

1 Einführung

Globaler Wettbewerb sowie sich rasch verändernde und zunehmend individualisierende Kundenbedürfnisse forcieren eine Konzentration von Unternehmen auf ihre Kernkompetenzen und eine Veränderung der Produktionsstruktur von Sachgütern und Dienstleistungen [Shen et al. 99]. Es entstehen komplexe Wertschöpfungsnetzwerke aus Entitäten, die Tätigkeiten wie Beschaffung von Rohstoffen, Transformation dieser Rohstoffe in Halbfertig- und Fertigprodukte sowie die Verteilung der Fertigprodukte an die Konsumenten durchführen (vgl. Bild 1). In der Literatur werden solche Wertschöpfungsnetzwerke als Supply Chains bezeichnet [GaHa95; Swam et al. 98; LeBi95]. Aufgrund ihrer heute meist netzwerkartigen Struktur sprechen wir im Folgenden jedoch von Supply Networks bzw. Supply Webs und meinen damit das gesamte Wertschöpfungsnetzwerk eines bestimmten an die Endkunden zu veräußernden Produktes.

Die Wohlfahrt jeder Entität in einem solchen Supply Web hängt von der Leistung der anderen Entitäten ab sowie von deren *Bereitschaft* und *Fähigkeit* zu kooperieren. Zum Beispiel wird die Fähigkeit eines Lieferanten, die Nachfrage von Kunden zu befriedigen, von der Bereitschaft und Fähigkeit der Kunden bestimmt, die Nachfrage dem Zulieferer in einer korrekten und fristgerechten Art und Weise mitzuteilen. Beim Fehlen einer solchen Kommunikation kann der Zulieferer gezwungen sein, mit höheren Lagerbeständen zu arbeiten, um Fehlmengenkosten zu reduzieren. Die höheren Lagerbestandskosten werden letztendlich von den Kunden in Form von Preisauflagen für die Produkte getragen [Swam et al. 95].

Das Supply-Chain-Management-Konzept basiert auf einer ganzheitlichen Betrachtung des Supply Web und berücksichtigt die Interdependenzen zwischen den einzelnen Entitäten [Vahr99]. Im Zentrum steht die integrierte Planung, Steuerung und Kontrolle des gesamten Netzwerks vom ersten Lieferanten bis zum Endkunden [Schu et al. 96] [Mert95] [Schü97]. Voraussetzung hierfür ist eine Kooperation aller an dem Supply Web beteiligten Unternehmen [Vahr99].

Entitäten bzw. Unternehmen in einem Supply Web sind jedoch autonome Organisationseinheiten, die sich nur so lange

Dispositive Supply-Web-Koordination durch Multiagentensysteme

Sven Grolik, Tim Stockheim, Oliver Wendt, Sahin Albayrak, Stefan Fricke

kooperativ verhalten, wie dies in ihrem eigenen Interesse liegt [Kjen98, 41]. Außerdem können die Entitäten in einem Supply Web mit Zulieferern und Kunden verbunden sein, die wiederum ihre eigenen Zulieferer und Kunden besitzen. Daher besteht die Möglichkeit, dass sich Supply Webs überlappen bzw. Unternehmen parallel als Akteure in verschiedenen Supply Webs wirken (vgl. Bild 1). So kann ein Teilezulieferer wie z. B. ein Monitor-Produzent der Zulieferer von zwei verschiedenen Computer-Herstellern sein. Daraus folgt wiederum, dass etwa zwei Unternehmen, die im Rahmen eines Supply Web miteinander kooperieren, gleichzeitig bezüglich zweier anderer Wertschöpfungsnetzwerke in Konkurrenz zueinander stehen können. In der englischsprachigen Literatur hat sich für diesen Sachverhalt der Begriff „Coopetition“ herausgebildet, zusammengesetzt aus Cooperation und Competition [BuKö99; BrNa96; Kjen98, 39]. Für unseren Monitor-Hersteller ist es sehr schwierig, wenn nicht unmöglich, seine Produktionsplanung in Abstimmung mit der Produktionsplanung bzw. gemäß den Zielen beider Kunden zur selben Zeit zu optimieren. Ein zentrales Supply Web Management, also eine zentrale Planung des gesamten Wertschöpfungsnetzwerkes, er-

scheint daher in solchen Fällen nicht oder nur sehr schwierig durchsetzbar. Gefordert wird eine kontinuierliche und dezentrale Planung im Rahmen eines verteilten Supply Web Management [Kjen98, 3, 5, 39].

Supply Chain Management basiert auf der integrierten Informationsverarbeitung im gesamten Supply Web [BuKö99, 2, 62]. Hierzu dienen Supply-Chain-Management-Systeme, welche den Informationsfluss innerhalb des Wertschöpfungsnetzwerkes unterstützen sowie eine Entscheidungsunterstützung und Automatisierung von Planungs-, Steuerungs- und Kontroll-

Dipl.-Kfm. Sven Grolik, Dipl.-Kfm. Tim Stockheim, Dr. Oliver Wendt, Institut für Wirtschaftsinformatik, J. W. Goethe-Universität Frankfurt, Mertonstr. 17, D-60054 Frankfurt am Main, Tel.: (0 69) 7 98-2 87 18, Fax (0 69) 7 98-2 85 85, {grolik | stockheim | wendt}@wiwi.uni-frankfurt.de; Dr.-Ing. Sahin Albayrak, Dr.-Inform. Stefan Fricke, Sekretariat FR 6-7, Franklinstraße 28/29, D-10587 Berlin, Tel.: (0 30) 3 14-2 49 43, Fax (0 30) 3 14-2 17 99, {sahin | fricke}@cs.tu-berlin.de

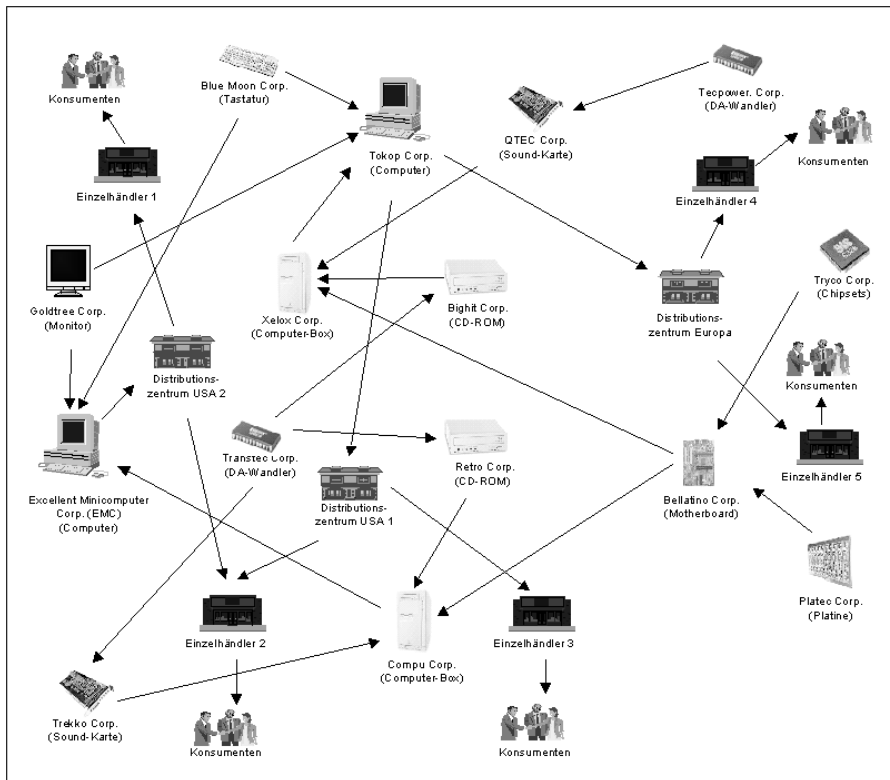


Bild 1 Fiktives Beispiel zweier sich überlappender Supply Webs in der Computerindustrie

prozessen ermöglichen [ScBo99, 11f; Chen98, 1]. Im Idealfall werden sämtliche Entitäten in einem Supply Web miteinander verbunden und tauschen ohne Zeitverzug alle notwendigen Informationen aus. Wird die Lieferkette gestört (beispielsweise durch einen Maschinenausfall bei einem Zulieferer) oder akquiriert eine Entität einen neuen Auftrag, so leitet das System die entsprechenden Informationen an alle Beteiligten weiter und ermöglicht damit allen involvierten Unternehmen, auf Basis dieser Informationen entsprechend den jeweils eigenen Zielen dezentral ihre Produktionspläne anzupassen [BuKö99, 2; Kjen98, 5, 43; Chen98, 15].

Verhandlungen zwischen den Akteuren in einem Supply Web spielen dabei eine Schlüsselrolle [Chen98, 1 f., 14 f.]. Auf dem Gebiet der Entwicklung von standardisierten Verhandlungsprotokollen besteht allerdings noch erheblicher Forschungsbedarf [Pete00]. Erforderlich sind hierbei aus Sicht der Autoren vor allem Protokolle, die auch innerhalb bestehender Rahmenvereinbarungen vom konkreten Leistungszeitpunkt (und dem hiervon abhängigen Ressourcenbelegungsprofil der betei-

ligten Akteure) abhängige Angebots- und Nachfragepreise nutzen, um die Aushandlung des optimalen Leistungszeitpunktes auf Basis der neuen Informationen zu gewährleisten. Der vorliegende Beitrag wird zunächst in Kapitel 2 aufzeigen, warum Multiagentensysteme als geeignete softwaretechnische Grundlage erscheinen, um diese Verhandlungsmechanismen zu implementieren, bevor Kapitel 3 bestehende Konzepte und Projekte diskutiert, die eine zumindest in Teilen zu unserer analogen Zielsetzung verfolgen. In Kapitel 4 stellen wir schließlich die von uns verwendete Agentenarchitektur vor und erläutern die in ihr zur Anwendung gelangenden leistungszeitpunktabhängigen Angebots- und Nachfragepreise an einem Beispiel.

2 Softwareagenten und Multiagentensysteme

In der Literatur existiert zwar keine einheitliche Definition von Softwareagenten [WoJe95; Nwan96; FrGr96]. Allgemein

kann ein Softwareagent aber verstanden werden als „software that assist people on their behalf, ...and are delegated to perform task(s), and given constraints under which they can operate“ [GilJan].

Wir verbinden mit Softwareagenten zunächst die folgenden drei Eigenschaften: Autonomie, Lernfähigkeit und Kooperation:

Autonomie: Softwareagenten agieren selbstständig, d. h. ohne die direkte Intervention von Menschen oder anderen Softwareagenten, und haben eine gewisse Kontrolle über ihre Aktionen und ihren inneren Zustand. Ein Schlüsselementer der Autonomie ist die Proaktivität. Softwareagenten nehmen ihre Umgebung wahr, welche z. B. die physische Welt, Nutzer über ein graphisches Benutzerinterface, eine Menge von anderen Softwareagenten und das Internet sein kann. Ihre Handlungen sind jedoch nicht nur einfache Reaktionen auf ihre Umwelt, sondern sie sind fähig, selbst die Initiative zu übernehmen und auf Basis ihres eigenen Urteilsvermögens Handlungen im Sinne ihrer eigenen Ziele durchzuführen [WoJe95, Nwan96].

Lernfähigkeit: Softwareagenten besitzen die Fähigkeit, das eigene Verhalten auf Basis vorheriger Erfahrungen mit Interaktionen mit Menschen oder anderen Softwareagenten zu verändern. Die Lernfähigkeit sollte dabei nicht nur auf das reine Lernen von Fakten beschränkt sein, sondern auch das Erkennen der Zusammenhänge, welche die Fakten bewirken, beinhalten. Der Test, ob der Agent seine Leistung im Laufe der Zeit steigern kann, dient als ein einfaches Maß für die Lernfähigkeit des Softwareagenten [Nwan96; Dale96].

Kooperation: Die Fähigkeit eines Softwareagenten zu kooperieren bzw. mit anderen Softwareagenten oder Menschen zu interagieren, beeinflusst direkt das Verhalten der Softwareagenten. Basis jeglicher Kooperation ist Kommunikation [WoJe95, Nwan96], welche drei wichtige Aspekte beinhaltet [GeKe94, Chen98]:

- Das *Interaktionsprotokoll* nimmt Bezug auf die Strategie eines Agenten, deren Verfolgung seine Interaktion mit anderen Agenten leitet. Dieses Protokoll kann ein Verhandlungsschema oder ein spieltheoretischer Mechanismus sein, aber auch ein simples Protokoll wie „wann immer du etwas nicht

weiß, finde jemanden, der es weiß und frage ihn“.

- Die *Kommunikationssprache* ist das Medium, über welches die Inhalte zwischen Agenten kommuniziert werden. Sie definiert, ob es sich bei den kommunizierten Inhalten um eine Behauptung, eine Aufforderung oder eine Anfrage handelt. Eine Entität soll nur dann als Softwareagent bezeichnet werden, wenn sie konform zu einer solchen Sprache kommuniziert.
- Das *Transportprotokoll* ist der gewählte (vom Kontext unabhängige) Transportmechanismus der Kommunikation wie z. B. TCP, SMTP, http.

Darüber hinaus besitzen Softwareagenten häufig die Fähigkeit der *Mobilität*, d. h., sie sind in der Lage, sich (über eine Infrastruktur) selbstständig in einem elektronischen Netzwerk von einem Ort zu einem anderen zu bewegen [FrGr96; WoJe95; PaEd00].

Umfassende Einführungen und ein allgemeiner Überblick über das Forschungsgebiet autonomer Softwareagenten finden sich in [BoGa88; Duf et al. 89; Chai92; Maes94; GeKe94; WoJe95; Syca et al. 96; Nwan96].

Das Forschungsgebiet Distributed Artificial Intelligence (DAI) befasst sich mit Methoden und Technologien zur Erstellung verteilter Systeme, deren Glieder Softwareagenten sind. Während in den frühen 80er Jahren das verteilte kooperative Problemlösen mit „hilfsbereiten“ Agenten in relativ geschlossenen Systemen (zentrales Systemdesign) Gegenstand der Forschung war, konzentrieren sich die Anstrengungen heute verstärkt auf die Realisierung von Multiagentensystemen (MAS). Hierbei steht die Realisierung autonomer Softwareagenten anstelle der Systemmodellierung im Vordergrund. Weder ist ein globales Ziel vorgegeben noch ein Problem zu lösen, anstelle dessen verfolgen die Softwareagenten eigene, persönliche Ziele. Ein System bzw. Systemverhalten entsteht dadurch, dass mehrere „selbstinteressierte“, durchaus konkurrierende und durch die oben beschriebenen Eigenschaften gekennzeichneten Softwareagenten miteinander interagieren [Chen98, 5–8; Kjen98, 39 f.; EyPa99].

3 Supply Chain Management auf Basis von Multiagentensystemen

3.1 Vorteile von Multiagentensystemen

Einer der größten Vorteile des Multiagentenansatzes ist die Möglichkeit, Systeme einfach zu konzeptualisieren. Dies wird besonders deutlich bei Domänen, die, wie im Falle eines Supply Web, als eine Menge natürlicher vorkommender Entitäten (wie z. B. Zulieferer, Hersteller, Kunden, Planungsabteilungen und Einkaufsabteilungen) dargestellt werden können [Teig97]. Softwareagenten sind eine Spezifikation von Softwareobjekten und teilen den Nutzen der *Modularität*, der zur weiten Verbreitung objektorientierter Technologie geführt hat. Sie sind geeignet zur Darstellung von modularen Systemen, wie ein Supply Web, dessen Entitäten durch eine Menge von Zustandsvariablen, verschiedenen von denen ihrer Umgebung, und durch eindeutig definierte Schnittstellen charakterisiert sind [Paru98a, 5 f.].

Weiterhin sind MAS durch ihre *Dezentralität* gekennzeichnet. Daher erleichtern sie die Abbildung von (z. B. physisch) verteilten Systemen, wie ein Supply Web. Ein Supply Web ist stark durch natürliche (geographische) Verteiltheit charakterisiert, da die beteiligten Unternehmen sowohl natio-

nal als auch international angesiedelt sein können [KnTi99, 189; Paru98a, 6]

MAS bestehen aus einer Population *autonomer* Agenten. Sie eignen sich daher sehr zur Modellierung von Domänen, wie ein Supply Web, das aus autonomen Entitäten besteht, welche verschiedene (möglicherweise konfliktäre) Ziele verfolgen und jeweils über proprietäre Informationen verfügen [KnTi99, 195, Chen98, 10, Paru99a, 13].

MAS zeichnen sich durch ihre *Robustheit* aus, da Funktionen und Verantwortung auf viele verschiedene autonome Softwareagenten verteilt sind. Somit können Fehler von einem oder wenigen Softwareagenten toleriert werden, ohne dass das gesamte System zusammenbricht [Chen98, 10; EyPa99, 627; Paru99a, 13; Shen et al. 99]. Außerdem können die Softwareagenten entsprechend Veränderungen der Umwelt angepasst werden, ohne das Verhalten von anderen Agenten direkt zu beeinflussen. Damit sind sie sehr geeignet für Domänen, wie ein Supply Web, das sich durch eine dynamische Umwelt auszeichnet. Zum Beispiel können in einem Supply Web Angebot und Nachfrage schwanken, Gesetzgebungen sich ändern und auch die Vertragsbindungen sind nicht statisch, d. h., auch die beteiligten Akteure sind nicht fest bestimmt [Paru99a; Teig97; KnTi99, 189 f.].

Ein weiterer Vorteil von MAS ist ihre *Skalierbarkeit*. Aufgrund der Modularität eines MAS ist es sehr viel leichter, neue

Kernpunkte für das Management

- Ansätze des Supply Chain Management berücksichtigen zwar Netzeffekte der Entscheidungen einzelner „Player“ des Wertschöpfungsnetzwerks, scheitern aber oft an den Komplexitätsproblemen der Globalplanung.
- Multiagentensysteme bilden die natürliche dezentrale Struktur des Wertschöpfungsnetzwerks ab und erlauben die verteilte Koordination gemäß den (modellierten) Interessen der einzelnen Beteiligten durch Softwareagenten.
- Auf Basis einer offenen Multiagentenarchitektur lassen sich Agententypen und Verhandlungsprotokolle realisieren, welche die bi- und multilaterale *Aushandlung von optimalen Leistungszeitpunkten* erlauben. Dies lässt sich über eine zeitpunktabhängige Angebots- und Nachfragefunktion realisieren.

Stichworte: Supply Chain, Softwareagenten, Verhandlung, verteiltes Scheduling, verteilte Künstliche Intelligenz

Softwareagenten dem System hinzuzufügen oder aus ihm zu entfernen, als es bei monolithischen Systemen ist, neue Fähigkeiten hinzuzugeben [Chen98, 11; Teig97; Brug et al. 98; KnTi99, 195; Kjen98, 4].

Schließlich zeichnen sich MAS bei der Integration von *Legacy-Systemen*, wie z. B. lokalen Lagerhaltungssystemen, aus. MAS können ohne ein aufwändiges Redesign dieser Altsysteme implementiert werden, da sie die Legacy-Systeme einfach über Schnittstellen „benutzen“. Lokale Verbesserungen oder ein lokaler Ersatz von Legacy-Software ist somit ohne die Beeinflussung des Gesamtsystems möglich [Teig97].

3.2 Überblick über die Literatur

In der Literatur existieren bereits zahlreiche Ansätze zum Einsatz von Multiagentensystemen zur Unterstützung beispielsweise der *Produktionsplanung und -steuerung* [siehe z. B. Zele95; Kass96; CoGö97] sowie der *Transportplanung* [siehe z. B. Fisc et al. 93; Falk et al. 93; Gerb et al. 99; Fisc et al. 98; RuVi99]. Wissensbasierte MAS wurden ebenfalls in verschiedenen produktions- und logistiknahen Anwendungen mit Erfolg eingesetzt [siehe z. B. KwNo93; Pan et al. 89; Robo et al. 91; Sade94; Smit89]. Diese Ansätze betrachten jedoch wiederum nur Teilbereiche einer Supply Chain. Arbeiten, bei denen die Supply Chain als Ganzes im Mittelpunkt steht, sind eher selten. Wichtige Ansätze werden im Folgenden kurz dargestellt.

Fox und Barbuceanu von der University of Toronto widmen sich den Koordinationsproblemen auf der taktischen und operationalen Ebene einer Supply Chain [siehe z. B. Fox et al. 93; BaFo95a; BaFo97]. Supply Chains werden hier als ein Netzwerk kooperierender Agenten modelliert. *Funktionsagenten* sind für die Durchführung definierter Organisationsfunktionen, wie Logistik, Transportmanagement, Auftragsakquisition, Ressourcenmanagement, Scheduling und Versand, zuständig. Sie koordinieren ihre Aktionen untereinander durch Kooperationsprotokolle. Für diese Zwecke wurde die Sprache COOL (COOrdination Language) zur Beschreibung sog. Konversationen definiert [BaFo95b]. Der Informationsaustausch erfolgt durch KQML-Sprechakte (Knowledge Query and Manipulation Language [Fini et al. 94]). *Informations-*

agenten dienen als Intermediäre, welche die Funktionsagenten über relevante Ereignisse und Veränderungen automatisch informieren. Sie liefern eine inhaltsbasierte Verteilung, eine Übersetzung und ein Konsistenzmanagement der relevanten Informationen. Der Ansatz von Fox und Barbuceanu basiert auf einer hierarchischen Agentenarchitektur, bei der Funktionsagenten einer höheren Ebene Restriktionen für solche einer niedrigeren Ebene definieren und dort als Intermediäre für Verhandlungen fungieren.

Eine ähnliche Vorgehensweise verfolgen Swaminathan et al. [Swam et al. 98], die einen Multiagentenansatz verwenden, um ein flexibles und wiedereinsetzbares Modellierungs- und Simulationsrahmenwerk zu gestalten, das eine schnelle Entwicklung von kundenangepassten Entscheidungsunterstützungsinstrumenten zum Supply Chain Management ermöglicht. Sie haben hierzu eine Softwarebibliothek entwickelt, die aus den Kategorien *Strukturelemente* und *Kontrollelemente* besteht. Strukturelemente sind zum Beispiel Einzelhändler, Distributionszentren, Hersteller und Zulieferer. Diese werden als heterogene Agenten mit verschiedenen, ihren Zustand charakterisierenden Attributen modelliert, die durch den Austausch von Nachrichten untereinander kommunizieren. Die Kontrollelemente helfen den Agenten bei der Entscheidungsfindung durch die Nutzung verschiedener Politiken (abgeleitet von analytischen Modellen wie Lagerhaltungspolitiken, Just-in-Time-Konzepten und Routing-Algorithmen) etwa zur Nachfrage-, Angebots-, Informations- und Beschaffungskontrolle innerhalb der Supply Chain. Eine Software-Applikation, die einige dieser Konzepte verwendet, wurde von IBM entwickelt.

Das Intelligent Coordination and Logistics Laboratory der Carnegie Mellon University hat eine Architektur namens MASCOT (*Multi-agent supply chain coordination tool*) zur Koordination von Supply Chains vorgeschlagen [Sade et al. 99; Kjen98]. Das System besteht aus Agenten, die durch ereignisgesteuerte Koordination Planungs- und Schedulingentscheidungen über das gesamte Wertschöpfungsnetzwerk unterstützen. Sie sind hierfür wiederum hierarchisch auf verschiedenen Abstraktionsstufen angeordnet: auf niedrigen Stufen unterstützen sie kurz- und mittelfristige Entscheidungen einzelner Produktionsstätten, auf höheren Stufen sind sie

betriebsstättenübergreifend für strategische und taktische Entscheidungen der Grobplanung zuständig. Koordination muss somit sowohl lateral zwischen Agenten einer Ebene wie auch vertikal entlang der Abstraktionshierarchie erfolgen. Darüber hinaus bietet das System zahlreiche Funktionalitäten des Workflow Management, die dem Nutzer die Abschätzung der Auswirkungen von Entscheidungen auf das gesamte Wertschöpfungsnetzwerk erleichtern.

In MetaMorph II [ShNo98a; ShNo98b] wird eine hybride, agentenbasierte Architektur verwendet, um die Aktivitäten der Planung, des Scheduling, der Simulation und der Durchführung der Leistungserbringung in Wertschöpfungsnetzwerken zu koordinieren. Jedes Subsystem wird hier über sog. Mediatoren, die via Internet oder Intranet kommunizieren, in das Gesamtsystem integriert. Als Subsysteme kommen hierbei sowohl MAS (z. B. ein Scheduling-MAS), als auch klassische PPS-Systeme oder wissensbasierte Materialmanagementsysteme infrage, sofern sie über entsprechende Schnittstellen verfügen. Agenten werden hier sowohl zur Repräsentation von Potentialfaktoren wie Maschinen und Werkzeugen verwendet wie auch zur Kapselung existierender Softwaresysteme. Die kooperativen Verhandlungen zwischen den Ressourcen- und Mediatoragenten werden in MetaMorph II durch eine Kombination hierarchischer Mediationsmechanismen mit Verhandlungsprozessen realisiert, die auf dem Kontraktnetzprotokoll [Smit80] basieren.

Kalakota et al. [Kala et al. 96; Hink et al. 97] beschreiben ein Echtzeit-Informationssystem, das auf einem MAS basiert, um Supply-Chain-Aktivitäten dynamisch zu kontrollieren. Die Gestaltung des MAS hängt dabei in erheblichem Maße von der Ausgestaltung des mathematischen Modells ab, das zur Repräsentation der Supply Chain entwickelt wird. So werden z. B. Entscheidungsvariablen des Planungsmodells durch Softwareagenten repräsentiert. Ein Softwareagent kann beispielsweise die Verantwortung für den Lagerbestand einer bestimmten Ressource haben. Der Ansatz von Kalakota et al. basiert auf einer hierarchischen Agentenarchitektur, in der jeder individuelle Agent spezielle Aufgaben erfüllt. Die Softwareagenten handeln rational und verwenden Methoden des Operations Research und der Statistik, um Kosteneffizienz zu erreichen.

Chen et al. [Chen et al. 99] schlagen ein Framework für ein verhandlungsbasiertes MAS zum Supply Chain Management vor, welches aus heterogenen Typen funktionaler Agenten besteht, die allerdings alle eine einheitliche Systemontologie verstehen und eine gemeinsame Agent Communication Language (ACL) zur Konversation verwenden. Die Ontologie beinhaltet Wissen über die Ressourcen und Interaktionsregeln (wie z. B. das verwendete Verhandlungsprotokoll). Die funktionalen Agenten werden in zwei Typen unterschieden: Der *Informationagent* verarbeitet Systeminformationen und kommuniziert mit der Systemumwelt, der *Ressourcenagent* repräsentiert das Verhalten physischer Ressourcen und ihrer Rollen im Wertschöpfungsnetzwerk. Die Implementierung des Systems ist allerdings zurzeit noch nicht abgeschlossen.

Das Environmental Research Institute of Michigan (ERIM) und die Firma Deneb Robotics untersuchen in verschiedenen Projekten Möglichkeiten der Unterstützung dezentraler Entscheidungsprozesse. Die ANTS-Architektur (*Agent Network for Task Scheduling*) [SaPa99] bedient sich z. B. sowohl der Koordinationsprinzipien von Menschen geschaffener Organisationen als auch derer von Insektenkolonien: Es zeigt sich hierbei, dass große Populationen simpler Agenten durchaus robustes Verhalten beim Scheduling von Wertschöpfungsnetzwerken zeigen können. Die Architektur verwendet hierzu ein auf dem Kontraktnetz aufbauendes sog. „least commitment scheduling“, welches Entscheidungen über die Produktionsreihenfolge bis zum letztmöglichen Zeitpunkt verzögert. Hierauf aufbauend verwendet der Density-based Emergent Scheduling Kernel (DESK) stochastische Profile der erwarteten zukünftigen Kapazitätsauslastung. Innerhalb dieses stochastischen Kapazitätsprofils suchen die Agenten nach Optimierungsmöglichkeiten durch Umplanung.

Im Projekt AARIA (*Autonomous Agents for Rock Island Arsenal*) [Paru et al. 98a; Bake et al. 99] wird gezeigt, wie den Produktivressourcen zugeordnete, über das Internet verbundene autonome Agenten in der Lage sind, eine virtuelle Produktion effizient und effektiv zu steuern und die Einlastung neuer Aufträge vorzunehmen. Das DASCh-Projekt (*Dynamical Analysis of Supply Chains*) [Paru99b; Paru98b; Paru et al. 98b] überträgt diese An-

sätze auf industrielle Wertschöpfungsnetzwerke und exploriert die Auswirkungen auf deren dynamisches Verhalten. Der DASCh-Ansatz trägt hierbei dem Bedürfnis nach Schutz proprietärer Information Rechnung und umfasst drei Typen von Agenten: „Company Agents“ repräsentieren die am Wertschöpfungsnetzwerk beteiligten Firmen, „PPIC Agents“ modellieren die Produktionsplanungs- und Lagerhaltungsverfahren, die innerhalb der Company Agents zur Anwendung kommen. „Shipping Agents“ modellieren schließlich die mit dem Transport von Material und Information zwischen den Company Agents verbundenen Verzögerungen und Unsicherheiten.

Zeng und Sycara [ZeSy98] entwickeln ein Modell des zwischenbetrieblichen E-Commerce und explorierten hierbei, welche neuen Möglichkeiten der Koordination sich durch elektronische Marktplätze bieten. Auch hier wird das Wertschöpfungsnetzwerk als MAS konzeptualisiert, in welchem die Unternehmen jeweils durch einen Softwareagenten vertreten werden, der „in ihrem Namen“ agiert. Der Hauptfokus der Arbeit liegt auf der Flexibilität und Kosteneffizienz der Koordination einer Just-in-Time-Lieferung. Auch Strader et al. [Stra et al. 98; Lin et al. 96; Lin96] wählen diesen Ansatz in ihrer „Swarm multi-agent simulation platform“, einem System zur Entscheidungsunterstützung und Simulation von Auswirkungen der Weitergabe proprietärer Information auf die Auftragserfüllung in divergenten Wertschöpfungsketten.

Im MAGNET-System (*Multi-Agent Negotiation Testbed*) der University of Minnesota [Coll et al. 00a; Coll et al. 00b; Coll et al. 99] verhandeln die Agenten miteinander über eine marktbasierete Infrastruktur mittels eines sog. „finite-leveled-commitment protocol“. Die Agenten nehmen hierin entweder die Anbieter- oder die Nachfragerrolle ein, der Markt selbst fungiert als expliziter Intermediär. Das MAS kann entweder autonom planen oder als Entscheidungsunterstützungssystem für einen humanen Entscheider eingesetzt werden.

Darüber hinaus befassen sich folgende Autoren mit dem Einsatz der Technologie mobiler Agenten zum Management von Wertschöpfungsnetzwerken: [Brug et al. 98]; [PaEd98; PaEd00]; [Szir et al. 00; Szir et al. 99]. Da die Fragen der Migration von Planungsagenten allerdings erst in einer

späteren Phase unseres Forschungsprojektes thematisiert werden sollen, werden diese Ansätze hier nicht weiter verfolgt.

4 Architektur und Protokolle zur dispositiven Supply-Web-Koordination

Unser Forschungsprojekt DISPOWEB (*Dispositive Supply-Web-Koordination*) hat die Entwicklung von Softwareagenten zum Ziel, die mithilfe von Protokollen im Wertschöpfungsnetz dispositive Entscheidungen der Produktionsplanung und Logistik autonom treffen und den betrieblichen Leistungsaustausch unternehmensintern sowie -übergreifend koordinieren. Im Mittelpunkt steht die bilaterale und multilaterale Aushandlung von optimalen Leistungszeitpunkten im Rahmen eines dezentralen Supply Web Management mit dem Ziel, einer pareto-effizienten Lösung möglichst nahe zu kommen. Eine derartige Flexibilisierung des klassischen Konzepts der starren Konventionalstrafe wurde in der oben ausgeführten Literatur bislang nicht untersucht. In der klassischen (also nicht automatisierten) Aushandlung von Leistungszeitpunkten war ein solches Konzept bislang nicht anzutreffen, da die Transaktionskosten des permanenten Propagierens der sich dynamisch verändernden Preisfunktionen (s. u.) zu hoch gewesen wären.

4.1 Anwendungsszenario und verwendete Agententypen

Im Folgenden sollen die im Projekt modellierten *Agententypen* der Anwendungsdomäne und ihre Relationen anhand eines *Anwendungsszenarios* „Computer Manufacturing“ skizziert werden, woraus im Rahmen des Projekts ein *Benchmark* für die Leistungsfähigkeit der zu untersuchenden Verfahren abgeleitet werden soll.

Das Netzwerk besteht dabei aus Knoten, die verschiedene *ökonomischen* Agenten repräsentieren, und Kanten, welche den *Güter- und Informationsfluss* zwischen diesen darstellen. Die im Modell betrachteten Agenten stehen aufgrund der von ihnen abgeschlossenen Rahmenverträge in *festen* Beziehungen (mit Ausnahme der Konsumenten, welche in unserem Mo-

dell zur Vereinfachung als ein Konsumenten-Agent zusammengefasst werden). Die Struktur des modellierten Supply Web ist daher fix, d. h. dass ein verarbeitender Betrieb keine Nachfragen von Kunden erhalten kann, mit denen er bisher keine Rahmenverträge geschlossen hat. Dynamik in unserem System entsteht lediglich durch

- Variation der Nachfrage der Konsumenten, die sich durch das gesamte Wertschöpfungsnetz propagiert,
- die Variation des Angebots der Rohstoffquellen und
- Ausfälle von Maschinen oder Transportkapazitäten.

Produktionsagenten

Verarbeitende Betriebe, die Produkte herstellen und hierzu ein *Bündel von Inputfaktoren* benötigen, die jeweils von einem oder mehreren Lieferanten bezogen werden müssen, werden als *Produktionsagenten* modelliert. Vereinfachend wird dabei angenommen, dass diese Betriebe einem oder mehreren Kunden lediglich *ein* Produkt anbieten, welches mithilfe eines einzigen Potentialfaktors, also einer einzigen Maschine, produziert wird. Jedes Produkt ist durch eine eindeutige Merkmalspezifikation vollständig beschrieben, wobei seine Eigenschaften lediglich bezüglich der Dimensionen *Raum* und *Zeit* variiert werden können.

Anbieter von Produkten können nun auf der Grundlage bestehender *Rahmenverträge* Leistungskontrakte mit weiterverarbeitenden Produktionsagenten abschließen, in welchen die Lieferung vordefinierter Mengen eines bestimmten Produktes innerhalb eines definierten *Zeitraumes* zu einem fest vorgegebenen *Preis* vereinbart wird. Zusätzlich zu den vorgegebenen Mengenkontingenten und Preisen umfassen diese Leistungskontrakte Vereinbarungen bezüglich der *Zeitintervalle*, innerhalb derer eine abgerufene Teilleistung vom Lieferanten zu erbringen ist.

Lieferanten, die Produkte desselben Typs anbieten, stehen somit in einer vollständigen Substitutionsbeziehung, d. h. zwischen ihnen herrscht *Konkurrenz*. Zwischen Lieferanten, die unterschiedliche, in ein nachfolgendes Produkt eingehende Vorprodukte anbieten, herrscht dagegen eine *Komplementaritätsbeziehung* bezüglich dieses Produktes, d. h. dass der nachfolgende Produktionsprozess nicht

gestartet werden kann, wenn auch nur ein einziges der benötigten Vorprodukte fehlt.

Verarbeitende Betriebe, die selbst keine Lieferanten aufweisen und somit die Quellen des Wertschöpfungsnetzwerks darstellen, bezeichnen wir als *Source-Agenten*, die Senken des Netzwerks dagegen als *Konsumenten*.

Agenten für physische Logistik

Für einen Gütertausch zwischen einem Produktionsagenten A und einem Produktionsagenten B muss entweder A oder B einen Beförderungsvertrag mit einem *Logistikagenten* L eingehen, der:

- das zu befördernde Gut im vereinbarten *Abhol-Zeitintervall* bei A abholt,
- das Gut im vereinbarten *Liefer-Zeitintervall* bei B übergibt und
- für diese Dienstleistung einen Preis verlangt, der den von A und B vereinbarten Transaktionszeitpunkt als für alle drei Parteien gewinnbringend erscheinen lässt.

Handelt es sich bei der nachgefragten Beförderungsleistung um eine Umplanung, so wird beim Logistikagenten L nicht nur ein neuer Auftrag eingelastet, sondern ebenfalls ein alter Auftrag storniert. Da gerade der Logistikagent starke Synergien und damit Kostenvorteile durch Zusammenlegung von Beforderungsaufträgen erzielt, hat er vermutlich für heute bereits einen Tourenplan optimiert, welcher das Segment von Produktionsagent A zu Produktionsagent B in idealer Kombination mit anderen, räumlich naheliegenden Beforderungsaufträgen anderer Kunden enthält.

Die Beantwortung der Frage nach den Opportunitätskosten einer angefragten Verschiebung der Fahrt auf morgen setzt bei L nun einerseits die erneute Optimierung der heutigen Tour sowie die optimale Einplanung in die morgige Tour voraus. Auch hier muss in einem System verteilter Agenten ein kostenminimaler Trade-Off zwischen der *Präzision* der Ermittlung seiner Preisuntergrenze und den *Wasserfalleffekten* der kooperativen Einbeziehung nachgelagerter Agenten in den eigenen Planungsprozess gefunden werden. Um zukünftige Touren neu zu optimieren, muss der Logistikagent genau genommen ständig die Opportunitätskosten einer Verschiebung des geplanten Lieferzeitpunkts bei all seinen Kunden auf ei-

ner bestehenden Tour abfragen, da ohne diese Abfrage nicht vermieden werden kann, dass die für alle Beteiligten optimale Tour nur deshalb nicht gefunden wird, weil auf Basis von veralteten Annahmen über die Auswirkungen auf nachfolgende Agenten geplant wurde.

Der Logistikagent übernimmt Transportleistungen und / oder Lagerleistungen. Führt er nur Transportleistungen, d. h. eine (kombinierte) zeitliche und räumliche Transformation von Produkten durch, so spezifizieren wir ihn als *Transportagenten*; ist er dagegen nur für die zeitliche Transformation bzw. die Lagerleistung verantwortlich, so bezeichnen wir ihn als *Lageragenten*.

Wie auch die Produktionsagenten verfügen beide Typen über Kapazitätsrestriktionen. Aus Vereinfachungsgründen soll auch hier wiederum nur von *einer* (homogenen) knappen Ressource ausgegangen werden, die also z. B. vollständig durch das maximal beförder- resp. lagerbare Gesamtvolumen beschrieben werden kann. Jeder einzelne Beförderungs- oder Lagerauftrag ist u. a. durch ein eindeutiges Gütervolumen charakterisiert.

Handelsagenten

Händler sind Organisationseinheiten, die auf eigene Rechnung Güter kaufen und diese ohne eine weitere Verarbeitung wieder verkaufen. Sie werden in unserem Modell durch Handelsagenten repräsentiert. Sie unterscheiden sich von Lageragenten dadurch, dass die Güter, die sich für einen gewissen Zeitraum in ihrem Besitz befinden, ihr Eigentum sind. Insbesondere verfolgen sie zwei konkurrierende Ziele. Zum einen versuchen sie ihren Kunden einen möglichst hohen Service anzubieten. Dies gelingt ihnen beispielsweise, indem sie eine hohe Verfügbarkeit der zu verkaufenden Güter sicherstellen, um Lieferzeiten zu reduzieren. Auf der anderen Seite versuchen sie Kapitalbindungskosten durch niedrige Lagerbestände zu minimieren. Ein spezifischer Handelsagent ist der in unserem Supply Web dargestellte Einzelhändler. Dieser zeichnet sich vor allem durch seinen direkten Kontakt zum Konsumenten aus.

Agentenholone

Die bislang diskutierten atomaren Agententypen werden als autonome Agenten verstanden, die lediglich *eine* (aus unserer

Sicht nicht weiter zerlegbare) Einzelleistung erbringen. Um Leistungsbündel anbieten zu können, können sich atomare Agenten zu sog. Agentenholonen zusammenschließen, die im Außenverhältnis, also in Kontrakten mit anderen atomaren Agenten oder Agentenholonen, als Einheit auftreten und von Kontraktpartnern daher wie atomare Agenten behandelt werden. Die Außenwelt abstrahiert folglich vom Innenverhältnis des holonischen Agenten. Das Agentenholon entspricht somit einer Rechtskörperschaft, die sich mit anderen Rechtskörperschaften zu komplexeren Rechtskörperschaften zusammenschließen kann, deren interne Kontrakt-Struktur (z. B. Gewinnaufteilung) aber den mit ihr in Leistungsbeziehungen tretenden Rechtskörperschaften verborgen bleibt.

Übernimmt etwa Logistikdienstleister *TransUS* den Transport der Computer von der Tokop Corp. zum Einzelhändler 2 und entschließt sich hierbei, die Zwischenlagerung im (rechtlich selbstständigen) Distributionszentrum USA 1 durchzuführen, so sind hierbei andere Kontrakttypen involviert, als wenn sich Logistikagent *TransUS* entschließt, das Distributionszentrum USA 1 aufzukaufen. In letzteren Fall wird die Einlagerungsleistung im Innenverhältnis abgewickelt, das Unternehmen *TransUS* wird zum Agentenholon, bietet aber im Außenverhältnis weiterhin ausschließlich Transportleistungen an, bleibt also Transportagent. Kauft dagegen Tokop Corp. den Logistikagenten *TransUS* und das Distributionszentrum USA 1 auf, so werden diese zu Business Units von Tokop; Tokop selbst wird zum Holon, bleibt allerdings vom Typ Produktionsagent. Von der Möglichkeit, dass Tokop z. B. dann, wenn der zu seinem Unternehmen gehörige Logistikagent gerade über freie Kapazitäten verfügt, nach außen für Dritte als Transportagent auftritt, soll im Projekt abstrahiert werden.

Eine Formalisierung der hier skizzierten Agententypen, ihrer Vertragstypen sowie ihrer Kommunikationsakte befindet sich zurzeit im Aufbau. Die bislang vorgenommene grobe Definition der Objekt- und Relationentypen in Ontolingua (<http://www.wiwi.uni-frankfurt.de/IWI/neteco/>) soll hierfür im Projekt zu einer konsistent axiomatisierten Ontologie ausgebaut werden.

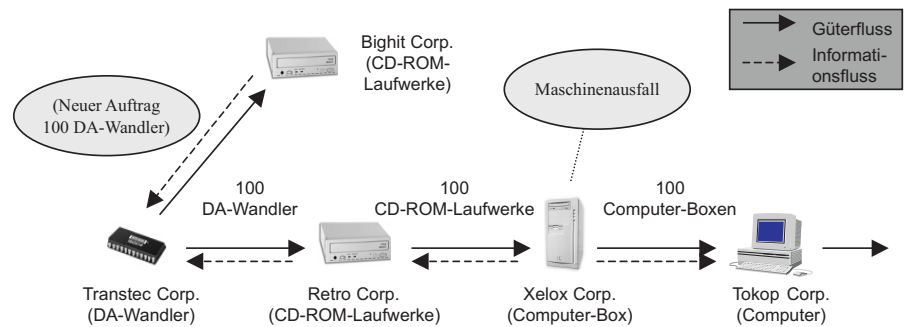


Bild 2 Ausschnitt aus dem beispielhaften Supply Web der Computerindustrie

4.2 Dezentrale Supply-Web-Koordination

Die dynamische Struktur von Supply Webs und die Tatsache, dass einige Entitäten gleichzeitig in mehreren Supply Webs agieren können, erfordert statt einer zentralen Koordination ein dezentrales Supply Web Management. Ein wichtiger Aspekt des dezentralen Supply Web Management ist die Kooperation der einzelnen Entitäten des Supply Web insofern, dass möglichst Echtzeitinformationen im gesamten Supply Web ausgetauscht werden. Diese Informationen liefern die Basis für eine effiziente Planung, Steuerung und Kontrolle der Güterflüsse im Versorgungsnetz. Das folgende Beispiel zeigt, wie durch die Verteilung von Information im Supply Web ein einzel- wie auch gesamtwirtschaftlicher Vorteil erzielt werden kann:

Wir betrachten einen Teilausschnitt des Supply Web eines Computerherstellers, der Tokop Corp. (vgl. Bild 2). Alle an dem Wertschöpfungsnetzwerk beteiligten Unternehmen haben Rahmenverträge miteinander abgeschlossen. Die Transtec Corp. stellt DA-Wandler her und hat sich zur Lieferung von 100 DA-Wandlern an die Retro Corp. bis zu einem bestimmten Zeitpunkt verpflichtet. Die Retro Corp. produziert CD-ROM-Laufwerke und ist ihrerseits einen Vertrag mit der Xelox Corp. eingegangen, aufgrund dessen sie 100 CD-ROM-Laufwerke bis zu einem bestimmten Zeitpunkt bereitstellen muss. Für die Produktion der CD-ROM-Laufwerke sind die 100 DA-Wandler der Transtec Corp. erforderlich. Die Xelox Corp. hat sich wiederum verpflichtet 100 Computer-Boxen an die Tokop Corp. zu liefern, in deren Produktion die 100 CD-

ROM-Laufwerke der Retro Corp. eingehen. Alle am Supply Web beteiligten Unternehmen sind verpflichtet, Konventionalstrafen zu zahlen, falls sie die jeweils vereinbarten Lieferzeitpunkte nicht einhalten können. Die Transtec Corp. ist nicht nur in diesem Supply Web tätig, sondern agiert durch einen Rahmenvertrag mit der Bight Corp., einem Hersteller von CD-ROM-Laufwerken, auch in einem konkurrierenden Wertschöpfungsnetzwerk. Vereinfachend wird angenommen, dass für eine Transformation auf jeder Wertschöpfungsstufe jeweils genau 1 Zeiteinheit benötigt wird und dass von den Transportzeiten abstrahiert werden kann.

Prinzipiell wird zunächst von *Truth-Telling Agents* ausgegangen, d. h., die Agenten verfolgen nicht die Strategie, ihre Gewinne durch bewusste Fehlinformation anderer Agenten zu maximieren. Der Vertrag über Lieferzeitpunkt und Preis enthält eine prohibitive Konventionalstrafe, sodass die Agenten, falls sie feststellen, den Lieferzeitpunkt nicht einhalten zu können, einen neuen Lieferzeitpunkt verhandeln.

Davon ausgehend, dass die Xelox Corp. augenblicklich damit rechnet, die CD-ROM-Laufwerke spätestens zum Zeitpunkt 6 für einen Preis von 5000 GE zu erhalten, jedoch bereit ist, für eine frühere Lieferung geringfügig mehr zu bezahlen (z. B. 500 GE pro Zeiteinheit), lassen sich die in Bild 3 dargestellten zeitpunktabhängigen Nachfragepreise gegenüber der Retro Corp. ableiten. Nach dem Zeitpunkt 6 besteht nur noch eine niedrige Restzahlungsbereitschaft von 2000 GE, wobei hier der niedrige Preis die zu tragenden Kosten für die Verspätung der Lieferung darstellen.

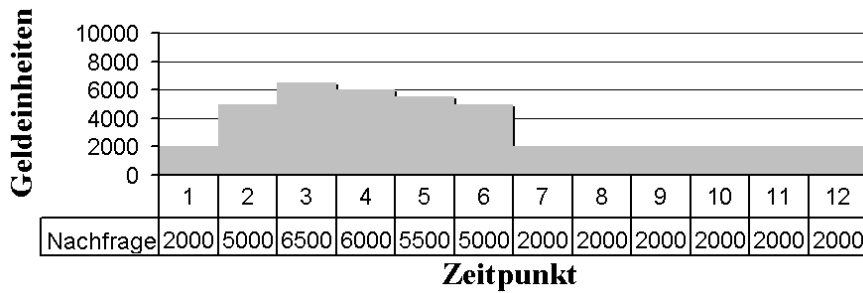


Bild 3 Zeitpunktbezogene Nachfragepreise der Xelox Corp.

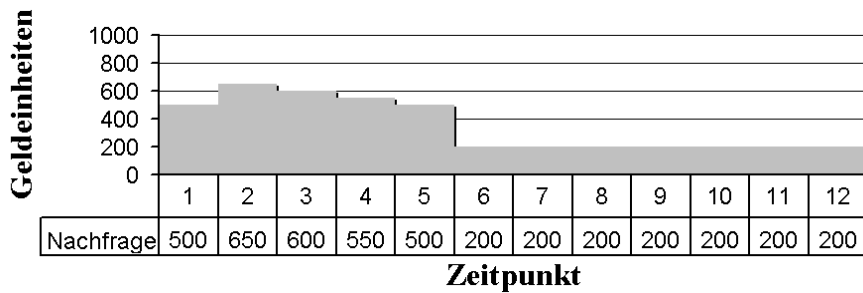


Bild 4 Abgeleitete zeitpunktbezogene Nachfragepreise der Retro Corp.

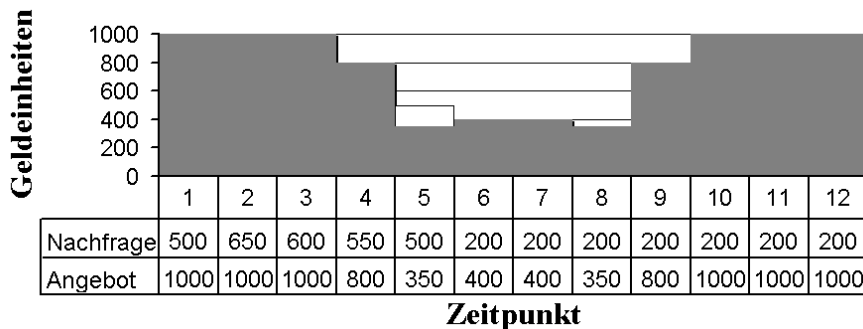


Bild 5 Zeitpunktbezogene Angebotspreise der Transtec Corp. und Kontraktraum mit der Retro Corp.

Da die Retro Corp. nicht durch weitere Aufträge eingeschränkt ist, leitet sie daraus nun ihre um eine Zeiteinheit versetzten Nachfragepreise ab (vgl. Bild 4). Für die DA-Wandler, die nicht das preisbestimmende Bauteil eines CD-ROM-Laufwerkes sind, wurden 10% der Gesamtkosten, also 500 GE, angenommen. Die aktuellen Angebotspreise der Retro Corp. sollen im Augenblick nicht näher betrachtet werden, da sie keinen Einfluss auf den im Folgenden dargestellten Prozess haben.

Dem stehen die zeitpunktbezogenen Angebotspreise der Transtec Corp. gegenüber, welche sich aus deren aktuellen Aufträgen und Maschinenwartungszeitpunk-

ten ergeben. Vergleicht man diese mit den zeitpunktbezogenen Nachfragepreisen der Retro Corp., so ergibt sich ein Kontraktraum (vgl. Bild 5). Die beiden Firmen sind nun bestrebt, den besten Zeitpunkt für die Lieferung der CD-ROM-Laufwerke auszuwählen. Idealtypisch liegt hier nur zum optimalen Lieferzeitpunkt (5) der Nachfragepreis über dem Angebotspreis. Dies ist jedoch keine notwendige Bedingung. Aufgrund bindender Rahmenverträge kann es dazu kommen, dass eine Lieferung stattfinden muss, obwohl die aktuelle Zahlungsbereitschaft (im Extremfall auch für alle Leistungszeitpunkte) unter dem aktuellen Angebotspreis liegt. Entscheidend

ist, dass die Differenz aus Nachfragepreis und Angebotspreis maximiert wird. Es wird nun ein Kontrakt über die Lieferung zum Zeitpunkt 5 abgeschlossen, wobei als Abnahmepreis der Durchschnitt von Angebots- und Nachfragepreis festgelegt wird.

Die Transtec Corp. rechnet damit, die DA-Wandler ab Zeitpunkt 5 fertigstellen zu können. Wie in Bild 5 zu erkennen ist, verursacht eine frühere Lieferung für den Nachfrager erheblich höhere Kosten. Zum anderen versucht die Transtec Corp., den Auftrag möglichst so einzulasten, dass ihre verbleibende Kapazität nicht gestückelt wird. Um dieses Ziel zu erreichen, wird ein geringfügig höherer Betrag verlangt, wenn der Einlastungszeitpunkt in der Mitte der freien Kapazität liegt.

Nun treten zwei Ereignisse ein: Zum einen wird der Transtec Corp. ein Auftrag von der Bight Corp. über 100 DA-Wandler angeboten. Aufgrund von Kapazitätsrestriktionen ist es ihr jedoch nicht möglich, gleichzeitig diesen neuen Auftrag und die Lieferung der 100 DA-Wandler bis zum vereinbarten Zeitpunkt mit der Retro Corp. zu erfüllen. Die Bight Corp. müsste also nun ein Angebot an die Transtec Corp. machen, sodass dieses die Kosten für die Umplanung des Auftrages der Retro Corp. kompensieren würde, um von der Transtec Corp. akzeptiert zu werden. Diese Kosten würden sich als entgangener Ertrag durch die spätere Ablieferung des Auftrages aus den zeitpunktbezogenen Nachfragepreisen der Retro Corp. errechnen.

Zum anderen fällt bei der Xelox Corp. eine Maschine aus, sodass das Unternehmen seinen Vertrag mit der Tokop Corp. über die Lieferung der 100 Computer-Boxen nicht rechtzeitig erfüllen kann. Es kommt also zwangsläufig zu einer Verschiebung des Liefertermins der Computerboxen, welche die Xelox Corp. herstellt. Die defekte Maschine steht bis zum Zeitpunkt 9 nicht für die Bearbeitung von Aufträgen zur Verfügung. Da nunmehr die Anlieferung bis zu diesem Zeitpunkt keinen Nachteil gegenüber einer Lieferung zum Zeitpunkt 6 bringt und sie die Vorleistung von der Retro Corp. weiterhin benötigt, passt sie ihre zeitpunktbezogenen Nachfragepreise dem vertraglich vereinbarten Preis von Zeitpunkt 6 an. Aufgrund des bestehenden Vertrages mit der Retro Corp. ist es ihr nicht möglich, die Kosten, welche durch die Verzögerung des Auftrags gegenüber der Tokop Corp. entste-

hen, in ihre zeitpunktbezogenen Nachfragepreise einzubeziehen (vgl. Bild 6).

Diese Nachfragepreise werden nun auch von der Retro Corp. berücksichtigt. Das heißt, analog zum vorherigen Vorgehen werden um eine Zeiteinheit versetzte Nachfragepreise abgeleitet. Es ergibt sich also ein zeitpunktbezogener Preis von 500 GE für die Lieferung der 100 DA-Wandler zwischen den Zeitpunkten 3 und 8. Der angebotene Preis sinkt ab Zeitpunkt 9 auf 200 GE.

Der veränderte Kontraktraum hat unter Beibehaltung der zeitpunktbezogenen Angebotspreise der Transtec Corp. jetzt folgende Gestalt (vgl. Bild 7).

Im Gegensatz zur vorherigen Situation würde die Verschiebung des Lieferzeitpunktes nicht zu verringerten Einnahmen führen. Kommt nun ein Angebot von der Bighit Corp., so würde die Transtec Corp. den Kontrakt mit der Retro Corp. auf Zeitpunkt 8 verschieben. Dadurch würden die nachgelagerten Produzenten nicht schlechter gestellt. Die Transtec Corp. könnte nun den neuen Auftrag der Bighit Corp. einlassen und somit ihren Gewinn erhöhen.

Durch die bilateralen Neuverhandlungen der optimalen Leistungszeitpunkte und der daraus resultierenden Preise der auszutauschenden Güter wird der Gewinn aus dem neuen Auftrag mit der Bighit Corp. auf die Transtec Corp. und die Bighit Corp. verteilt und eine einzel- sowie gesamtwirtschaftlich vorteilhafte Situation erzielt.

Erforderlich ist ein *Verhandlungsprotokoll*, welches die Steuerungsfunktion des Preises zur Bewertung von Knappheitssituationen nicht durch definierte Fixpreise außer Kraft setzt, sondern es vielmehr gestattet, auch innerhalb bestehender Rahmenvereinbarungen vom konkreten *Leistungszeitpunkt abhängige* Angebots- und Nachfragepreise zu nutzen, um die Aushandlung optimaler Leistungszeitpunkte zu gewährleisten. Die Bestimmung von leistungszeitpunktspezifischen dispositiven Deckungsbeiträgen liefert dabei die Basis für die Aushandlung der Preise. Welche Information sinnvollerweise zu welchem Zeitpunkt propagiert wird und wie sich unterschiedliche Verhandlungsstrategien bei fragmentierten Kontrakträumen mit mehreren möglichen Leistungszeitpunkten auswirken, ist zurzeit gerade Gegenstand umfangreicher Tests. Als Basis dient eine Implementierung der Agenten in JAVA.

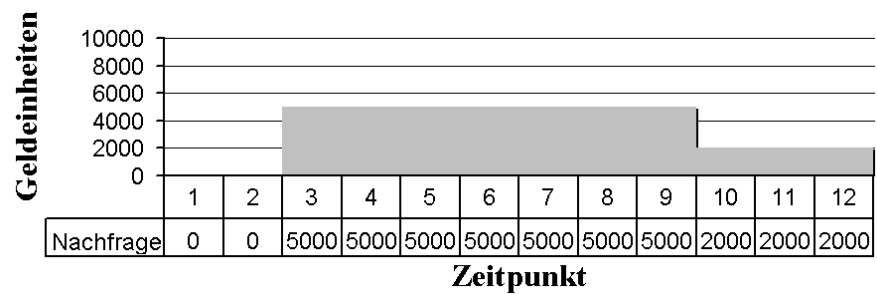


Bild 6 Modifizierte zeitpunktbezogene Nachfragepreise der Xerox Corp.

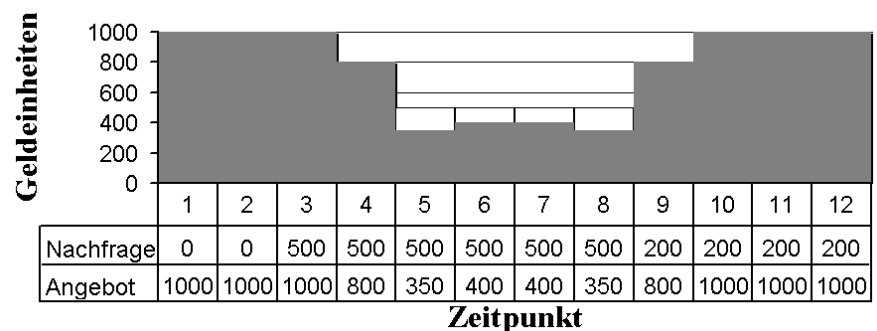


Bild 7 Aktualisierter Kontraktraum der Transtec Corp. mit der Retro Corp.

5 Ausblick

Die im Rahmen des Forschungsprojekts DISPOWEB entwickelten Agenten verhalten sich in der gegenwärtigen Implementierung stets kooperativ und propagieren bereitwillig jegliche Information über ihre veränderten Zahlungsbereitschaften. In einem nächsten Schritt muss untersucht werden, wie robust sich das Planungsergebnis bezüglich strategisch verfälschter Zahlungsbereitschaften erweist und durch welche Anreize eine solche Verfälschung möglichst verhindert werden kann.

Die Propagation der Nachfragepreise erfolgt zurzeit simultan. Sollte sich herausstellen, dass die Realisierung komplexer Umplanungen daran scheitert, dass kein Agent bereit ist, Risiko einzugehen, so können zusätzliche Planungsagenten als Intermediäre eingeführt werden. Diese würden dann komplexe Umplanungsoperationen durchführen und den Agenten (gegen Entlohnung) bekannt geben.

Die im Augenblick erfolgende Implementierung ist auf einen einzelnen Rechner beschränkt, wobei die asynchrone Kommunikation zwischen den Agenten simuliert wird. Der nächste Schritt ist die

Übertragung der Klassen und Objekte in einen nicht nur logisch, sondern auch softwaretechnisch verteilten Agent-Framework. Die sich daraus ergebende Sicherheits- und Zuverlässigkeitsproblematik muss sich dann im Verhalten der Agenten widerspiegeln. Zudem sollte eine Anpassung des Agenten auf die ihm zur Verfügung stehende Performanz seiner Kommunikations- und Rechenmöglichkeiten erfolgen.

Parallel zur Implementierung versuchen wir augenblicklich ein reales Supply Web möglichst präzise abzubilden. Ist die erste Implementierung erfolgt, so wird versucht, unser bisher fiktives Modell auf diese „reale“ Anwendung anzupassen.

Literatur

- [BaFo95a] *Barbuceanu, M.; Fox, M.S.*: The Architecture of an Agent Based Infrastructure for Agile Manufacturing. Internal Report. Enterprise Integration Laboratory. Department of Industrial Engineering, University of Toronto. 1995.
- [BaFo95b] *Barbuceanu, M.; Fox, M.S.*: COOL: A language for describing coordination in multi agent systems. In: Proceedings of the First In-

- ternational Conference Francisco, CA, 1995, S. 14–24.
- [BaFo97] *Barbuceanu, M.; Fox, M.S.*: Coordinating Multiple Agents in the Supply Chain. In: Proceedings of WET-ICE 97, Boston, Mass. IEEE Computer Society Press.
- [Bake et al. 99] *Baker, A.D.; Parunak, H.V.D.; Erol, K.*: Internet-based Manufacturing: A Perspective from the AARIA Project. Working Paper, Enterprise Action Group, Inc., Cincinnati, Ohio, August 12, 1999.
- [BoGa88] *Bond, A.H.; Gasser, L.*: Readings in Distributed Artificial Intelligence. Morgan Kaufmann Publishers, San Mateo, CA, 1988.
- [BrNa96] *Brandenburger, A.M.; Nalebuff, B.J.*: Co-opetition. New York 1996.
- [Brug et al. 98] *Brugali, D.; Menga, G.; Galarra-ga, S.*: Inter-Company Supply Chains Integration via Mobile Agents. In: Proceedings of PROLAMAT'98, Trento, Itali, <http://www.polito.it:80/~brugali>, Abruf am 2000-02-12.
- [BuKö99] *Buxmann, P.; König, W.*: Zwischenbetriebliche Kooperationen mit SAP-Systemen – Perspektiven für Logistik und Service Management. Springer, Berlin et al. 1999.
- [Chai92] *Chaib-draa, B.*: Distributed Artificial Intelligence: An Overview. Artificial Intelligence Review 6 (1992) 1, S. 35–66.
- [Chen98] *Chen, Y.*: Negotiation Process In Supply Chain Management System (SCMS). <http://www.csee.umbc.edu/~yechen/research/paper/paperindex.html>, 1998-12-15, Abruf am 1999-12-12.
- [Chen et al. 99] *Chen, Y.; Peng, Y.; Finin, T.; Labrou, Y.; Cost, S.; Chu, B.; Yao, J.; Sun, R.; Wilhelm, B.*: A negotiation-based Multi-agent System for Supply Chain Management. <http://www.csee.umbc.edu/~yechen/research/paper/paperindex.html>, 1999-03-12, Abruf am 1999-12-12.
- [CoGö97] *Corsten, H.; Gössinger, R.*: Multiagentensystem zur Unterstützung der Produktionsplanung und -steuerung. In: Information Management (1997) 3, S. 65–75.
- [Coll et al. 99] *Collins, J.; Sundareswara, R.; Tsvetovat, M.; Gini, M.; Mobasher, B.*: Search Strategies for Bid Selection in Multi-Agent Contracting. Agent-mediated Electronic Commerce (AmEC-99), at IJCAI'99, Stockholm, Sweden, August 1999.
- [Coll et al. 00a] *Collins, J.; Sundareswara, R.; Tsvetovat, M.; Gini, M.; Mobasher, B.*: Multi-Agent Contracting for Supply-Chain Management. Technical Report 2000-10, University of Minnesota, 2000.
- [Coll et al. 00b] *Collins, J.; Bilot, M.; Gini, M.; Mobasher, B.*: Mixed-initiative decision support in agent-based automated contracting. In: Proceedings of the Fourth International Conference on Autonomous Agents, June 2000.
- [Dale96] *Dale, J.*: A Mobile Agent Architecture to Support Distributed Resource Information Management. <http://www.mmrgecs.soton.ac.uk/publications/papers/Voyager/papers/abst.htm>
- [Durf et al. 89] *Durfee, E.H.; Lesser, V.R.; Corkill, D.D.*: Trends in Cooperative Distributed Problem Solving. In: IEEE Transactions March 1989.
- [EyPa99] *Eymann, T.; Padovan, B.*: Eine Multi-Agenten-Simulation zur ökonomischen Analyse der dezentralen Koordination von Wert-schöpfungsketten. In: *Scheer, A.-W.; Markus, N. (Hrsg.)*: Electronic Business Engineering. 4. Internationale Tagung Wirtschaftsinformatik 1999. Physica-Verlag, Heidelberg 1999, S. 625–641.
- [Falk et al. 93] *Falk, J.; Spieck, S.; Mertens, P.*: Unterstützung der Lager- und Transportlogistik durch Teilintelligente Agenten. In: Information Management (1993) 2, S. 26–31.
- [Fini et al. 94] *Finin, T.; Fritzon, R.; McKay, D.; McEntire, R.*: KQML – a language and protocol for knowledge and information exchange. Technical Report, CS-94-02, University of Maryland, Valley Forge Engineering Center, Unisys Corporation, 1994.
- [Fisc et al. 93] *Fischer, K.; Kubn, N.; Müller, H.-J.; Müller, J.P.; Pischel, M.; Schroth, A.*: Verteiltes Problemlösen im Transportwesen. In: Information Management (1993) 2, S. 32–40.
- [Fisc et al. 98] *Fischer, K.; Ruß, C.; Vierke, G.*: Decision Theory and Coordination in Multi-agent Systems. Research Report. Deutsches Forschungszentrum für Künstliche Intelligenz. 1998.
- [Fox et al. 93] *Fox, M.S.; Chiongio, J.F.; Barbuceanu, M.*: The Integrated Supply Chain Management System. Internal Report. Enterprise Integration Laboratory. Department of Industrial Engineering, University of Toronto. 1993.
- [FrGr96] *Franklin, S.; Graesser, A.*: Is it an agent, or just a program?: A taxonomy for autonomous agents. In: Intelligent Agents III: Proceedings of the Third International Workshop on Agent Theories, Architectures, and Languages, Lecture Notes in Artificial Intelligence 1193 (1996) S. 21–35, <http://www.mscl.memphis.edu/~franklin/AgentProg.htm>, Abruf am 1999-07-16.
- [GaHa95] *Ganesban, R.; Harrison, T.P.*: An Introduction to Supply Chain Management. Penn State University, http://silmaril.smeal.psu.edu/misc/supply_chain_intro.html, 1995-05-22, Abruf am 1999-07-13.
- [GeKe94] *Genesereth, M.R.; Ketchpel, S.P.*: Software Agents. In: Communications of the ACM 37 (1994) 7, S. 48–53.
- [Gerb et al. 99] *Gerber, C.; Siekmann, J.; Vierke, G.*: Holonic Multi-Agent Systems. Research Report. Deutsches Forschungszentrum für Künstliche Intelligenz. 1999.
- [GilJan] *Gilbert, D.; Janca, P.*: Intelligent Agents. IBM White Paper. <http://www.networking.ibm.com/iag/iagwp1.html>, (Dokument auf dem Server nicht mehr verfügbar).
- [Hink et al. 97] *Hinkkanen, A.; Kalakota, R.; Saengcharoenrat, P.; Stallaert, J.; Whinston, A.B.*: Distributed Decision Support Systems for Real Time Supply Chain Management using Agent Technologies. http://yama.bus.utexas.edu/ejou/articles/art_1.html, Abruf am 1999-10-09.
- [Kala et al. 96] *Kalakota, R.; Stallaert, J.; Whinston, A.B.*: Implementing Real-time Supply Chain Optimization Systems. http://cism.bus.utexas.edu/jan/sc_imp.html, 1996-10-22, Abruf am 1999-10-09.
- [Kass96] *Kassel, S.*: Multiagentensysteme als Ansatz zur Produktionsplanung und -steuerung. In: Information Management (1996) 1, S. 46–50.
- [Kjen98] *Kjenstad, D.*: Coordinated supply chain scheduling. Ph. D. Thesis and NTNU Report 1998:24, Department of Production and Quality Engineering, Norwegian University of Science and Technology (NTNU), Trondheim, November 1998.
- [KnTi99] *Knirsch, P.; Timm, I.J.*: Multi-Agentensysteme zur Unterstützung temporärer Logistiknetzwerke. In: *Kopfer, H.; Bierwirth, C. (Hrsg.)*: Logistik Management: intelligente I + K Technologien. Springer-Verlag, Berlin et al. 1999, S. 185–195.
- [KwNo93] *Kwok, A.; Norrie, D.*: Intelligent agent systems for manufacturing applications. In: Journal of Intelligent Manufacturing 4 (1993) 4, S. 285–293.
- [LeBi95] *Lee, H. L.; Billington, C.*: The Evolution of Supply-Chain-Management Models and Practice at Hewlett-Packard, Interfaces 25 (1995) 5, S. 42–63.
- [Lin et al. 96] *Lin, E.; Tan, G. W.; Shaw, H. J.*: Multi-Agent Enterprise Modeling. University of Illinois at Urbana-Champaign, College of Commerce and Business Administration, Office of Research, Working Paper 96–0134.
- [Lin96] *Lin, F.*: Reengineering the Order Fulfillment Process in Supply Chain Networks: A Multiagent Information Systems Approach. Ph. D. Thesis, University of Illinois at Urbana-Champaign.
- [Maes94] *Maes, P.*: Modeling Adaptive Autonomous Agents. In: Artificial Life Journal 1 und 2, S. 135–162.
- [Mert95] *Mertens, P.*: Supply Chain Management (SCM). In: WIRTSCHAFTSINFORMATIK 37 (1995) 2, S. 177–179.
- [Nwan96] *Nwana, H.S.*: Software Agents: An Overview. In: Knowledge Engineering Review, 11 (1996) 3, S. 1–40, <http://agents.umbc.edu/introduction/ao>.
- [Pan et al. 89] *Pan, J.Y.C.; Tanenbaum, J.M.; Glicksman, J.*: A Framework for Knowledge-Based Computer Integrated Manufacturing. In: IEEE Transactions on Semiconductor Manufacturing 2 (1989) 2, S. 87–100.
- [PaEd98] *Papaioannou, T.; Edwards, J.*: Mobile Agent technology Enabling the Virtual Enterprise: a Pattern for Database Query. In: Working Notes of the Agent-Based Manufacturing Workshop, Minneapolis, MN 1998.
- [PaEd00] *Papaioannou, T.; Edwards, J.*: Manufacturing Systems Integration and Agility: Can Mobile Agents Help? <http://luckyspc.lboro.ac.uk/Docs/index.html>, Abruf am 07-08-00.
- [Paru98a] *Parunak, H.V.D.*: What can Agents do in Industry, and Why? An Overview of Industrially-Oriented R&D at CEC. In: *Klusck; Weiss (Hrsg.)*: Cooperative Information Agents II, Lecture Notes in Artificial Intelligence 1435 (1998), S. 1–18.
- [Paru98b] *Parunak, H.V.D.*: The DASch Experience: How to model a Supply Chain. <http://www.irim.org/~vparunak/papers.htm>, 1998, Abruf am 2000-07-18.
- [Paru99a] *Parunak, H.V.D.*: Agents in Overalls: Experiences and Issues in the Development and Deployment of Industrial Agent-Based Systems, 1999. <http://www.irim.org/~vparunak/papers.html>, Abruf am 2000-07-18.
- [Paru99b] *Parunak, H.V.D.*: DASch: Dynamic Analysis of Supply Chain, 1999. <http://www.irim.org/~vparunak/papers.htm>, Abruf am 2000-07-18.
- [Paru et al. 98a] *Parunak, H.V.D.; Baker, A.D.; Clark, S.J.*: The AARIA Agent Architecture:

- From Manufacturing Requirements to Agent-Based System Design. The original version of this paper was presented at the Workshop on Agent-Based Manufacturing, ICAA'98, Minneapolis, MN, 10 May 1998. <http://www.erim.org/~vparunak/papers.htm>, 1998, Abruf am 2000-07-18.
- [Paru et al. 98b] *Parunak, H.V.D.; Savit, R.; Riolo, R.L.*: Agent-Based Modeling vs. Equation-Based Modeling: A Case Study and Users' Guide, 1998. <http://www.erim.org/cec/publications.html>, Abruf am 2000-05-19.
- [Pete00] *Peters, R.*: Elektronische Märkte und automatisierte Verhandlungen. In: WIRTSCHAFTSINFORMATIK 42 (2000) 5, S. 413–421.
- [Robo et al. 91] *Roboam, M.; Sycara, K.; Fox, M.S.*: Organization modeling as a platform for multi-agent manufacturing systems. In: Proceedings of Computer Applications in Production and Engineering. Bordeaux, France 1991.
- [RuVi99] *Ruß, C.; Vierke, G.*: The Matrix Auction: A Mechanism for the Market-Based Coordination of Enterprise Networks. Research Report. Deutsches Forschungszentrum für Künstliche Intelligenz. 1999.
- [Sade94] *Sadeh, N.*: Micro-opportunistic Scheduling: The MICRO-BOSS Factory Scheduler. Technical Report. The Robotics Institute. Carnegie Mellon University 1994.
- [Sade et al. 99] *Sadeh-Konieczpol, N.; Hildum, D.; Kjenstad, D.; Tseng, A.*: MASCO: An Agent-Based Architecture for Coordinated Mixed-Initiative Supply Chain Planning and Scheduling. In: Workshop notes, Agent-Based Decision Support for Managing the Internet-Enabled Supply Chain, Third International Conference on Autonomous Agents (Agents '99), May 1999.
- [SaPa99] *Sauter, J.A.; Parunak, H.V.D.*: ANTS in the Supply Chain. Presented at the Workshop on Agent based Decision Support for Managing the Internet-Enabled Supply Chain, Agents 99, Seattle, WA, 1 May 1999. <http://www.erim.org/~vparunak/papers.html>
- [ScBo99] *Scheer, A.-W.; Borowsky, R.*: Supply Chain Management: Die Antwort auf neue Logistikanforderungen. In: *Kopfer, H.; Bierwirth, C. (Hrsg.)*: Logistik Management: intelligente I + K Technologien. Springer-Verlag, Berlin et al. 1999, S. 3–14.
- [Schu et al. 96] *Schuh, G.; Weber, H.; Kajüter, P.*: Logistikmanagement – Strategische Wettbewerbsvorteile durch Logistik. Schäffer-Poeschel, Stuttgart 1996.
- [Schü97] *Schütte, R.*: Supply Chain Management. In: *P. Mertens et al. (Hrsg.)*: Lexikon der Wirtschaftsinformatik. 3. Auflage. Springer-Verlag, Berlin et al. 1997, S. 389–390.
- [Shen et al. 99] *Shen, W.; Norrie, D.H.; Kremer, R.*: Developing Intelligent Manufacturing Systems Using Collaborative Agents. In: Proceedings of the 2nd International Workshop on Intelligent Manufacturing Systems, Leuven, Belgium, S. 157–166, September 22–24, 1999.
- [ShNo98a] *Shen, W.; Norrie, D.H.*: An Agent-Based Approach for Manufacturing Enterprise Integration and Supply Chain Management. In: *Jacucci, G. et al. (Hrsg.)*: Globalization of Manufacturing in the Digital Communications Era of the 21st Century: Innovation, Agility, and Virtual Enterprise. Kluwer Academic Publisher, 1998, S. 579–590.
- [ShNo98b] *Shen, W.; Norrie, D.H.*: A Hybrid Agent-Oriented Infrastructure for Modeling Manufacturing Enterprises. In: Proceedings of KAW'98, Banff, Canada, 1998, Agent-5, S. 1–19.
- [Smit80] *Smith, R.G.*: The Contract Net Protocol: High-Level Communication and Control in a Distributed Problem Solver. In: IEEE Transactions on Computers, C-29 (12), S. 1104–1113.
- [Smit89] *Smith, S.F.*: The OPIS Framework for Modelling Manufacturing Systems. Technical Report. The Robotics Institute. Carnegie Mellon University 1989.
- [Stra et al. 98] *Strader, T. J.; Lin, F.-R.; Shaw, M. J.*: Simulation of Order Fulfillment in Divergent Assembly Supply Chains. In: Journal of Artificial Societies and Social Simulation 1 (1998) 2.
- [Swam et al. 95] *Swaminathan, J.M.; Sadeh, N.M.; Smith, S.F.*: Information Exchange in Supply Chains. Technical Report. The Robotics Institute. Carnegie Mellon University 1995.
- [Swam et al. 98] *Swaminathan, J.M.; Smith, S.F.; Sadeh, N.M.*: Modeling Supply Chain Dynamics: A Multi-Agent Approach. In: Decision Sciences 29 (1998) 3.
- [Syca et al. 96] *Sycara, K.; Decker, K.; Pannu, A.; Williamson, M.; Zeng, D.*: Distributed Intelligence Agents. In: IEEE Expert, Dezember 1996.
- [Szir et al. 99] *Szirik, N.B.; Hammer, D.K.; Goossenaerts, J.B.M.; Aerts, A.T.M.*: Mobile Agent Support for Tracking Products in Virtual Enterprises. In: The working papers of the Workshop on Agent-Based Decision-Support for Managing the Internet Enabled Supply-Chain, AGENTS'99 Conference, Seattle, S. 93–100.
- [Szir et al. 00] *Szirik, N. B.; Wortmann, J.C.; Hammer, D.K.; Goossenaerts, J.B.M.; Aerts, A.T.M.*: Mediating Negotiations in a Virtual Enterprise via Mobile Agents, AIWoRC'2000: Mobile Technologies and Virtual Enterprises, Buffalo, April 2000.
- [Teig97] *Teigen, R.*: Information Flow in a Supply Chain Management System. <http://www.eil.utoronto.ca/profiles/rune/dip-thesis.html>, Abruf am 1999-07-14.
- [Vahr99] *Vahrenkamp, R.*: Supply Chain Management. In: *Webe, J.; Baumgarten, H. (Hrsg.)*: Handbuch Logistik. Schäffer-Poeschel, Stuttgart 1999, S. 308–321.
- [WoJe95] *Wooldridge, M.; Jennings, N.R.*: Intelligent Agents: Theory and Practice. In: Knowledge Engineering Review 10 (1995) 2, S. 115–152.
- [ZeLe95] *Zelewski, S.*: Multi-Agenten-Systeme zur Koordination von Produktionsprozessen. In: *Scheer, A.-W. (Hrsg.)*: 16. Saarbrücker Arbeitstagung, 1995, S. 123–150.
- [ZeSy98] *Zeng, D.; Sycara, K.*: Agent-Facilitated Real-Time Flexible Supply Chain Structuring. http://www.ri.cmu.edu/pubs/pub_3229.html, Abruf am 2000-05-03.

