligente Planungsobjekte repräsentiert und als Softwareagenten in einem Agentensystem abgebildet. Die Interaktion zwischen den Einheiten erfolgt über definierte Schnittstellen (Interfaces) nach festgelegten Regeln (Protokollen). Im Folgenden werden die definierten intelligenten Planungsobjekte kurz beschrieben. Eine genaue Beschreibung der intelligenten Planungsobjekte wurde bereits in [Bey+16], [Bey+15], [You+14], [You18] veröffentlicht.

Funktionsbereiche:

Innerhalb eines Distributionszentrums existieren trotz vielfältiger Realisierungsmöglichkeiten und technischer Systemgestaltung bestimmte Standardabläufe, die in sog. Funktionsbereichen abgebildet werden können. Innerhalb der Funktionsbereiche werden die möglichen Kombinationen von Organisationsformen, IT-Systemen, Prozessabläufen und Strategien einheitlich definiert. Darüber hinaus werden die Prozesse der Funktionsbereiche durch Berechnungsformeln und Bewertungsmethoden analytisch beschrieben.

Prozesse:

Unter einem Prozess werden miteinander verbundene Tätigkeiten verstanden. Dabei werden Güter eines bestimmten Eingangszustands in Güter mit einem bestimmten Ausgangszustand umgewandelt. Die Prozesse nach [DIN05] können zu einer durchgängigen Modellierung des gesamten Materialflusses genutzt werden.

Ressourcen:

Unter Ressourcen werden nach [DIN10] Mittel verstanden, mit welchen Vorgänge (Prozesse) durchgeführt werden können. Jeder in der Methodik definierte Prozess

enthält in einem Ressourcenkatalog verwendbare Ressourcenklassen. Dabei enthält jede Ressourcenklasse Eigenschaften und Methoden der Ressourcen. Die Eigenschaften ermöglichen einen direkten Vergleich mit den an die Ressource gestellten Anforderungen. Die Methoden ermöglichen einer Ressourcenklasse die internen Berechnungen durchzuführen.

Anforderungen:

Die Konzipierung von Intralogistiksystemen erfolgt auf Grundlage individueller Anforderungen. Eine erfolgreiche Planung und eine objektive Bewertung von Intralogistiksystemen ist erst nach einer vollständigen Erfassung von Anforderungen möglich, welche ein ausreichendes Verständnis des Systems erzeugen [Gud10]. Im Rahmen der Methodik wurden die Anforderungen an ein Distributionszentrum für Stückgüter hierarchisch auf Funktionsbereichsebene in Form von Kennzahlen definiert und mit Hilfe von Variablen, Parametern und Einheiten beschrieben.

Innerhalb der entwickelten Methodik bildet der Input für die Grobplanung von Distributionszentren die Aufgabenstellung. Dementsprechend werden zunächst die Prozesse zu einer Ablaufkette aufgebaut und Schritt für Schritt der in der Aufgabenstellung definierte Endzustand herbeigeführt (Prozessplanung). Da im Regelfall mehrere Prozessvarianten zur Erreichung des zu Beginn formulierten Endzustandes betrachtet werden können, werden mehrere Varianten ausgewählt. Anschließend erfolgt die qualitative Auswahl von Ressourcen, ihre Zuordnung zu den einzelnen Prozessen sowie die Überprüfung der Kompatibilität untereinander (Ressourcenauswahl). Dabei entstehen mehrere Lösungsvarianten, da meist unterschiedliche Ressourcen für die Ausführung eines Prozesses geeignet sind. Anschließend erfolgt die Dimensionierung der betrachteten Ressourcen, welche eine quantitative Einbindung der Ressourcen in den jeweiligen Arbeitsschritt ermöglicht. Geeignete Ressourcenvarianten werden anhand der festgelegten Ziele und Randbedingungen sowie dem Aspekt der Wirtschaftlichkeit bewertet.

Das Vorgehen innerhalb der Planung wurde basierend auf den intelligenten Planungsobjekten in die drei aufeinander aufbauenden Prozesse *Komposition*, *Konfiguration* und *Adaption* sowie als regelbasierte Interaktion zwischen den intelligenten Planungsobjekten modelliert. Im Folgenden werden diese drei Prozesse genauer erläutert.

Komposition:

Das Ziel der Komposition ist die Bildung funktionserfüllender bzw. zueinander kompatibler Einheiten. Dafür werden durch eine systematische Analyse von Funktionen, Anforderungen und Ressourcen Kompositionsregeln abgeleitet. Bei der Kopplung von Funktionen mit Ressourcen erfolgt ein Vergleich von Eigenschaften der Angebotsseite (Anforderungen, Funktionen und Flussobjekte) mit der

Lieferantenseite (Ressourcen). Im Fall der Komposition von Systemen werden Eigenschaften sowie Schnittstellen der miteinander zu koppelnden Ressourcen sowie die vorhandenen Interaktionsmöglichkeiten verglichen. Die erzielten Ergebnisse werden in Kompositionsmatrizen gespeichert. Im Rahmen der Komposition von Systemen besteht die Möglichkeit, dass aufeinander folgende Ressourcen nicht interagieren. In diesem Fall wird durch das Einfügen eines Übergangssystems eine Kopplung erreicht. Für die Überprüfung von Vorgänger-Nachfolger-Beziehungen werden Übergangsregeln definiert.

Konfiguration:

Innerhalb der Konfiguration werden die durch die Komposition generierten Systeme anhand von Konfigurationsregeln dimensioniert. Die Dimensionierung der Systeme erfolgt anhand von Kennzahlen. Dabei werden die benötigten Kennzahlen anhand von technischen Daten der verwendeten Ressourcen, den gegebenen Anforderungen und den Systemlasten berechnet. Die Berechnung basiert auf einem Prozessmodell, welches den Materialstrom der Ressourcen darstellt und mit Hilfe von Regeln generiert wird.

Adaption:

Die Adaption, welche durch das Prozessmodell ermöglicht wird, beseitigt eventuell auftretende Kompatibilitäts- und Kapazitätsprobleme. Kann durch eine Ressource die Systemlast nicht erreicht werden, muss die Kapazität dieser Ressource angepasst werden. Diese Anpassung kann durch Erhöhung der Anzahl bzw. durch einen Austausch der Ressource erzielt werden. Findet die Adaption über einen Austausch der Ressource statt, muss das Prozessmodell geändert werden.

Eine genaue Beschreibung dieser drei Prozesse ist in [You+14] und [You18] zu finden.

Für das in diesem Abschnitt dargestellte Konzept der Systemplanung wurde ein Agentenkonzept entwickelt, welches im folgenden Unterkapitel beschrieben wird.

3.1.1 AGENTENKONZEPT DER SYSTEMPLANUNG

Für die Systemplanung wurde eine auf Dezentralität und Selbstorganisation beruhende Methodik konzipiert, welche die Verwendung eines agentenbasierten Assistenzsystems vorsieht. Wie in [You+14] bereits detailliert beschrieben wurde, findet ein Bottom-Up-Vorgehen zur regelbasierten Systembildung auf Grundlage der beschriebenen intelligenten Planungsobjekte statt. Eine ausführliche Beschreibung dieser Methodik wurde bereits in [Bey+16], [Bey+15] und [You+14] präsentiert. Deshalb erfolgt nachfolgend lediglich eine kurze Beschreibung der wichtigsten Softwareagenten für das Konzept der Systembildung sowie der gelieferten Ergebnisse. In Abbildung 1

werden die wichtigsten Softwareagenten für die Systembildungsphase gezeigt.

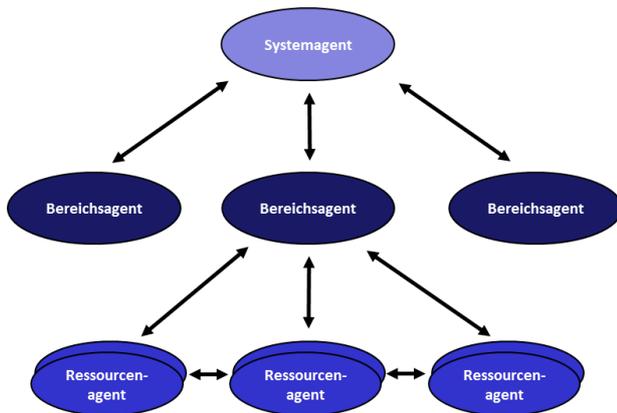


Abbildung 1: Übersicht der wichtigsten Systembildungsagenten (vereinfacht)

- **Systemagent:** Der Systemagent koordiniert die Interaktion zwischen Planer und dem Assistenzsystem. Über ihn gehen die Anforderungen in das Assistenzsystem ein. Weiterhin ermittelt er welche Bereichsagenten benötigt werden und erstellt diese.
- **Bereichsagent:** Die Bereichsagenten vertreten die beschriebenen Funktionsbereiche innerhalb des Assistenzsystems. Basierend auf den Prozesssequenzen innerhalb der jeweiligen Funktionsbereiche initialisieren die Bereichsagenten die benötigten Ressourcenagenten. Dabei werden für jede Funktion dieser Sequenz mehrere Ressourcenagenten erzeugt.
- **Ressourcenagent:** Jeder Ressourcenagent repräsentiert eine Ressource innerhalb des Assistenzsystems. Er überprüft, ob seine Ressource die Anforderungen erfüllt und mit welchen Nachbarressourcen, innerhalb der gesamten Prozesssequenz, sie kompatibel ist.

Das Resultat der Systembildungsphase umfasst die Ressourcen, welche die gestellten Anforderungen erfüllen und die Information, welche dieser Ressourcen miteinander kompatibel sind. Das agentenbasierte Assistenzsystem

stellt dem Planer des Intralogistiksystems dieses Zwischenergebnis zur Verfügung, wodurch es seine assistierende Funktion erfüllt.

3.2 KONZEPT DER INTEGRIERTEN LAYOUTPLANUNG

Das für die integrierte Layoutplanung entwickelte Konzept hat das Ziel, ein optimales Layout abhängig von einer Zielfunktion und unterschiedlichen Nebenbedingungen zu generieren. Als Zielfunktion wird häufig, wie in 2.1.1 beschrieben, die Minimierung des Transportaufwandes verwendet. Die Zielfunktion 2-1 unterliegt dabei folgenden Nebenbedingungen:

- Die einzelnen Funktionsbereiche eines Distributionszentrums dürfen sich nicht überlappen.
- Die zu platzierenden Funktionsbereiche dürfen die Hallenabmessungen nicht überschreiten und müssen innerhalb der angegebenen Maße liegen.
- Das Gebäude darf eine durch den Planer vorgegebene maximale Breite bzw. Länge nicht überschreiten.

Das beschriebene Layoutoptimierungsproblem kann mit heuristischen Verfahren, welche Verfahren ohne Konvergenzbeweis entsprechen, gelöst werden. Der Einsatz von Modellen und konvergenten Verfahren für die Berechnung eines optimalen Layouts lässt sich nicht mit vertretbarem Rechenaufwand durchführen. Heuristische Verfahren lassen bei der Suche nach einer Lösung potentielle Lösungen des Problems aus ohne dabei zu wissen, ob die ausgelassenen Lösungen nicht optimal sind [Böl94].

Die beschriebene Zielfunktion sowie die Nebenbedingungen lassen sich mit nichtlinearer Programmierung (NLP) lösen.

Das Konzept für die Layoutplanung lässt sich in das bereits beschriebene Konzept für die Systembildung integrieren, sodass sich insgesamt ein Konzept für die Layout- und Systemplanung ergibt. Dieses Agentenkonzept für die integrierte Layout- und Systemplanung ist in Abbildung 2 dargestellt.

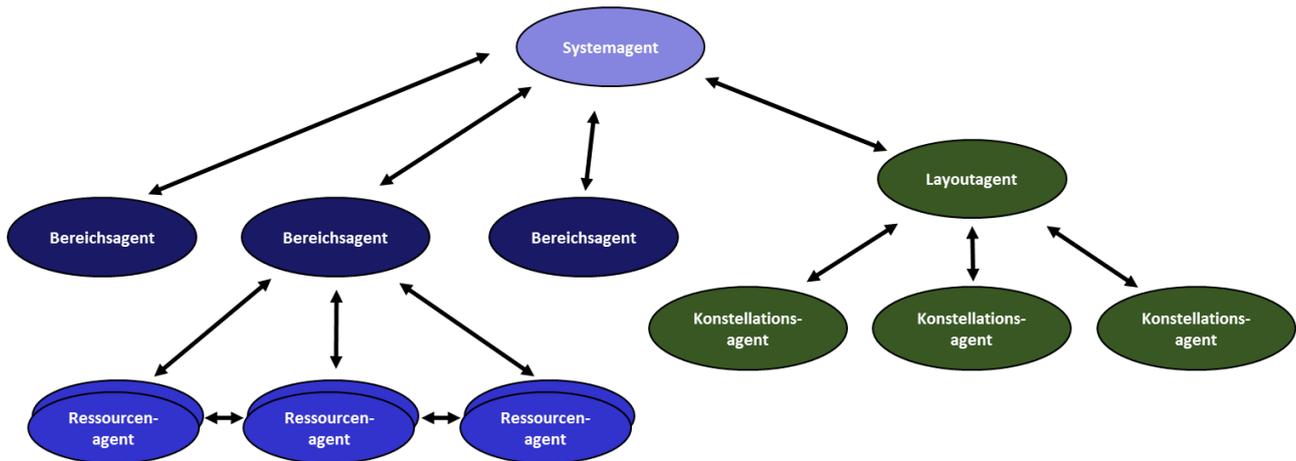


Abbildung 2: Agentenkonzept für die integrierte Layout- und Systemplanung (vereinfacht)

Nachfolgend wird beschrieben wie die beiden neuen Agententypen dazu beitragen das entwickelte Konzept für die Layoutplanung zu integrieren.

- **Layoutagent:** Auf Basis der Ergebnisse der Systemplanung ermittelt der Agent alle möglichen sich unterscheidenden Flächeninhalte, die für alle Funktionsbereiche benötigt werden. Die benötigten Flächeninhalte ergeben sich dabei aus der räumlichen Ausdehnung der jeweils betrachteten Ressourcenkombination eines Funktionsbereichs. Der Layoutagent erstellt, entsprechend der Anzahl an Kombinationsmöglichkeiten unterschiedlicher Funktionsbereichsflächeninhalte, die Konstellationsagenten.
- **Konstellationsagent:** Ein Konstellationsagent vertritt alle Varianten von Ressourcenkombinationen, welche dieselben Flächeninhalte für die Funktionsbereiche benötigen. Jeder Konstellationsagent organisiert selbstständig die optimierte Layoutkonstellation für die von ihm vertretenen Ressourcenkombinationen. Anschließend verhandeln die Konstellationsagenten untereinander über die beste Layoutkonstellation. Das aktuelle Konzept sieht dabei den Vergleich der jeweiligen Transportaufwände vor, wobei weitere Kriterien (z. B. Raumkosten) problemlos integriert werden können. So wird das übergeordnete Ziel, die optimierte Layoutkonstellation mit den geringsten Transportaufwänden zu ermitteln, erreicht.

Im folgenden Abschnitt wird das für die Layoutplanung benötigte mathematische Modell beschrieben.

3.3 MATHEMATISCHES MODELL

Die im Rahmen der Layoutplanung betrachtete Zielfunktion 2-1 minimierte den Transportaufwand zwischen

den einzelnen Funktionsbereichen. Dabei wird die Transportintensität sowie die Distanz zwischen den Funktionsbereichen betrachtet. Die Transportintensität zwischen Funktionsbereichen wird in einer Belastungsmatrix dargestellt und kann daher im Rahmen der Layoutplanung als nicht änderbar angenommen werden. Somit muss der Transportaufwand durch die optimale Anordnung der Funktionsbereiche minimiert werden. Für die Entfernung der Funktionsbereiche untereinander kann die euklidische Distanz, wie sie in Formel 3-1 dargestellt ist, verwendet werden. Die euklidische Distanz stellt die direkte Verbindung zwischen zwei Punkten dar. Dies ist innerhalb eines Distributionszentrums nahezu ausgeschlossen. Dennoch kann diese Annahme der euklidischen Distanz zwischen zwei Punkten im Rahmen der Layoutplanung getroffen werden. [Bla85], [WM88] sowie [CK84] haben mit Hilfe von rechnerischen Experimenten bewiesen, dass die euklidische Distanz und der in der Praxis mögliche Weg bei einer großen Anzahl an Objekten konvergieren.

$$d_{ij} = \sqrt{(x_i - x_j)^2 + (y_i - y_j)^2} \quad (3-2)$$

Durch einsetzen der Formel 3-2 in die Zielfunktion 2-1 ergibt sich eine von x und y abhängige Funktion (3-3), welche die Mittelpunkte der Funktionsbereiche bei minimalem Transportaufwand liefert.

$$\min T = \sum_{i=1}^n \sum_{j=i+1}^n (\lambda_{ij} + \lambda_{ji}) \cdot \sqrt{(x_i - x_j)^2 + (y_i - y_j)^2} \quad (3-3)$$

Die dargestellte Zielfunktion unterliegt den in Abschnitt 3.2 beschriebenen Nebenbedingungen. Die erste genannte Nebenbedingung schließt das Überlappen einzelner Funktionsbereiche aus. Dazu darf der Abstand zwischen den x- bzw. y-Koordinaten zweier Funktionsbereiche nicht kleiner als die Hälfte der Gesamtbreite bzw. Gesamthöhe beider Funktionsbereiche sein. Die Formeln 3-3 und 3-4 stellen diese Nebenbedingung dar. Die beiden Ungleichungen schließen einander aus.

$$\left| x_i - x_j \right| - \frac{1}{2} (b_i + b_j) \geq 0, \text{ wenn} \quad (3-4)$$

$$\left| y_i - y_j \right| - \frac{1}{2} (h_i + h_j) < 0$$

$$\left| y_i - y_j \right| - \frac{1}{2} (h_i + h_j) \geq 0, \text{ wenn} \quad (3-5)$$

$$\left| x_i - x_j \right| - \frac{1}{2} (b_i + b_j) < 0$$

b : Länge der Seite eines Funktionsbereichs in x-Richtung

h : Länge der Seite eines Funktionsbereichs in y-Richtung

Die zweite Nebenbedingung stellt sicher, dass alle Funktionsbereiche innerhalb der durch den Planer angegebenen Gebäudeabmessungen liegen. Die dafür definierten linearen Ungleichungen 3-5, 3-6, 3-7 und 3-8 überprüfen den Abstand der Seite eines Funktionsbereichs zur Gebäudewand. Dabei wird vorausgesetzt, dass das Koordinatensystem seinen Ursprung in einer Ecke des Gebäudes hat.

$$x_i - \frac{1}{2} b_i \geq 0 \quad (3-6)$$

$$b_T - \left(x_i - \frac{1}{2} b_i \right) \geq 0 \quad (3-7)$$

$$y_i - \frac{1}{2} h_i \geq 0 \quad (3-8)$$

$$h_T - \left(y_i - \frac{1}{2} h_i \right) \geq 0 \quad (3-9)$$

b_T : Länge der Seite des Gebäudes in x-Richtung

h_T : Länge der Seite des Gebäudes in y-Richtung

4 VERIFIKATION ANHAND EINES PROTOTYPIS

Das beschriebene Konzept zur integrierten Layout- und Systemplanung wird prototypisch umgesetzt. Dazu wurde mittels Java und dem Agentenframework JADE ein agentenbasiertes Assistenzsystem implementiert. Der Prototyp beschränkt sich aufgrund der Komplexität und der Vielzahl an verwendbarer Ressourcen innerhalb eines Dis-

tributionszentrums auf die Funktionsbereiche Wareneingang, Einheitenlager, Kommissionierung und Warenausgang. Zur Optimierung der beschriebenen Zielfunktion mit den dargestellten Nebenbedingungen wird MATLAB eingesetzt. Im Folgenden werden der Ablauf des Agentensystems sowie die Umsetzung in MATLAB beschrieben.

4.1 ABLAUF AGENTENSYSTEM

Der Ablauf sowie die Umsetzung für die Systembildungsphase wurden bereits in [Bey+15] und [You+14] ausführlich beschrieben. Am Ende dieser Phase präsentiert das agentenbasierte Assistenzsystem dem Planer über das Graphical User Interface das Ergebnis der Systembildung. In Abbildung 3 wird ein beispielhafter Ausschnitt dieses Ergebnisses für die Prozesse *Lagern (Spalte 1)* und *Fördern (Spalte 2)* gezeigt. Dies stellt zugleich in grafischer Form dar, auf welcher Basis die integrierte Layoutplanung aufgesetzt.

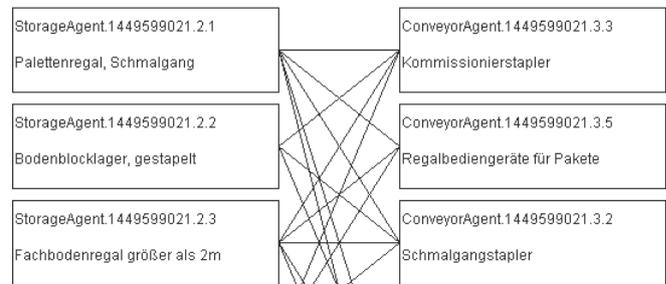


Abbildung 3: Ergebnis der Systembildung (Ausschnitt)

Der Planer hat bezüglich der Layoutplanung zunächst die Möglichkeit über das Interface diverse Eingaben an das Assistenzsystem weiterzugeben. Neben den bereits bestehenden, in [Bey+15] und [You+14] beschriebenen Eingabeoptionen, wurde die Möglichkeit zur Eingabe der maximalen Gebäudeabmessungen implementiert. Der Planer kann nach Beendigung seiner Eingaben den Vorgang zur Systembildung starten und erhält wie beschrieben ein Ergebnisbild entsprechend des in Abbildung 3 gezeigten Ausschnitts. Außerdem wurde im Interface ein Layout-Panel integriert, in welchem dem Planer nach dem Starten des Systembildungsvorgangs die maximalen Gebäudeabmessungen präsentiert werden. Der Planer kann nun per Drag&Drop die beiden Tore für den Wareneingang und -ausgang in den Außenwänden des Gebäudes platzieren und den Layout-Optimierungsvorgang starten.

Der Layoutagent ermittelt auf Basis des Ergebnisses der Systembildung zunächst alle gültigen Ressourcenkombinationen. Dabei verwendet er die in der Systembildungsphase gewonnenen Informationen, welche Kompatibilitäten die Ressourcen miteinander aufweisen. Anschließend ermittelt er für alle Funktionsbereiche die benötigten Flächeninhalte in Abhängigkeit der jeweils betrachteten Res-

sourcenkombination. Hierbei werden je nach Ressourcenkombination unterschiedliche Flächenberechnungsformeln verwendet. Die verwendete Formel ist von der jeweils betrachteten Lagerressource abhängig. Für einige Typen von Lagerressourcen wird zusätzlich berücksichtigt, welche Förderressourcen mit ihr interagieren, da sich eine entsprechend benötigte Gangbreite auf den Flächenbedarf auswirkt.

Durch kombinatorisches Verbinden aller so ermittelten unterschiedlichen Flächeninhalte aller Funktionsbereiche ergibt sich die Anzahl an Konstellationsagenten, welche der Layoutagent daraufhin erstellt.

Bei der Erstellung der Konstellationsagenten übergibt ihnen der Layoutagent jeweils die Flächeninhalte der Funktionsbereiche, die maximalen Abmessungen des Gebäudes sowie die Lage der beiden Tore für den Wareneingang und -ausgang. Um die optimierte Layoutkonstellation zu ermitteln wurde eine Schnittstelle zwischen Java und MATLAB implementiert. Jeder Konstellationsagent ruft dabei unter Verwendung seiner spezifischen Eingabeparameter eine MATLAB-Funktion auf. Der Ablauf zur Ermittlung der optimierten Layoutkonstellation wird im nachfolgenden Kapitel 4.2 ausführlich erläutert. Als Ergebnis erhält der jeweilige Konstellationsagent sowohl die räumliche Anordnung der Funktionsbereiche als auch einen Wert für die Transportaufwände dieser Konstellation. Jeder Konstellationsagent vertritt gegenüber den übrigen Konstellationsagenten seine Layoutkonstellation. Es findet ein dialogbasierter Verhandlungsvorgang statt, bei welchem die Konstellationsagenten mit höheren Transportaufwänden gelöscht werden. Der verbleibende Konstellationsagent übermittelt seine Layout-Konstellation an den Layoutagenten. Der Layoutagent kann nun das Layout-Panel des Interfaces aktualisieren, sodass die Funktionsbereiche entsprechend eingezeichnet werden. Weiterhin erhält der Planer so die x- und y-Werte der Lage und Abmessungen der einzelnen Funktionsbereiche. Zusätzlich wird eine Liste mit möglichen Ressourcenkombinationen für diese Layoutkonstellation ausgegeben.

4.2 MATLAB ABLAUF

Das in Abschnitt 3.3 dargestellte mathematische Modell zur Layoutoptimierung wird mit Hilfe von MATLAB optimiert. MATLAB verfügt zur Lösung von Optimierungsproblemen über unterschiedliche Solver. Die Auswahl eines Solvers ist zum einen von der Art der Zielfunktion und zum anderen von der Art der Nebenbedingung abhängig. Das beschriebene Layoutoptimierungsproblem besteht aus einer nichtlinearen Zielfunktion sowie linearen und nichtlinearen Nebenbedingungen sowie aus den Grenzwerten b_T und h_T . Anhand dieser Kriterien eignet sich der MATLAB Solver `fmincon` zur Minimierung der Zielfunktion.

$$\min f(x) = \begin{cases} c(x) \leq 0 \\ ceq(x) = 0 \\ A * x \leq b \\ Aeq * x = beq \\ lb \leq x \leq ub \end{cases} \quad (4-10)$$

Die Zielfunktion ist unter anderem abhängig von der Transportintensität λ . Diese wird MATLAB für jeden Funktionsbereich über eine Belastungsmatrix aus Excel übergeben. Die für die Berechnung der Nebenbedingungen benötigte Breite b_i und Höhe h_i der einzelnen Funktionsbereiche wird im Rahmen der Systemplanung berechnet und an MATLAB übergeben. Die benötigte Breite und Höhe des Gebäudes wird durch den Planer in der GUI angegeben und an MATLAB weitergeleitet. Mit Hilfe des genannten Solvers wird die Zielfunktion optimiert. Das Ergebnis wird in Form von x- und y-Koordinaten der Funktionsbereiche an das Agentensystem zurückgegeben.

5 FAZIT UND AUSBLICK

Im Rahmen dieses Beitrags wurde ein Konzept für die integrierte Layout- und Systemplanung von Intralogistiksystemen vorgestellt. Das erarbeitete Konzept wurde anhand der prototypischen Umsetzung des konzipierten, agentenbasierten Assistenzsystems verifiziert. Hierbei wurde gezeigt, dass sich das Paradigma der agentenorientierten Softwareentwicklung besonders gut für Problemstellungen dieser Art, also komplexe Problemstellungen mit vielen Randbedingungen, eignet. Insbesondere wurde innerhalb des Konzepts eine geeignete Methodik zur Layoutoptimierung präsentiert. Hierzu wurde eine Zielfunktion für den Transportaufwand, sowie deren Nebenbedingungen, aufgestellt. Diese Zielfunktion wird mit Hilfe einer Heuristik minimiert, wodurch sich die optimale Layoutkonstellation ergibt. Zusammenfassend ermöglicht das präsentierte Konzept eine Assistenz des Planungsprozesses für intralogistische Systeme von der Aufgabenstellung über die Ressourcenauswahl bis hin zur Layoutplanung.

In der prototypischen Umsetzung wird die Zielfunktion mit dem MATLAB Solver `fmincon` minimiert. In weiteren Untersuchungen könnte die Zielfunktion mit unterschiedlichen Solvern – z. B. `fseminf` – optimiert werden. Die Ergebnisse können z. B. hinsichtlich Qualität und Rechenzeit verglichen werden. Darüber hinaus können der benötigte Flächeninhalt des gesamten Layouts im Konstellationsagenten berechnet werden und als weiteres Bewertungskriterium neben dem Transportaufwand hinzugezogen werden. Weitere Bewertungskriterien können bei Bedarf in das entwickelte Agentensystem übernommen werden. Das entwickelte Agentenkonzept ist dementsprechend hinsichtlich eines multikriteriellen Bewertungsverfahrens leicht erweiterbar. Allgemein ist eine Erweiterung

des Prototyps um die in einem Distributionszentrum vorhandenen Funktionsbereiche – z. B. Konsolidierung und Verpackung – und um weitere Ressourcen möglich.

6 DANKSAGUNG

Die Autoren danken sowohl der Deutschen Forschungsgemeinschaft (DFG) für ihre Unterstützung im Forschungsprojekt „Dezentrale selbstorganisierte Planung von Intralogistiksystemen mit Hilfe eines Software-Agentensystems (DEPIAS)“ als auch Frau Theresa Beyer und Herrn Ramin Yousefifar für die Vorarbeiten im ersten Projektabschnitt und die Unterstützung im aktuellen Projektabschnitt.

LITERATUR

- [AF07] Arnold, Dieter; Furmans, Kai: Materialfluss in Logistiksystemen. 5., erweiterte Auflage, VDI-Buch, Springer, Berlin, 2007.
- [Agg90] Aggteleky, Béla: Betriebsanalyse und Feasibility-Studie: Technisch-wirtschaftliche Optimierung von Anlagen und Bauten. In: Fabrikplanung, Werkentwicklung und Betriebsrationalisierung, Band 2, 2., vollständig, überarbeitete und erweiterte Auflage, Hanser, München 1990.
- [Aie+11] Aiello, Francesco; Bellifemine, Fabio Luigi; Fortino, Giancarlo; Galzarano, Stefano; Gravina, Raffaele: An agent-based signal processing in-node environment for real-time human activity monitoring based on wireless body sensor networks. In: Engineering Applications of Artificial Intelligence 24(7), Elsevier.
- [All99] Allgayer, Franz: Computerunterstützte Planung von Materialflusssystemen auf Basis statischer Materialflüsse. Dissertation, Technische Universität München. Verlag Utz, München, 1999.
- [Arn+08] Arnold, Dieter; Isermann, Heinz; Kuhn, Alex; Tempelmeier, Horst; Furmans, Kai (Hrsg.): Handbuch Logistik. 3. neu bearb. Aufl. VDI-Buch, Springer, Berlin, 2008.
- [Bey+15] Beyer, Theresa; Yousefifar, Ramin; Abele, Sebastian; Bordasch, Manuel; Göhner, Peter; Wehking, Karl-Heinz: Flexible agent-based planning and adaptation of material handling systems. In: 2015 IEEE International Conference on Automation Science and Engineering (CASE), Gothenburg, Sweden, IEEE, 2015. pp. 1060–1065.
- [Bey+16] Beyer, Theresa; Göhner, Peter; Yousefifar, Ramin; Wehking, Karl-Heinz: Agent-based dimensioning to support the planning of Intra-Logistics systems. In: 2016 IEEE 21st International Conference on Emerging Technologies and Factory Automation (ETFA), Berlin, Germany, IEEE, 2016.

- [Bla85] Blanks, John P.: Near-optimal quadratic-based placement of a class of IC layout problems. In: IEEE Circuits and Devices magazine 1(5), IEEE, 1985. pp. 31-37.
- [Blu+09] Blutner, Doris; Cramer, Stephan; Krause, Sven; Mönks, Tycho; Nagel, Lars; Reinholz, Andreas; Witthaut, Markus: Assistenzsysteme für die Entscheidungsunterstützung. In: Große Netze der Logistik: Die Ergebnisse des Sonderforschungsbereichs 559, Buchholz, Peter; Clausen, Uwe (Hrsg.), Springer, Berlin, Heidelberg, 2009. S. 241–270.
- [Böl94] Bölte, Andreas: Modelle und Verfahren zur innerbetrieblichen Standortplanung. Dissertation, Physica, Heidelberg, 1994.
- [CK84] Cheng, Chung-Kuan; Kuh, Ernest Shiu-Jen: Module placement based on resistive network optimization. In: IEEE Transactions on Computer-Aided Design of Integrated Circuits and Systems 3(3), IEEE, 1984. S. 218-225.
- [DIN05] DIN EN 14943: Transportdienstleistungen – Logistik – Glossar. Beuth, Berlin, 2005.
- [DIN10] DIN SPEC 1001: Lager- und Transportlogistik – Standardisierte Leistungsdefinition und –bewertung in der Angebotsphase. Beuth, Berlin, 2010.
- [DPH07] Drira, Amine; Pierreval, Henri; Hajri-Gabouj, Sonia: Facility layout problems: A survey. In: Annual Reviews in Control 31(2), Elsevier, 2007. S. 255-267.
- [Ell15] Ellinger, Marita: Beitrag zur agentenbasierten Konzeptplanung von Kommissioniersystemen. Dissertation, Technische Universität Dortmund. Verlag Praxiswissen, Dortmund, 2015.
- [Epp13] Epple, Ulrich: Agentenmodelle in der Anlagenautomation. In: Xpert.press, Agentensysteme in der Automatisierungstechnik, Göhner, Peter (Ed.), Springer, Berlin, Heidelberg, 2013. S. 95–110.
- [Gar13] Gartner: Hype Cycle for Emerging Technologies maps out evolving relationship between humans and machines. Press Release, Stamford, Connecticut, 2013. URL: www.gartner.com/newsroom/id/2575515.
- [Gud10] Gudehus, Timm: Logistik: Grundlagen – Strategien – Anwendungen, Springer, Heidelberg, 2010.
- [GW14] Göhner, Peter; Weyrich, Michael: Agent-Based Concepts for Manufacturing Automation. In: German Conference on Multiagents System Technologies, Springer, Cham, 2014. S. 90-102.
- [HSN07] ten Hompel, Michael; Schmidt, Thorsten; Nagel, Lars: Materialflusssysteme: Förder- und Lagertechnik. 3., völlig neu bearbeitete Auflage. Intralogistik. Springer, Berlin, Heidelberg, 2007.
- [Jen00] Jennigs, Nicholas Robert: On agent-based software engineering. In: Artificial Intelligence 117(2), 2000. pp 277-296.
- [Job13] Jobi, Boris Sebastian: Entwicklung einer rechnergestützten Systematik zur funktionsübergreifenden Planung von Distributionszentren durch Einsatz der Graphentheorie. Dissertation, Universität Stuttgart, 2012. Berichte aus der Logistik. Shaker, Aachen, 2013.
- [Jün89] Jünemann, Rheinhardt: Materialfluss und Logistik: Systemtechnische Grundlagen mit Praxisbeispielen. Springer, Berlin, 1989.
- [Mar16] Martin, Heinrich: Transport- und Lagerlogistik: Systematik, Planung, Einsatz und Wirtschaftlichkeit. 10. Auflage. Springer, Wiesbaden, 2016.
- [Mar+17] Marks, Philipp; Weyrich, Michael; Hoang, Xuan Luu; Fay, Alexander: Agent-based adaptation of automated manufacturing machines. In: 2017 22nd IEEE International Conference on Emerging Technologies and Factory Automation (ETFA), Limassol, Cyprus, IEEE, 2017. S. 1-8.
- [MST12] Müller-Schloer, Christian; Schneck, Hartmut; Ungerer, Theo: Organic Computing. In: Informatik Spektrum 35(2), Springer, Berlin, Heidelberg, 2012. S. 71–73.
- [SB06] Schreckenghost, Debra; Bonasso, R. Peter: Multi-agent system for managing human activities in space operations. In: 2006 IEEE Aerospace Conference, Big Sky, Montana, IEEE, 2006.

- [Sch17] Schulte, Christof: Logistik – Wege zur Optimierung der Supply Chain. 7. Auflage, Vahlen, München, 2017.
- [Uhl13] Uhlmann, Eckart: Selbstorganisierende Produktion. In: Industrie Management 29.1, Fraunhofer Publica, 2013. S. 57-61.
- [VDI18] VDI/VDE 2653: Agentensysteme in der Automatisierungstechnik. Blatt 1: Grundlagen. VDI/VDE-Richtlinien, VDI, Düsseldorf, 2018.
- [Vög+17] Vögeli, Desirée; Jazdi, Nasser; Grabmaier, Sebastian; Jüttner, Matthias; Weyrich, Michael; Göhner, Peter; Rucker, Wolfgang M.: Softwareagenten zur zuverlässigen Durchführung dezentraler multiphysikalischer Simulationen. In: at – Automatisierungstechnik 2017 65(11), De Gruyter Oldenbourg, 2017. S. 793-803.
- [Wag08] Wagner, Thomas: Agentenunterstütztes Engineering von Automatisierungsanlagen. Dissertation, Institut für Automatisierungs- und Softwaretechnik, Universität Stuttgart, Stuttgart, 2008.
- [Weh12] Wehking, Karl-Heinz: PlnLog II: Entwicklung einer Planungsplattform für intralogistische Systeme – Phase II. Abschlussbericht des Instituts für Fördertechnik und Logistik der Universität Stuttgart zu dem durch das Ministerium für Wissenschaft, Forschung und Kunst Baden-Württemberg in Kooperation mit dem Intralogistiknetzwerk in Baden-Württemberg e.V. geförderten Vorhaben 32-729.85/282, Stuttgart, 2012.
- [Wei02] Weiß, Gerhard: Agent Orientation in Software Engineering. In: Knowledge Engineering Review 16(4), 2002. S. 349-373.
- [WM88] Weis, Bernd X.; Mlynski, Dieter A.: A graphtheoretic approach to the relative placement problem. In: IEEE transactions on circuits and systems 35(3), 1988. S. 286-293.
- [You+14] Youseffar, Ramin; Wehking, Karl-Heinz; Beyer, Theresa; Jazdi, Nasser; Göhner, Peter: Dezentrale selbstorganisierte Grobplanung von Intralogistiksystemen mit Hilfe eines Software-Agentensystems. In: Logistics Journal: Proceedings 10(01), 2014. S. 139-150.
- [You18] Youseffar, Ramin: Entwicklung eines agentenbasierten Konzepts zur flexiblen Systemplanung von Distributionszentren. Dissertation, Universität Stuttgart. Shaker, 2018.
- [ZJW18] Zeller, Andreas; Jazdi; Nasser; Weyrich, Michael: Verifikation verteilter Automatisierungssysteme auf Basis einer Modellkomposition. In: Automatisierungstechnik 66(6), 2018: S. 456-470
-
- Ruben Noortwyck, M.Sc.**, Wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Fördertechnik und Logistik (IFT), Universität Stuttgart
Tel.: +49 (0)711 685 83475
E-Mail: ruben.noortwyck@ift.uni-stuttgart.de
- Timo Müller, M.Sc.**, Wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Automatisierungstechnik (IAS), Universität Stuttgart
Tel.: +49 (0)711 685 67292
E-Mail: timo.mueller@ias.uni-stuttgart.de
- Prof. Dr.-Ing. Dr. h. c. Karl-Heinz Wehking**, Institutsleiter des Instituts für Fördertechnik und Logistik (IFT), Universität Stuttgart
Tel.: +49 (0)711 685 83770
E-Mail: karl-heinz.wehking@ift.uni-stuttgart.de
- Prof. Dr.-Ing. Michael Weyrich**, Institutsleiter des Instituts für Automatisierungstechnik und Softwaresysteme (IAS), Universität Stuttgart
Tel.: +49 (0)711 685 67301
E-Mail: michael.weyrich@ias.uni-stuttgart.de
- Adressen:**
Institut für Fördertechnik und Logistik, Universität Stuttgart, Holzgartenstraße 15 B, D-70174 Stuttgart
Institut für Automatisierungstechnik und Softwaresysteme, Universität Stuttgart, Pfaffenwaldring 47, D-70550 Stuttgart