

---

## Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	3
2	Design eines EM zur Mehr-Depot Tourenplanung	5
3	Implementation und Tests	12
4	Zusammenfassung und Ausblick	16
	Literatur	18



## 1 Einleitung

veränderte  
Markt-  
bedingungen

Die stärkere Globalisierung von Märkten sowie dynamische Umweltbedingungen, die im Business-to-Consumer Bereich durch sich rasch ändernde Kundenbedürfnisse auftreten, stellen neue Anforderungen an die Prozesse eines Unternehmens. Neben einer höheren Reaktionsfähigkeit und stärkeren Flexibilität ist auch ein robusteres Verhalten der Planungsprozesse nötig, um den geänderten Marktbedingungen gerecht zu werden.

interne  
Elektronische  
Märkte

Marktnahe, dezentrale Organisationsstrukturen wie z. B. Profit-Center Konzepte bilden die aufbauorganisatorische Grundlage, um Prozesse mit diesen Eigenschaften zu implementieren bzw. zu reorganisieren<sup>1</sup>. Einen Schritt weiter gehen innerbetriebliche Elektronische Märkte (EM), welche die Allokation der bei den Organisationseinheiten verteilt vorliegenden Ressourcen unterstützen<sup>2</sup>. Dabei sind die eingehenden Kundenaufträge den Organisationseinheiten als Marktteilnehmern so zuzuordnen, daß aus Gesamtunternehmenssicht eine effiziente Allokation aller Ressourcen erreicht wird. Die Bewertung und Einplanung eines Auftrags erfolgt für jeden einzelnen Marktteilnehmer lokal, ohne Informationen über Pläne und Ressourcen anderer Marktteilnehmer einzuholen. Die so erstellten Pläne werden schließlich über einen marktlichen Mechanismus koordiniert. Den höchsten Automatisierungsgrad erreichen solche EM, in denen Softwareagenten stellvertretend für die Organisationseinheiten auftreten und Aktionen durchführen. Derartige Multi-Agenten-Systeme (MAS) erhöhen die Reaktionsfähigkeit der Planungsprozesse, und die Transaktionskosten des Marktes werden gesenkt.

EM zur  
Tourenplanung

Im betrieblichen Bereich der Transportplanung werden diese Veränderungen durch die Forderung nach neuen Konzepten zur Tourenplanung deutlich. Herkömmliche zentrale Planungsverfahren aus dem Operations Research (OR) stehen vor der Schwierigkeit, alle verteilt vorliegenden, planungsrelevanten Informationen zu erfassen und an eine zentrale Instanz zu übertragen. Dies ist oftmals in dem kurzen Planungszeitraum nicht möglich. Weiterhin widersprechen solche Planungsprozesse der Idee einer dezentralen Organisationsstruktur. Innerbetriebliche EM zeichnen sich hingegen da-

---

<sup>1</sup> Vgl. z. B. Krüger (1994)

<sup>2</sup> Vgl. z. B. Zelewski (1997)

durch aus, daß die Planung dezentral erfolgt und keine Datenerfassung und -übertragung notwendig ist, sodaß anreizkomform das dezentrale Organisationskonzept auch in Planungsprozessen beibehalten wird.

Design- entscheidungen	Vor dem Hintergrund der Zielsetzungen (1) hohe Lösungsqualität und (2) kurze Rechenzeit sind bei dem Design solcher EM grundsätzlich zwei Fragen zu beantworten: (i) Welche marktlichen Koordinationsmechanismen kommen zum Einsatz bzw. werden kombiniert? (ii) Mit welcher lokalen Problemlösungsfähigkeit sind die Softwareagenten auszustatten?
Problemklasse	Als Szenario zur Analyse dieser Fragestellungen wird auf eine Problemklasse aus dem OR zurückgegriffen. Beim Multi-Depot Vehicle Routing Problem (MDVRP) handelt es sich um ein statisches Mehr-Depot Tourenplanungsproblem ohne zeitliche Restriktionen. Für diese Problemklasse wurde durch Tests mit standardisierten Datensätzen bereits gezeigt, daß die Lösungsqualität eines EM an die von zentralen Verfahren aus dem OR heranreichen kann <sup>3</sup> .
Methodik	Gegenstand dieser Arbeit ist es, Tests mit unterschiedlichen Konfigurationen eines prototypisch implementierten Multi-Agenten-Systems (MAS) als EM durchzuführen und zu analysieren, welche Auswirkungen eine unterschiedliche Problemlösungsfähigkeit der Agenten und der Einsatz verschiedener Koordinationsmechanismen auf die Lösungsqualität und Rechenzeit hat, um daraus wieder Rückschlüsse für Szenarien der Realwelt ziehen zu können.
Aufbau der Arbeit	Kapitel 2 beschreibt zunächst die Modellierung eines EM zur Mehr-Depot Tourenplanung und zeigt auf, welche Designentscheidungen zu treffen sind. Aufbauend darauf werden in Kapitel 3 Tests mit verschiedenen Konfigurationen des MAS durchgeführt und die Resultate analysiert. Kapitel 4 faßt schließlich die Ergebnisse der Untersuchung zusammen und gibt einen Ausblick auf weitere Forschungsbemühungen.

---

<sup>3</sup> Vgl. Weinhardt/Schmalz (1999)

## 2 Design eines EM zur Mehr-Depot Tourenplanung

### Szenario

Als Szenario einer Mehr-Depot Tourenplanung wird die Problemklasse MDVRP aus dem OR herangezogen<sup>4</sup>. Dabei handelt es sich um ein Mehr-Depot Auslieferungsproblem, das sich dadurch auszeichnet, daß homogene und nicht teilbare Güter an Kunden mit bekannten Standorten und Nachfragemengen geliefert werden. Die an den Depots stationierten Fahrzeuge unterliegen Kapazitäts- und Weglängenrestriktionen. Weiterhin müssen die Fahrzeuge nach dem Ende einer Tour wieder zu dem Depot zurückkehren, von dem sie gestartet sind. Als zusätzliche Restriktion kommt hinzu, daß Kunden nicht von mehreren Fahrzeugen beliefert werden können, d. h. Kundenaufträge sind nicht teilbar. Das Ziel besteht nun darin, alle Kunden zu bedienen und die Gesamtdistanz sowie die Anzahl der eingesetzten Fahrzeuge zu minimieren. Das MDVRP gehört der Komplexitätsklasse NP-vollständig an. Deshalb werden zur Lösung meist heuristische Verfahren verwendet.

### Modellierung

Zur Modellierung eines solchen Szenarios als EM/MAS bieten sich zwei Alternativen an, die sich an den identifizierbaren Organisationseinheiten orientieren. Zum einen ist es möglich, die Fahrzeuge als Marktteilnehmer aufzufassen, die um Kundenaufträge konkurrieren, und dadurch eine sehr feine Körnung des EM/MAS zu wählen. Für die einzelnen Agenten reduziert sich die Planungsaufgabe dann auf die Lösung eines Traveling Salesman Problems (TSP)<sup>5</sup>. Dabei ist für die Fahrzeuge die Reihenfolge, in der die Kunden angefahren werden, so festzulegen, daß sich die zurückgelegte Distanz minimiert. Der Kommunikations- und Koordinationsaufwand zwischen den Agenten ist durch die hohe Anzahl der Marktteilnehmer sehr groß. Die andere Alternative besteht darin, eine grobe Körnung zu wählen und die Depots als Agenten zu modellieren. Jedem Depot bzw. jedem Agent stellt sich dann die Aufgabe, ein Vehicle Routing Problem (VRP) zu lösen<sup>6</sup>. Das VRP unterscheidet sich vom MDVRP nur dadurch, daß lediglich von einem Depot ausgeliefert wird. Die restlichen Eigenschaften der Problemklassen sind gleich. Der Kommunikations- und Koordinationsaufwand ist hierbei weitaus geringer als bei der ersten Alternative. In der betrieblichen Praxis überwiegt der Fall, in dem Depots, aufgrund der raum- bzw. regionenbezoge-

---

Problemlösungsprozeß

ngsbeispiele für das MDVRP werden z. B. in Golden/Wasil (1987) oder Pooley (1994) behandelt.  
<sup>4</sup>Fulkerson/Johnson (1954)  
<sup>6</sup>Ramser (1960)

nen Verteilungsstruktur, als Profit-Center organisiert sind und eine Planung für die zur Verfügung stehenden Fahrzeuge durchführen. Deshalb werden in dieser Arbeit die Depots als Marktteilnehmer bzw. Agenten modelliert. Zusätzlich wird eine zentrale Instanz, der Auktionsagent, eingeführt.

Der Problemlösungsprozeß gliedert sich dann in 2 Phasen:

- (1) Der Auktionsagent verwaltet die komplette Auftragsmenge und verauktioniert einzeln und sequentiell alle Aufträge. Die Depotagenten berechnen die zusätzliche Distanz, die durch diesen einen Auftrag verursacht wurde, und geben dies als Gebot an den Auktionsagenten. Den Zuschlag erhält der Depotagent mit dem geringsten Gebot <sup>7</sup>. Hat der Auktionsagent alle Aufträge versteigert, ist eine sogenannte *Initiallösung* erzeugt.
- (2) Aus globaler Sicht ist die Zuordnung eines einzelnen Auftrages zu einem der Depotagenten jeweils optimal. Für die Sequenz dieser Auktionen ist jedoch keineswegs Pareto-Optimalität gewährleistet. Deshalb findet in Phase (2) eine *Reallokation* statt, indem es den Depotagenten ermöglicht wird, Aufträge „Weiterzuverkaufen“ oder „Auszutauschen“, um die Lösungsqualität weiter zu erhöhen (siehe Abbildung 1)<sup>8,9</sup>. Als Abbruchkriterium wird ein Zeitlimit festgelegt oder es wird ein lokales Optimum erreicht.

---

<sup>7</sup> Diese Auktion wird auch als Höchstpreisauktion bezeichnet. Bei Problemstellungen in denen strategisches Verhalten der Agenten vermieden werden soll, kann die Vickrey Auktion verwendet werden (vgl. Weinhardt/Gomber (1996)).

<sup>8</sup> Im OR spricht man von inter-route Verbesserungsverfahren (vgl. Osman (1993) oder Thangiah (1996) für den Ein-Depot Fall bzw. Renaud/Laporte/Boctor (1996) für den Mehr-Depot Fall).

<sup>9</sup> In Sandholm (1996) werden ebenfalls einige dieser Koordinationsmechanismen beschrieben.

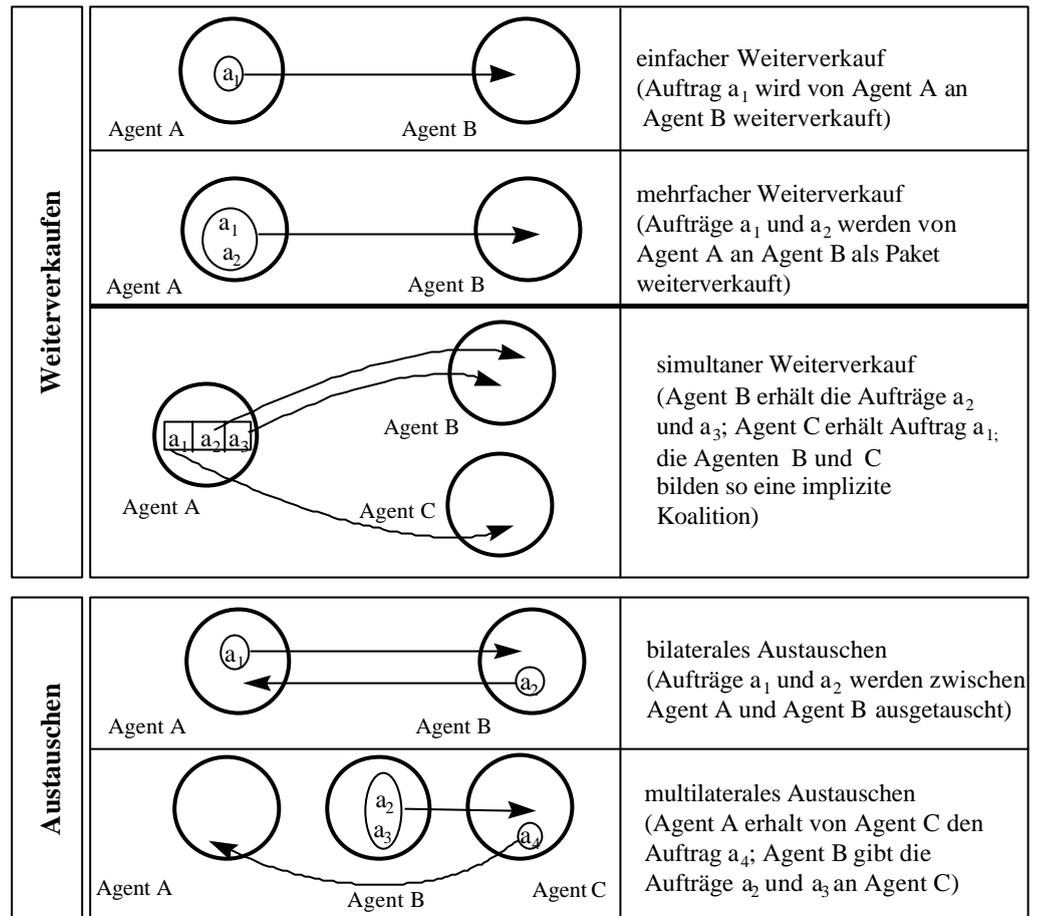


Abbildung 1: Koordinationsmechanismen zur Reallokation

einfacher  
Weiterverkauf

Im einfachsten Fall wird ein Weiterverkauf mit einem Auftrag durchgeführt. Dazu wählt ein Depotagent einen Auftrag aus seinem Auftragsbestand aus und bietet ihn anderen Depotagenten an. Diese geben ein Gebot ab und der Bieter mit der geringsten Distanz erhält den Zuschlag - jedoch nur, wenn sich die Gesamtdistanz verringert<sup>10</sup>. Dadurch wird sichergestellt, daß nur Transaktionen zwischen zwei Agenten zustande kommen, die die globale Lösungsqualität verbessern. Hat ein Agent alle in seinem Auftragsbestand befindlichen Aufträge angeboten und keinen Weiterverkauf durchgeführt, kann der nächste Agent einen Weiterverkauf initiieren. Haben alle Agenten des Marktes ihre Aufträge angeboten und konnte kein Auftrag weiterverkauft werden, ist zwar ein Optimum bezüglich des verwendeten Koordinationsmechanismus erreicht; durch den Einsatz weiterer bzw. anderer Koordinationsverfahren können durchaus noch weitere Verbesserungen erzielt werden, d.

<sup>10</sup> Das ursprüngliche Kontraktnetzprotokoll in Smith (1980) berücksichtigt nicht die Grenzkosten der Agenten.

h. um die Lösungsqualität weiter zu steigern, ist es nötig, Varianten des Weiterverkaufs anzuwenden oder Aufträge auszutauschen.

mehrfacher  
Weiterverkauf

Eine Variante besteht darin, die Paketgröße der betrachteten Aufträge zu verändern und zwei bzw. mehrere Aufträge anzubieten. Die Gebote für solche Auftragspakete werden nicht gleich der Summe der Gebote für die Einzelaufträge sein, sodaß sich durch den Weiterverkauf von Auftragspaketen „echte“, weitere (zusätzliche, neue) Transaktionsmöglichkeiten ergeben. Wurden beim einfachen Weiterverkauf alle  $N$  Aufträge angeboten, so ergeben sich beim mehrfachen Weiterverkauf  $K$  Kombinationsmöglichkeiten von anzubietenden Auftragspaketen, wie durch die folgende For-

$$K = (N, n) = \frac{N!}{n!(N-n)!} = \binom{N}{n}$$

mel berechnet werden kann ( $n$  ist die Größe des Auftragspaketes)<sup>11</sup>.

Wie Tabelle 1 zeigt, steigen mit der Anzahl der Aufträge eines Agenten und der Größe der Auftragspakete die Kombinationsmöglichkeiten stark an. Daher ist bei der Wahl der Paketgröße die Anzahl der Aufträge eines Agenten zu berücksichtigen, um bei gegebener Rechenzeit alle Kombinationen von Auftragspaketen anbieten zu können.

	einfacher Weiterverkauf	zweifacher Weiterverkauf	dreifacher Weiterverkauf	vierfacher Weiterverkauf
Anzahl der Aufträge	10	45	120	210
50	50	1225	19600	230300
100	100	4950	161700	3921225

Tabelle 1: Kombinationsmöglichkeiten der Auftragspakete

simultaner  
Weiterverkauf

Eine andere Variante des Weiterverkaufs ergibt sich dadurch, daß auch multilaterale Transaktionen ermöglicht werden, d. h. die Übernahme von Auftragspaketen kann durch implizit entstehende Koalitionen erfolgen: Hierbei werden von allen Teilnehmern - wie beim mehrfachen Weiterverkauf - Auftragspakete angeboten. Jedoch ist es den Bietern möglich, simultan für alle Auftragskombinationen ein Gebot abzugeben<sup>12</sup>. Dazu erstellt der Agent, der den Me-

<sup>11</sup> Es entsteht das kombinatorische Problem Kombination ohne Wiederholung.

<sup>12</sup> Der in Varian (1995) und Gomber/Schmidt/Weinhardt (1997) jeweils vorgestellte Mechanismus berücksichtigt nicht die Reallokation von Gütern bzw. Aufträgen sondern die nur „Erstallokation“.

chanismus initiiert hat, eine Matrix, die in den Spalten die Auftragskombinationen und in den Zeilen die Bieter enthält<sup>13</sup>. Die Zellen der Matrix werden dann mit den Geboten der anderen Agenten gefüllt. Den Zuschlag erhalten der oder die Agenten, bei denen sich die größte Reduktion der Gesamtdistanz ergibt bzw. es erfolgt kein Zuschlag. Durch die Möglichkeit, Aufträge bzw. Auftragskombinationen des Auftragspaketes an verschiedene Agenten weiterzuverkaufen, bietet dieser Mechanismus ein größeres Potential, erfolgreiche Transaktionen durchzuführen als der mehrfache Weiterverkauf. Allerdings steigt die Komplexität im Vergleich zu den o. g. Weiterverkaufsvarianten stark an, da bei einem Auftragspaket mit  $n$  Aufträgen jeder Bieter  $2^n - 1$  Gebote abgeben muß; das zu lösende Zuordnungsproblem ist im Koordinationsmechanismus NP-schwer<sup>14</sup>.

bilaterales und  
multilaterales  
Austauschen

Während bei den Varianten des Weiterverkaufs immer ein oder mehrere Aufträge eines Agenten angeboten wurden, werden beim Austauschen mindestens zwei Aufträge unterschiedlicher Agenten betrachtet. Beim bilateralen Austauschen nehmen zwei Agenten jeweils *einen* Auftrag aus ihrem Auftragsbestand und planen den Auftrag des anderen Agenten ein. Der Austausch kommt dann zustande, wenn sich die Gesamtdistanz verringert. Multilaterales Austauschen erweitert diesen Koordinationsmechanismus um die Möglichkeit, daß mehrere Agenten an einem Austausch teilnehmen<sup>15</sup>. Weiterverkaufen und Austauschen unterscheiden sich dahingehend, daß bei einem Weiterverkaufen alle Agenten des MAS involviert sind und deshalb zu einem Zeitpunkt nur ein Weiterverkauf durchgeführt wird<sup>16</sup>. Bei einem Austauschen von Aufträgen sind hingegen nur zwei bzw. eine Teilmenge aller Agenten beteiligt. Deshalb ist es nötig, mehrere disjunkte Teilmengen von Agenten zu bilden, die Aufträge untereinander austauschen. Dieser Planungsschritt vor dem Austauschen erfordert jedoch eine zusätzliche Koordination der Agenten, die nicht in dieser Arbeit untersucht wird. Hier können räumliche Daten über die Lage der Touren und eine Bildung von Depot-Clustern weiterhelfen.

dezentrale  
Koordination

Die vorgestellten Koordinationsmechanismen zur Reallokation zeichnen sich alle dadurch aus, daß sie völlig dezentral ablaufen

<sup>13</sup> Gember/Schmidt/Weinhardt (1997) bezeichnen den Koordinationsmechanismus als Matrix Auction.

<sup>14</sup> Vgl. Schmidt (1999), S. 80; eine Preisfestsetzung mit der Generalized Vickrey Auction oder dem Pricing per Column ist hier wegen dem Fehlen von Anreizproblemen nicht notwendig. Der in Varian (1995) und Gember/Schmidt/Weinhardt (1997) jeweils vorgestellte Mechanismus muß im simultanen Weiterverkauf mehrfach angewendet werden.

<sup>15</sup> In Thompson/Psarafitis (1993) werden mehrere Aufträge simultan zwischen mehreren Touren eines Depots zyklisch verschoben um die Distanz zu reduzieren.

<sup>16</sup> Mehrere parallele Weiterverkäufe erfordern bei der Gebotsabgabe für einen Weiterverkauf Annahmen der Agenten, ob sie Zuschläge bei anderen noch nicht beendeten Weiterverkäufen erhalten und werden in dieser Arbeit nicht untersucht.

und keine zentrale Instanz, wie z. B. einen Auktionator, erfordern. Jeder Agent kann die Mechanismen initiieren bzw. darauf reagieren. Dadurch können die Planungsprozesse in der Phase (2) auch dann noch weitergeführt werden, wenn ein Agent ausfällt<sup>17</sup>.

Meta-  
Koordination

In der Phase der Reallokation stellt sich bei der Existenz mehrerer Koordinationsmechanismen die Frage, wie die Koordinationsmechanismen miteinander kombiniert werden bzw. welcher Meta-Koordinationsmechanismus vorteilhaft angewendet wird. Jeder der vorgestellten Koordinationsmechanismen erzeugt ein lokales Optimum. Der Wechsel des Mechanismus kann daher vor bzw. nach dem Erreichen des jeweiligen Optimums erfolgen. Beim Wechsel selbst kann ein bereits verwendeter oder ein noch nicht verwendeter Mechanismus zum Einsatz kommen. Die Auswahl kann stochastisch bzw. deterministisch erfolgen. Abbildung 2 zeigt ein Beispiel für solch ein Entscheidungsproblem. Nach dem Erreichen der Initiallösung wurde der einfache Weiterverkauf gewählt. Ist das lokale Optimum noch nicht erreicht, können der einfache Weiterverkauf oder weitere Mechanismen eingesetzt werden. Ist ein lokales Optimum erreicht, können alle Mechanismen außer dem einfachen Weiterverkauf verwendet werden. Es bleibt offen, nach welchen Kriterien die Mechanismen auszuwählen und zu kombinieren sind. Diese Frage wird in Kapitel 3 behandelt.

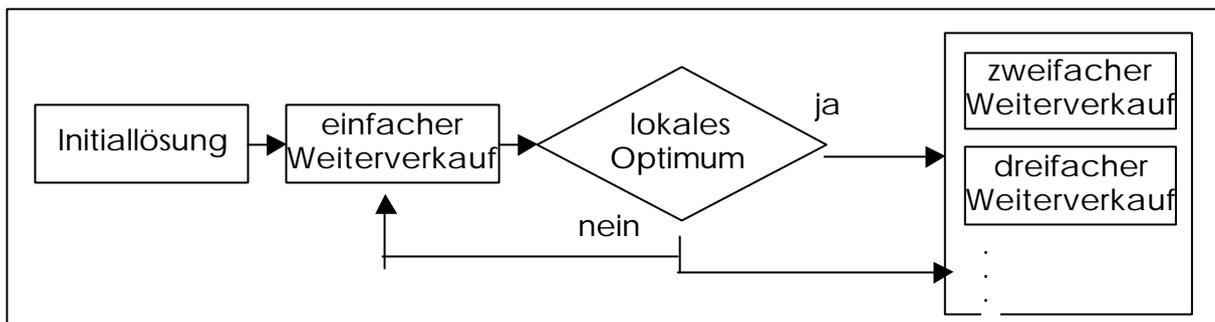


Abbildung 2: Wahl des Meta-Koordinationsmechanismus

lokale  
Problemlösungs-  
fähigkeit

Neben der Gestaltung des Problemlösungsprozesses mit verschiedenen Koordinationsmechanismen ist weiterhin zu klären, mit welchen lokalen Lösungsverfahren die Agenten arbeiten sollen. Das OR stellt für das VRP eine große Anzahl von Verfahren bereit, die sich bezüglich Lösungsqualität und benötigter Rechenzeit stark unterscheiden. Im Rahmen dieser Arbeit werden folgende drei heuristische Verfahren als lokale Problemlöser verwendet, in Kapitel 3 getestet und vergleichend analysiert:

<sup>17</sup> Eine zentrale Instanz benötigt die Simulated Trading Heuristik, bei der zur Reallokation mehrere Austauschvorgänge simultan durchgeführt werden (vgl. Bachem/Hochstättler/Malich (1993)).

- Cheapest-Insertion-Verfahren: Hierbei handelt es sich um ein sehr einfaches und schnelles Verfahren, bei dem lediglich die kostengünstigste Einfügealternative für jeden neuen Auftrag gesucht wird<sup>18</sup>. Da die bereits eingeplanten Aufträge ihre Positionen in den Routen nicht mehr verändern, ist die Rechenzeit sehr kurz, jedoch ist die Lösungsqualität des Verfahrens nicht sehr hoch, d.h. der Algorithmus findet nicht zwingend die Lösungen mit den kürzesten Touren für das Depot.
- Savings-Verfahren: Das Verfahren von Clarke und Wright zählt zu den Konstruktionsverfahren und bildet Touren und Routen parallel zueinander<sup>19</sup>. Dazu werden zunächst für N Kunden N Pendeltouren gebildet. Anschließend werden jeweils zwei Touren derart zusammengefaßt, daß sich eine maximale Reduktion der Gesamtdistanz ergibt und keine Nebenbedingung verletzt wird. Das Verfahren ist beendet, wenn keine Touren mehr zusammengefaßt werden können. Durch die jeweilige Revision des gesamten Tourenplans ist die Leistungsfähigkeit höher als die des Cheapest-Insertion-Verfahrens.
- Sweep-Verfahren: Bei dem Verfahren von Gillet und Miller werden zunächst Touren gebildet<sup>20</sup>. Anschließend werden für die Touren die Reihenfolgen festgelegt, in der die Kunden anzu-fahren sind. Das Bilden der Touren erfolgt, indem die Kunden nach aufsteigenden Polarwinkeln in einer Liste geordnet werden. Beginnend mit dem ersten Element der Liste, werden die nächsten Kunden solange einer Tour zugeordnet, bis gegen die Kapazitäts- oder Weglängenrestriktion verstoßen wird. Anschließend werden die Touren mit dem 2-opt Verfahren verbessert<sup>21</sup>. Im nächsten Schritt wird mit dem zweiten Kunden der Liste begonnen, die Touren zu bilden. Dies wird solange fortgesetzt, bis der letzte Kunde der Liste erreicht ist und N Tourenpläne entstanden sind. Der Tourenplan mit der geringsten Distanz wird als Ergebnis ausgewählt. Durch die Erzeugung von N verschiedenen Tourenplänen wird die Lösungsqualität im Durchschnitt höher sein als die des Savings-Verfahrens<sup>22</sup>.

---

<sup>18</sup> Vgl. Golden/Stewart (1985)

<sup>19</sup> Vgl. Clarke/Wright (1964)

<sup>20</sup> Vgl. Gillet/Miller (1974)

<sup>21</sup> vgl. Lin/Kernighan (1973)

<sup>22</sup> Vgl. z. B. Wendt (1994), S.180

### 3 Implementation und Tests

Agenten-  
architektur  
ADAMKO

Als informationstechnische Infrastruktur zur Implementation des MAS/EM und anschließender Durchführung von Tests wird die Agentenarchitektur ADAMKO verwendet<sup>23</sup>. ADAMKO steht für Agentenarchitektur mit domänenunabhängigem, adaptiven, multiplen Koordinationsverhalten und soll:

- die Nutzung und Integration verschiedener Koordinationmechanismen ermöglichen,
- in unterschiedlichen betrieblichen Domänen eingesetzt werden können und
- eine Verbesserung des Koordinationsverhaltens durch einen Lernprozeß erreichen.

Abbildung 3 zeigt den modularen Aufbau von ADAMKO-Agenten und die verwendeten Protokolle. Als Koordinationsmechanismen sind der einfache, zweifache und dreifache Weiterverkauf im Modul *Coordination Machine* implementiert. Das Modul *Problem Solver* wird mit den drei oben beschriebenen Verfahren zur Lösung eines VRP ausgestattet. Damit ist es den Agenten möglich, an verschiedenen Koordinationsmechanismen teilzunehmen und Aufträge lokal zu bewerten sowie einzuplanen.

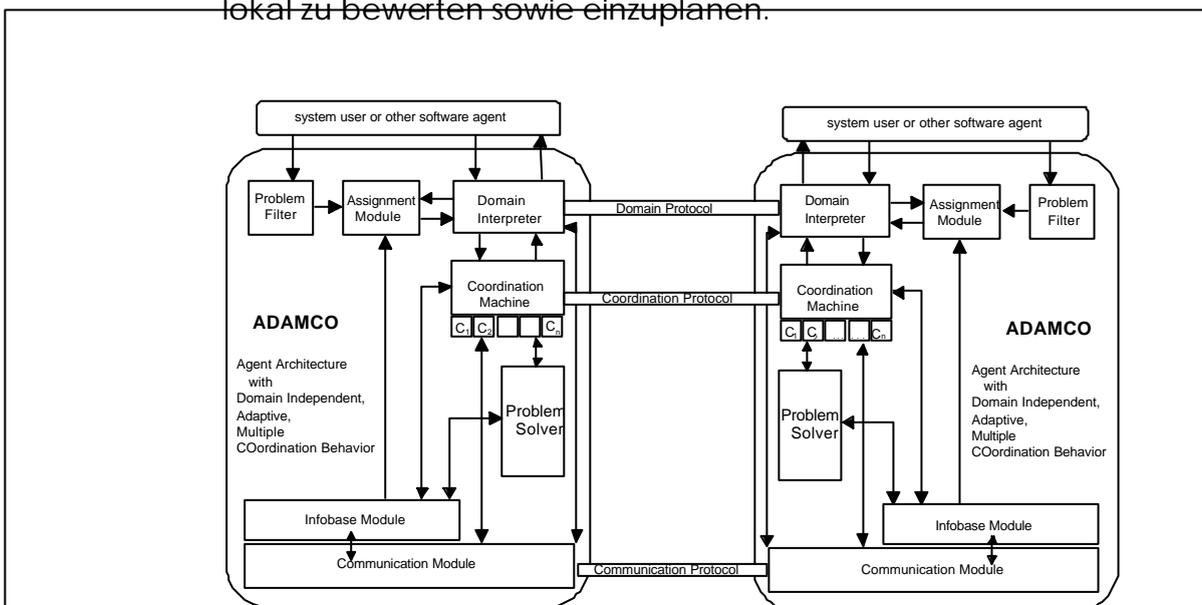
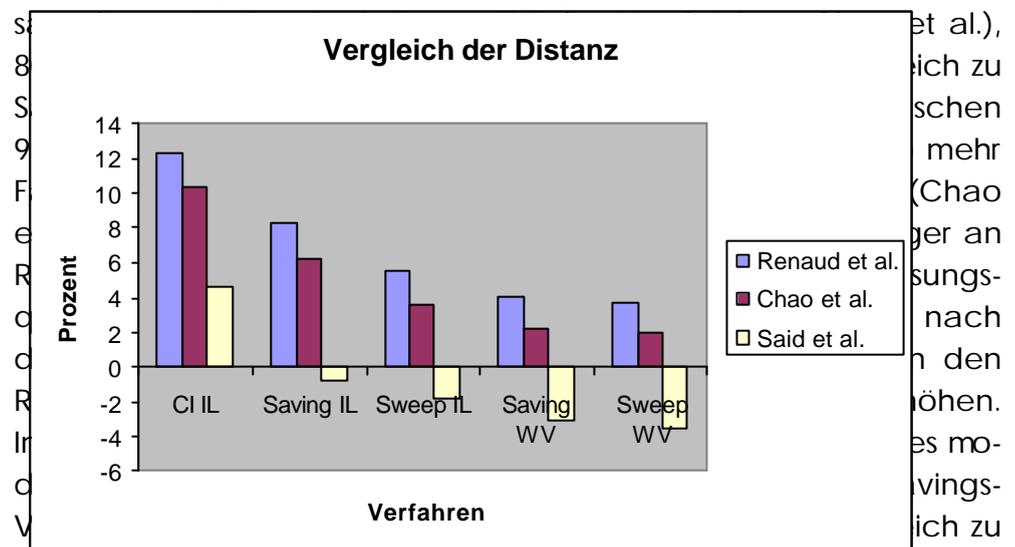


Abbildung 3: Module und Protokolle der Agentenarchitektur ADAMKO

<sup>23</sup> vgl. Lohmann/Schmalz/Weinhardt (1997) oder Lohmann (1998)

Tests und  
Vergleiche

In einem ersten Schritt wird nun untersucht, wie sich der Einsatz bezüglich der Lösungsqualität besserer lokaler Verfahren auf die Lösungsqualität des gesamten MAS/EM auswirkt. Dazu werden 23 standardisierte Datensätze aus der Literatur verwendet<sup>24</sup>. Die Ergebnisse werden mit denen dreier zentraler Verfahren aus dem OR verglichen. Dabei handelt es sich zum einen um die Verfahren von Chao, Golden, Wasil<sup>25</sup> und Renaud, Laporte, Boctor<sup>26</sup>. Diese Verfahren minimieren die Gesamtdistanz aller eingesetzten Fahrzeuge. Zum anderen wird, mit dem Verfahren von Said, Thangiah und Rahman<sup>27</sup>, ein Verfahren als Referenz herangezogen, das zunächst die Anzahl der eingesetzten Fahrzeuge und anschließend die Gesamtdistanz minimiert. Das Cheapest-Insertion Verfahren liefert als lokales Problemlösungsverfahren Initiallösungen, die bezüglich der Ge-



den zentralen Verfahren abgetragen. Verglichen wurden neben der Initiallösung (IL) auch eine Lösung nach anschließendem einfachen Weiterverkauf (WV).

<sup>24</sup> Vgl. z. B. Chao/Golden/Wasil (1993) oder <http://www.sru.edu/depts/cisba/compsci/thangiah/CODE/MDVRP>

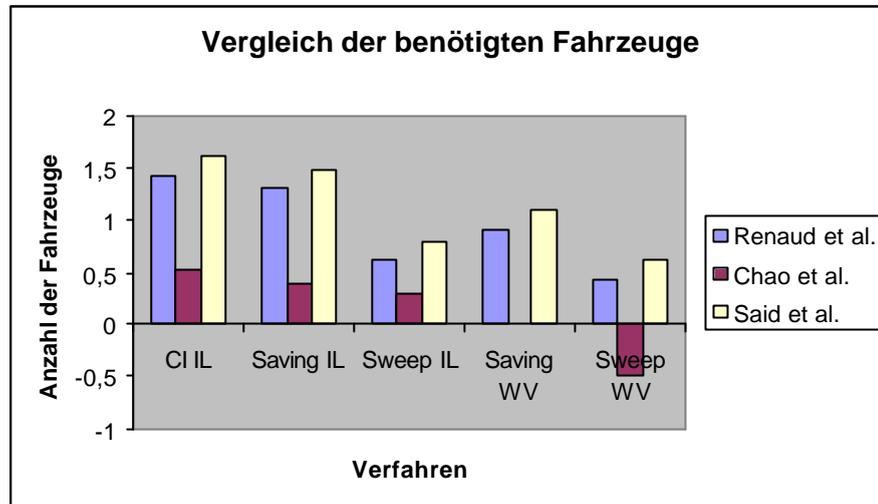
<sup>25</sup> Vgl. Chao/Golden/Wasil (1993)

<sup>26</sup> Vgl. Renaud/Laporte/Boctor (1996)

<sup>27</sup> Vgl. Said/Thangiah/Rahman (1997)

Diagramm 1: Vergleich der Distanz mit zentralen Verfahren

Die Ergebnisse bezüglich der benötigten Fahrzeuge sind in Dia-



gramm 2 abgetragen.

Diagramm 2: Vergleich der benötigten Fahrzeuge im Vergleich zu zentralen Verfahren

Analyse der  
Ergebnisse

Bezüglich der hier eingesetzten lokalen Lösungsverfahren läßt sich folgendes feststellen:

- Der Einsatz von komplexeren lokalen Algorithmen, die für Ein-Depot Probleme eine höhere Lösungsqualität liefern, führt auch zu einer höheren globalen Lösungsqualität.
- Die höhere Lösungsqualität führt jedoch bei den hier eingesetzten Verfahren zu einer höheren Rechenzeit (siehe Diagramm 3).

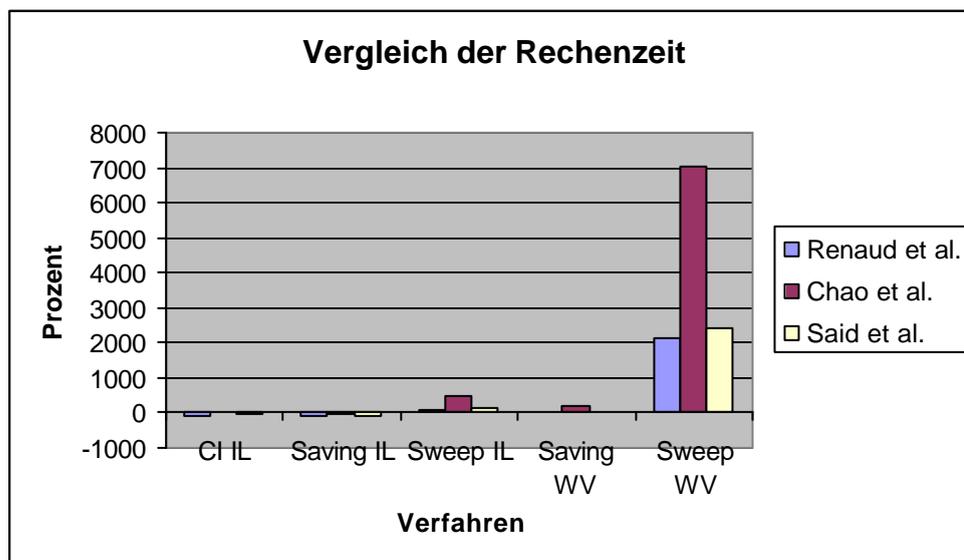


Diagramm 3: Vergleich der Rechenzeit

Bezüglich der verwendeten Koordinationsmechanismen lassen sich folgende Aussagen treffen:

- Eine Zuordnung einzelner Aufträge mit der Höchstpreisauktion führt zu Initiaillösungen, die im Durchschnitt zwischen 5% -12% schlechter sind als die zentraler Verfahren.
- Eine Reallokation durch den Weiterverkauf einzelner Aufträge kann die Initiaillösung weiter verbessern, jedoch wird ein lokales Optimum erreicht.
- Durch den Weiterverkauf von Auftragspaketen (2 oder mehr Aufträge) kann das lokale Optimum wieder verlassen und die Lösungsqualität weiter gesteigert werden.
- Es entsteht deshalb nach dem Erreichen der Initiaillösung und bei einem Wechsel des Koordinationsmechanismus das Entscheidungsproblem „Wahl der Paketgröße“.

Tabelle 2 zeigt am Beispiel von 3 Datensätzen, zu welchen Ergebnissen der einfache, zweifache und dreifache Weiterverkauf nach dem Erreichen der Initiaillösung führt<sup>28</sup>.

PN	KM	D	AF	R	T <sub>v</sub>	T <sub>e</sub>
1	einfacher WV	602,83	12	3,53	91	3
	zweifacher WV	602,92	11	24,54	721	6
	dreifacher WV	619,81	12	150,53	4501	4
2	einfacher WV	501,16	7	3,9	69	1
	zweifacher WV	489,90	7	13,54	391	3
	dreifacher WV	502,7	6	93,49	2789	3
3	einfacher WV	906,28	16	8,13	196	3
	zweifacher WV	907,53	16	117,47	3483	7

Legende: PN – Problemnummer KM – Koordinationsmechanismus  
D – Distanz AF – Anzahl der Fahrzeuge R – Rechenzeit in Minuten  
T<sub>v</sub> – versuchte Transaktionen T<sub>e</sub> – erfolgreiche Transaktionen

**Tabelle 2: Vergleich unterschiedlicher Koordinationsmechanismen**

<sup>28</sup> Hierbei wurde das Savings-Verfahren verwendet.

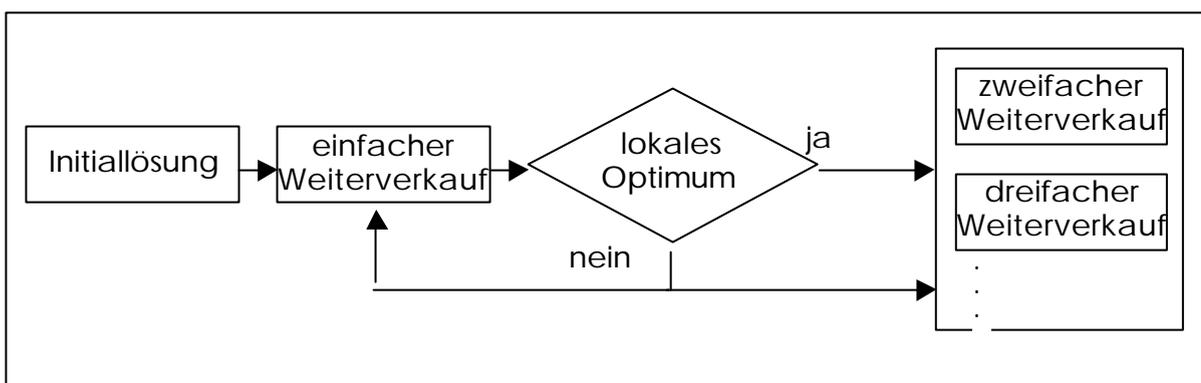
Kombination  
der  
Koordinations-  
mechanismen

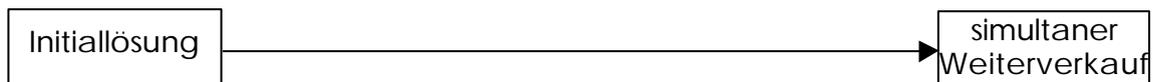
Wie aus der Tabelle zu erkennen ist, steigt die Rechenzeit mit der Größe der Auftragspakete stark an. Auch wird das Verhältnis von erfolgreichen Transaktionen  $T_e$  zu versuchten Transaktionen  $T_v$  immer kleiner. Bezüglich der Lösungsqualität unterscheiden sich die Koordinationsmechanismen jedoch nur geringfügig. Es bleibt daher die Frage offen, in welcher Reihenfolge die Mechanismen zu kombinieren sind. Dieses Reihenfolgeproblem tritt nicht auf, wenn der simultane Weiterverkauf verwendet wird, da auch Teile des Auftragspaketes weiterverkauft werden können und somit der einfache und mehrfache Weiterverkauf enthalten sind. Durch die Möglichkeit einen Zuschlag für mehrere Agenten (implizite Koalition) zu erteilen, werden Transaktionen möglich, die bei einfachem und mehrfachem Weiterverkauf nicht realisiert werden können.

## 4 Zusammenfassung und Ausblick

Zusammen-  
fassung

Wie gezeigt wurde, kann ein EM zur Mehr-Depot Tourenplanung an die Leistungsfähigkeit zentraler Verfahren aus dem OR heranreichen. Das Design eines solchen Marktes betrifft zum einen die lokale Problemlösungsfähigkeit der Agenten, zum anderen die eingesetzten marktlichen Koordinationsmechanismen. In den Tests wurde gezeigt, daß bei den hier eingesetzten lokalen Verfahren ein positiver Zusammenhang zwischen lokaler und globaler Problemlösungsfähigkeit besteht. Auch konnte festgestellt werden, daß der Einsatz *eines* Koordinationsmechanismus nicht ausreichend ist, da ein lokales Optimum nicht wieder verlassen werden kann. Der Einsatz unterschiedlicher Koordinationsmechanismen, die verschiedene Paketgrößen der Aufträge berücksichtigen, führt jedoch zu einem Reihenfolgeproblem, bei dem entschieden werden muß, in welcher Abfolge die Koordinationsmechanismen eingesetzt werden sollen. Bei einem simultaner Weiterverkauf von Aufträgen, entsteht dieses Reihenfolgeproblem nicht (siehe Abbildung 4).





**Abbildung 4: einfacher, mehrfacher vs. simultaner Weiterverkauf**

Ausblick

In weiteren Tests wird zu zeigen sein, zu welcher Lösungsqualität und Rechenzeit der simultane Weiterverkauf führt. Weiterhin sind die Koordinationsmechanismen bi- und multilaterales Austauschen ebenfalls durch Tests zu analysieren. Neben dem Einsatz im Bereich der Tourenplanung können solche Koordinationsmechanismen auch in weiteren Domänen eingesetzt werden, wie Arbeiten aus der Produktionsplanung<sup>29</sup> oder der Allokation von Rechenleistungen in Computernetzwerken<sup>30</sup> zeigen. Besonders im Bereich des Supply Chain Management<sup>31</sup> bietet sich weiteres Potential für derartige EM/MAS, die auch über mehrere Stufen einer Wertschöpfungskette bzw. eines Wertschöpfungsnetzwerkes eingesetzt werden können und somit die Reagibilität solcher Unternehmenskooperationen zu erhöhen.

Durch die Einführung marktlicher Koordinationsmechanismen können so nicht nur im innerbetrieblichen Allokationsprozeß, sondern auch bei überbetrieblichen Kooperationen und Netzwerken – dann spielen Anreizprobleme bei der marktlichen Preisfindung eine essentielle Rolle – Effizienzsteigerungen erreicht werden.

---

<sup>29</sup> Vgl. Schmidt (1999)

<sup>30</sup> Vgl. Lohmann (1998)

<sup>31</sup> Vgl. Scheer/Borowsky (1999)

## Literatur

- Bachem, A.; Hochstättler, W.; Malich, M.:** The Simulated Trading Heuristic for Solving Vehicle Routing Problems. Technical Report 93.139, Mathematisches Institut der Universität Köln, 1993.
- Chao, I.M.; Golden B.L.; Wasil, E.:** A new heuristic for the multi depot vehicle routing problem that improves upon best-known solutions. In: American Journal of Mathematical and Management Science (1993) 13, S. 371-401.
- Clarke, G.; Wright, J.W. :** Scheduling of vehicles from a central depot to a number of delivery points. Operations Research (1964) 12, S. 568-581.
- Danzig, G.B.; Fulkerson, D.R.; Johnson, S.M.:** Solution of a large scale traveling salesman problem. Operations Research (1954) 2, S. 393-410.
- Danzig, G.B.; Ramser, J.H.:** The Truck Dispatching Problem. Management Science (1960) 6, S. 80-91.
- Gillet, B.; Miller, L.:** A heuristic algorithm for the vehicle dispatch problem. Operations Research (1974) 22, S. 340-349.
- Golden, B; Stewart, W.:** Empirical Analysis of Heuristics. In: Lenstra, J.; Rinnoy, A.; Shmoys, D. (Hrsg.): The Traveling Salesman Problem, Wiley-Interscience, New York, S. 207-249, 1985.
- Golden, B; Wasil, E.:** Computerized vehicle routing in the soft drink industry. Operations Research (1987) 35, S. 6-17.
- Gomber, P., Schmidt, C., Weinhardt, Ch.:** Efficiency and Incentives in MAS-Coordination. In: Proceedings of the 5<sup>th</sup> European Conference on Information Systems (ECIS' 97), Cork, Ireland, Volume II, S. 1040-1051, 1997.
- Krüger, W.:** Organisation der Unternehmung. 3. Auflage, Kohlhammer, Stuttgart, Berlin, Köln, 1994.
- Lin, S.; Kernighan, B.W. :** An Effective Heuristic Algorithm for the Traveling Salesman Problem. Operations Research (1973) 21, S. 498-516.
- Lohmann, M.; Schmalz, A.; Weinhardt, Ch.:** ADAMCO - An agent architecture with domain independent, adaptive, multiple coordination behavior. In: Proceedings of the Tenth International Conference Industrial and Engineering Applications of Artificial Intelligence and Expert Systems, S. 151-159, Atlanta, 1997.
- Lohmann, M. :** Dynamische Ressourcenallokation in verteilten Systemen - Eine vergleichende, interdisziplinäre Analyse von Koordinationsmechanismen. Dissertation Universität Bielefeld, 1998.
- Osman, I.H.:** Metastrategy Simulated Annealing and Tabu Search Algorithms for the Vehicle Routing Problems. Annals of Operations Research (1993) 41, S. 421-451.
- Pooley, J.:** Integrated production and distribution facility planning at adult foods. Interfaces (1994) 17 (1), S. 113-121.
- Renaud, J.; Laporte, G.; Boctor, F.F.:** A Tabu Search Heuristic for the Multi-Depot Vehicle Routing Problem. In: Computers & Operations Research (1996) 23, S. 229-235.

- Said, S.; Thangiah, S.R.; Rahman, F.:** A genetic cluster method for the multi-depot vehicle routing problem. In: Proceedings of the third international Conference on Artificial Networks and Genetic Algorithms, April 1997.
- Sandholm, T.W.:** Neogation among Self-Interested Computationally Limited Agents. Ph. D. Dissertation, University of Massachusetts, 1996.
- Smith, R.G.:** The contract net protocol: High-level communication and control in a distributed problem solver. IEEE Transactions on Computers (1980) C29, S. 1104-1113.
- Scheer, A.-W.; Borowsky, R.:** Supply Chain Management: Die Antwort auf neue Logistikanforderungen. In: Kopfer, H.; Bierwirt, Chr. (Hrsg.): Logistik Management, Intelligente I+K Technologien. Springer Verlag, Berlin, Heidelberg, S. 3-14, 1999.
- Schmidt, C.:** Marktliche Koordination in der dezentralen Produktionsplanung. Effizienz – Komplexität – Performance. Dissertation Universität Gießen, Gabler, 1999.
- Thangiah, S.R.:** Vehicle Routing with Time Windows using Genetic Algorithms. In: Chambers, L. (Hrsg.): Practical Handbook of Genetic Algorithms, New Frontiers, Volume II, CRC Press, Florida, S. 253-277, 1996.
- Varian, H. R.:** Economic Mechanism Design for Computerized Agents. USENIX Workshop on Electronic Commerce, 1995.
- Wendt, O. :** Tourenplanung durch den Einsatz naturanaloger Verfahren: Integration von Genetischen Algorithmen und Simulated Annealing. Gabler, Wiesbaden, 1994.
- Weinhardt, Ch.; Gomber, P.:** Domänenunabhängige Koordinationsmechanismen für die dezentrale betriebliche Planung. In: IM Information Management (1996) 1, S. 6-16.
- Weinhardt, Ch.; Schmalz, A.:** Zentrale versus dezentrale Transportplanung – Eine vergleichende Analyse für Multi-Depot Tourenplanungsprobleme. In: Kopfer, H.; Bierwirt, Chr. (Hrsg.): Logistik Management, Intelligente I+K Technologien. Springer Verlag, Berlin, Heidelberg, S. 147-157, 1999.
- Zelewski, S.:** Elektronische Märkte zur Prozeßkoordination in Produktionsnetzwerken, in: Wirtschaftsinformatik 39 (1997) 3, S. 231-243.