

# Dezentrale selbstorganisierte Grobplanung von Intralogistiksystemen mit Hilfe eines Software-Agentensystems

Decentralized, self-organized rough planning of intralogistics systems  
with a multi-agent system

**Ramin Yousefifar, Theresa Beyer, Nasser Jazdi,  
Karl-Heinz Wehking, Peter Göhner**

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

*Institut für Automatisierungs- und Softwaretechnik (IAS)  
Fakultät Informatik, Elektrotechnik und Informationstechnik  
Universität Stuttgart*

**I**n diesem Beitrag wird eine dezentral aufgebaute und auf Selbstorganisation basierende Methodik zur Grobplanung von Intralogistiksystemen thematisiert. Diese Methodik sieht eine Kombination des Wissenschaftsgebiets der Agentensysteme aus der Informatik mit der Materialflussplanung vor. Dieser Artikel leistet somit einen Beitrag für die Entwicklung eines intelligenten, rechnergestützten Assistenzsystems zur Planung intralogistischer Systeme.

*[Schlüsselwörter: Materialflussplanung, Agentensystem]*

**T**his article introduces a decentralized and self-organization-based model for the rough planning of material flow systems. This methodology provides a combination of science territory of agent software from the computer science with the material flow planning. This paper makes a contribution to the development of an intelligent, computer-based assistance system for the planning of intralogistics systems.

*[Keywords: Material flow planning, multi-agent system]*

## 1 EINLEITUNG

Gegenstand dieses Artikels ist die Vorstellung einer dezentralen Grobplanung von Systemen der Intralogistik mit Hilfe von Agentensystemen. Die Intralogistik beschäftigt sich mit der Planung, der Realisierung, dem Betrieb und der Optimierung von innerbetrieblichen Material- und Informationsflüssen sowie von Warenumschlagsprozessen in Industrie, Handel und öffentlichen Einrichtungen [Arn04]. Zu den Intralogistiksystemen zählen u.a. Warenverteilzentren, Distributionszentren, Flughäfen oder Krankenhäuser. Intralogistiksysteme haben sich in den vergangenen Jahrzehnten infolge wach-

sender Dynamik und Turbulenz der Marktanforderungen sowie steigender Produkt- und Prozesskomplexität stark gewandelt. Systeme, die in derartigen Märkten unterwegs sind, müssen sich auch entsprechend aufstellen, um dieser äußeren Komplexität zu entsprechen. Nach [Ash56] kann nur Komplexität mit Komplexität umgehen. Für die Steuerung und den Betrieb dieser komplexen Systeme sind in den letzten Jahren intelligente, verteilte Programmieransätze ausgearbeitet worden, die insbesondere aus dem Feld der Agentensysteme stammen. Agentensysteme setzen sich aus autonomen Einheiten zusammen, wodurch dezentrale Ansätze ermöglicht werden. Diese dezentralen Ansätze erlauben heute neben dem Einsatz moderner Materialflusskomponenten und Automatisierungslösungen eine zeitnahe Anpassung an sich verändernde Umfeldbedingungen. Dagegen verläuft die Planung von Intralogistiksystemen nach einem erfahrungsabhängigen, zeit- und ressourcenintensiven und intransparenten Planungsprozess ab.

Ausgehend von der Darstellung des allgemeinen Planungsvorgehens wird in diesem Artikel eine neuartige Methodik vorgestellt. Im Rahmen dieser Methodik werden Intralogistiksysteme als komplexe adaptive Systeme betrachtet, ihre Planung als dialogbasierter Prozess modelliert und abschließend mit Hilfe eines Agentensystems realisiert. Dieser Planungsprozess basiert auf einem Bottom-Up Vorgehen, bei dem das Intralogistiksystem durch eine mehrfach zielgerichtete Komposition, Konfiguration und Adaption gebildet wird. Die dezentrale Planung, basierend auf definierten Regeln, ermöglicht auf der einen Seite eine einfache Handhabung und führt auf der anderen Seite zu einer Steigerung der Transparenz und Nachvollziehbarkeit. Die regelbasierte Systembildung sorgt für eine Einbeziehung aller möglichen Varianten in die Planung und verbessert so die Planungssystematik. Die Formalisierung der Beschreibung von Planungsobjekten erlaubt den nachträglichen Austausch von Systemen und ermöglicht

dadurch die dynamische Anpassung an sich verändernde Umfeldbedingungen.

## 2 STAND DER TECHNIK DER PLANUNG VON INTRALOGISTIKSYSTEMEN

Generell existieren mehrere Vorgehensmodelle, um intralogistische Systeme zu entwickeln. Diese Vorgehensmodelle lassen sich allerdings nur in der Anzahl der Stufen und im Detaillierungsgrad der Planung unterscheiden, nicht aber in deren grundsätzlichen Gesamthaltungen. Etablierte Vorgehensmodelle beinhalten eine sequentielle Abfolge aufeinander aufbauender Planungsschritte, denen jeweils spezifische Methoden zur Verarbeitung gegebener Inputdaten zu entscheidungsrelevanten Ergebnissen zugewiesen sind [Job13]. Unabhängig von dem jeweiligen Stufenmodell beinhaltet das Planungsvorgehen bis einschließlich der Grobplanung folgende Schritte:

Nach der Konkretisierung der Aufgabenstellung und Ziele anhand verschiedener Planungshilfsmittel wie Analysen, Diagrammen, Plänen oder statistischen Verfahren wird der Ist-Zustand erfasst, auf Basis dessen der Soll-Zustand definiert wird. Das Resultat dieser Phase ist eine Planungsdatenbank, welche als Grundlage der darauffolgenden Grobplanung dient. Die Grobplanung fällt je nach Wahl des Vorgehensmodells mehr oder weniger detailliert aus. Ziel ist die Konzeption verschiedener Varianten auf Basis des Ist-Zustandes, wobei der Soll-Zustand das Optimum darstellt sowie Restriktionen und Randbedingungen berücksichtigt werden. Die Varianten unterscheiden sich hinsichtlich ihrer Abläufe und Prozesse und der technischen Ausführung der Arbeitsmittel. Hierbei werden Prozessvarianten entwickelt, welche die Gestaltung des Gesamtsystems anhand von Arbeitsgangfolgen, Materialflussoperationen und Transportketten beinhalten. Dabei stehen dem Planer Hilfsmittel wie Flussdiagramme oder andere rechnergestützte Systeme zur Verfügung. Darauf aufbauend werden den Prozessvarianten Arbeits- bzw. Betriebsmittel zugeordnet. So entstehen technische Lösungen, die den Anforderungen des Soll-Zustands möglichst gerecht werden sollen. Im Folgenden kommt es zu einer Dimensionierung, Überprüfung und Bewertung der Varianten. Hierbei dienen u. a. Leistungsfähigkeit und Kosten der einzelnen Varianten als Kriterien. Zur Bewertung werden auch Analysetechniken wie die Nutzwert- oder die Sensibilitätsanalyse herangezogen [Jün89, Nag07].

In der Feinplanungsphase wird die Vorzugsvariante aus der Grobplanungsphase detailliert ausgearbeitet und ausgeschrieben. In der Realisierungsphase wird eine Umsetzung der geplanten Anlage mit den im Ausschreibungsverfahren ausgewählten Partnern durchgeführt. Die Realisierung endet mit der Inbetriebnahme der Anlage und der Übergabe an den Betreiber [Jün89, Nag07].

Solche iterativen Vorgehensmodelle bieten dem Planer jedoch nur eine Orientierungshilfe zur Durchführung der Planung. Die Wahl geeigneter Modelle und Methoden bleibt jedoch dem Planer überlassen. Die Ergebnisse der am Institut für Fördertechnik und Logistik der Universität Stuttgart durchgeführten Studie „Erfahrung und Augenmaß zählen, Planung von Intralogistiksystemen“ zeigen, dass fast alle der befragten Unternehmen (unter 80 Beratungs- und Planungsunternehmen sowie Anbietern von Intralogistiksystemen) Erfahrungswerte als bedeutendste Quelle für die Auswahl von Betriebsmittelvarianten einstufen [Wun14]. Quellen für Informationen über intralogistische Betriebsmittel sind dann hauptsächlich Messebesuche, Internet-Recherchen, Herstellerkataloge und Fachliteratur (siehe Abbildung 1).



Abbildung 1: Quellen zur Auswahl von intralogistischen Betriebsmitteln

Die Anwendung geeigneter Modelle und Methoden, die Identifikation von Restriktionen und Abhängigkeiten, die systematische Entwicklung von Lösungen sowie die Auflösung von Ziel- und Abhängigkeitskonflikten ist dementsprechend bedingt durch fehlende Prozesstransparenz sehr vom Wissen und den Erfahrungen des Planers abhängig und damit Quelle von Verzögerungen, Missverständnissen und Fehlern bei der Planung [Gab98, Mar11]. Zum einen kann aufgrund unterschiedlicher Einsatzbedingungen und Detaillierungsgraden der Methodeneinsatz mit der eventuell verfälschenden Interpretation von Ergebnissen sowie der fehlerträchtigen Transformation von Modellen verbunden sein. Zum anderen wird eine kurzfristige Adaption ermittelter Lösungen durch die Modell- und Methodenvielfalt erschwert. Zur Steigerung der Flexibilität und Produktivität in der Planung besteht daher die Notwendigkeit, den manuellen Aufwand und die Subjektivität der Entscheidungen durch rechnergestützte Methoden und Verfahren zu reduzieren.

Die Anforderung an den Planungsprozess, digitalisiert zu werden, ist aber aufgrund der bestehenden Komplexität schwer zu realisieren. Die Komplexität des Planungsprozesses wird von mehreren Faktoren beeinflusst. Zum einen werden Intralogistiksysteme individuell auf Basis spezifischer Kundenwünsche entwickelt. Die Herausforderung besteht darin, das Zusammenspiel einzelner

Bestandteile (Funktionsbereiche, Funktionen, Ressourcen usw.) so zu gestalten, dass die geforderte Gesamtfunktionalität des Intralogistiksystems erfüllt wird. Zum anderen bestehen vielfältige Abhängigkeiten zwischen einzelnen Bestandteilen, die bei ihrer Integration zur gesamten Anlage berücksichtigt werden müssen. Die bestehenden rechnergestützten Planungsmodelle sind dementsprechend durch Reduzierung der Komplexität entweder in der Form der Erstellung von vordefinierten Standardsystemen charakterisiert [Job13] oder durch die Fokussierung auf einzelne Funktionsbereiche eines Intralogistiksystems wie Kommissionierung gekennzeichnet [Ell12]. Ein durchgängiger rechnergestützter Modellierungsansatz zur ganzheitlichen Planung von Intralogistiksystemen ist bis jetzt der Wissenschaft nicht gelungen. Es besteht daher Handlungsbedarf hinsichtlich rechnergestützter Konzepte und Verfahren zur Gestaltung einer ganzheitlichen, flexiblen Unterstützung, welche die vielfältigen Abhängigkeiten zwischen Komponenten bei der Planung berücksichtigt.

### **3 INTRALOGISTIKSYSTEME ALS KOMPLEXE ADAPTIVE SYSTEMEN**

Ein Ansatz, um die beschriebene Komplexität bei der Planung abzubilden, ist die Modellierung von einem Intralogistiksystem als komplexes adaptives System (CAS), da dies durch seine Eigenschaften eine dezentrale Planungsmethodik ermöglicht. CAS sind heterarchisch aus autonomen Einheiten (Entitäten) aufgebaut. Zur Erfüllung ihrer Aufgaben interagieren die Einheiten miteinander und schließen sich zeitweise zusammen. Sie tauschen dabei Güter, Daten und Kapital aus. Somit kann ein CAS als ein temporäres Netzwerk verstanden werden, in dem die einzelnen Einheiten unterschiedliche Funktionen des Gesamtsystems einnehmen. Die Einheiten unterscheiden sich folglich in ihren Eigenschaften und in ihrem Verhalten. Das Verhalten einer Entität ist autonom und lernfähig [Hol88, Göp05, Hol02]. Des Weiteren ist die Selbstorganisation eine wesentliche Eigenschaft von einem CAS [McK09]. Nach [McK09] sind selbstorganisierende Systeme in einem gewissen Rahmen vorkonfiguriert, damit diese nicht vollkommen unkontrolliert und chaotisch agieren. Eine wichtige Fähigkeit dieser Systeme ist, dass sie sich selbst adaptieren können, um sich an ihr sich veränderndes Umfeld anzupassen. Diese Adaption erfolgt dabei in zwei Stufen: Zuerst versuchen sich die Entitäten durch Änderungen in ihrem Verhalten an die Veränderungen des Umfelds anzupassen. Ist dadurch allerdings keine zufriedenstellende Lösung zu erreichen, adaptiert sich das System, indem es sich neu strukturiert. Dadurch entsteht ein nicht-deterministisches, nicht-lineares, nicht-reproduzierbares Verhalten, das nach [Hol02] eine koevolutionäre Verhaltensweise bewirkt.

Durch die fortschreitenden Entwicklungen in der Identifikations-, Informations- und Kommunikationstechnik ist es möglich, Logistiksysteme als CAS aufzufassen.

Logistische Objekte erhalten in einem begrenzten Rahmen eine gewisse Entscheidungs- und Kommunikationsfähigkeit, allerdings keine Autonomie und keine Lernfähigkeit. Durch die ständige Adaption an die sich verändernde Umgebung entstehen laufend neue Strukturen bzw. neue Verhaltensweisen. Um dieses Verhalten zu unterbinden, müssen Schwellwerte für die Adaption eingeführt werden, ab denen sich das System anfängt zu adaptieren.

Im Sonderforschungsbereich 637 „Selbststeuerung logistischer Prozesse - Ein Paradigmenwechsel und seine Grenzen“ werden Logistiksysteme als komplexe adaptive Logistiksysteme angesehen. Er fokussiert sich allerdings auf die Planung und Steuerung von Produktions- und Transportnetzwerken. In diesem Beitrag dient das CAS-Paradigma dagegen als Modellierungsansatz zur Abbildung der Komplexität der Planung intralogistischer Systeme. Somit bilden die Eigenschaften und Verhaltensweisen der CAS die Grundlage für ein dezentral aufgebautes und auf Selbstorganisation beruhendes Planungsverfahren. Für die dezentrale, heterogene Welt der Intralogistiksysteme, die durch zunehmend komplexere Abläufe sowie die Notwendigkeit zu mehr Flexibilität, Anpassbarkeit und Integrationsfähigkeit geprägt ist, erscheint dieser Ansatz besonders geeignet. Im folgenden Abschnitt wird verdeutlicht, wie ein Intralogistiksystem auf Basis eines dezentralen Planungsverfahrens durch intelligente autonome Einheiten vorteilhaft konzipiert werden kann.

### **4 DEZENTRALE, AUF SELBSTORGANISATION BASIERENDE GROBPLANUNG VON INTRALOGISTIKSYSTEMEN**

Wie bereits im Abschnitt 2 erläutert, findet während der Grobplanung zum einen die Gestaltung von Funktionsabläufen auf Basis von Planungsdaten und zum anderen die Zuordnung von Funktionen zu Ressourcen sowie deren anforderungsgerechte Anordnung, Dimensionierung und Bewertung statt. Auf Basis der Auffassung von Intralogistiksystemen als CAS werden in diesem Artikel die Funktionen, Ressourcen und Anforderungen als zielgerichtete, miteinander interagierende, autonome Einheiten modelliert. Diese autonomen Einheiten werden dann bei der Grobplanung von Intralogistiksystemen als intelligente Planungsobjekte (IPO) agieren. Diese IPOs kennen alle ihre Eigenschaften und wissen beispielsweise, wie sie organisiert werden wollen oder mit welchen anderen Objekten (Funktionen oder Ressourcen) sie wie verbunden werden können. Die Interaktion zwischen den IPOs erfolgt dabei über definierte Schnittstellen nach festgelegten Regeln. Als Ergebnis dieser Interaktionen entwickelt sich die Grundstruktur des Intralogistiksystems.

Ein wichtiger Bestandteil dieser Methodik ist die Integration von Planungsinformationen und -wissen. Die rechnergestützte Nutzung von Informationen und Wissen ist jedoch nicht generell möglich, sondern nur, wenn gewisse Voraussetzungen erfüllt sind. Zum einen müssen

die interne Struktur von Planungsobjekten und die Zugehörigkeit von Informationen und Regeln zu den internen Bestandteilen von Planungsobjekten explizit sichtbar sein. Sonst lässt sich nicht entscheiden, für welche Zusammenhänge innerhalb oder zwischen Planungsobjekten sie relevant sind und die Menge bestehender Wechselwirkungen kann nicht bestimmt werden. Zum anderen müssen Informationen und Regeln in formalisierter Form vorliegen. Andernfalls ist eine rechnergestützte Erfassung und Verknüpfung nicht möglich [Wag08].

Im Folgenden werden zuerst die IPOs und deren internen Struktur beschrieben und darauf aufbauend das regelbasierte Vorgehen zur Grobplanung von Intralogistiksystemen erläutert. Der Abschnitt schließt dann mit der Vorstellung möglicher Formalisierungsoptionen der Objekte und Regeln ab. An dieser Stelle ist zu bemerken, dass diese Teilschritte (-ziele) kein bestimmtes Szenario beschreiben, sondern zur Ermittlung und Strukturierung der gesamten Planungsfunktionalität, unabhängig von einer konkreten Intralogistikvariante, dienen. Die Untersuchung einer Intralogistikvariante mit ihren Artikeln, Ladehilfsmitteln, Förder-, Umschlag-, Handhabungs-, Lager- und Kommissioniersystemen bildet dann die Grundlage zur branchenspezifischen Definition von Funktionen und Ressourcen in Referenzfunktionen, Regel- und Ressourcenkatalogen.

#### 4.1 IPO-FUNKTION

Die Intralogistiksysteme können analog zu logistischen Netzwerken als ein Netz von Knoten modelliert werden. Solche Knoten bilden dabei die Funktionsbereiche eines Systems wie z. B. Wareneingang, Kommissionierung, Packerei usw. Diese Funktionsbereiche lassen sich ebenfalls durch die elementaren materialflusstechnischen Funktionen wie z. B. Fördern, Puffern, Lagern usw. abbilden. Eine Funktion transformiert damit einen Eingangszustand, d. h. Güter in einem bestimmten Zustand, in einen Ausgangszustand, also Güter in einem neuen Zustand. Funktionen können damit zu einer durchgängigen Modellierung des gesamten innerbetrieblichen Materialflusses eines Intralogistiksystems genutzt werden. Die beispielhafte Modellierung eines Distributionszentrums ist in Abbildung 2 zu sehen.

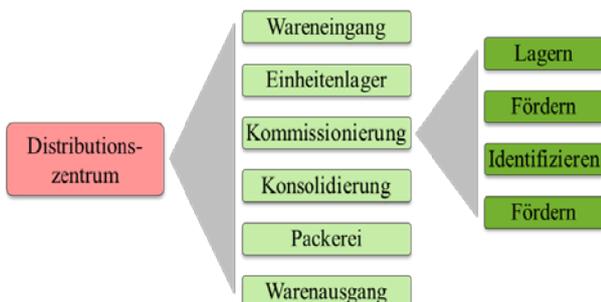


Abbildung 2: Modellierung eines Distributionszentrums

Den Funktionen können – analog zu Referenzprozessen- definierte Parametersätze zugeordnet werden [Fig08]. Zum Beispiel lässt sich die abstrakte Funktion „Fördern“ nutzen, um jeglichen Förderprozess zu beschreiben: Durch Parametrisierung der Förder-Funktion, etwa durch Hinterlegung einer bestimmten Förderstrecke (Länge, Start, Ziel, Steigung etc.), eines Förderguts und eines Durchsatzes, entsteht ein konkreter Förderprozess eines Intralogistiksystems [Som09]. Außerdem sind für diese Funktionen festgelegte Start- und Endzustände zu hinterlegen, um klare Grenzen zwischen konsekutiven Prozessen ziehen zu können [Weh10]. Die Funktionsbausteine und ihre definierten Parametersätze werden als IPO-Funktionen modelliert.

#### 4.2 IPO-RESSOURCE

Ressourcen sind Systeme, die zur Erfüllung einer oder mehrerer Funktionen eingesetzt werden können. Ressourcen können beispielsweise Personen, Gabelstapler, Rollenbahnen, Drucker oder Scanner sein. Aufgrund ihrer Eigenschaften und Verhaltensweisen sind Ressourcen in der Lage, nur bestimmte Funktionen zu übernehmen. Die Schnittstellen einer Ressource definieren die Art und Weise, wie sie mit anderen vor- oder nachgeschalteten Ressourcen zusammenarbeiten können.

Auf Grundlage einer einheitlichen Beschreibung von Ressourcen und ihrer Ausprägungen in Intralogistiksystemen können die IPO-Ressourcen entwickelt werden. Die IPO-Ressource enthält zum einen Informationen über die Funktionen, die die Ressource erfüllen kann, und zum anderen Informationen über die logistischen Objekte, die sie handhaben kann. Für einen Gabelstapler sollen bspw. folgende Informationen verfügbar sein:

- Anheben, Absetzen und Fördern von Paletten möglich
- Anheben und Absetzen in unterschiedlichen Höhen möglich
- Überwindung von Steigungen möglich
- automatische Identifikation von Transpondern möglich

Die Eigenschaften der Ressource können mit Hilfe von Variablen, Parametern und Einheiten beschrieben werden. Die Variablenbezeichnungen sowie deren Bedeutung müssen über alle Ressourcen hinweg vereinheitlicht sein. Zur Sammlung, Verwaltung und Ausgabe dieser Daten je Ressource sind herstellerübergreifende Kataloge anzulegen, auf die der Nutzer im Planungsprozess zugreifen kann. Es entsteht somit ein Verzeichnis von Eigenschaften und die zu ihrer Beschreibung benutzten Variablen und Einheiten.

Neben der Zuordnung von Ressourcen zu Flussobjekten ist bei dieser Methodik eine Beschreibung von Schnittstellen und Interaktionsmöglichkeiten zur Kopp-

lung einer Ressource mit anderen vorzunehmen. Dies muss ebenfalls in einer einheitlichen, verständlichen Form erfolgen. Zur Plausibilitätsüberprüfung von Anwenderdaten können für die variablen Bandbreiten zulässige Werte angegeben werden. Abschließend sollen die Ressourcen in Katalogen zusammengefasst werden, die im weiteren Planungsprozess die gezielte Suche nach passenden Partnern ermöglichen.

#### 4.3 IPO-ANFORDERUNG

Die IPO-Anforderung bildet die Grundlage für die regelbasierte Systembildung. Die IPO-Anforderung enthält drei Arten von Information bzw. Anforderungen [Gud10]:

- I. Quantitative Anforderungen, die aus den Eigenschaften der Eingangs- und Ausgangsströme (Artikelstamm- und Kundenauftragsdaten) wie z. B. Flussobjekteabmessung, Durchsatz, anzubringendes Packmittel usw. abgeleitet werden.
- II. Qualitative Anforderungen wie z. B. Transparenz, Flexibilität usw., die durch den Planer als direkte Vorgaben angegeben werden.
- III. Restriktive Anforderungen wie z. B. gegebene bauliche Randbedingungen (bei einer Umplanung), grundlegende Verordnungen, Vorschriften und technische Regeln für innerbetriebliche Verkehrswege, arbeitsbedingter Kontakt zwischen den jeweiligen Betriebsmitteln, organisatorische Zusammenhörigkeit von Arbeitsmitteln usw.

Die Anforderungen gelten dabei sowohl für das Gesamtsystem als auch für dessen einzelne Funktionen und Ressourcen. Auf das Gesamtsystemniveau werden z. B. die Anordnung und der Aufbau von Funktionsbereichen aufgrund der zu manipulierenden Artikel festgelegt. Die Aufbauorganisation des Funktionsbereichs Kommissionierung wird z. B. maßgeblich durch die Eigenschaften der dort zu kommissionierenden Artikel bestimmt (Der Funktionsbereich Kommissionierung wird in unterschiedliche Zonen mit unterschiedlichen Kommissioniertechniken aufgeteilt, da sich nicht jede Kommissioniertechnik für jeden Artikel eignet). Auf der Funktionsebene legt bspw. die Auftragsstruktur die Reihenfolge der Prozesse zur Herbeiführung des in der Aufgabenstellung definierten Endzustands fest. Wenn z. B. die Positionsmenge für Artikel in Kundenaufträge die Stückzahl einer ganzen Ladeinheit umfasst, reduziert sich der Kommissionierauftrag auf einen Auslagerauftrag im Einheitenlager (die entsprechende Ladeinheit wird ausgelagert und im Regelfall direkt in Richtung Warenausgang zugesteuert). Die Verarbeitung von Anforderungen an das zu erstellende System und dessen Funktionsbereiche, Funktionen und Ressource stellt des Weiteren erhöhte Ansprüche an deren Beschreibungsqualität [Som09].

#### 4.4 BOTTOM-UP-VORGEHEN ZUR REGELBASIERTEN SYSTEMBILDUNG AUF GRUNDLAGE VON IPOs

Um die Grundstruktur eines Intralogistiksystems zu konzipieren, gilt es nun in diesem Abschnitt, die dialogbasierten Interaktionen zwischen IPOs so zu entwickeln, dass ein funktionsbereichsübergreifendes Modell des Gesamtsystems erzeugt wird. Eine Form der Interaktionsdarstellung, die insbesondere bei der Entwicklung von Expertensystemen eingesetzt wird, sind Regeln. Allerdings sind hiermit nicht nur logische Abhängigkeiten gemeint, sondern auch Regeln, wie sie in der täglichen Sprache häufig verwendet werden [Läm12]:

- Wenn Bedingungen, dann Schlussfolgerung
- Wenn Bedingungen, dann Aktion

Die Anwendung von Regeln trägt wesentlich zur Steigerung der Transparenz des Entwicklungsprozesses sowie der Nachvollziehbarkeit von Planungsentscheidungen bei. Die regelbasierte Systembildung (finaler Planungsschritt der Grobplanungsphase) kann dabei in zwei Teilschritte aufgegliedert werden, welche im Folgenden erläutert werden.

##### 4.4.1 SYSTEMAUSWAHL UND DIMENSIONIERUNG

Die Verhandlungen zur Auswahl und Dimensionierung eines Systems werden in drei aufeinander aufbauende Teilschritte zerlegt: Komposition, Konfiguration und Adaption. Die Komposition zielt auf die Bildung funktionserfüllender bzw. zueinander kompatibler Einheiten ab. Die Konfiguration sorgt für eine leistungsgerechte Dimensionierung von Systemen und durch die Adaption werden eventuell auftretende Kapazitäts- und Kompatibilitätsprobleme beseitigt. Ziel dieser regelbasierten Bildung von Systemen ist eine Auflistung von zueinander kompatiblen und ausreichend konfigurierten Systemen, die die gestellten Anforderungen an Funktion und Systemlast erfüllen. Nachfolgend wird der Kompositions-, Konfigurations- und Adaptionsprozess ausführlich erläutert.

##### KOMPOSITION:

Die Kompositionsregeln werden manuell durch eine systematische Analyse von Funktionen, Anforderungen und Ressourcen abgeleitet. Im Falle der Komposition von Funktionen mit Ressourcen erfolgt ein dialoggeführter Vergleich von Eigenschaften der Angebotsseite (Funktion, Anforderungen und Flussobjekte) mit denen der Liefertenseite (Ressourcen). Bei der Kopplung von Systemen werden die Schnittstellen und Eigenschaften miteinander zu koppelnder Ressourcen sowie deren Interaktionsmöglichkeiten verglichen. Die Entwicklung von Kompositionsregeln erfolgt dabei mit steigender Variablenanzahl vom Groben ins Feine. Es entstehen Auflistungen von Kombinationen, die bestimmte Vergleichskriterien erfüllen. Entsprechend der vorhandenen Detaillierung kann somit ein weit oder eng gefasster Vergleich vorgenommen

werden. Dies ermöglicht die Definition von Mindestangaben zur Durchführung der Komposition. Die Ergebnisse der Regelanwendung können in Kompositionsmatrizen gespeichert werden.

Bei der Kopplung von Systemen ist es möglich, dass aufeinander folgende Ressourcen nicht direkt miteinander interagieren können. In diesem Fall erfolgt keine Verknüpfung von zwei aufeinander folgenden Systemen durch die zuvor entwickelten Kompositionsregeln. In diesen Fällen kann eine Kopplung durch das Einfügen von Übergangssystemen erzielt werden. Dies ist die Aufgabe der Übergangsregeln. Diese überprüfen die Richtigkeit von Vorgänger-Nachfolger-Beziehungen auf Grundlage der Schnittstellen sowie der Ein- und Ausgangszustände der Prozesse. Sie ermitteln schnittstellenbasierte Inkonsistenzen in der Prozessabfolge. Die Inkonsistenzen werden markiert und eine entsprechende Übergangsfunktion eingefügt. Für diese Übergangsfunktion wird eine Ressource ermittelt.

#### **KONFIGURATION:**

Über die entwickelten Kompositionsregeln werden funktionserfüllende bzw. zueinander kompatible Systeme geschaffen. Die Dimensionierung von Systemen erfolgt auf Grundlage von Konfigurationsregeln. Die Dimensionierung von Materialflusssystemen erfolgt mit Hilfe von Kennzahlen, die aus den technischen Daten der prozessausführenden Ressourcen, den gegebenen Anforderungen und den Systemlasten berechnet werden. Es werden die Kennzahlen ermittelt, die zur Dimensionierung benötigt werden. Die Kennzahlen und ihre Berechnungsvorschriften werden katalogisiert. Die Berechnung der Kennzahlen beruht auf einem Prozessmodell, das den Materialstrom über die Ressourcen (IPO) abbildet. Dieses Modell wird mit Hilfe von Regeln generiert. Die Bildungs- und Prüffregeln für das Prozessmodell werden erstellt und katalogisiert. Die Prüffregeln beinhalten auch die Prüfung der vollständigen Beschreibung der Systemlasten und der Anforderungen.

#### **ADAPTION:**

Das Prozessmodell ermöglicht die Adaption an die bestehenden Anforderungen und Systemlasten. Kann eine Ressource die geforderte Systemlast nicht erreichen, so muss die Kapazität angepasst werden. Während dies bei Unstetigförderern, wie beispielsweise Gabelstaplern, einfach durch eine Erhöhung der Anzahl erfolgen kann, ist dies bei Stetigförderern ggf. mit einer Anpassung des Prozessmodells verbunden. Dementsprechend kann die Adaption auch durch den Austausch kompatibler Ressourcen erzielt werden. Zunächst werden Fälle definiert, in denen eine Adaption erforderlich ist. Für diese Fälle werden entsprechende Regeln definiert und ein Vorgehen zur Adaption beschrieben.

Nachfolgend wird der Kompositions-, Konfigurations- und Adaptionprozess exemplarisch illustriert. Die Förderung von Paletten kann mit Hilfe von Stetigförderern wie bspw. Rollenbahnen oder von Unstetigförderern wie bspw. Gabelstapler bzw. Schleppzüge vorgenommen werden. Es soll der Wareneingang mit einem Hochregallager verbunden werden. Im Kompositionsprozess werden alle zur Funktion Fördern passenden Ressourcen aus gesucht. Im Prozess Konfiguration werden die ausgesuchten Ressourcen anhand von Kennzahlen dimensioniert und bewertet sowie in ein Ranking gebracht. Aufgrund des hohen gleichmäßigen Förderaufkommens ist die Förderung mit Hilfe von Rollenbahnen die beste Lösung. Die Paletten werden in einem automatischen Hochregallager eingelagert, dessen Vorzone ebenfalls mit Rollenbahnen ausgerüstet ist. Im Zuge der Adaption wird die Identifikation der Paletten, das automatische Wiegen sowie die Kontur- und Palettenprüfung in das Rollenbahnsystem integriert und eine Ausschleusestrecke für Nachprüfungen eingebaut.

Je nach Anwendungsfall sollen auch die Regeln zum Management des Planungsprozesses manuell definiert werden. Diese Management-Regeln veranlassen eine Reihenfolge, nach der der Bottom-Up Planungsprozess ablaufen soll. Hierzu wird der Ablauf eines Planungsprozesses als Workflow modelliert und die Eingangs-, Zwischen- und Endzustände dokumentiert. Auf dieser Grundlage werden Regeln definiert, die eine kontextbezogene Steuerung des Planungsprozesses ermöglichen. Im Zusammenhang der Erörterung der Reihenfolge gilt es festzuhalten, dass der Funktionsbereich Kommissionierung als erstes auszuplanen ist, da dieser maßgeblich den Lieferservice und die Logistikkosten beeinflusst bzw. die direkte Schnittstelle zum Kunden bildet und damit einhergehend auch direkt die Wettbewerbsfähigkeit der Unternehmung bestimmt. Die große Anzahl von Realisierungsmöglichkeiten in diesem Bereich führt des Weiteren zu einer hohen Komplexität bei der Planung. Demnach hat die Planung von Kommissioniersystemen einen hohen Stellenwert bzw. stellt die Kommissionierung den Funktionsbereich eines Distributionszentrums dar, der am schwierigsten zu planen ist. Gleichzeitig weist die Kommissionierung aber auch die größten Optimierungspotenziale auf, durch deren Nutzung sich für die Unternehmung die Chance ergibt, den bisherigen Marktanteil zu stärken bzw. diesen zu vergrößern.

#### **4.4.2 SYSTEMBEWERTUNG**

Aus der Vielzahl möglicher Vernetzungen zwischen Funktionen und Ressourcen sowie Funktionsbereichen sind diejenigen auszuwählen, die den technisch-betriebswirtschaftlichen Aufwand minimieren. Das heißt, im Rahmen der Bewertung optionaler Lösungsvarianten prinzipiell diejenige Variante auszuwählen ist, welche im Hinblick auf das Erreichen der geforderten Leistung, die geringsten Kosten (Betriebs- oder

Investitionskosten) und somit die größte Wirtschaftlichkeit aufweist. Der Vergleich kostenseitig gleichwertiger Alternativen anhand schlecht quantifizierbarer Faktoren wie Flexibilität, Erweiterbarkeit, Robustheit, usw. mit Hilfe nutzwertentheoretischer Verfahren wie beispielsweise einer Nutzwertanalyse liegt außerhalb der Methodik und ist durch den Planer in einem separaten Bewertungsschema vorzunehmen.

#### 4.5 FORMALISIERUNG VON OBJEKTEN DER PLANUNG UND REGELN

Die gesammelten Regeln zur Komposition, Konfiguration, Adaption und zum Management müssen für die digitale Verarbeitung formalisiert werden. Die Grundlage dafür bildet ein einheitliches Vokabular, einheitliche Variablen und Parameter, um mit Hilfe einer Regelbeschreibungssprache die genannten Regeln zu formalisieren. Das Wissen kann folglich formal durch eine Regelbeschreibungssprache beschrieben werden und ist somit für Computer anwendbar. Durch das formalisierte Wissen in Form von Regeln kann ein Computer beispielsweise Beziehungen zwischen Komponenten eines Systems ableiten [Gom04].

Hauptanwendungsgebiet der Regelbeschreibungssprachen sind u.a. Wissensmanagementsysteme, das Semantic Web, Business Rules, Ontologien und Agentensysteme. Mit Hilfe von Sprachen zur Ontologieentwicklung können Beziehungen zwischen Objekten und deren Eigenschaften einerseits auf Sprachkonzepten, andererseits auf Logiken basierend beschrieben werden. Dadurch ist eine regelbasierte Abbildung von diesen Beziehungen möglich. Des Weiteren existieren noch semi-formale Regelbeschreibungssprachen. Diese bilden die Relationen durch eine auf definiertem Vokabular beruhende Grammatik ab [Pul06, Gro04].

### 5 AGENTENSYSTEME

Das Paradigma der agentenorientierten Softwareentwicklung [Jen00] ist geeignet, um flexible Systeme zu entwickeln. Das System wird dabei als eine Menge an autonomen Agenten aufgefasst.

Agenten sind gekapselte Software-Einheiten, die versuchen, ihre eigenen, vordefinierten Ziele zu erreichen [Wag03]. Sie besitzen einen definierten Handlungsspielraum, in dem sie selbstständig Entscheidungen treffen und agieren. Um ihre Ziele zu erreichen, interagieren Agenten mit ihrer Umgebung und anderen Agenten, die wiederum ihre eigenen Ziele verfolgen. Da die Ziele der einzelnen Agenten im Widerspruch zueinander stehen können, müssen die Agenten miteinander kooperieren, um ihre eigenen Ziele zu erreichen. Durch diese Kooperation der einzelnen Agenten ist es möglich, ein übergeordnetes Gesamtziel zu erreichen. Durch das beschriebene Verhalten eines Agen-

ten kann dieser dynamisch auf Veränderungen in seiner Umwelt reagieren [VDI10].

Der Zusammenschluss von einzelnen Agenten bzw. das Interagieren von einzelnen Agenten mit einem gemeinsamen Hauptziel wird als Agentensystem bezeichnet. Mit Hilfe von Agentensystemen können daher komplexe Probleme, die viele Randbedingungen besitzen, effektiver gelöst werden. Durch die Verteilung von einzelnen Funktionen auf einzelne Agenten existiert nur eine geringe Kopplung zwischen den einzelnen Elementen. Aus diesem Grund sind sie gut für Problemstellungen geeignet, die sich aus unterschiedlichen Teilproblemen zusammensetzen, die allerdings eine gewisse Abhängigkeit voneinander besitzen. Das Intralogistiksystem kann, wie in Kapitel 4 beschrieben, in seine Funktionsbereiche unterteilt werden. Diese stellen eigene Teilsysteme dar, die allerdings gewisse Abhängigkeiten, z. B. die Übergänge zwischen den Funktionsbereichen, untereinander aufweisen.

Gerade bei der Dimensionierung der einzelnen Ressourcen existieren starke Wechselbeziehungen zwischen den einzelnen Ressourcen. Mit Hilfe des proaktiven Verhaltens von Agentensystemen können Wechselbeziehungen zwischen einzelnen Elementen, die während der Planung dynamisch entstehen, einfacher berücksichtigt werden.

Im Bereich der Intralogistik werden bereits Agentensysteme im laufenden Betrieb eingesetzt. Die zentrale Steuerung von Materialflusssystemen bringt einige Schwachstellen mit sich. So sind beispielsweise nicht alle Abläufe vollständig planbar. [Kug13] setzt Agentensysteme für die Materialflusssteuerung im Bereich der Intralogistik ein, um mit Hilfe von deren proaktivem Verhalten und einer dezentralen Steuerung diesen Schwachstellen zu begegnen. Durch den Einsatz von Agenten ist es möglich, den immer komplexer werdenden Systeme sowie der Anforderung nach mehr Flexibilität gerecht zu werden.

In anderen Bereichen ist die Planung mit Hilfe von Agentensystemen bereits weiter fortgeschritten. Wagner [Wag05] nutzt ein agentenbasiertes Assistenzsystem, um den Entwickler bei der Entwicklung von Automatisierungsanlagen zu unterstützen. [Hei11] nutzt ein Agentensystem, um die Rekonfiguration von Transferzentren zu planen. Die einzelnen Werkzeuge werden dabei durch Agenten vertreten, die sich selbstständig ihre Position in der Maschine suchen.

### 6 REALISIERUNG MIT HILFE EINES AGENTENSYSTEMS

Für die Realisierung der vorgestellten dezentralen Planungsmethodik eignen sich Agentensysteme. Mit Hilfe der losen Kopplung und der Autonomie der Agenten können dynamische Netze aus IPOs entstehen, indem jedes IPO durch einen Agenten abgebildet wird.

Die Anforderungen an das zu planende Intralogistiksystem werden dem Agentensystem zur Verfügung gestellt, indem der Planer seine Anforderungen bzgl. der Artikelstamm- und Kundenauftragsdaten in das System eingibt. Zur Dimensionierung und Bewertung des Systems sind Restriktionen wie Layoutinformationen ebenso unabdingbar. Die Restriktionen der zu planenden Anlage werden auch hier manuell durch den Planer generiert. Das Agentensystem bildet aufgrund der Anforderungen Realisierungsmöglichkeiten bzw. -alternativen und bewertet diese anschließend für den Planer. Das Agentensystem wählt allerdings nicht selbstständig die beste Lösung aus, sondern stellt dem Planer die am besten bewerteten Realisierungsvorschläge zur Verfügung. Auf diese Weise wird gewährleistet, dass der Planer seine Erfahrung und sein Wissen einbringen kann. In Abbildung 3 ist der beispielhafte Aufbau der oberen Ebene des Agentenkonzepts für ein Distributionszentrum dargestellt. Auf oberster Ebene existiert der Systemagent. Der Systemagent analysiert die vom Planer eingegebenen Anforderungen und wertet diese aus, indem er beispielsweise die für die Dimensionierung benötigten Kennzahlen, wie z. B. durchschnittliches Kommissionierauftragsvolumen und -gewicht berechnet. Zusätzlich entscheidet er aufgrund der gestellten Anforderungen, welche Funktionsbereiche im Intralogistiksystem (Wareneingang, Kommissionierung, etc.) zunächst benötigt werden und instanziiert die jeweiligen Bereichsagenten. Die Funktion eines Bereichsagenten wird später näher erläutert. Eine weitere Aufgabe des Systemagenten ist die Ausgabe der Ergebnisse, die in der Form von bewerteten Realisierungsmöglichkeiten ausgegeben werden.

Die Bereichsagenten repräsentieren die Funktionsbereiche, aus denen sich ein Intralogistiksystem zusammensetzt, d. h. ein Bereichsagent koordiniert seinen jeweiligen Funktionsbereich. Er besitzt das für seinen Funktionsbereich spezifische Wissen, um einerseits die benötigten Funktionen auszuwählen, die zur Erfüllung der Anforder-

ungen benötigt werden. Andererseits bestimmt er eine Struktur für die einzelnen Funktionen. Existiert mehr als eine sinnvolle Architektur, den Funktionsbereich aufzubauen, werden entsprechend weitere Bereichsagenten mit den alternativen Strukturen instanziiert. Des Weiteren wird das für den Funktionsbereich spezifische Berechnungsmodell in diesem Wissen hinterlegt. Die Bereichsagenten der unterschiedlichen Funktionsbereiche kooperieren miteinander, um die Schnittstellen zwischen ihren Funktionsbereichen zu bestimmen. Die Ressourcen, die die erste bzw. letzte Ressource in einem Funktionsbereich darstellen, müssen zu der ersten bzw. letzten Ressource der angrenzenden Funktionsbereiche kompatibel sein, um den Materialfluss durch das gesamte Intralogistiksystem zu gewährleisten.

Mit Hilfe der ermittelten Struktur instanziiert der Bereichsagent die benötigten Funktionsagenten und teilt diesen ihre jeweiligen Nachbarn mit. Die bereits in Abschnitt 4.4 beschriebenen Schritte zur Systembildung erfolgen hier. Der beispielhafte Aufbau des Agentenkonzepts eines Bereichs ist in Abbildung 4 zu sehen. Jeder Funktionsagent vertritt eine Ressource mit der gewünschten Funktion. Da alle Realisierungsmöglichkeiten geprüft werden sollen, wird für jede Ressource, die die geforderte Funktion erfüllt, ein Funktionsagent benötigt. Aus der Vielzahl an Funktionsagenten baut sich ein Netz aus verbundenen Funktionsagenten auf, die jeweils ihre potentiellen Nachbarn kennen. Die Funktionsagenten prüfen nach ihrer Instanzierung zunächst, ob die von ihnen vertretene Ressource den an das System gestellten Anforderungen entspricht. Ist beispielsweise eine Anforderung an das Intralogistiksystem, dass Paletten transportiert werden müssen, verabschieden sich die Funktionsagenten, deren Ressourcen nur Pakete transportieren können. Diese Funktionsagenten teilen ihren Nachbarn mit, dass sie nicht kompatibel sind und versetzen sich selbst in einen Ruhezustand. Aus diesem Zustand können sie nur vom Anforder-

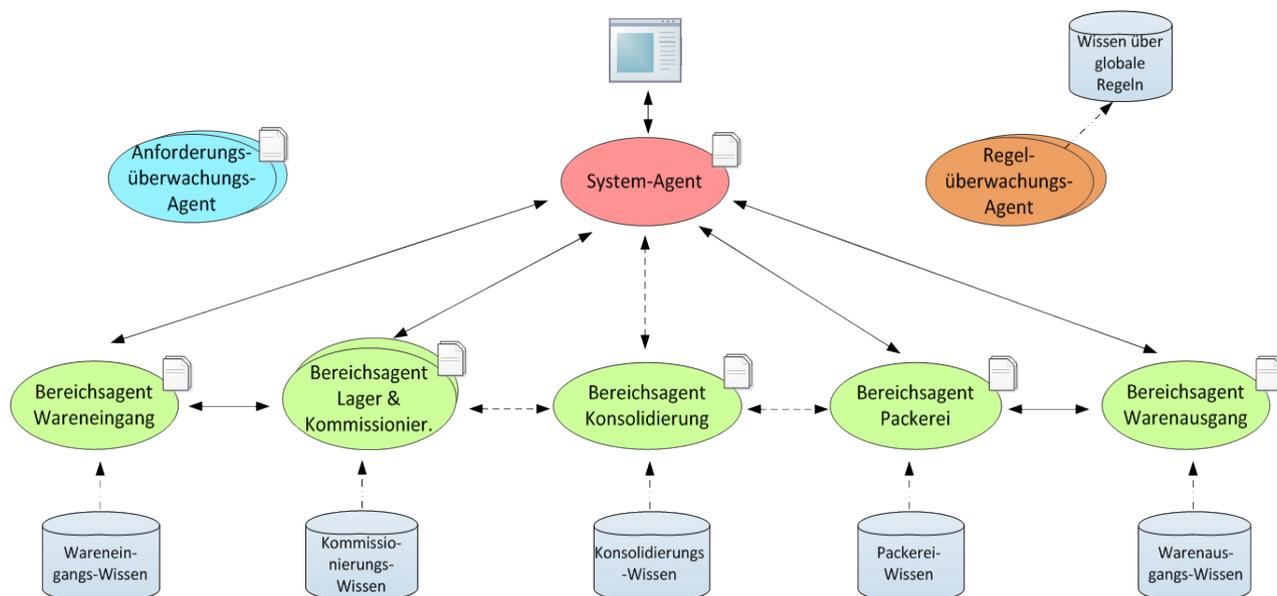


Abbildung 3: Obere Ebene des Agentenkonzepts am Beispiel eines Distributionszentrums

derungsüberwachungsagent wieder geweckt werden, wenn beispielsweise die Anforderungen durch den Planer geändert werden. Dadurch, dass die Funktionsagenten, deren Ressourcen die Anforderungen nicht erfüllen, inaktiv werden, entsteht ein Agentennetz, in dem nur die Ressourcen vorhanden sind, die die gewünschten Anforderungen erfüllen.

Des Weiteren müssen die Schnittstellen der einzelnen benachbarten aktiven Ressourcen überprüft werden, da nicht jede Ressource zu jeder Nachbarressource kompatibel ist. Um die Kompatibilität feststellen zu können, wird eine Regelwissensbasis benötigt, mit deren Hilfe bestimmt werden kann, ob zwei benachbarte Ressourcen kompatibel sind. Bandförderer werden in der Regel aufgeständert. Sie fördern Paletten in einer bestimmten Höhe über dem Boden. Ein vor- oder nachgeschaltetes Förder-system muss in der Lage sein, entweder die Palette auf dem Bandförderer abzustellen bzw. abzunehmen (Gabelstapler, Kran) oder sie in der entsprechenden Förderhöhe zu übergeben bzw. zu übernehmen (Rollenbahn). Stellen die Funktionsagenten mit einem ihrer jeweiligen Nachbarn fest, dass sie zueinander inkompatibel sind, wird deren Verbindung im Netz gelöscht. Diese beiden Schritte, die Auswahl der Ressourcen und die Überprüfung der Schnittstellen, bilden die Komposition der Systembildung ab.

Sowohl für die Zuordnung der Ressourcen zu den neun Funktionen als auch um die Kompatibilität der Ressourcen zueinander zu bestimmen wird ein Ressourcenkatalog benötigt. In diesem werden die Ressourcen nach den einzelnen Funktionen kategorisiert. Für jede Funktion werden die spezifischen Eigenschaften festgelegt und formalisiert abgebildet, um diese Informationen für das Agentensystem zur Verfügung zu stellen. Für den Zugriff

auf den Ressourcenkatalog existiert ein weiterer Agententyp, der Ressourcen-Schnittstellen-Agent, der in Abbildung 5 dargestellt ist. Dieser bietet den Vorteil, dass bei einer Änderung der Datenquelle lediglich der Ressourcen-Schnittstellen-Agent ausgetauscht werden muss, da er die einzige Schnittstelle zu den Daten darstellt. Die Ressourcenkataloge können somit beispielsweise in Form von einer Exceltabelle gestaltet werden. Dies hat den Vorteil, dass der Planer leicht neue Ressourcen dem Katalog hinzufügen kann.

Neben der Komposition spielt die Dimensionierung der Ressourcen eine Rolle bei der Kompatibilität zu ihrem Nachbarn. So ist beispielsweise die Auswahl des Fördermittels auch abhängig von der Höhe eines Lagermittels. Die Konfiguration der Systembildung muss dementsprechend im nächsten Schritt erfolgen. Sobald ein Funktionsagent die Kompositionsphase abgeschlossen hat, kann er mit der Konfiguration beginnen. Somit läuft der Konfigurationsvorgang parallel zur Komposition. Die Dimensionierungsregeln für die einzelnen Ressourcen sind ebenfalls in einem Ressourcenkatalog hinterlegt.

Der letzte Schritt, die Adaption, erfolgt mit Hilfe der Überwachungsagenten. Sie überprüfen beispielsweise, ob die geforderte Systemlast durchgängig erfüllt ist. Begrenzt eine Ressource diese, wird diese aus dem Netz genommen und durch eine andere Ressource ersetzt. Die Anforderungsüberwachungsagenten überwachen, dass die Anforderungen an das zu planende Intralogistiksystem erfüllt werden. Der Regelüberwachungsagent überwacht, dass die Regeln, die für die korrekte Entwicklung eines Intralogistiksystems existieren, eingehalten werden.

Um ein Intralogistiksystem automatisiert und korrekt zu planen, müssen alle Regeln, die benötigt werden, um

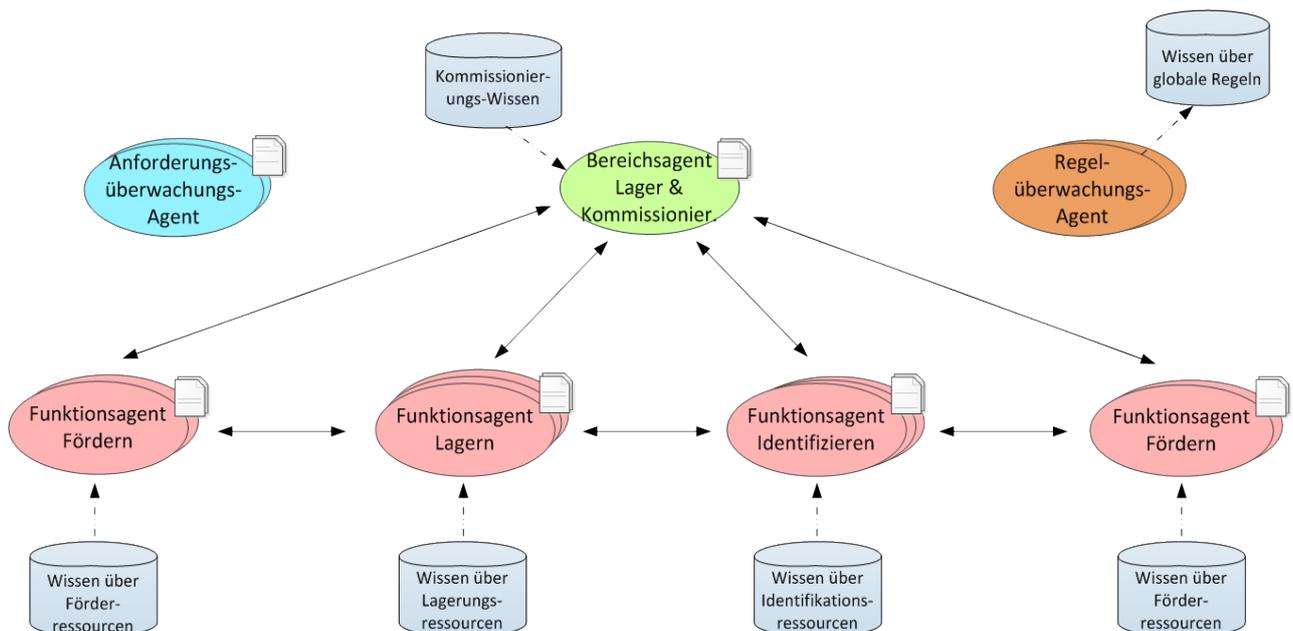


Abbildung 4: Untere Ebene des Agentenkonzepts am Beispiel eines Distributionszentrums

ein Intralogistiksystem zu planen, wie oben beschrieben in einer Wissensbasis hinterlegt werden. Diese Regeln bilden das Wissen des Planers ab. Es beinhaltet beispielsweise die Regeln, mit denen die Bereichsagenten entscheiden können, welche Funktionen benötigt werden und vor allem in welcher Reihenfolge diese erfolgen müssen. Die Regeln werden einmal bei der Entwicklung des Assistenzsystems vom Planer festgelegt und können danach dynamisch erweitert werden. Da nicht jeder Entscheidung automatisiert getroffen werden kann, da manche, z. B. die sich aus qualitativen Anforderungen ergebenden Entscheidungen, auf der Erfahrung der Planer beruhen und nicht formalisiert werden können, ist eine Interaktion des Assistenzsystems mit dem Planer möglich. Tritt eine Konfliktsituation auf, die nicht alleine auf Basis der hinterlegten Regeln gelöst werden kann, wird der Planer in die Entscheidung miteinbezogen. Dieses Vorgehen gewährleistet, dass kein Wissen des Planers verloren geht. Durch die Interaktion mit dem Planer besteht zusätzlich die Möglichkeit, dass der Planer gewisse Entscheidungen dem Assistenzsystem, wie zum z. B. die gewünschten Funktionsbereiche, vorgibt und somit die generierten Lösungsalternativen und die Berechnungszeit einschränkt.

Auf diese Art entsteht am Ende ein Netz aus Funktionsagenten, das alle Realisierungsmöglichkeiten für das zu entwickelnde Intralogistiksystem enthält. Jeder Pfad durch das Netz entspricht einer Realisierungsmöglichkeit. Diese Pfade werden extrahiert und nach unterschiedlichen Kriterien, wie zum Beispiel den Kosten, bewertet. Die Realisierungsmöglichkeiten, die die vom Planer angegebenen Investitionskosten überschreiten, werden automatisch aussortiert.

Durch die Autonomie der Agenten erfolgt der gesamte Planungsprozess parallel und iterativ, d. h. die einzelnen Schritte der Systembildung, die Komposition, die Konfiguration und die Adaption, werden parallel ausgeführt. Ob die Planung beendet werden kann, entscheidet der Systemagent zusammen mit den Überwachungsagenten. Dies ist erreicht, sobald alle Anforderungen und Ziele an das zu planende Intralogistiksystem erfüllt sind. Durch die ständige Prüfung, ob alle Anforderungen erfüllt sind,

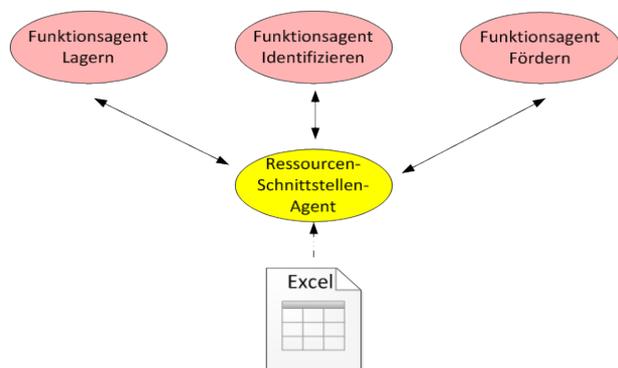


Abbildung 5: Ressourcen-Schnittstellen-Agent

können beispielsweise die Anforderungen während dem Planungsvorgang verändert werden und das System passt sich dynamisch an, um die Konsistenz der Planung wieder herzustellen.

## 7 FAZIT UND AUSBLICK

Die Struktur eines komplexen Intralogistiksystems zu planen, stellt in vielen Hinsichten eine große Herausforderung dar. Seit vielen Jahren ist daher das Thema Planungssoftware-Systeme für Industrie und Forschung ein zentrales Feld. Die Grundlage der gegenwärtigen rechnergestützten Planungsmodelle wird durch eine iterative und zeitaufwendige Vorgehensweise sowie durch die Erfahrungen und das Wissen des Planungsteams geprägt und ist damit für die mangelnde Flexibilität und Transparenz in Planungsprozessen verantwortlich. Die wachsende Dynamik und Turbulenz der Marktanforderungen, der demographische Wandel sowie steigende Produkt- und Prozesskomplexität fordert heute von einer Planungssoftware intelligentes Verhalten, das heißt Software, die die Anforderungen und Rahmenbedingungen erkennen und diese durch zweckmäßige Modelle und Methoden objektiv analysieren und auf Basis von diesen Ergebnissen das ganzheitliche Optimum erreichen.

Dieser Artikel versucht durch die Vorstellung einer dezentralen und auf Selbstorganisation basierten Methodik zur Grobplanung von Intralogistiksystemen mit Hilfe von Agentensystemen hierzu einen Beitrag zu leisten. Diese Methodik betrifft sowohl die Wissenspräsentation – wie wird das im Unternehmen (bei einem Planer) verfügbare Planungswissen gespeichert - als auch die automatische Wissensverarbeitung: Wie wird mit dem vorhandenen Wissen gearbeitet? Wie werden Schlussfolgerungen aus dem gegebenen Wissen abgeleitet? In diesem Artikel wurden die Voraussetzungen sowie die theoretischen und technischen Grundlagen zur Realisierung dieser Methodik thematisiert. Die dargestellten Ergebnisse werden im Rahmen des Projekts „Dezentrale selbstorganisierte Grobplanung von Intralogistiksystemen mit Hilfe eines Software-Agentensystems“ (DEPIAS) durchgeführt. Das im Juni 2013 gestartete Projekt wird durch die „Deutsche Forschungsgemeinschaft“ gefördert und läuft noch bis Juni 2016.

## DANKSAGUNG

Die Autoren danken der Deutschen Forschungsgemeinschaft (DFG) für ihre Unterstützung im Forschungsprojekt DEPIAS.

## LITERATUR

- [Arn04] Arnold, D. (Hrsg.): Intralogistik. VDI-Springer Verlag, Berlin 2004.
- [Ash56] Ashby, W.R.: An introduction to Cybernetics. New York 1956.
- [Ell12] Ellinger, M.; ten Hompel, M.: Agentenbasiertes Planungsmodell für die Grobplanung von Kommissioniersystemen. In: Logistics Journal: Proceedings, 2012.
- [Fig08] Figgner, O.: Beitrag zur Prozessstandardisierung in der Intralogistik. In: ten Hompel, M. (Hrsg.), Verlag Praxiswissen, Dortmund 2008.
- [Gab98] Gabbert, P.; Brown, D.: Knowledge-Based Computer-Aided Design of Materials Handling Systems. In: 188 IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics, 19, 1998, 2.[Gel02] Gellmann, M.: What is complexity. In: Alberto, Q.C.; Marco, F. (Hrsg., 2002): Complexity and Industrial Clusters: Dynamics and Models in Theory and Practice. S. 13-24.
- [Gom04] Gómez-Pérez, A.; Fernandez-Lopez, M.; Corcho, O.: Ontological Engineering. Springer Verlag, London 2004.
- [Göp05] Göpfert, I.: Logistik: Führungskonzeption, 2. Auflage, München, 2005.
- [Gro04] Grosz, B.: Representing e-commerce rules via situated courteous logic programs. In: RuleML, Electronic Commerce Research and Applications, 3, 2004, 1, S. 2-20.
- [Gud10] Gudehus, T.: Logistik. Springer Verlag, Berlin/Heidelberg 2010.
- [Hei11] Heisel, U. et al.: Flexible Fertigungssystemplanung für Transferzentren. In: wt Werkstattstechnik online, 4, 2011.
- [Hol02] Holland, J.H.: Complex adaptive systems and spontaneous emergence. In: Curzio, A.Q.; Fortis, M. (Hrsg., 2002): Complexity and Industrial Clusters. S. 25-34.
- [Hol88] Holland, J.H.: The global economy as an adaptive system. In: Anderson, P.W.; Arrow, K.J.; Pines, D. (Hrsg., 1988): The Economy as an Evolving Complex System. S. 117-124.
- [Hül09] Hülsmann, M.; Cordes, P.: Wettbewerbsvorteile in und von internationalen Wertschöpfungsnetzwerken — einige komplexitäts- und kompetenztheoretische Überlegungen. In: Wimmer, T.; Bobel, T. (Hrsg.): 26. Deutscher Logistik-Kongress — Kongressband 2009. Deutscher Verkehrs-Verlag, Hamburg 2009.
- [Jen00] Jennings, N. R.: On agent-based software engineering. In: Artificial Intelligence, 117, 2000.
- [Job13] Jobi, B. S.: Entwicklung einer rechnergestützten Systematik zur funktionsbereichsübergreifenden Planung von Distributionszentren durch Einsatz der Graphentheorie. Diss. Universität Stuttgart, Shaker Verlag, Aachen 2013.
- [Jün89] Jünemann, R.: Materialfluß und Logistik. Springer, Berlin 1989.
- [Kug13] Kugler, W.; Gehlich, D.: Einsatz von Agentensystemen in der Intralogistik. In: Göhner, P. (Hrsg., 2013): Agentensysteme in der Automatisierungstechnik. S. 113 – 128.
- [Läm12] Lämmel, U.; Cleve, J.: Künstliche Intelligenz. Carl Hanser Verlag, München 2012.
- [Mar11] Marrenbach, D.; Wehking, K.-H.: Auto-poetic material handling systems. In: Proceedings of the 16th Annual International Conference on Industrial Engineering Theory, Applications and Practice. Stuttgart 2011.
- [McK09] McKelvey, B. et al.: Designing an electronic auction market for complex 'smart parts' logistics: Options based on LeBaron's computational stock market. In: International Journal of Production Economics, 120, 2009, S. 476-494.
- [McK99] McKelvey, B. et al.: Self-organization, complexity catastrophe, and microstate models at the edge of chaos. In: Baum, J.A.C. / McKelvey, B. (Hrsg., 1999), Variations, in Organization Science: In Honor of Donald T. Campbell, Thousand Oaks, S. 279-307.

- [Nag07] Nagel, L.; Schmidt, T.; ten Hompel, M.: Materialflusssysteme: Förder- und Lagertechnik. Springer Verlag, Berlin 2007.
- [Pul06] Pulido, J.R. et al.: Ontology languages for the semantic web: A never completely updated review. In: Knowledge-Based Systems, 19, 2006, 7, S. 489-497.
- [Sch07] Scholz-Reiter, B. et al.: Selbststeuerung in der betrieblichen Praxis — Ein Framework zur Auswahl der passenden Selbststeuerungsstrategie. In: Industrie Management, 23, 2007, S. 7.
- [Som09] Sommer, T.; Neuhäusser, D.; Jobi, B.: Ganzheitliche Planung logistischer Systeme – Hilfestellung durch EDV-gestützte Assistenzsysteme. In: Logistics Journal: Proceedings, 2009.
- [VDI10] VDI/VDE-Richtlinie: Agentensysteme in der Automatisierungstechnik. VDI/VDE 2653, Blatt 1, 2010.
- [Wag03] Wagner, T., Göhner, P., Urbano, P.: Softwareagenten – Einführung und Überblick über eine alternative Art der Softwareentwicklung. Teil I: Agentenorientierte Softwareentwicklung. In: Atp – Automatisierungstechnische Praxis, 45, 2003, 10.
- [Wag05] Wagner, T.: Agentenunterstütztes Engineering von Automatisierungsanlagen. In: 7. GMA-Kongress 2005 - Automation als interdisziplinäre Herausforderung, Baden-Baden 2005, S. 559-567.
- [Wag08] Wagner, T.: Agentengestütztes Engineering von Automatisierungsanlagen. Diss. Universität Stuttgart, Shaker Verlag Aachen 2008.
- [Weh10] Wehking, K.-H.; Sommer, T.: Rechnergestützte Auswahl intralogistischer Betriebsmittel. In: Jahrbuch Logistik 2010. Huss-Verlag, München 2010.
- [Wun14] Wunderle A., Sommer, T.: Erfahrung und Augenmaß zählen: Planung von Intralogistiksystemen. In: Hebezeuge Fördermittel, 54, 2014.

---

**M. Sc. Ramin Yousefifar**, wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Fördertechnik und Logistik (IFT), Universität Stuttgart

**Dipl.-Ing. Theresa Beyer**, wissenschaftliche Mitarbeiterin am Institut für Automatisierungs- und Softwaretechnik (IAS), Universität Stuttgart

**Dr.-Ing. Nasser Jazdi**, Akademischer Oberrat am Institut für Automatisierungs- und Softwaretechnik (IAS), Universität Stuttgart

**Prof. Dr.-Ing. Dr. h. c. K.-H. Wehking**, Institutsleiter am Institut für Fördertechnik und Logistik (IFT), Universität Stuttgart

**Prof. Dr.-Ing. Dr. h. c. Peter Göhner**, Institutsleiter am Institut für Automatisierungs- und Softwaretechnik (IAS), Universität Stuttgart

Adresse: Institut für Fördertechnik und Logistik, Universität Stuttgart, Holzgartenstr. 15b, D-70174 Stuttgart.  
Phone: +49 711 685-83743, Fax: +49 711 685-83795,  
E-Mail: Ramin.Yousefifar@ift.uni-stuttgart.de

Adresse: Institut für Automatisierungs- und Softwaretechnik, Universität Stuttgart, Pfaffenwaldring 47, D-70550 Stuttgart.  
Phone: +49 711 685-67299, Fax: +49 711 685-67302,  
E-Mail: Theresa.Beyer@ias.uni-stuttgart.de