

# Integration von Software-Agenten und Soft-Computing-Methoden für die Transportplanung

Hagen Langer<sup>1</sup>, Ingo J. Timm<sup>1</sup>, Jörn Schönberger<sup>2</sup>, Herbert Kopfer<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Technologie-Zentrum Informatik (TZI), Universität Bremen  
Am Fallturm 1, 28359 Bremen  
hlander@tzi.de, i.timm@tzi.de

<sup>2</sup>Lehrstuhl für Logistik, Universität Bremen  
Wilhelm-Herbst-Straße 5, 28359 Bremen  
sberger@logistik.uni-bremen.de, kopfer@uni-bremen.de

*Zusammenfassung:* Anwendungen in der Transportlogistik zeichnen sich durch eine besonders hohe Komplexität und Dynamik aus. In diesem Rahmen haben sich Soft-Computing-Ansätze für die Disposition etabliert, da sie eine effiziente Planung ermöglichen. Daneben werden in der Forschung Ansätze zur Transportplanung mit Hilfe von Multiagentensystemen untersucht, die eine natürliche Repräsentation bieten und hierbei autonomes und robustes Verhalten ermöglichen. Die Integration von Multiagentensystemen und Soft-Computing-Methoden wird in diesem Beitrag als Lösungsansatz beschrieben, um robuste und flexibel reagierende selbststeuernde logistische Prozesse in dieser Domäne zu realisieren.

## 1 Einleitung

Effiziente und zuverlässige Transportprozesse sind für moderne verteilte und arbeitsteilige Produktionskonzepte von zentraler Bedeutung. Daher sind in den letzten Dekaden weit reichende überregionale und internationale Transportnetzwerke entstanden, die eine räumliche Überbrückung zwischen Beschaffungs-, Produktions- und Nachfrageorten zu marktgerechten Preisen ermöglichen.

Nur durch eine Nutzung hoch entwickelter Planungs-Unterstützungssoftware ist es noch möglich, aus der Vielzahl möglicher Prozessausprägungen die jeweils bestmögliche für jede Transportressource bzw. jeden Auftrag zu identifizieren, ohne eines der beiden Ziele Profit- oder Servicemaximierung übermäßig zu vernachlässigen [CrLa1998]. In der wissenschaftlichen Literatur sind zwei Klassen von Planungsmethoden zu finden, die in aktuellen Anwendungen zur Planung von Transportprozessen eingesetzt werden: Soft-Computing und Software-Agentensysteme.

Unter dem Begriff *Soft-Computing* [Lipp2005] sind methodischen Verfahren zusammengefasst, die im Gegensatz zu vielen klassischen Ansätzen aus der Künstlichen

Intelligenz (KI) keine Repräsentationen auf der Basis einer klassischen zweiwertigen Logik voraussetzen, sondern auch und gerade „weiche“, d.h. unscharfe, mehrwertige oder approximative Repräsentationen einsetzen, um für komplexe Entscheidungsprobleme hochwertige Lösungen zu finden. Die wichtigsten Verfahren sind dabei Evolutionäre Verfahren, Lokale Suche, Fuzzy-Systeme sowie Neuronale Netze.

Software-Agentensysteme basieren hingegen auf dem Paradigma der dezentralen Entscheidungsfindung. Agenten repräsentieren Einheiten, die autonom entscheiden können und hierbei auf der Basis von Interaktion und Kommunikation mit ihrer Umwelt (insbesondere anderen Agenten) die Handlungsfähigkeit der logistischen Objekte herstellen.

In dieser Arbeit soll überlegt werden, wie diese bisher weitgehend getrennt verfolgten methodische Planungsparadigmen mit dem Ziel der Verbesserung und Ausweitung von Transportplanungskompetenzen in hybriden Ansätzen integriert werden können, um eine Dispositionsunterstützung für zukünftige Transportplanungs-Szenarien zur Verfügung zu stellen.

Im Einzelnen werden die folgenden Fragestellungen beantwortet:

- Vor welchen Herausforderungen steht das Transportprozess-Management und warum können diese Herausforderungen weder durch vollständig zentralisierte noch durch rein dezentrale Planungsunterstützungs-Ansätze bewältigt werden? (Abschnitt 2)
- Welche konzeptionellen Ansätze verfolgen Methoden des Soft-Computing sowie Software-Agenten zur Lösung von Entscheidungsproblemen? (Abschnitt 3)
- Welche Ansatzpunkte stehen für eine Kombination zentraler sowie dezentraler Planungsansätze zur Verfügung? (Abschnitt 4)

## 2 Grenzen zentraler Transportprozess-Planungsansätze

Technische Innovationen, Management-Trends sowie neue Marktbedürfnisse wirken verändernd auf alle heutigen Wertschöpfungssysteme ein. Somit sind auch Transportsysteme als Wertschöpfungssysteme diesen Einflüssen unterworfen. In diesem Abschnitt werden zunächst Auswirkungen technischer Innovationen insbesondere im Kommunikationsbereich auf die Planung von Transportsystemen analysiert. Anschließend wird dargestellt, wie sich der Konzentrationstrend zu immer größeren Netzwerken auf die Transportprozessplanung auswirkt. Schließlich werden die Konsequenzen neuer Geschäftsmodelle für die Transportplanung am Beispiel kurzfristiger Kooperationen im Rahmen der Auftragsfremdvergabe erläutert.

### 2.1 Aktuelle Herausforderungen an die Transportplanung

**Dynamisierung der Prozessplanung.** Die Berücksichtigung aktuellster Planungsdaten bei der Bestimmung der durchzuführenden Transportaktivitäten stellt einen wesentlichen Wettbewerbsvorteil dar. Deshalb müssen alle relevanten Einflussgrößen, die auf die ablaufenden Prozesse einwirken, zeitnah bei der Prozessfestlegung berücksichtigt werden. Basierend auf möglichst vollständiger Information über die verfügbaren Ressourcen und Aufträge erfolgt eine aktualisierende Prozessplanung mit dem Ziel, die anstehenden Aufgaben (Transportaufträge) unter den gegebenen

Rahmenbedingungen mit maximaler Effizienz zu erfüllen. Die festgelegten Prozesse werden anschließend im Transportnetzwerk zur Ausführung freigegeben. Bei der Planung der Prozesse ist einerseits eine Robustheit gegenüber Störungen anzustreben. Andererseits ist jedoch auch sicherzustellen, dass die Prozesse flexibel an veränderte Situationen angepasst werden können.

**Notwendigkeit zur Verbesserung des Informationsflusses.** Moderne Datenerfassungs-, Verarbeitungs- sowie Kommunikationstechnologien ermöglichen die Bereitstellung aktuellster Informationen, oftmals in Echtzeit über bestehende Kommunikationssysteme. Als Konsequenz muss eine Prozessanpassung umgehend erfolgen und die Informationen über die neuen Prozessschritte müssen zielgerichtet in das Transportsystem propagiert werden [HSEH2005]. Die bestehenden Kommunikationsnetzwerke ermöglichen häufig jedoch nur spezielle Dienste (Positionsbestimmung). Der Ausbau bestehender Kommunikationssysteme ist jedoch mit hohen Investitionen verbunden, die sich nur über einen längeren Zeitraum amortisieren.

**Steigerung der Komplexität der Planungsaufgaben.** Um die Wünsche nach immer schnelleren und zuverlässigeren Transportdienstleistungen im globalen Kontext erfüllen zu können, werden existierende Transportnetze sukzessive durch Erweiterungen und Verknüpfungen ausgedehnt. Typischerweise sind solche Transportsysteme als Hub-and-Spoke-Netze organisiert. Vom Abholort bis zum Zielort werden einzelne Transportaufträge mehrmals umgeschlagen und mit anderen Aufträgen zusammengefasst. Ein einzelner Auftrag erfordert dabei die Realisierung einer Transportkette aus aufeinander folgenden Non-Stop-Transporten sowie Umschlagsvorgängen und Zwischenlagerungen. Die Berücksichtigung der Verfügbarkeiten von Umschlagsressourcen sowie die Notwendigkeit, die Abfahrtszeiten in den Hub-to-Hub-Transporten zu berücksichtigen, steigert einerseits die Komplexität der Planungsaufgabe und andererseits das Risiko, dass die Transportkette während ihrer Ausführung gestört wird [ChMu1999].

**Autonomieinseln.** Aufgrund der überregionalen Ausdehnung der Transportnetze werden regional tätige Dienstleister eingesetzt, die spezifische Aufgaben in der Transportkette übernehmen. Diese Subunternehmen werden oftmals kurzfristig mit der Übernahme von Abschnitten der Transportketten für eine kurze Zeit betraut. Die Verantwortung für den übertragenen Transportabschnitt liegt beim beauftragten Subunternehmer, der für sich autark eigene Prozesse plant. Der Auftraggeber hat keine Möglichkeit, die Subunternehmer-Prozesse zu beeinflussen. Eine Integration in die Kommunikations- und Informationsnetze ist daher oftmals nicht möglich, da diese mit unverhältnismäßig hohen Investitionskosten verbunden ist. Somit ist eine zentrale Informationsbasis nicht realisierbar. Daher können fremdvergebene Abschnitte einer Transportkette nicht in die zentrale Planung integriert werden [KrKo2006].

## 2.2 Grenzen zentraler Planungsansätze

Die Anwendung automatisierter zentralisierter Verfahren zur Planung von Betriebsprozessen im Allgemeinen und von Transportprozessen im Speziellen bedingt zunächst eine Formalisierung des zu bewältigenden Anwendungsproblems. Dafür wird dieses Problem in ein vereinfachtes und abstraktes formales Entscheidungsmodell abgebildet, das das globale Problem repräsentiert. Dieses Modell wird einem Lösungsalgorithmus zugeführt, der nach vorbestimmten Logiken eine Prozess-Alternative ermittelt, die im motivierenden Anwendungsproblem umzusetzen ist. Auf

diesem Paradigma der Modell-basierten Planung fundieren fast alle Entscheidungsmethoden des Soft-Computing insbesondere Meta-Heuristiken (Genetische Suche [BeBa2004], Local Search [DeKa2006], Neuronale Netze [1995], Ameisenalgorithmen [Lack2004], ...), die die wesentlichen Verfahren zur Entscheidungsunterstützung in der Transportprozess-Planung darstellen.

Die oben skizzierten Anforderungen an die Planung zukünftiger Transportsysteme korrumpieren sowohl die Datensammlung in ihrer bisherigen Form als auch die Aufstellung des Modells nach bisher verfolgten Paradigmen sowie die Modell-Lösung.

Die Akquisition und Aufbereitung der benötigten Planungsdaten ist im Gegensatz zu statischen Situationen bei sich verändernden Problemsituationen durch mindestens drei Aspekte erschwert: Die verfolgten Planungsziele können sich ändern, so dass a priori unklar ist, welche Daten zur Messung des Zielerreichungsgrades notwendig sind (dynamisches Zielsystem). Es werden zusätzliche Daten benötigt, die die Geschwindigkeit und Richtung der Änderung der Problemstellung hinreichend repräsentieren. Redundante Daten sind zu eliminieren und ggf. fehlende Daten müssen in Echtzeit beschafft werden.

Die Definition des benötigten Entscheidungsmodells ist mit heutigen Methoden nur unzureichend möglich. Einerseits fehlen flexible Lösungsrepräsentationen, andererseits ist unklar, wie kurzfristige und längerfristige Aspekte in einem Modell für ein dynamisches Entscheidungsproblem integriert werden können. Schließlich sind heutzutage keine Methoden bekannt, um autonome Subsysteme in einem globalen Entscheidungsmodell für ein globales System adäquat zu berücksichtigen.

Die Modell-Lösung wird einerseits durch die Notwendigkeit zur Anpassung des Lösungsverfahrens an die geänderte Problemstellung erschwert. Andererseits ist die für die Lösungssuche zur Verfügung stehende Zeit beschränkt, so dass häufig nur die Wiederherstellung der Prozessumsetzung erzielt werden kann, nicht jedoch eine Prozessoptimierung stattfindet. Die Verwendung von einfachen Update-Regeln wird jedoch der Komplexität der Planungsaufgabe nicht gerecht.

### **2.3 Grenzen eines verteilten Transportprozess-Managements**

Die Künstliche Intelligenz (KI) untersucht Systeme, deren Eigenschaften analog zu den Eigenschaften sozialer Systeme, wie Intelligenzleistung, beschrieben werden können. In diesem Rahmen hat sich die Verteilte Künstliche Intelligenz (VKI) als Teilgebiet der KI insbesondere für dezentrale Planungsaufgaben etabliert [Müll1993]. Die Forschung der VKI bemüht sich, Systeme der Künstlichen Intelligenz (KI) in Hinsicht auf Skalierbarkeit, multiple Problemlösungsstrategien und Wiederverwendbarkeit durch autonome und kooperative Systeme zu erweitern [Find1991]. Für die Logistik ist diese Forschungsrichtung insofern interessant, als dass die Gestaltung monolithischer Systeme für die Lösung komplexer Planungs- und Dispositionsaufgaben zunehmend unangemessen ist und auch eine reine Modularisierung komplexer Systeme in lose gekoppelte Subsysteme keine Vorteile bieten kann. In der Transportlogistik steht das Potential der VKI im Vordergrund, Ressourcen (Transportmittel) und Aufträge mit intelligenten Stellvertretern zu repräsentieren im Vordergrund, d.h., dass die Autonomie zentral ist. Diese ist dann gegeben, wenn ein System auf der Basis lokal autonom entscheidender Einheiten (Mikro-Dynamik), die miteinander kooperie-

ren, eine globale Optimierung (Makro-Dynamik) vornimmt. Diese wird häufig als Emergenz beschrieben.

Die Anfänge der VKI waren durch Probleme gekennzeichnet, die im Wesentlichen dem verteilten kooperativen Problemlösen zuzuordnen waren. Hierbei waren die Agenten benevolent, verhalten sich rational und gehen nach Möglichkeit immer Kooperationen ein auch wenn diese für den Agenten nicht vorteilhaft sind. In den 90er Jahren hat sich eine Verschiebung des Fokus auf die Koordination kompetitiver Akteure eingestellt. Das Problem der Transportlogistik unterscheidet sich von der Annahme kompetitiver Umgebungen nochmals, da hier nicht nur Mikrostrukturen, Interaktionen zwischen Agenten, berücksichtigt werden müssen sondern auch Mesostrukturen, also Unternehmen, die aus unterschiedlichen Akteuren bestehen. Hierbei sind Akteure innerhalb einer Unternehmung kooperativ eingestellt und zu Akteuren anderer Unternehmen eher wettbewerblich. In Systemen der kooperativen Problemlösung stand die Optimierung des Gesamtsystems im Vordergrund wohingegen in den wettbewerblichen Systemen die individuelle Optimierung der Agenten fokussiert behandelt wird. Die Anforderungen der Transportlogistik benötigen sowohl individuelle Optimierung auf Akteursebene als auch globale Optimierung auf Mesoebene. In diesem Bereich sind die Ansätze der VKI noch nicht hinreichend untersucht bzw. entwickelt worden.

### 3 Vergleich der konzeptionellen Grundlagen

#### 3.1 Paradigmen des Soft-Computing

Heutige Transportsysteme sind häufig das Resultat von Outsourcing- und Fusionsvorgängen. Im Zuge derer wurde der Werkverkehr einzelner Firmen aus dem Firmenverbund herausgelöst und in eigenständige, profit-orientierte Dienstleistungsfirmen umgewandelt.

Entscheidungsstrukturen wurden zur Planung der gewerblichen Transportdienstleistungen unverändert übernommen. Da der Werksverkehr lediglich ein Ausführungsinstrument darstellte und der Fuhrpark einer zentralen Leitung unterstellt war, wurde typischerweise streng hierarchisch geplant.

Für die typischen Planungsszenarien wie dem Problem des Handlungsreisenden, dem Standardproblem der Tourenplanung oder aber auch deren Verallgemeinerungen wurden insbesondere im Operations Research aber auch in der Künstlichen Intelligenz Planungsmethoden entwickelt, die über lange Jahre zufrieden stellende Planungsergebnisse lieferten. Alle erprobten Entscheidungslogiken basieren jedoch auf die gleichen Paradigmen:

- Sie sind global *systembezogen*, d.h., sie treffen alle Entscheidungen unter Berücksichtigung der Wirkungen auf das gesamte Transportsystem. Die dafür erforderlichen Informationen über die relevanten Eigenschaften des Transportsystems stehen der planenden Instanz vollständig und fehlerfrei zur Verfügung.
- Sie setzen ein *statisches* Transportnetzwerk voraus: Während des Planungsprozesses und ebenso bei der anschließenden Ausführung des Plans ändern sich die relevanten Eigenschaften des Transportnetzwerks nicht mehr.

- Sie sind *nicht-kommunikativ*, d.h., es findet kein weiterer Informationsaustausch statt, sobald die zu lösende Planungsaufgabe spezifiziert ist und die Planungsmethode gestartet ist.
- Sie sind *koordinierend*, d.h., die Aktivitäten der beteiligten logistischen Objekte (Fahrzeuge, Pakete,...) werden aufeinander abgestimmt, ohne dass ein Feedback der Objekte eingeholt wird, das zu einer Entscheidungsrevision führen könnte.
- Sie nutzen eine *eigene spezifische interne Problemrepräsentation*, die nicht mit anderen Objekten bzw. Methoden geteilt wird.
- Sie kommen in *hierarchisch organisierten Entscheidungssystemen* zum Einsatz, in denen eine zentrale Entscheidungskompetenz vorgesehen ist.
- Sie benötigen eine externe Anweisung zur Initiierung einer Planung oder einer Planüberarbeitung.

Aufgrund der globalen Sichtweise wird durch die Soft-Computing-Methoden die Approximation eines globalen Optimums für die auszuwählende Prozessentscheidung angestrebt.

### 3.2 Konzeption der Software-Agenten-Methodik

Software-Agenten repräsentieren ausgewählte Objekte, die für die betrachtete Entscheidungssituation relevant sind. Jeder Agent stellt eine autonome Entscheidungsentsität dar und versucht durch Kommunikation und Verhandlungen mit den übrigen Software-Agenten dezentral eine für alle beteiligten Agenten akzeptable Problemlösung zu finden. Hierbei ist die Autonomie eine zentrale Eigenschaft, die Softwareagenten zugeschrieben wird, d.h. die Agenten agieren selbständig ohne direkte Intervention von Menschen und anderen Entitäten und haben zumindest eine partielle Kontrolle über ihr Verhalten und ihren Zustand [WoJe1995, Ferb1999, Tecu1998]. Agenten werden insbesondere in solchen Anwendungen eingesetzt, in denen die Komplexität der Aufgabe und die Dynamik der Umgebung einer vorprogrammierten Verhaltensweise nicht adäquat sind. Daher werden Agenten so gestaltet, dass sie eine gewisse Autonomie realisieren, d.h., dass der Auftraggeber dem Agenten nicht einen Plan mit auf den Weg gibt, sondern dass der Agent über eigenständige Planungsalgorithmen verfügen muss, vgl. [KaJe1997]. Im Verlauf seiner Arbeit wird der Agent also nicht direkt von außen gesteuert, sondern erhält durch die eigene Planung und seine Unabhängigkeit im Handeln einen gewissen Grad an Autonomie [Weiß1999]. Russel & Norvig beschreiben Autonomie wie folgt: "To the extent that an agent relies on the prior knowledge of its designer rather than on its own percepts, we say that the agent lacks autonomy." [RuNo2003, S. 37]

Realisierungen von Software-Agenten-Systemen in der Transportplanung basieren insbesondere auf einer Abbildung der einzelnen Transportressourcen bzw. –Aufträge auf Agenten. Durch eine Abstimmung der Agenten untereinander werden umsetzbare Transportprozesse festgelegt.

Die konzeptionelle Basis von Software-Agenten unterscheidet sich aufgrund des dezentralen Ansatzes wesentlich von den Paradigmen des Soft-Computing:

- Agenten entscheiden *autonom*, d.h., sie treffen Entscheidungen auf individueller Datenbasis, ohne notwendigerweise auch die Wirkungen auf das Gesamtsystem zu betrachten.
- Sie sind *kommunikativ*, d.h., sie erhalten und/oder geben Informationen von/an anderen Agenten, um für sich ein individuelles Entscheidungsmodell zu erhalten.
- Sie sind (zumeist) *kooperierend*, d.h., es werden Entscheidungen angestrebt, die nicht nur individuellen Zielen, sondern den Zielen mehrerer Agenten gerecht werden.
- Sie sind *interoperabel* und können Wissen weitergeben bzw. empfangen.
- Sie kommen in *heterarchisch organisierten Systemen* zum Einsatz, bei denen eine zentrale Entscheidungskompetenz nicht möglich oder nicht gewollt ist.
- Sie sind *proaktiv* und können aus eigenem Antrieb Entscheidungen treffen.

Eine Approximation eines globalen und durch alle Objekte verfolgten monolithischen Ziels wird nicht notwendigerweise angestrebt. Vielmehr steht die Verfügbarkeit eines reaktiven Systems, das sich an neue Situationen anpassen kann, im Vordergrund. Dabei können in einem einzigen Multiagentensystem (MAS) sowohl kooperierende als auch konkurrierende Agenten kombiniert werden. Aus diesem Grunde eignen sich Multiagentensysteme auch für die Simulation von komplexeren Szenarien, in denen nicht nur *eine* Organisation (z.B. ein Logistikdienstleister), sondern *mehrere* Organisationen mit unterschiedlichen Kapazitäten, Fähigkeiten und Interessen vorkommen. Die Untersuchung der organisationalen Prozesse in Multiagentensystemen, die Sozionik, ist inzwischen zu einem eigenen, sehr dynamischen Untersuchungsgebiet geworden [Fisc2004] und hat im Paradigma des Soft-Computing keinerlei Pendant. Neben der Möglichkeit, besonders komplexere Szenarien bis hin zu sozialen Systemen zu simulieren, bieten Multiagentensysteme – wie auch andere Verfahren aus der Verteilten KI – eine Robustheit, die durch zentral gesteuerte Systeme kaum erreichbar ist.

### 3.3 Synopsis

Die beiden bisher zur Transportprozessplanung verwendeten Methodenklassen basieren auf verschiedenen, teilweise sogar konträren Grundannahmen. Dies ist insbesondere durch die unterschiedlichen Planungsziele bedingt. Während die Methoden des Soft-Computing die Erfüllung eines globalen Ziels der Verfolgung individueller Zielsetzungen der beteiligten Objekte überordnen, sehen Agenten-Methoden die Abstimmung der individuellen Zielsetzungen als Chance zur Erreichung eines übergeordneten Ziels.

## 4 Hybridisierungsansätze

Die Integration der beiden Paradigmen Soft-Computing und Multiagentensysteme kann auf verschiedene Arten erfolgen. Zunächst ist es möglich, dass Agenten als Komponente ihres Entscheidungssystems über Soft-Computing-Methoden verfügen. Soft-Computing-Methoden können z.B. bei der Handlungsplanung eingesetzt werden, aber auch bei der Erkennung von Mustern in Perzepten sowie bei Lern- und

Adaptionsprozessen. Die Integration von Soft-Computing ist in diesem Fall die Integration der Technologie *in* einen einzelnen Agenten. Agentenarchitekturen, die „crispe“ Verfahren der Wissensrepräsentation und Reasoning-Verfahren traditioneller Tertium-non-datur-Logiken zwingend voraussetzen, müssen dementsprechend angepasst werden. Aber eine solche Integration von Soft-Computing-Methoden muss nicht auf die interne Struktur eines einzelnen Agenten beschränkt sein, sondern kann auch erhebliche Auswirkungen auf die Agentenkommunikation haben. Dies gilt z.B., wenn die Semantik der Agentenkommunikation durch eine gemeinsame Ontologie definiert werden soll: Wenn in einem Multiagentensystem Agenten interagieren müssen, die sich darin unterscheiden, dass einige von ihnen unscharfe, vage oder kontinuierliche Repräsentationen ihrer internen Zustände verwenden, andere hingegen nicht, müssen Repräsentationsmodelle prinzipiell unterschiedlicher Art miteinander verknüpft werden. Hier kann sicherlich zum Teil auf etablierte Methoden aus dem Soft-Computing, z.B. Fuzzifizierung/Defuzzifizierung, zurückgegriffen werden, die sich für einfache Steuerungssysteme bewährt haben; für den allgemeinen Fall wäre aber die Integration unterschiedlicher Agenten auf der Basis einer einheitlichen, zugleich jedoch hybriden Ontologie zu leisten. Dies geht natürlich substantiell über Verfahren zur Diskretisierung kontinuierlicher Werte hinaus und muss u.a. qualitative Abstraktionen umfassen. Da bereits die Integration von in einer einheitlichen Repräsentationssprache definierten und inhaltlich sehr ähnlichen Ontologien (unter Erhaltung von Informationsgehalt, Redundanzfreiheit und Konsistenzeigenschaften) ein äußerst anspruchsvolles und durchaus noch nicht vollständig gelöstes Problem darstellt [Wach2003].

*Swarm Intelligence* kann als ein alternativer Ansatz der direkten Integration von Ideen der beiden Paradigmen Soft-Computing und Multiagentensysteme angesehen werden. Die interne Struktur der „Agenten“ ist in diesem Fall jedoch so einfach, dass intelligentes Verhalten ausschließlich aus dem Zusammenwirken der Agenten emergieren soll. Trotz verschiedener Parallelen zwischen Swarm-Intelligence-Ansätzen und Multiagentensystemen (z.B. Verteiltheit von Wissen, relative Robustheit des Gesamtsystems bei Ausfall einzelner Individuen und Emergenz als zentrales Wirkungsprinzip) sind Swarm-Intelligence-Systeme eine besonders extreme Ausformung von Multiagentensystemen.

**Ereignisgesteuerte integrierte globale und lokale Planung.** Globale Offline-Planung ist die Methode der Wahl, wenn alle für die Lösung eines Planungsproblems benötigten Informationen bereits vor der Ausführung des Plans korrekt und vollständig vorliegen. Im Bereich der Transportlogistik zählen z.B. die grundsätzlich zur Verfügung stehenden Routen (das Straßen- oder Schienennetz) zu diesen a priori bekannten und während des Planungsprozesses und der Planausführung unveränderlichen Informationen. Dynamisch sind hingegen die Verkehrssituation und die Auftragseingänge. Sie können entweder vorab approximiert werden (hierzu eignen sich insbesondere Soft-Computing-Methoden) oder sie werden online in einen vorhandenen Rahmenplan integriert. Letzteres setzt allerdings voraus, dass die handelnden Einheiten während der Ausführung des Prozesses in der Lage sind, die sich verändernde Situation mittels eigener Sensoren und/oder auf der Basis von Kommunikationsprozessen wahrzunehmen und zu analysieren. Darüber hinaus müssen sie auch über die Fähigkeit verfügen, die ursprünglichen Pläne an die neuen Rahmenbedingungen anzupassen. Diese Anforderung wird besonders durch Agententechnologie erfüllt. So lässt sich bereits erkennen, dass eine vielversprechende Kombination auf der Basis einer vorgelagerten zentralen Planung durch Soft-Computing und einer

nachgelagerten Feinplanung bzw. Laufzeitkontrolle durch Agententechnologie beruht.

Der integrierte Ansatz von Soft-Computing und VKI soll so erfolgen, dass auf der Ebene von Unternehmen Grobplanungen mit Hilfe von Soft-Computing Ansätzen durchgeführt werden. Diese werden als Zielvorgaben an Intelligente Agenten verteilt, die physikalische Ressourcen (z.B. Transportmittel) repräsentieren und eine Feinplanung unter Zuhilfenahme aller verfügbaren Informationen durchführen. Im Anschluss daran werden die Pläne von den Agenten ausgeführt und die Durchführung kontrolliert. Sollte ein Plan nicht mehr erfüllbar sein, so wird eine Neuplanung auf lokaler Ebene durchgeführt. Durch die individuelle Optimierung und lokale Berechnung kann es jedoch passieren, dass Ziele des Unternehmens oder Ziele eines Agenten nicht mehr erreichbar sind. Daher ist es notwendig auch die Ausführung und die Umplanschritte zu überprüfen, damit bei größeren Problemen eine erneute Grobplanung angestoßen werden kann. Für diesen Benachrichtigungsmechanismus wird auf das strategische Management für autonome Softwaresysteme zurückgegriffen, welches in [Timm2006] und [TiHi2006] eingeführt wurde.

In aktuellen Forschungsarbeiten der VKI werden unterschiedliche Grade der Autonomie von Softwareagenten betrachtet [RoWe2004], [Müll1996]. Bereits Castelfranchi und Conte haben Ansätze für die dynamische Anpassung von Autonomie durch Normen, Verhaltensweisen und Prozeduren vorgeschlagen [CaCo92]. Für die Gestaltung von realitätsnahen Systemen in der Transportlogistik wird die Planung und Entscheidungsfindung in einer sich schnell ändernden, und dynamischen Umwelt durchzuführen. Zusätzlich besteht über diese Änderungen und die neuen Randbedingungen oft Unsicherheit (Risikomanagement). Der konventionelle Ansatz zur Berücksichtigung strategischer Aspekte innerhalb eines Systems führt über die Manipulation des Systems durch menschliche Nutzer. Eine erste Möglichkeit der Flexibilisierung ist die Nutzung von Systemkomponenten, die die einzelnen Subsysteme überwachen und bei Zielverfehlung oder ungewünschten Systemzuständen in die Autonomie der Subsysteme eingreifen. Dieser zentrale Ansatz würde aber zur Laufzeit einen potentiellen Engpass darstellen. Das strategische Management (vgl. Abbildung 1) für autonome Softwaresysteme geht davon aus, dass ein übergeordnetes und formalisiertes Zielsystem vorliegt und dieses durch eine weitgehend autonome Interaktion der Agenten eingehalten werden kann [Timm2006]. Abweichend von dem ursprünglichen Ansatz, in dem der Grad der Autonomie während der Laufzeit dynamisch und autonom durch die Agenten selbst angepasst wird, soll im Rahmen des hier vorgestellten Ansatzes nicht die Autonomie beeinträchtigt werden, sondern eine Benachrichtigung der zentralen Einheit durchgeführt werden, die dann eine erneute Planung anstoßen kann. Die Agenten eines Unternehmens interagieren miteinander, um die Einhaltung der Ziele des Unternehmens festzustellen oder adäquat gegenzu lenken. Die Zielspezifikation auf Unternehmensebene sollte für die Nutzung im strategischen Management eine Funktion zur Messung der Zielerreichung wie Kennzahlen oder Kennlinien enthalten, vgl. [NyWi1999]. Diese sollte zumindest drei Ausprägungen von Zielerreichung unterscheiden können: Ziel erreicht (grüner Bereich), Ziel leicht verfehlt (gelber Bereich) und Ziel stark verfehlt (roter Bereich). Das strategische Management wird durch einen vier-stufigen Prozess realisiert (vgl. Abbildung 1).

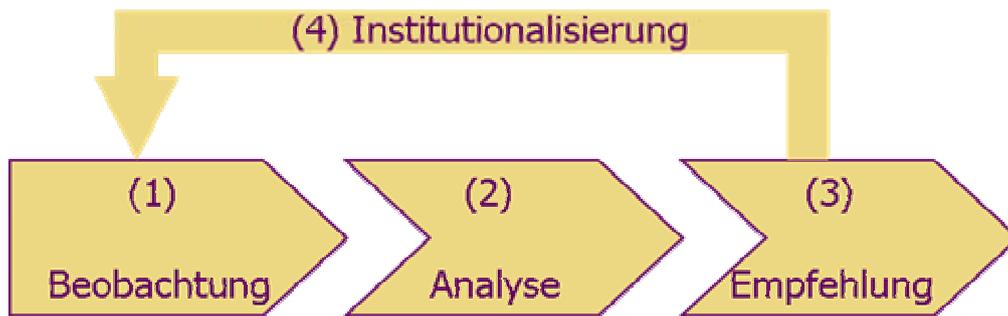


Abbildung 1: Phasen des Strategischen Managements in Multiagentensystemen

Im Normalbetrieb befindet sich das System in der ersten Phase (Beobachtung). In dieser Phase melden alle Agenten ihre individuellen Erfolgsparameter an eine spezielle Instanz, die die Systemziele sowie deren Erfüllungsgrad auf der Basis dieser individuellen Erfolgsparameter berechnet. Die Zielerfüllung sowie die aktuellen Ziele werden allen Teilnehmern des Systems zur Verfügung gestellt. In dieser Phase sollen die individuellen Agenten, ihre Feinplanung in Hinblick auf ihre lokalen Ziele optimieren. Wird über längere Zeit ein Systemziel leicht verfehlt (gelb) sollen die Agenten bei der Feinplanung auf das leicht verfehlt Gruppenziel besondere Rücksicht nehmen, ohne jedoch eine kooperative Planung anzustoßen. Hierbei wechselt das System in Phase 2 (Analyse). In vielen denkbaren und realen Szenarien wird jedoch eine unkoordinierte individuelle Handlung bei einer globalen Verfehlung nicht zu zufrieden stellenden Ergebnissen führen. Problematisch wird diese Situation dann, wenn viele Agenten versuchen, auf die gleiche Weise ein Globalziel zu erreichen. Dann kann das Globalziel übererreicht werden, was wiederum dazu führen kann, dass ein anderes Ziel verfehlt wird. Eine solche Wechselwirkung lässt sich nur durch koordinierte Aktionen verhindern. Daher wird in einem Fall andauernder starker Zielverfehlung (roter Bereich) die Phase 3 des strategischen Managements aktiviert. In dieser Phase wird die zentrale Planung eingeschaltet, damit eine Umplanung durch eine zentrale Instanz zu einer Rekonfiguration der Ziele und Aufträge zwischen den Ressourcen führt. Die Institutionalisierung beschreibt dann wieder den Schritt der Rückführung von der zentralen Planung in das dezentrale System.

Die in diesem Kontext vorgestellten Methoden der Beobachtung und Analyse bedürfen in ganz besonderer Weise Wissen. Als Wissen werden neben expliziten Fakten und Regeln auch unsichere, indirekte, kontextabhängige und implizite Annahmen verstanden (z. B. Erfahrungswerte, Heuristiken und Schätzungen). Da logistische Prozesse inhärent dynamisch sind, ist die schnelle und verlässliche Bereitstellung von Wissen erforderlich. Für die Modellierung bedeutet dies, dass statische Methoden, z. B. die Repräsentation statischen Wissens mit Ontologien, durch dynamische Methoden des Wissensmanagement begleitet und mit ihnen integriert werden müssen.

**Rolle des Wissensmanagements bei der Koordination globaler und lokaler Planung.** Je dynamischer die Umgebung logistischer Prozesse ist, desto wichtiger werden Infrastrukturen, die es erlauben, die planenden und operativ tätigen Komponenten möglichst schnell mit den jeweils aktuellen und relevanten Informationen zu versorgen. In [LGH2006a] und [LGH2006b] wird eine Wissensmanagement-Infrastruktur

für Multiagentensysteme vorgeschlagen, die auf einem System von Wissensmanagement-Rollen beruht. Das Modell verzichtet auf eine strikte 1-zu-1-Zuordnung von

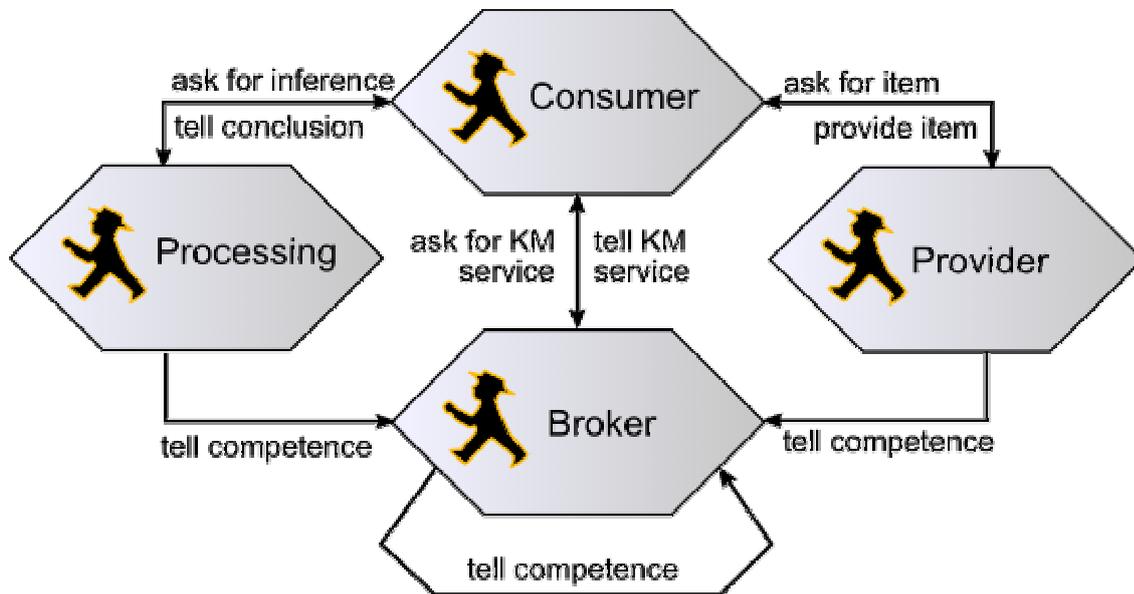


Abbildung 2: Externe Rollen

Agenten und Wissensmanagement-Funktionalitäten. Unter der „Rolle“ eines Agenten wird in diesem Zusammenhang ein komplexes Verhaltensmuster verstanden, das unabhängig von der primären logistischen Funktion des jeweiligen Agenten (z. B. der Funktion eines Transportmittels oder der eines Disponenten) eine sekundäre Funktion innerhalb eines verteilten Wissensmanagement-Systems realisiert. Diese sekundäre Funktion kann sich entweder auf Prozesse beschränken, die nur genau einen Agenten betreffen (in diesem Falle sprechen wir von einer „internen“ Rolle), oder aber ein Interaktionsmuster festlegen, in das zwei oder mehr Agenten involviert sind („externe“ Rolle). In Abbildung 2 sind die vier von uns angenommen externen Rollen und ihr die jeweiligen Interaktionsschemata dargestellt.

Rollen sind nicht direkt an einzelne Agenten gebunden, d. h., grundsätzlich kann ein und derselbe Agent in verschiedenen Situationen unterschiedliche Rollen ausfüllen. In einem sehr elementaren Szenario gibt es zwei Rollen, die eines „Knowledge-Consumers“ und die eines „Knowledge-Providers“. In diesem einfachen Szenario findet ein Wissenstransfer von dem Agenten in der Knowledge-Provider-Rolle zu dem Agenten in der Knowledge-Consumer-Rolle statt. Dieses einfache Szenario wurde auf der Basis eines *Iterated-Contract-Net*-Protokolls als „Iterated Knowledge Transfer Protocol“ implementiert (vgl. [LGH06a]). Neben den beiden Basis-Rollen des Knowledge-Consumer und des Knowledge-Provider wurden fünf weitere, teils deutlich komplexere Rollen definiert, die u. a. Wissensmanagementprozesse wie Wissensakquisition und Wissenswartung ausführen. Das System der Rollen wird durch eine beschränkte Zahl von Parametern definiert, deren Werte festlegen, unter welchen Bedingungen welche Agenten miteinander auf der Basis welcher Wissensmanagement-Rollen interagieren. Als Beispiele für diese Parameter seien *Transferkosten*, *Relevanz* eines Wissenspakets und *Vertrauen* in den Kooperationspartner genannt. Eine detailliertere Beschreibung findet sich in u. a. [LGH06a] und [LGH06b].

## 5 Zusammenfassung und Ausblick

In den letzten Jahren hat sich gezeigt, dass die Planungsansätze und die entwickelten Methoden häufig den aktuellen Anforderungen moderner Logistiksysteme nicht mehr genügen. Die Größe und Komplexität der heutigen Transportsysteme ist selbst beim Einsatz massivster Rechenleistungen nicht mehr zufrieden stellend zu beherrschen. Ein Überdenken der bisher streng hierarchisch angelegten Planungskonzepte sowie die Entwicklung und Erprobung neuer Planungsansätze stellt daher eine wesentliche Herausforderung für die Unterstützung der Planung zukünftiger Logistiksysteme dar. In diesem Beitrag skizzierten wir Wege zur Integration von Soft-Computing-Methoden, Multiagentensystemen und rollenbasiertem Wissensmanagement als Perspektive für die Simulation selbststeuernder logistischer Prozesse in dynamischen Umgebungen. Neben der direkten Integration von Soft-Computing-Methoden in die Architektur individueller Agenten und Swarm Intelligence haben wir einen Ansatz zur ereignisgesteuerten Kombination globaler und lokaler Planungsmechanismen vorgestellt, der uns insbesondere unter dem Aspekt der Robustheit für transportlogistische Anwendungen sehr vielversprechend erscheint. In einem solchen Ansatz kommt einem effektiven und flexiblen Wissensmanagement eine besondere Bedeutung zu. In diesem Zusammenhang skizzierten wir in ihren Grundzügen eine rollenbasierte Infrastruktur für MAS-basiertes Wissensmanagement.

### Literaturverzeichnis

- [BeBa2004] Berger, J.; Barkaoui, M.: A parallel hybrid genetic algorithm for the vehicle routing problem with time windows. In: *Computers & Operations Research* 31 (12), S. 2037-2053, 2004
- [CaCo1992] Caltelfranci, C.; Conte, R. (1992): Emergent functionality among intelligent systems: Cooperation within and without minds. *Journal on Artificial Intelligence and Society*, 6(1):78–87.
- [CHMu1999] Cheung, R.K.; Muralidharan, B.: Impact of dynamic decision making on hub-and-spoke freight transportation networks. In: *Annals of Operations Research* 87, S. 49-71, 1999
- [CrLa1998] Crainic, T.G.; Laporte, G. (Hrsg.): *Fleet Management and Logistics*. Kluwer, 1998
- [DeKa2006] Derigs, U.; Kaiser, R.: Applying the attribute hill climber heuristic to the vehicle routing problem. Accepted for publication in: *European Journal of Operational Research*, 2006
- [Ferb1999] Ferber, J. (1999): *Multi-Agent Systems - An Introduction to Distributed Artificial Intelligence*. Harlow, UK: Addison-Wesley.
- [Find1991] Findler, N. (1991): Uttam sengupta: An overview of some recent and current research in the ai lab at arizona state university. *AI Magazine*, 12(3):22–29.
- [Fisc2004] Fischer, K., M. Florian and T. Malsch (Eds.) (2004): *Socionics: Its Contributions to the Scalability of Complex Social Systems*. Lecture Notes in Computer Science, Lecture Notes in Artificial Intelligence, Springer Verlag.
- [HSEH2005] Herrmann, T.; Schöpe, L.; Erkens, E.; Hülder, M. (Hrsg.): *Mobile Speditionslogistikunterstützung*. Shaker-Verlag: Aachen, 2005

- [KaJe1997] Kalenka, S.; Jennings, N. (1997): Socially responsible decision making by autonomous agents. In K. Korta et al. (Hrsg.): *Cognition, Agency and Rationality*, Dordrecht, The Netherlands: Kluwer, S. 135–149.
- [KrKo2006] Krajewska, M.; Kopfer, H.: Collaborating freight forwarding enterprises – request allocation and profit sharing. In: *OR Spectrum* 28(3), S. 301-317, 2006
- [Lack2004] Lackner, A.: *Dynamische Tourenplanung mit ausgewählten Metaheuristiken*. Cuvillier Verlag: Göttingen, 2004
- [LGH2005] Lorenz, M.; Gehrke, J. D.; Hammer, J.; Langer, H.; Timm, I. J.: Knowledge Management to Support Situation-aware Risk Management in Autonomous, Self-managing Agents. In: Czap, H. et al. (Hrsg.): *Self-Organization and Autonomic Informatics (I)*. *Frontiers in Artificial Intelligence and Applications*, Bd. 135, S. 114-128. IOS Press, 2005.
- [LGH2006a] Hagen Langer, Jan D. Gehrke, Joachim Hammer, Martin Lorenz, Ingo J. Timm, Otthein Herzog: A Framework for distributed knowledge management in autonomous logistic processes. *International Journal of Knowledge-Based and Intelligent Engineering Systems*, Vol.10, No. 4, 2006, pp. 277-290.
- [LGH2006b] Langer, H.; Gehrke, J. D.; Herzog, O.: Distributed Knowledge Management in Dynamic Environments. [to appear]
- [Lipp2005] Lippe, W.-M.: *Soft-Computing*. Springer, 2005
- [Müll1993] Müller, H.-J. (1993): *Verteilte Künstliche Intelligenz - Methoden und Anwendungen*. Mannheim: BI Wissenschaftsverlag.
- [NyWi1999] Nyhuis, P.; Wiendahl, H.-P. (1999): *Logistische Kennlinien – Grundlagen, Werkzeuge und Anwendungen*, Berlin: Springer.
- [Retz1995] Retzko, R.: *Flexible Tourenplanung mit selbstorganisierenden Neuronalen Netzen*. Unitext Verlag: Göttingen, 1995
- [RoWe2005] Rovatsos, M.; Weiß, G. (2005): Autonomous Software. In Chang, S. K. (Hg.): *Handbook of Software Engineering and Knowledge Engineering*, volume 3: Recent Advances, River Edge, New Jersey. World Scientific Publishing.
- [RuNo2003] Russel, S. J.; Norvig, P. (2003): *Artificial Intelligence: A Modern Approach*. 2nd Edition, Englewood Cliffs, New Jersey: Prentice Hall.
- [Tecu1998] Tecuci, G. (1998): *Building Intelligent Agents – An Apprenticeship Multi-strategy Learning Theory, Methodology, Tool and CaseStudies*. San Diego, California, USA: Academic Press, 1998.
- [TiHi2006] Timm, I.J.; Hillebrandt, F. (2006): Reflexion als sozialer Mechanismus zum strategischen Management autonomer Softwaresysteme. In: Florian, M. et al. (Hrsg): *Reflexive Soziale Mechanismen*. VS Verlag für Sozialwissenschaften, Wiesbaden, Buch im Druck.
- [Timm2006] Timm, I.J. (2006): *Strategic Management of Autonomous Software Systems*. TZI Technical Report. Habilitation. Fachbereich Mathematik und Informatik. Technologie-Zentrum Informatik. Universität Bremen.
- [Wac03] WACHE, H.: *Semantische Interpretation für heterogene Informationsquellen*. DISKI-Dissertationen zur Künstlichen Intelligenz. Bd.261. Köln: infix, 2003
- [Weiß1999] Weiß, G. (Hrsg.) 1999: *Multiagent Systems - A Modern Approach to Distributed Artificial Intelligence*. Cambridge, Massachusetts: The MIT Press.
- [WoJe1995] Wooldridge, M.; Jennings, N. (1995): Intelligent Agents: Theory and Practice. In: *The Knowledge Engineering Review* 10 (1995), Nr. 2, S. 115–152.