

Analyse kombinatorischer Auktionen für ein Multi-Agentensystem zur Lösung des Groupage-Problems kooperierender Speditionen

Giselher Pankratz, FernUniversität Hagen

1. Einleitung

Steigendes Verkehrsaufkommen und die Zunahme der Wettbewerbsintensität im Transportgewerbe zwingen die Transportunternehmen zu einer Effizienzsteigerung bei der Erstellung von Transportleistungen. Insbesondere spedititionsübergreifende Kooperationen lassen eine deutliche Steigerung der Auslastung der Produktionsfaktoren im Transportsektor erwarten. Die Aufgabe, den hierzu erforderlichen Laderaum- und Frachtausgleich zwischen kooperierenden Speditionen durch den unternehmensübergreifenden Abgleich zwischen verfügbaren und benötigten Kapazitäten herzustellen, ist als das Groupage-Problem beschrieben worden [4]. Die Beachtung wichtiger Aspekte der wirtschaftlichen Selbstständigkeit der Teilnehmerspeditionen legt es nahe, dezentrale Lösungsansätze für das Groupage-Problem zu wählen, die das Groupage-Problem in ein lokales Dispositionsproblem für jede Teilnehmerspedition einerseits und ein überbetriebliches Koordinierungsproblem für die Auftragsallokation andererseits zerlegen. Es bietet sich an, das Szenario der Groupage-Kooperation als Multi-Agenten-System (vgl. z.B. [13]) zu modellieren, bei dem mehrere Speditionen als autonome Agenten zur Lösung des Groupage-Problems interagieren.

2. Auktionsbasierte Agentenkoordination

In der Literatur finden sich bereits mehrere Ansätze zur dezentralen Fahrzeugeinsatzplanung mittels Multi-Agenten-Systemen (z.B. [1,2,7,12]). In diesen Ansätzen kommen zur Koordination der Agentenaktivitäten marktliche Koordinationsmechanismen zum Einsatz. Ergebnis einer Verhandlungsrunde ist in der Regel eine bilaterale Transaktion, bei der eine geringe Zahl von Transportaufträgen (meist ein Auftrag) atomistisch von einem Agenten auf einen anderen übergeht. Bewährt haben sich dabei auktionsähnliche Verhandlungsprotokolle mit verdeckter, einmaliger Gebotsabgabe. Aus Effizienzgründen ist es jedoch wünschenswert, auch komplexere Kontrakte zur (Re-)Allokation einer größeren Anzahl von Aufträgen zuzulassen, um es den Agenten zu ermöglichen, in stärkerem Ausmaß komplementäre Beziehungen zwischen Aufträgen in die Verhandlungen einzubeziehen [8]. Komplexere Kontrakte lassen sich z.B. durch die Verwendung kombinatorischer Auktionen erzielen (z.B. [3,9]). Dabei kommt dem Problem der Gewinnerermittlung eine zentrale Bedeutung bei der Durchführung kombinatorischer Auktionen zu.

Allgemein läßt sich das Problem der Gewinnerermittlung in kombinatorischen Auktionen wie folgt beschreiben: Gegeben sei eine Menge M gleichzeitig zu versteigernder Güter. Jeder der Bieter i , $i = 1, \dots, n$, verfüge über eine Bietfunktion $v_i(X)$ zur Bewertung von Güterbündeln $X \subset M$. Sei $X_i \subset M$ das Güterbündel, das Bieter i aus der Auktion erhält und bezeichne

$$\Xi = \left\{ \mathbf{X} = (X_1, \dots, X_n) \mid X_i \cap X_j = \emptyset, i \neq j \text{ und } \bigcup_i X_i = M \right\} \quad (1)$$

die Menge aller zulässigen Allokationen. Die Bewertungsfunktion des Auktionators läßt sich angeben als

$$F(\mathbf{X}) = \sum_i v_i(X_i) \quad (2)$$

mit $\mathbf{X} \in \Xi$. Handelt es sich – wie im vorliegenden Fall der Groupage – um eine Ausschreibung, bei der die Güter Transportaufträge darstellen und ein Gebot das Entgelt repräsentiert, gegen dessen Zahlung ein Bieter bereit ist, ein bestimmtes Bündel an Transportaufträgen zu übernehmen, so ist diejenige Allokation $\mathbf{X}^* = (X_1^*, \dots, X_n^*)$ gesucht, die das folgende Minimierungsproblem löst:

$$F(\mathbf{X}^*) = \min_{\mathbf{X} \in \Xi} F(\mathbf{X}). \quad (3)$$

Das Problem der Gewinnerermittlung in kombinatorischen Auktionen stellt ein NP-schweres kombinatorisches Optimierungsproblem dar [6,9,10]. Geht man davon aus, daß jeder Bieter explizit für jedes der möglichen $2^{|M|}-1$ nichtleeren Güterbündel ein Gebot abgibt, so kann zur Lösung des Allokationsproblems ein Set-Partitioning-Ansatz gewählt werden (z.B. [10]). In vielen praktischen Anwendungsfällen ist jedoch zu erwarten, daß für zahlreiche der $2^{|M|}-1$ verschiedenen Kombinationen überhaupt keine Gebote vorliegen. Der von SANDHOLM auf der Basis eines Set-Packing-Ansatzes entwickelte Algorithmus macht sich diesen Umstand zunutze, indem ausschließlich solche Allokationen konstruiert werden, die aus den tatsächlich eingegangenen Geboten gebildet werden können [9]. Ein ähnliches Prinzip verfolgt auch der Algorithmus zur Gewinnerermittlung in [11]. Bei beiden zuletzt genannten Algorithmen kann es jedoch vorkommen, daß mehrere disjunkte Gebote eines Bieters in die Allokation aufgenommen werden und additiv in die Bewertung eingehen, obwohl der Bieter die Vereinigungsmenge der zugehörigen Güterbündel eigentlich ungünstiger bewertet [9]. Übertragen auf den vorliegenden Fall einer Ausschreibung von Transportaufträgen entspricht dies der Annahme genereller Subadditivität, d.h. für zwei beliebige Auftragsbündel $X, Y \subseteq M$ gilt stets: $v_i(X \cup Y) \leq v_i(X) + v_i(Y)$ für alle Bieter i . Obwohl in der Transportdomäne nicht selten subadditive Beziehungen zwischen Transportaufträgen zu beobachten sind, ist die Annahme genereller Subadditivität zwischen Transportaufträgen für die Transportdomäne unzutreffend. Superadditivität tritt zum Beispiel dann auf, wenn ein Agent jedes einzelne zweier disjunkter Auftragsbündel übernehmen kann, die Vereinigungsmenge aus beiden jedoch aufgrund zeitlicher oder kapazitiver Beschränkungen nicht ausführen kann. Sollen jedoch alle vorhandenen Diskomplementaritäten *ex ante* berücksichtigt werden, müssen im Extremfall die Präferenzen aller Bieter vollständig, d.h. jeweils für alle $2^{|M|}-1$ Teilmengen, erhoben werden, so daß die an den tatsächlich vorliegenden Geboten orientierte Vorgehensweise bei der Konstruktion realisierbarer Allokationen keinen Vorteil mehr aufweist.

3. Ein Algorithmus zur Gewinnerermittlung in kombinatorischen Auktionen

Der hier vorgestellte Algorithmus zur Gewinnerermittlung in kombinatorischen Auktionen geht davon aus, daß die Bieter in erster Linie bemüht sein werden, während der Bietphase für alle Aufträge und Auftragskombinationen Gebote abzugeben, bei denen Komplementaritäten ausgenutzt werden können, so daß

nach Abschluß der Bietphase alle streng subadditiven Beziehungen explizit in entsprechenden Geboten zum Ausdruck gebracht worden sind. Der Algorithmus konstruiert Allokationen aus den nach Abschluß der Bietphase vorliegenden Geboten. Enthält eine Allokation mehr als ein Gebot eines Bieters, werden Rückfragen an die betroffenen Bieter gestellt und Gebote über die jeweiligen Auftragsbündel nachgefordert. Nach Voraussetzung muß dieser Gebotswert superadditiv, d.h. mindestens so hoch sein wie die Summe der Werte der einzelnen Gebote.

Das entwickelte Verfahren kann als ein als Tiefensuche organisiertes Branch-and-Bound-Verfahren charakterisiert werden (Depth-First Branch-and-Bound, [5]). Der Suchraum ist als Baum repräsentiert, dessen Wurzelknoten die „leere“ Allokation darstellt. Jeder weitere Knoten auf einem beliebigen Pfad vom Wurzelknoten bis zu einem Blatt des Suchbaumes repräsentiert eine gegenüber dem unmittelbaren Vorgängerknoten um genau ein zusätzliches Gebot erweiterte Allokation. Während alle Nicht-Blatt-Knoten des Suchgraphen jeweils unvollständige Allokationen darstellen, repräsentiert jedes Blatt des Suchbaumes eine vollständige Allokation, die alle Aufträge umfaßt.

Zur Erzeugung von Nachfolgerknoten kommen grundsätzlich alle Gebote in Frage, die ausschließlich solche Aufträge enthalten, die bislang noch nicht in die Allokation aufgenommen wurden. Um keine Allokation mehrfach zu erzeugen, werden in jedem Knoten nur solche Gebote zur Erzeugung von Nachfolgerknoten in Betracht gezogen, die den Auftrag mit dem kleinsten Index unter den noch nicht allokierten Aufträgen beinhalten. Außerdem bleiben solche Gebote unberücksichtigt, durch deren Einbeziehung für den betroffenen Bieter ein Auftragsbündel entsteht, über das er während der Bietphase ein Gebot abgegeben hat. Die zur Auswahl stehenden Gebote werden in der Reihenfolge aufsteigender Kosten pro Auftrag eines Gebots bearbeitet (gerichtete Tiefensuche); dabei wird die Technik des sog. „Backtracking“ angewendet.

Zur Bewertung eines Knotens wird eine Bewertungsfunktion der Form $f(k) = g(k) + h(k)$ zu Grunde gelegt. Eine untere Schranke $g'(k)$ für die Kosten der durch den Knoten k repräsentierten (unvollständigen) Allokation ergibt sich durch Addition der Bewertung des aktuell in die Allokation aufgenommenen Gebots zu den Kosten des Vorgängerknotens. Ist der Bieter des neu aufgenommenen Gebots bereits mit einem oder mehreren Geboten in der Allokation vertreten, so ist zu prüfen, ob für den Bieter des neu aufgenommenen Gebots ein Auftragsbündel entsteht, über das bereits zu einem früheren Zeitpunkt im Verlauf der Suche ein Rückfragegebot von diesem Bieter eingeholt wurde. In diesem Fall ist die Allokationsbewertung $g(k)$ entsprechend zu korrigieren; anderenfalls ist für alle Nicht-Blatt-Knoten die vorläufige Bewertung $g'(k)$ weiterzuverwenden, da Rückfragen immer erst nach Auffinden eines Blattknoten gestellt werden. Übersteigt bereits die Bewertung $g(k)$ bzw. $g'(k)$ eines Knotens die Kosten *best_wert* der besten bisher gefundenen Lösung *best_lsg*, so kann auf die weitere Untersuchung aller Pfade durch den Knoten k verzichtet werden. Zur weiteren Verschärfung dieser Ausschlußregel dient die heuristische Schätzfunktion $h(k)$, die für jeden Knoten k die Restkosten des günstigsten Pfades von Knoten k bis zu einem Blattknoten schätzt. In Anlehnung an SANDHOLM wird hier eine optimistische Schätzfunktion verwendet, die für alle noch nicht allokierten Aufträge die minimalen zu erwartenden Kosten pro Auftrag aufsummiert.

Hierzu wird unter den Geboten, die den jeweiligen Auftrag enthalten, das Gebot mit den geringsten Durchschnittskosten herangezogen. Um die wahren Restkosten möglichst knapp zu unterschätzen, wird die Datengrundlage der Schätzfunktion laufend aktualisiert, indem alle Gebote von der Kostenermittlung ausgeschlossen werden, die Aufträge enthalten, die bereits in die Allokation aufgenommen wurden.

Handelt es sich bei dem betrachteten Knoten um einen Blattknoten, so werden über die bislang nur vorläufig bewerteten Güterbündel von den jeweiligen Bieter Rückfragegebote eingeholt und die Bewertung der gefundenen Allokation entsprechend korrigiert; außerdem werden die Rückfrage-Gebote gesondert abgelegt, um im weiteren Verlauf der Suche darauf zurückgreifen zu können. Sind die Kosten $g(k)$ der gefundenen Allokation kleiner als $best_wert$, so werden $best_lsg$ sowie $best_wert$ aktualisiert.

4. Evaluierung

Das entwickelte Verfahren wurde in Java programmiert und mit Hilfe zufällig erzeugter Problemdaten-sätze auf einem PC (Pentium II, 400 MHz) getestet. Zur Konfiguration verschiedener Problemklassen dienen die folgenden Problemparameter: Die Anzahl n der Bieter, die Anzahl m der Aufträge, die Anzahl t der Bündelgebote sowie die Anzahl l der in einem Bündelgebot enthaltenen Aufträge (Gebotslänge). Zur Erzeugung einer Probleminstanz werden für jeden Bieter Einzelbewertungen $v_i(\{j\})$ aller $j = 1, \dots, m$ Aufträge zufällig (gleichverteilt) aus dem Intervall $(0,1]$ generiert. Diese Einzelbewertungen stellen die Ausgangsbasis für die bieterspezifischen Bewertungen der Bündelgebote dar und sind vorerst nicht für die Bekanntgabe in der Bietphase der Auktion bestimmt. Anschließend werden aus den Aufträgen durch zufällige Auswahl ohne Zurücklegen t verschiedene Auftragsbündel zusammengestellt. Die jeweilige Gebotslänge kann durch Vorgabe eines Wertes für den Parameter l einheitlich festgelegt werden; anderenfalls wird die Gebotslänge für jedes einzelne Bündel zufällig aus $2,3, \dots, m$ bestimmt. Jedes der generierten Auftragsbündel wird zufällig einem Bieter zugeordnet und mit der um 15 Prozent reduzierten Summe der bieterspezifischen Einzelbewertungen aller enthaltenen Aufträge bewertet. Zusätzlich wird für jeden der m Aufträge aus den eingangs generierten Einzelbewertungen aller Bieter zufällig je ein Einzelgebot ausgewählt. Die bieterspezifische Bewertung von Rückfrage-Geboten während der Suche erfolgt analog zur Bietphase, jedoch mit einem 15-prozentigen Aufschlag. Die durch Variation der Problemparameter konfigurierten Problemklassen wurden zu drei Testfällen zusammengefaßt (vgl. Abb. 1).

Parameter Testfall	Anzahl Bieter n	Anzahl Aufträge m	Anzahl Bündelgebote t	Gebotslänge l
A	5	10;20;30	25;50;100;150	zufällig
B	5	30	50;100;150	5;10;15;20
C	3;5;7	20	25;50;100;150	zufällig

Abb. 1: Testfälle und Parameterkonfigurationen

Für jede Problemklasse wurden 30 Probleminstanzen generiert und mit dem Algorithmus bearbeitet. Die folgenden Abbildungen fassen die Ergebnisse der Testläufe grafisch zusammen, wobei jeder ausgewiesene Punkt den Mittelwert aus 30 Probleminstanzen repräsentiert. Die Rechenzeitangaben erfolgen ohne Berücksichtigung des Zeitbedarfs für Kommunikation. Der Zeitbedarf des Algorithmus liegt im Bereich weniger Sekunden für Auktionen mit einer kleinen Anzahl vorliegender Gebote; bei 30 Aufträgen und

150 Bündelgebote werden knapp 17 Minuten für die Berechnung der optimalen Allokation benötigt (Abb. 2a). Während sich bei wenigen Aufträgen ($m=10$) die Anzahl der erforderlichen Rückfragen bei variierender Gebotszahl kaum ändert, sind im Fall $m=30$ jeweils etwa genausoviele Rückfragen erforderlich, wie Bündelgebote vorliegen (Abb. 2b).

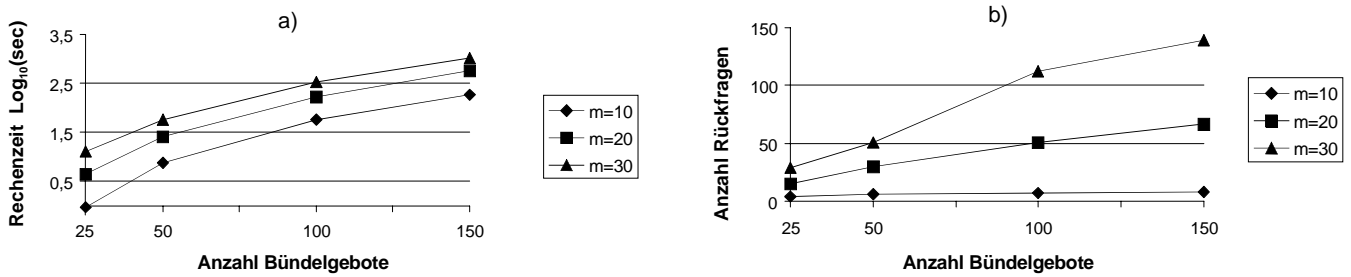


Abb. 2: Ergebnisse für Testfall A

Die Ergebnisse für Testfall B (Abb. 3) verdeutlichen den Einfluß unterschiedlicher Gebotslängen auf die Rechenzeit (Abb. 3a) bzw. die Anzahl der Rückfragen (Abb. 3b) bei konstanter Anzahl von Aufträgen.

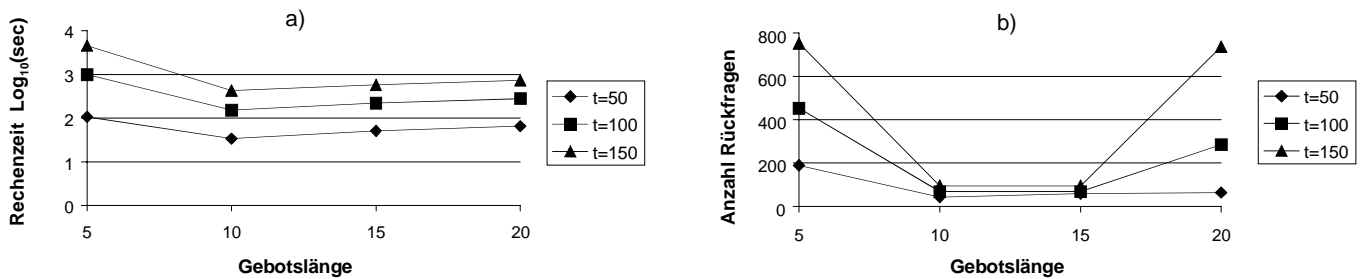


Abb. 3: Ergebnisse für Testfall B

Die Abnahme der Rechenzeiten bei einer Steigerung der einheitlichen Gebotslänge von fünf auf zehn Aufträge pro Gebot ist mit der resultierenden Verkürzung der Suchpfade zu erklären. Bei weiterer Steigerung der Gebotslänge über zehn hinaus nimmt die Wahrscheinlichkeit jedoch wieder ab, zueinander passende Bündelgebote zu finden. Im Durchschnitt müssen dadurch mehr Einzelgebote in die Allokation einbezogen werden, so daß die Suchpfade länger werden, was zu der beobachteten Zunahme der Rechenzeiten führt. Auffällig ist die rapide Zunahme der Anzahl der Rückfragen bei einer Gebotslänge von weniger als 10 bzw. mehr als 15 Aufträgen pro Gebot (Abb. 3b). In diesen Bereichen übersteigt die Anzahl der Rückfragen die Zahl der während der regulären Bietphase abgegebenen Gebote um ein Vielfaches.

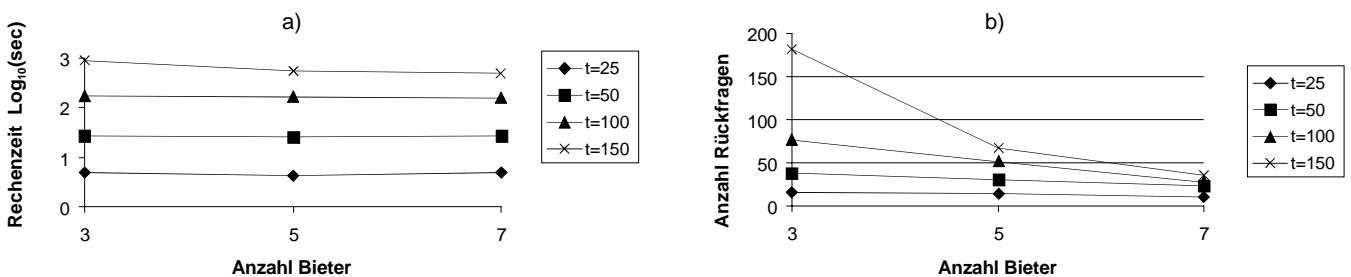


Abb. 4: Ergebnisse für Testfall C

Im untersuchten Intervall sind die Rechenzeiten weitgehend unabhängig von einer Änderung der Anzahl der Bieter (Abb. 4a). Da bei einer größeren Anzahl beteiligter Bieter die Wahrscheinlichkeit für das Ent-

haltensein mehrerer Gebote desselben Bieters in einer Allokation sinkt, geht somit auch die durchschnittliche Anzahl von Rückfragen zurück (Abb. 4b).

5. Ausblick

Durch den Verzicht auf die vollständige Erhebung aller möglichen Gebotsvarianten und durch die Strategie, bei Bedarf weitere Gebote „just in time“ von den Bietern nachzufordern, erreicht der hier vorgestellte Algorithmus eine erhebliche Entlastung der Bieter bei der zeitintensiven Gebotsbewertung. In allen Testläufen beträgt die Gesamtzahl der erforderlichen Gebote (einschließlich der Rückfragen) lediglich einen verschwindend geringen Teil der bei Vollerhebung erforderlichen Anzahl. Dennoch kann der bei Problemen mit hohem Anteil nachgeforderter Gebote entstehende Kommunikationsaufwand die Suche erheblich verlängern, so daß es sinnvoll erscheint, nach Strategien zur Begrenzung dieses Aufwandes zu suchen. Als weiterer Schritt ist die Einbindung des vorgestellten Algorithmus in ein Multi-Agenten-System für das Groupage-Problem geplant. Um die bei der bisherigen objektorientierten Implementierung auftretenden Geschwindigkeitsverluste zu verringern, wird die Entwicklung einer Methodenklasse in Java angestrebt, die auf einer weitgehend prozeduralen Implementierung des Algorithmus basiert. Schließlich ist beabsichtigt, Algorithmen für zweiseitige kombinatorische Auktionen zu entwickeln, bei denen die Agenten gleichzeitig sowohl als Bieter als auch als Anbieter von Transportaufträgen auftreten können.

Literaturverzeichnis

- [1] Falk, J. (1995): Ein Multi-Agentensystem zur Transportplanung und -steuerung bei Speditionen mit Trampverkehr. Infix-Verlag, Sankt Augustin.
- [2] Fischer, K.; Müller, J.P.; Pischel, M.; Schier, D. (1995): A Model for Cooperative Transportation Scheduling, in: Lesser, V. (Ed.): Proceedings of the First International Conference on Multiagent Systems (ICMAS'95), MIT Press, S. 109-116.
- [3] Gomber, P.; Schmidt, C.; Weinhardt, C. (1997): Elektronische Märkte für die dezentrale Transportplanung, in: Wirtschaftsinformatik 39:137-145.
- [4] Kopfer, H.; Pankratz, G. (1998): Das Groupage-Problem kooperierender Verkehrsträger, in: Kall, P.; Lüthi, H.-J. (Eds.): Operations Research Proceedings 1998, Springer-Verlag, Berlin, S. 453-462.
- [5] Korf, R.E. (1998): Artificial Intelligence Search Algorithms, in: Atallah, M.J. (Ed.): Algorithms and Theory of Computation Handbook, CRC Press, Boca Raton et al., S. 36-1 – 36-20.
- [6] Rothkopf, M.H.; Peke, A.; Harstad, R.M. (1995): Computationally Manageable Combinatorial Auctions, DIMACS Technical Report 95-09.
- [7] Sandholm, T. (1993): An Implementation of the Contract Net Protocol Based on Marginal Cost Calculations, in: Proceedings of the 11th Nat. Conf. on Artificial Intelligence (AAAI-93), Washington D.C., S. 256-263.
- [8] Sandholm, T. (1998): Contract Types for Satisficing Task Allocation: I Theoretical Results. AAAI 1998 Spring Symposium: Satisficing Models, Stanford University, California, March 23-25.
- [9] Sandholm, T. (1999): An Algorithm for Optimal Winner Determination in Combinatorial Auctions, Technical Report WUCS-99-01, Washington University, Department of Computer Science.
- [10] Schmidt, C. (1999): Marktliche Koordination in der dezentralen Produktionsplanung – Effizienz, Komplexität, Performance. Diss. Justus-Liebig-Universität Gießen, Fachbereich Wirtschaftswissenschaften.
- [11] Steinmetz, E.; Collins, J.; Jamison, S.; Sundareswara, R.; Mobasher, B.; Gini, M. (1998): An Efficient Anytime Algorithm for Multiple-Component Bid Selection in Automated Contracting, in: Proceedings of the Workshop on Agent Mediated Electronic Trading (AMET'98), May 1998.
- [12] Utecht, T. (1997): Kooperatives Problemlösen in Workstationclustern. Verlag für Wissenschaft und Forschung, Berlin.
- [13] Wooldridge, M.; Jennings, N.R. (1995): Intelligent Agents: Theory and Practice, in: The Knowledge Engineering Review 10 (1995) 2, S. 115-152.