

2011

Kombinatorische Auktionen als Instrument zur Verhandlung von Verträgen mit interdependenten Eigenschaften

Fabian Lang

Helmut-Schmidt-Universität Hamburg, fabian.lang@hsu-hamburg.de

Andreas Fink

Helmut-Schmidt-Universität Hamburg, andreas.fink@hsu-hamburg.de

Follow this and additional works at: <http://aisel.aisnet.org/wi2011>

Recommended Citation

Lang, Fabian and Fink, Andreas, "Kombinatorische Auktionen als Instrument zur Verhandlung von Verträgen mit interdependenten Eigenschaften" (2011). *Wirtschaftsinformatik Proceedings 2011*. 10.
<http://aisel.aisnet.org/wi2011/10>

This material is brought to you by the Wirtschaftsinformatik at AIS Electronic Library (AISEL). It has been accepted for inclusion in Wirtschaftsinformatik Proceedings 2011 by an authorized administrator of AIS Electronic Library (AISEL). For more information, please contact elibrary@aisnet.org.

Kombinatorische Auktionen als Instrument zur Verhandlung von Verträgen mit interdependenten Eigenschaften

Fabian Lang

Professur für BWL, insbes. Wirtschaftsinformatik
Fakultät für Wirtschafts- und Sozialwissenschaften
Helmut-Schmidt-Universität Hamburg
Holstenhofweg 85, 22043 Hamburg
Tel. +49 40 6541 2321
fabian.lang@hsu-hamburg.de

Andreas Fink

Professur für BWL, insbes. Wirtschaftsinformatik
Fakultät für Wirtschafts- und Sozialwissenschaften
Helmut-Schmidt-Universität Hamburg
Holstenhofweg 85, 22043 Hamburg
Tel. +49 40 6541 2857
andreas.fink@hsu-hamburg.de

ZUSAMMENFASSUNG

Der technologische Fortschritt beim E-Commerce, bei der betrieblichen Planung und im Zusammenhang mit intelligenten Multi-Agenten-Systemen eröffnet eine Vielzahl an Möglichkeiten für automatisierte Verhandlungen durch Softwareagenten. Die Interdependenz verschiedener Verhandlungsgegenstände in der Form von Vertragseigenschaften kann dabei zu nicht-linearen Vertragsräumen führen, sodass Verträge mit hoher sozialer Wohlfahrt nicht erreicht werden. Als Lösungsansatz wurde ein kombinatorisches Auktionsverhandlungsprotokoll entwickelt, das Bestimmungsrechte zu Vertragseigenschaften versteigert. Das Verhandlungsprotokoll wurde simulativ getestet und mit weiteren Protokollen in Bezug auf Wohlfahrtsgüte, Rechenleistung und Anreizkompatibilität verglichen. Als Ergebnis erreichte das vorgeschlagene Auktionsverhandlungsprotokoll Verträge mit der höchsten Wohlfahrt innerhalb für die adressierten Anwendungen praxistauglicher Rechenzeit verbunden mit vollständiger Anreizkompatibilität.

Schlüsselwörter

automatisierte Verhandlungen, kombinatorische Auktionen, Multi-Agenten-Systeme, nicht-lineare Vertragsräume

1. Einleitung

Im Jahre 1899 trafen sich der belgische Chemiker Leo Baekeland und der Unternehmer George Eastman, um über den Kauf der neuesten Erfindung Baekelands, ein schnell entwickelbares Fotopapier, zu verhandeln. Baekeland plante, \$ 50.000 als Kaufpreis zu verlangen, war aber bereit, Eastman bis \$ 25.000 entgegen zu kommen. Eastman eröffnete zuerst die Verhandlung und kaufte das Patent für \$ 1.000.000 [1]. Die Baekeland-Anekdote zeigt die Wichtigkeit der Verhandlungsgestaltung und die Bedeutung des Verhandlungsprotokolls für das spätere Verhandlungsergebnis. Da technologische Innovationen vielerlei Möglichkeiten zur Verhandlung geschaffen haben, haben Verhandlungen heute einen Stellenwert wie niemals zuvor. Im Bereich des E-Commerce gibt es Angebote, wie etwa das individuelle Zusammenstellen von Lebensmittelzutaten (z.B. Müsli – mymuesli.com) oder Name-Your-Own-Price-Auktionen (z.B. Reisen – priceline.com), die in einem klassischen Filialsystem aufgrund von hohen Transaktionskosten nahezu undenkbar wären. Doch nicht nur die Verhandlungsmöglichkeiten des Menschen wurden durch die Technologie erweitert, sondern es wurden auch die Grundlagen für automatisierte Verhandlungen zwischen intelligenten Softwareagenten geschaffen, die die Interessen eines menschlichen Prinzipals vertreten können. Beispiele hierfür sind agentenbasierte Konzepte zur Ablaufplanung von Fertigungsprozessen oder die Datenallokation in Rechenzentren [9,17]. Automatisierte Verhandlungen sind als zentrales Instrument zur Koordination von autonomen Agenten anzusehen [12]. Aktuelle Entwicklungen wie das Internet der Dinge oder Smart Houses tragen dazu bei, dass automatisierte Verhandlungen und intelligente Softwareagenten auch in Zukunft an Bedeutung gewinnen werden [14,15].

Verträge umfassen häufig mehrere festzulegende Vertragseigenschaften mit Abhängigkeit untereinander. So können in der Fertigungsplanung Abhängigkeiten aufgrund technisch bedingter Rüstaufwände oder der Relevanz der örtlichen Position einer Maschine innerhalb einer Fertigungskette entstehen. Diese Interdependenzen führen bei einer adäquaten Abbildung der Nutzenfunktionen zu nicht-linearen Vertragsräumen, die meist keine Monotonie der Nutzenfunktionen über den Verhandlungsverlauf aufzeigen, wodurch gängige

Verhandlungsformen nicht zwangsläufig zu Pareto-optimalen Einigungen führen [16].

Ein beispielhaftes Anwendungsszenario ist die Koordination von Flurfahrzeugen in einem von mehreren Unternehmen genutzten Lager. Ein von mehreren Parteien genutztes Lager kann Effizienzgewinne aufgrund einer höheren durchschnittlichen Auslastung realisieren. Unter der Annahme, dass die Flurfahrzeuge von verschiedenen Unternehmen gestellt werden, sind unterschiedliche Interessen zu berücksichtigen. Interdependenzen treten bspw. aufgrund der relativen Position auf; d.h., ein Flurfahrzeug, das eine Entität in der Nähe einer anderen einlagert, kann eine darauf folgende Auslagerung jener anderen Entität mit einer relativ hohen Effizienz durchführen. Eine ausschließliche Nutzung der Fahrzeuge für das eigene Unternehmen wäre damit im Allgemeinen ineffizient. Eine zentrale Steuereinheit kann den Interessen der verschiedenen Parteien nicht ausreichend gerecht werden (und höchstens als Mediator auftreten), insofern die Unternehmen ihre privaten Informationen nicht unbedingt preisgeben möchten. Die Flurfahrzeuge können jedoch als Agenten eingesetzt werden, ohne Informationen an andere Parteien komplett zu offenbaren, und mit Hilfe von Verträgen in der Form entsprechender Ablaufpläne die anstehenden Prozesse dezentral koordinieren.

Die zweckmäßige Gestaltung bilateraler und insbesondere auch multilateraler Verhandlungen ist bei nicht-linearen Vertragsräumen nicht trivial. Der Nutzengraph weist durch die Nicht-Linearität viele Hügel und Täler auf und es besteht die Gefahr, in einem lokalen Optimum zu verharren. Wie in Abbildung 1 illustriert wird, müssen Agenten unter Umständen zeitweise Verschlechterungen eingehen, um zu ihrem optimalen Vertrag im Verhandlungsprozess zu gelangen – unterstellt, dass nur schrittweise Veränderungen gemäß der gezeigten Vertragsanordnung möglich sind. So muss Agent 1 von seinem lokalen Maximum bei Vertrag 2 abweichen, um zu seinem bestmöglichen Vertrag (Vertrag 7) zu gelangen. Agent 2 erreicht seinen bestmöglichen Vertrag jedoch schon bei Vertrag 3 und wird nicht mehr bereit sein, von diesem abzuweichen. Sofern Agent 1 dies antizipiert oder sich zumindest des Risikos bewusst ist, wird er ebenfalls nicht mehr bereit sein, sein lokales Maximum bei Vertrag 2 zu verlassen, sodass weder Agent 1 noch Agent 2 noch die soziale Wohlfahrt (SW) ihr globales Optimum erreichen.

Dieses kontraproduktive, opportunistische Verhalten ist bei dem Design von Verhandlungsprotokollen zu berücksichtigen. Insbesondere bei multilateralen Verhandlungsproblemen erweist sich eine adäquate Einigung auf einen Vertrag durch iterative Verhandlung als zunehmend schwierig. Des Weiteren ist zu vermuten, dass die bekannten iterativen Protokolle bei einer sehr kleinen Anzahl zu verhandelnder Eigenschaften oder bei gegensätzlichen Bewertungen ebenfalls keine bestmögliche Einigung garantieren können. Daher versucht diese Arbeit, die daraus resultierende Forschungslücke zu schließen, indem ein neuartiges Verhandlungsprotokoll, das sich kombinatorischer Auktionen bedient, vorgeschlagen wird. Die Evaluation erfolgt durch eine simulative Untersuchung der oben genannten Aspekte.

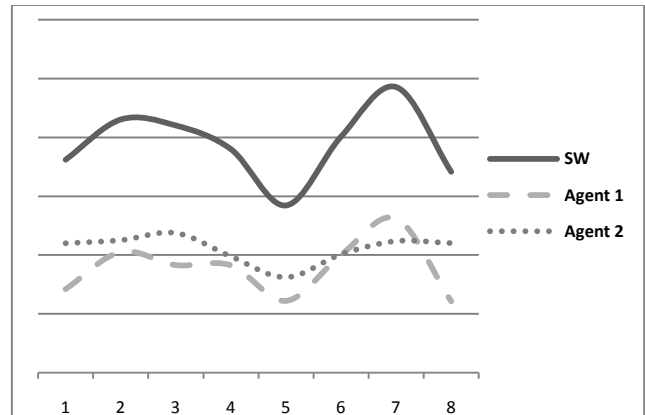


Abbildung 1. Nutzenwerte benachbarter Verträge über den Verhandlungsverlauf

Im Anschluss an die Einleitung wird in Kapitel 2 ein selektiver Überblick über die verwandte Literatur gegeben. In Kapitel 3 werden die Szenarien der Studie präsentiert. In Kapitel 4 werden das kombinatorische Auktionsprotokoll sowie zwei Referenzprotokolle vorgestellt. Kapitel 5 diskutiert die Ergebnisse der Simulation. Abschließend wird in Kapitel 6 ein Fazit gezogen und ein Ausblick auf die weitere Forschung gegeben.

2. Ausgewählte verwandte Literatur

Die Ausgestaltung von multidimensionalen Verträgen wurde bisher sowohl aus der Perspektive der Spieltheorie als auch im Gebiet der künstlichen Intelligenz untersucht [19].

Eine Einführung zur Forschung im Bereich der allgemeinen Multi-Agenten-Koordinationsprobleme gibt Conitzer [5] mit illustrativen Beispielen. Weiterführend geben Jennings et al. [12], Lomuscio et al. [21] und Ströbel und Weinhardt [33] einen Überblick zur automatisierten Verhandlung.

Die spieltheoretische Erforschung von Multi-Agenten-Verhandlungsproblemen findet bereits seit den 1940ern statt. Ein erstes Lösungskonzept erreichte Nash [24] mit der sogenannten *Nash-Lösung*, die auf vier Axiomen aufbaut, die von rationalen Individuen zu erfüllen sind: 1.) Unabhängigkeit von gleichwertigen Transformationen, 2.) Pareto-Optimalität, 3.) Unabhängigkeit von irrelevanten Alternativen, 4.) Symmetrie. Das ursprüngliche Nash-Verhandlungsproblem wurde durch ein *Ultimatumspiel* dargestellt, also eine Situation, bei der ein Gut oder Güterbündel als Spielgegenstand zwischen zwei oder mehreren Personen aufgrund eines einzigen Aufteilungsvorschlags geteilt werden müssen. Das Ultimatumspiel wird häufig anhand der Metapher eines zu teilenden Kuchens illustriert, bei dem bei Ablehnung eines Teilungsangebotes keiner der Spieler etwas erhält. Es muss folglich eine Kooperation bzw. eine Koalition zwischen den Spielern erzielt werden. Nashs ursprünglicher Beitrag befasst sich mit Nicht-Nullsummenspielen in der kooperativen Spieltheorie (Koalitionsspiele), was er jedoch bereits ein Jahr später auf die nicht-kooperative Spieltheorie und Nullsummenspiele erweiterte [25]. Einen wichtigen Beitrag zur kooperativen Spieltheorie lieferten auch Kalai und Smorodinsky [13], die das Nash'sche Axiom der irrelevanten Alternativen durch ein Monotonie-Axiom ersetzen. Rubinstein [29] entwickelte zur nicht-kooperativen Spieltheorie ein Verhandlungsmodell, bei dem in einem Zwei-Agenten-Ultimatumspiel eine Lösung durch abwechselnde,

alternierende Aufteilungsvorschläge erreicht wird. Sowohl das Rubinstein'sche als auch das Nash'sche Verhandlungsmodell nehmen vollständige Information über die Präferenzen der Vertragspendants an. In realen Szenarien ist jedoch ein Anreiz vorhanden, Informationen über eigene Präferenzen strategisch geheim zu halten oder sogar den Verhandlungspartner darüber zu täuschen. Es ist ebenso denkbar, dass die eigenen Präferenzen den Akteuren teilweise unbekannt sind. Die Spieltheorie kann deshalb nur stark eingeschränkt zur Lösung von angewandten Verhandlungsproblemen eingesetzt werden.

Aus dem Feld der künstlichen Intelligenz schlugen z.B. Klein et al. [16], Hattori et al. [10] und Lai et al. [19] Verhandlungsmechanismen vor, bei denen ein Mediator Vertragsvorschläge unterbreitet und somit die Suche im möglichen Vertragsraum nach Pareto-optimalen Lösungen unterstützt. So können bei Klein et al. [16] die Agenten über Annahme oder Ablehnung eines Vorschlages entscheiden. Verschiedene Agentenverhalten sowie deren Anreizkompatibilität wurden untersucht. Fink [8] entwickelte ebenfalls eine Strategie zur Anreizkompatibilität innerhalb dieses Verhandlungsrahmens. Homberger [11] verwendete und evaluierte das von Klein et al. [16] entwickelte und von Fink [8] erweiterte Protokoll auf der Basis eines Produktionskoordinationsproblems mit mehreren Produktionsanlagen. Aufbauend auf Klein et al. [16] konzipierten Hattori et al. [10] ein Verhandlungsprotokoll, das durch einen iterativen Bietprozess den Raum der möglichen Vereinbarung sukzessive verkleinert und den Vertrags- und somit den Suchraum einschränkt. Lai et al. [19] entwarfen einen Verhandlungsmechanismus, bei dem ein Mediator mehrere Basislösungen bestimmt, die den Vertragsraum und die Verhandlungsspannweite der Agenten auf der Suche nach Pareto-effizienten Verhandlungslösungen einschränken. Lai und Sycara [18] entwickelten des Weiteren ein Protokoll mit abwechselnden Angeboten, das auf dem Rubinstein'schen Verhandlungsmodell beruht.

Die Anwendung von Auktionen als Verhandlungsinstrument wird vielfach in der Literatur postuliert. So entwarfen Collins et al. [4] eine kombinatorische Auktionsarchitektur für Multi-Agenten-Verhandlungen zur marktlichen Koordination von Auftraggeber und -nehmer, z.B. für Bauprojekte. Bulow und Klemperer [3] verglichen den Erfolg von Auktionen mit dem von Verhandlungen am Beispiel einer Unternehmensakquisition und zeigten dabei, dass die Auktion in diesem Falle der Verhandlung überlegen ist.

In Bezug auf kombinatorische Auktionen geben Cramton et al. [6] eine gute allgemeine Einführung. Sandholm [31] entwickelte ein Auktionsdesign zur eingeschränkten Überwindung des *Winner Determination Problem*, einem \mathcal{NP} -schweren Problem, das bei der Bestimmung der Auktionsgewinner im Allgemeinen entsteht und welches zu dem gewichteten Mengenpackungsproblem äquivalent ist [30]. Hierbei werden Gebote auf Zweierkombinationen beschränkt und mit Hilfe eines Branch-on-Bid-Verfahren optimiert. Dieses Auktionsdesign kann zwar die \mathcal{NP} -Schwere nicht auflösen, aber eine effiziente Berechnung für bestimmte praxisrelevante Probleme gewährleisten. Lehmann et al. [20] präsentieren verschiedene Approximationsalgorithmen für das Winner Determination Problem (z.B. Greedy Winner Determination), die mit geringem Rechenaufwand adäquate Resultate erreichen.

3. Forschungsszenario

Vertragsverhandlungen können in sehr unterschiedlichen Ausgestaltungen und Formen stattfinden. So existieren sowohl Verhandlungen zwischen Unternehmer und Konsument ($B2C$) als auch Verhandlungen zwischen zwei Unternehmern ($B2B$), wobei einzelne Agenten (*One-to-One*) bilateral oder mit mehreren anderen Agenten (*One-to-Many*) sowie mehrere Agenten untereinander (*Many-to-Many*) verhandeln können [27]. Eine Zahlung oder ein Gütertausch kann dabei Bestandteil des Vertrages sein. Es existieren aber vielerlei Beispiele für Verhandlungen ohne Zahlung wie etwa beim Nierentausch oder bei Verhandlungen zur Planung von Maschinenbelegungen [4]. Die Bewertung der einzelnen Verträge kann ebenso unterschiedlich verlaufen. So wird zwischen privater Bewertung und gemeinsamem Wert unterschieden, was weitreichende Folgen für die Bereitstellung von Informationen hat. Bei der privaten Bewertung bilden die Agenten unabhängig von den anderen Agenten ihre private Präferenz und versuchen zudem, diese strategisch geheim zu halten. Im Gegenzug dazu kann ein gemeinsamer Wert vorliegen, der allerdings gegebenenfalls nicht offenliegt, so dass die Agenten diesen unterschiedlich abschätzen. Es existieren ebenso Mischformen, bei denen teilweise Einigkeit herrscht und teilweise unterschiedliche, private Bewertungen existieren [34].

Das hier betrachtete Szenario umfasst eine Many-to-Many-Verhandlung, bei der sich die verschiedenen *Akteure* $j \in \{1, \dots, J\}$ auf einen Vertrag mit N zweiwertigen Eigenschaften einigen müssen. Die daraus resultierenden möglichen Verträge $c = \{d_1, \dots, d_n, \dots, d_{N-1}, d_N\}$ innerhalb des Vertragsraumes C sind Bitvektoren; d.h., eine Vertragseigenschaft $n \in \{1, \dots, N\}$ kann die booleschen Werte $d_n \in \{0, 1\}$ annehmen. Die einzelnen Nutzen der Vertragseigenschaften sind dabei nicht unabhängig, sondern *paarweise voneinander abhängig*.

Die Nutzen *einer* Vertragseigenschaft sind gleichverteilt im Intervall $[-100, 100]$. Der Nutzenzugewinn bei der Kombination *zweier* Eigenschaften wurde als normalverteilt mit $\chi \sim \mathcal{N}(\mu = 0, 2; \sigma = 0, 1) | \chi > 0$ angenommen. Es ergibt sich für einen Akteur j folgender Nutzen P_j für die Zweierkombination n und n' :

$$P_j(n, n') | \{d_n = 1 \wedge d_{n'} = 1\} = P_j(n, n') | \{d_n = 1 \wedge d_{n'} = 0\} + P_j(n, n') | \{d_n = 0 \wedge d_{n'} = 1\} * [1 + \chi].$$

Wie hier sichtbar, umfasst das Szenario sowohl *Komplemente* als auch *Substitute*, d.h., der Nutzen einer Kombination aus zwei Eigenschaften kann größer bzw. geringer als die Summe der dazu gehörigen Einzelnutzen sein. Sofern die Summe der Nutzen zweier einzelner Vertragseigenschaften positiv ist, ist die Kombination noch wünschenswerter für den Akteur (Komplement). Bei den Substituten ist diese Beziehung genau umgekehrt. Ein Akteur j hat demnach für einen Vertrag c die Nutzenfunktion

$$U_j(c) = \sum_{p=1}^N \sum_{q=p}^N P_j(p, q) | \{d_p = 1 \wedge d_q = 1\} * d_p * d_q,$$

während die Gesamtgüte der Verträge anhand der *sozialen Wohlfahrt* SW gemessen werden soll:

$$SW(c) = \sum_{j=1}^J U_j(c).$$

In der Literatur wird häufig die Pareto-Effizienz als Kriterium für einen optimalen Vertrag verwendet. Eine Allokation – oder hier

der Vertrag – ist Pareto-effizient, sobald ein Agent sich nicht mehr besser stellen kann, ohne einen anderen Agenten schlechter zu stellen. Die Maximierung der sozialen Wohlfahrt erfüllt, als Teilmenge der Pareto-effizienten Lösungen, das Pareto-Kriterium und ist sogar noch restriktiver als dieses, erfordert jedoch eine kardinale Nutzenquantifizierung.

Die im folgenden Kapitel präsentierten Verhandlungsprotokolle wurden anhand dreier konkreter Szenarioeinstellungen getestet:

Szenario 1: private Bewertung ($N = 50, J = 3$)

Im ersten Szenario werden ausschließlich private Bewertungen berücksichtigt. Die drei Akteure unterliegen keinen Externalitäten – die Bildung ihrer Präferenzen erfolgt also unabhängig von denen der anderen Agenten. Der zu verhandelnde Vertrag umfasst 50 binäre Eigenschaften. Dieses Szenario wird in der Literatur als Standardfall behandelt.

Szenario 2: gemischte Bewertung ($\tilde{N} = 5, J = 3$)

Im diesem Szenario findet eine teilweise gemeinsame Bewertung statt, sodass ein Teil des Vertrages ignoriert werden kann, da bei diesen Vertragseigenschaften sowohl Informationen über die Präferenzen der Akteure als auch Einigkeit über die Werte der Eigenschaften existieren. Bei einer gemeinsamen Bewertung und einer identischen Interessenrichtung haben die Akteure keinen Anreiz zur Geheimhaltung von Informationen. Ein Teil der Vertragseigenschaften wird allerdings in diesem Szenario weiterhin privat bewertet und muss verhandelt werden. Die Vertragsgröße weicht in diesem Szenario nicht von denen der anderen Szenarien ab ($N = 50$), jedoch resultiert – aufgrund des Konsenses der Akteure über 45 Eigenschaften – eine kleinere *zu verhandelnde* Vertragsgröße mit $\tilde{N} = 5$ unabhängig bewerteten Eigenschaften. Diesem Szenario liegt die Vermutung zu Grunde, dass verhandlungsbasierte Protokolle bei einer kleinen Anzahl an zu verhandelnden Eigenschaften eher in suboptimalen Zuständen verharren.

Szenario 3: gemischte – mit gemeinsamer, aber gegensätzlicher – Bewertung ($N = 50, J = 3$)

Im letzten Szenario sind die Nutzenfunktionen der drei Akteure teilweise abhängig und teilweise unabhängig. Agent 1 und Agent 2 haben eine gemeinsame, aber gegensätzliche Bewertung

$$U_1(c) = -U_2(c),$$

wohingegen Akteur 3 eine private Bewertung vornimmt. Dieses Szenario stellt demnach eine Situation mit zwei Konkurrenten mit gegensätzlichen Interessen und einer dritten Partei dar (also einen Extremfall eines Interessenkonfliktes). Interessenkonflikte treten z.B. bei Käufer- und Verkäuferbeziehungen oder bei zwei Anbieterkonkurrenten in Verhandlung mit einem Kunden auf. Solche Nullsummenspiele wurden in der Literatur für den bilateralen Fall gründlich untersucht, jedoch im Allgemeinen ohne die Hinzunahme einer dritten Partei. Verhandlungen erweisen sich in diesem Szenario als schwierig, da ein Konsens nicht möglich erscheint.

Evaluationskriterien

Um anwendungsorientierte Lösungen zu gewährleisten, werden an die Verhandlungsprotokolle folgende normative Anforderungen gestellt:

1. Die Protokolle sollten eine möglichst hohe soziale Wohlfahrt erreichen. Wie bereits erwähnt, entspricht die soziale Wohlfahrt

dem Pareto-Kriterium und erreicht den besten Durchschnittsnutzen für die beteiligten Agenten.

2. Die Protokolle sollten eine möglichst geringe Rechenzeit aufweisen.

Eine Anwendungstechnologie muss eine effiziente, schnelle Lösung generieren, um einen praxistauglichen Einsatz zu gewährleisten.

3. Die Protokolle sollten das Kriterium der individuellen Rationalität erfüllen.

Die individuelle Rationalität besagt dabei, dass jeder Agent eigennützig handelt und seinen eigenen Nutzen, ohne Berücksichtigung der Nutzen anderer Akteure, zu maximieren versucht.

4. Verhandlungsprotokolle

Im Folgenden werden zwei auktions- und ein verhandlungsbasiertes Protokoll zur Vertragsgestaltung durch Softwareagenten präsentiert. Der Fokus liegt hier auf der auf dem Gebiet der Vertragsverhandlungen neu vorgestellten Methode der kombinatorischen Auktionen. Die weiteren Protokolle dienen dabei als zu vergleichende Referenzprotokolle.

4.1 Auktionsbasierte Protokolle

Innerhalb der auktionsbasierten Protokolle werden Rechte an der Bestimmung der Vertragseigenschaften von einem unabhängigen Auktionator an die Agenten versteigert. Der Auktionator handelt hierbei eigennützig, da der Auktionserlös maximiert wird. Der Auktionserlös ist für den Wert der sozialen Wohlfahrt irrelevant, da er z.B. durch Umverteilung wieder rückvergütet werden kann und somit den Wert der sozialen Wohlfahrt nicht beeinflusst. Erhält ein Agent ein Bestimmungsrecht über eine Eigenschaft, so wird der Agent, wenn er einen positiven Nutzen daraus erhält, sich für die Ausprägung $d_n = 1$ entscheiden, und, sofern er einen negativen Nutzen aus der Eigenschaft ziehen würde, sich für die Ausprägung $d_n = 0$ entscheiden. In Abbildung 2 wird die wechselseitige Beziehung der beteiligten Akteure der Auktion dargestellt.

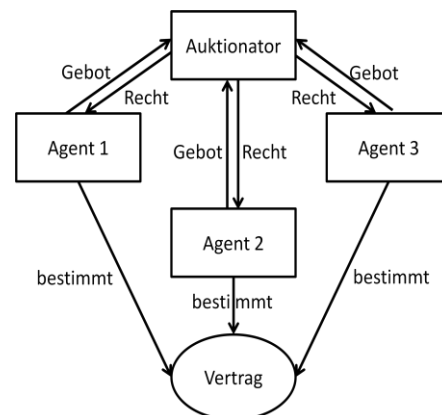


Abbildung 2. Agentenbeziehungen im auktionsbasierten Modell

4.1.1 Kombinatorische Auktionen (KA)

Kombinatorische Auktionen fußen auf der Annahme, dass bei einer Versteigerung verschiedener Güterkombinationen Interdependenzen innerhalb der Kombinationen existieren. Bspw. sind Nutzenwerte von Zeitfenstern auf Flughäfen nicht nur vom

Startfenster, sondern auch vom Landefenster am Zielort abhängig [28]. Ein weiteres Beispiel sind regional getrennte Frequenzspektrumauktionen; verschiedene Kombinationen von lizenzierten Regionen – wie z.B. alle Bezirke eines Bundesstaates – sind von größerem Nutzen als dieselbe Anzahl an Bezirken über mehrere Bundesstaaten [2,32].

Da die Vertragseigenschaften im Szenario voneinander abhängig sind, entsteht eine Situation vergleichbar mit den oben genannten Güterkombinationen, wobei nun mit Hilfe von kombinatorischen Auktionen Verträge mit möglichst großer sozialer Wohlfahrt erreicht werden könnten. Ein Merkmal von Auktionen im Vergleich zu Verhandlungen ist ein Anreiz zur Informationspreisgabe. Während Agenten in Verhandlungen keinen ursprünglichen Anreiz haben, die Informationen über ihre Präferenzen, Reservationspreise etc. preiszugeben, wird bei der Auktion durch die Gebote der Agenten – mindestens aus der Perspektive des Auktionators – vielerlei Information preisgegeben.

Durch Implementierung sogenannter Vickrey-Clarke-Groves-Mechanismen (VCG-Mechanismen)¹ wird den Agenten zudem der Anreiz zum strategischen Bieten genommen, da die wahrheitsgemäße Angabe der Zahlungsbereitschaft im Falle der VCG-Mechanismen immer die optimale Strategie für ein Individuum ist und somit die dominante Strategie der Agenten darstellt [23].

Unter der Anwendung eines unparteiischen Auktionators wird das folgende kombinatorische Auktionsverhandlungsprotokoll (KA-P) vorgeschlagen (mathematische Formulierung nach [30]):

Das kombinatorische Auktionsverhandlungsprotokoll (KA-P)

Schritt 1. Die Agenten reichen ihre Gebote auf paarweise Kombinationen der Vertragseigenschaften sowie die allein stehenden Eigenschaften ein, woraus die Menge der maximalen Gebote (ein Gebot pro Kombination) entsteht $B = \{B_1, \dots, B_i, \dots, B_{I-1}, B_I\}$.

Ein Gebot B_i stellt dabei Tupel aus der Menge der enthaltenen Vertragseigenschaften S_i und dem Gebotspreis p_i dar: $B_i = (S_i, p_i)$.

Schritt 2. Der Auktionator maximiert den Ertrag der Auktion, indem er das Winner Determination Problem (WDP) löst:

$$\max_{x_i} \sum_{i=1}^I p_i * x_i \quad s.t. \quad \sum_{i|n \in S_i} x_i \leq 1 \quad \forall n \in \{\mathbb{N} | 0 < n \leq N\}$$

Der Auktionator bestimmt die Vickrey-Preise, indem er das WDP für alle Akteure aus $\{\mathbb{N} | 0 < j \leq J\} \setminus j$ erneut löst und somit die Opportunitätskosten für die Abwesenheit des Bieters j bestimmt.

Schritt 3. Der Auktionator vergibt als Ergebnis von Schritt 2 die Rechte an der Bestimmung der Eigenschaften an die jeweiligen Gewinner $winner = \{win_1, \dots, win_n, \dots, win_{N-1}, win_N\}, win_n \in \{\mathbb{N} | 0 < j \leq J\}$.

¹ VCG-Mechanismen sind eine Verallgemeinerung der Zweitpreisauktion mit verdeckten Geboten (Vickrey-Auktion) für den Mehrgüterfall.

Schritt 4. Die Agenten bestimmen die gewonnenen Eigenschaften des Vertrages und formen den abschließenden Vertrag wie folgt²:

$$d_n = \begin{cases} 1, & P_{j|j=win_n}(n, n) | \langle d_n = 1 \rangle \geq 0 \\ 0, & P_{j|j=win_n}(n, n) | \langle d_n = 1 \rangle < 0 \end{cases}$$

Die Agenten geben ihre Gebotspreise p_i entweder gemäß ihrem Nutzen aus der Vertragseigenschaft oder den Opportunitätskosten ab (d.h. dem Preis, den sie bereit sind, für die Vermeidung der Eigenschaft zu zahlen). Bspw. hat Agent 1 einen Nutzen für eine Eigenschaft von 15 Geldeinheiten (GE), während Agent 2 für dieselbe Eigenschaft einen Missnutzen von 20 GE hat. Agent 2 wäre bereit, bis zu 20 GE zu zahlen, damit diese Eigenschaft auf $d_n = 0$ gesetzt werden würde, und würde somit das Gebot von Agent 1, das 15 GE beträgt, überbieten. Der zu zahlende Betrag für Agent 2 würde im VCG-Verfahren allerdings nur 15 GE betragen, da dies das höchste Gebot ohne die Teilnahme von Agent 2 wäre. Agent 2 erhält also eine Vickrey-Zahlung in Höhe von 20 GE – 15 GE = 5 GE, da diese die Opportunitätskosten aus der Sicht des Auktionators für die Teilnahme darstellen.

4.1.2 Winner Takes It All (WTIA)

Das Winner-Takes-It-All-Protokoll (WTIA-P), als weiteres auktionsbasiertes Protokoll, soll einen Referenzwert für das KA-P darstellen. Das WTIA-P greift auf keine differenzierte Nutzenkombinatorik zurück, sondern bestimmt lediglich den Akteur mit der größten Zahlungsbereitschaft für den gesamten Vertrag.

Das Winner-Takes-It-All-Protokoll (WTIA-P)

Schritt 1. Die Agenten reichen ihre Gebote $GB = \{p_1, \dots, p_j, \dots, p_{J-1}, p_J\}$ auf den Gesamtvertrag ein. Die Zahlungsbereitschaft für den Gesamtvertrag bestimmt sich aus den Beträgen der Nutzen über alle Eigenschaften. Die Beträge resultieren daraus, dass bei negativem Nutzen die Opportunitätskosten zur Vermeidung einer Eigenschaft berücksichtigt werden.

Schritt 2. Der Auktionator maximiert den Ertrag der Auktion, indem das höchste Gebot ausgewählt wird:

$$\max \sum_{j=1}^J p_j * x_j \quad s.t. \quad \sum_{j=1}^J x_j \leq 1$$

Der Auktionator bestimmt zudem den Vickrey-Preis, indem er das zweithöchste Gebot bestimmt und die Differenz zum Höchstgebot dem Auktionsgewinner gutschreibt (Vickrey-Zahlung).

Schritt 3. Der Auktionator vergibt als Ergebnis von Schritt 2 die Rechte an der Bestimmung der Vertragseigenschaften an den Gewinner $winner \in \{\mathbb{N} | 0 < j \leq J\}$.

Schritt 4. Der Gewinner bestimmt die gewonnenen Eigenschaften des Vertrages und formt somit den abschließenden Vertrag wie folgt:

² Ein Risikonutzenkalkül für den theoretisch denkbaren Sonderfall, dass eine nicht selbst bestimmbare Eigenschaft eine größere Substitutionsstrafe als der Nutzen aus der Eigenschaft aufweist, wurde zur Vereinfachung außer Acht gelassen.

$$d_n = \begin{cases} 1, & P_{j|j=\overline{\text{winner}}}(n, n) | \langle d_n = 1 \rangle \geq 0 \\ 0, & P_{j|j=\overline{\text{winner}}}(n, n) | \langle d_n = 1 \rangle < 0 \end{cases}$$

4.2 Verhandlungsbasiertes Protokoll

Das verhandlungsbasierte Protokoll nutzt analog zum Auktionator einen unparteiischen Mediator – wie häufig in der Literatur vorgeschlagen (vgl. bspw. [8,16,19]). In diesem Fall unterbreitet der Mediator Vertragsvorschläge und die Agenten entscheiden über deren Annahme als aktueller Vertragskandidat. Abbildung 3 gibt einen Überblick über das Schema der Agentenbeziehungen.

In einem iterativen Prozess wird der Vertragsraum auf der Suche nach Pareto-effizienten Verträgen überprüft. Die Agenten bestimmen hierbei die Richtung der Suche des Mediators, indem sie durch die Annahme- bzw. Ablehnungsentscheidung Informationen über die relative Güte des Vertragskandidaten preisgeben. Der Vertragskandidat, der zuletzt die Zustimmung aller Agenten erhält, wird als finaler Vertrag c festgelegt.

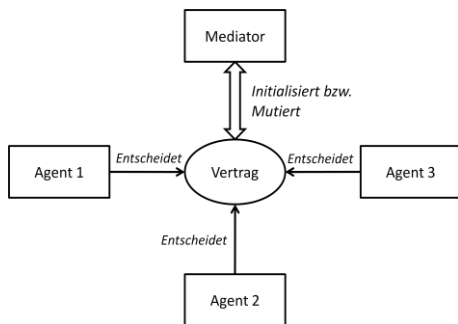


Abbildung 3. Agentenbeziehungen im verhandlungsbasierten Modell

Im Folgenden wird ein generisches Verhandlungsprotokoll basierend auf [16] vorgestellt:

Das generische verhandlungsbasierte Protokoll (GV-P)

Schritt 1. Der Mediator ermittelt zufällig einen Initialvertrag c'_0 , der als aktuell bester Vertrag c^*_0 gesetzt wird³. Es gilt $t \leftarrow 0$.

Schritt 2. Der Mediator invertiert im aktuell besten Vertrag c^*_t ein Bit an einer zufällig ermittelten Stelle und erhält somit einen neuen Vertragskandidaten c'_t .

Schritt 3. Die Agenten entscheiden über die Zustimmung zum Vertragskandidaten. Eine Zustimmung durch einen Agenten hat den Wert $Z_j = 1$, während eine Ablehnung den Wert $Z_j = 0$ einnimmt.

Schritt 4. Der Mediator bestimmt den aktuell besten Vertrag:

$$c^*_{t+1} = \begin{cases} c'_t, & \sum_{j=1}^J Z_j(c'_t) = J \\ c^*_t, & \sum_{j=1}^J Z_j(c'_t) \neq J \end{cases}$$

³ Für c'_t und c^*_t gelten die gleichen Eigenschaften wie für c .

Sofern das Abbruchkriterium nicht erfüllt ist, beginnt der Mediator bei Schritt 2 mit $t \leftarrow t + 1$ erneut. Das Abbruchkriterium wird als eine bestimmten Anzahl an Wiederholungen $t \in \{\mathbb{N} | 0 < t \leq T\} = T$ des Verhandlungsprozesses (Schritt 2 bis 4) festgelegt.

Schritt 5. Sofern das Abbruchkriterium erfüllt ist, legt der Mediator den finalen Vertrag $c = c^*_T$ fest.

Eine Eigenschaft des GV-P ist somit, dass sehr wenige Informationen für den Mediator zur Optimierung notwendig sind und daher auch nur eine geringe Informationspreisgabe von den Agenten verlangt werden muss.

Das GV-P wurde in der Simulation mit zwei verschiedenen Agententypen getestet. Der erste Agententyp agiert dabei opportunistisch, gemäß dem sogenannten Hill Climbing (siehe Abschnitt 4.2.1.), während der zweite Agententyp sich, gemäß dem probabilistischen Akzeptanzkriterium beim Simulated Annealing (siehe Abschnitt 4.2.2.), kooperativ verhält [9,16]. Eine nähere Diskussion zur Realitätsnähe der Verhaltensweisen sowie deren Anreizkompatibilität erfolgt in Kapitel 5.

4.2.1 Hill Climbing (HC)

Die Bezeichnung Hill Climbing (dt. Bergsteigen) bezieht sich auf eine Analogie zum sogenannten Bergsteigeralgorithmus. Der Bergsteigeralgorithmus ist eine iterative Optimierungsheuristik, die stets die beste Verbesserung in der momentanen Nachbarschaft sucht, bis keine weiteren Verbesserungen möglich sind und daher zumindest ein lokales Optimum gefunden ist [22]. Sinngemäß dazu stimmen per Annahme im GV-P, mit dem Agententyp Hill Climber (HC-P), die Agenten nur einem Vertrag zu, der ihnen einen größeren oder identischen Nutzen im Vergleich zum letzten Vertragskandidaten, der die Zustimmung aller Agenten erhalten hat, ermöglicht. Das Verhalten ist also gierig oder opportunistisch.

Die Zustimmungsfunktion in Schritt 3 des GV-P lautet somit für diesen Typus:

$$Z_j(c'_t) = \begin{cases} 1, & U_j(c'_t) \geq U_j(c^*_t) \\ 0, & U_j(c'_t) < U_j(c^*_t) \end{cases}$$

4.2.2 Simulated Annealing (SA)

Die Bezeichnung Simulated Annealing (dt. simulierte Abkühlung) ist ebenfalls wie HC eine Analogie zu einer Metaheuristik. Die SA-Heuristik geht ähnlich wie die HC-Heuristik vor, jedoch ist beim SA eine Bereitschaft vorhanden, eine lokale partielle Verschlechterung einzugehen. Diese Bereitschaft ist abhängig von einer sogenannten Temperatur (τ), die über die Zeit bzw. Verhandlungsrunden gemäß einer Kühlfolge (*cooling schedule*) sinkt. Diese Vorgehensweise soll es ermöglichen, lokale Optima zu überwinden [22]. Beim GV-P mit dem Agententyp Simulated Annealer (SA-P) wurde den Agenten unterstellt, dass sie diese Bereitschaft zur Verschlechterung ebenfalls aufweisen. Somit können die Agenten schlechter stellenden Verträgen zustimmen, was den anderen Agenten gegebenenfalls eine Verbesserung ermöglichen kann (kooperatives Verhalten). Von diesem Verhalten wird eine verbesserte Wohlfahrt gegenüber dem HC-P erwartet, da der Verhandlungsprozess – wie in der Einleitung gezeigt – sowohl individuelle als auch soziale lokale Optima aufweist.

Die Zustimmungsfunktion in Schritt 3 des GV-P lautet somit für diesen Typus

$$Z_j(c'_t) = \begin{cases} 1, & U_j(c'_t) \geq U_j(c_t^*) \vee e^{-\left(\frac{U_j(c'_t) - U_j(c_t^*)}{\tau}\right)} \geq zz_t \\ 0, & U_j(c'_t) < U_j(c_t^*) \wedge e^{-\left(\frac{U_j(c'_t) - U_j(c_t^*)}{\tau}\right)} < zz_t \end{cases}$$

wobei zz_t eine gleichverteilte Zufallszahl aus dem Intervall von 0 bis 1 ist ($zz_t \sim \mathcal{U}(0,1)$).

5. Ergebnisse

Die verschiedenen Protokolle wurden anhand der in Kapitel 3 vorgestellten Kriterien – Leistung, Rechenzeit und Anreizkompatibilität – evaluiert. Hierzu wurde eine Simulationssoftware entwickelt, die die Protokolle implementiert. Zur Lösung des Winner Determination Problem im KA-P wurde eine Schnittstelle zu einem CPLEX-Solver verwendet, während das GV-P über $T = 50.000$ Verhandlungsrunden simuliert wurde. Während weitere Verhandlungsrunden eventuell bessere Ergebnisse hervorbringen könnten, liegt in diesem Bereich ein angemessener Kompromiss zwischen Rechenzeit und Leistung. Der Vertrag wird als bindend für alle Verhandlungsteilnehmer angenommen, sodass auch Nutzenniveaus im negativen Wertebereich nicht ausgeschlossen sind (aufgrund der Verteilung der Nutzenwerte im Intervall $[-100,100]$). Tabelle 1 zeigt die Ergebnisse der Simulationen nach 5.000 Simulationswiederholungen, deren Variationskoeffizienten c_v (Mittelwert-normierte Standardabweichung) in Abhängigkeit des wohlfahrtsmaximierenden Vertrages, der ebenfalls mit der Hilfe des CPLEX-Solver ermittelt wurde, sowie deren mittlerer Rang. Der Rang wurde mit allen Simulationsergebnissen als Bezugsgröße ermittelt, beginnend mit dem kleinsten Wert (Rang 1) und endend mit dem größten Wert (Rang 20.000). Aufgrund der Ordinalskala wurde der Median als Kennzahl für den mittleren Rang gewählt. Des Weiteren wurden die Ergebnisse paarweise in einem Wilcoxon-Vorzeichen-Rang-Test auf Gleichheit des Mittelwertes getestet und erreichten dabei ausschließlich sehr hohe Signifikanzniveaus (p -Wert $< 1\%$).

Tabelle 1. Ergebnisse der Protokolle in den drei Szenarien nach 5.000 Simulationswiederholungen in Abh. des optimalen, wohlfahrtsmaximierenden Vertrages

Szenario 1				
	KA	SA	WTIA	HC
Mittelwert	77,6%	70,4%	53,1%	39,7%
c_v	10,2%	16,8%	24,5%	44,8%
Rang (Median)	16103,5	13197,5	7026	3377,5
Szenario 2				
	KA	SA	WTIA	HC
Mittelwert	76,4%	29,8%	36,5%	-49,2%
c_v	82,2%	1088,3%	730,7%	-1622,6%
Rang (Median)	13921	9963,5	9963,5	5729,5
Szenario 3				
	KA	SA	WTIA	HC
Mittelwert	56,7%	38,8%	42,0%	-6,0%
c_v	24,5%	42,8%	120,0%	-441,7%

Rang (Median)	14330,5	104385	17214,5	3831
---------------	---------	--------	---------	------

Das KA-P erweist sich anhand des Mittelwertes in allen drei Szenarien, sowohl bei privater als auch bei gemischter Bewertung sowie bei gegensätzlicher Bewertung, als leistungsstärkstes Protokoll. Das arithmetische Mittel liegt bei 77,6%, 76,4% bzw. 56,7% des optimalen Wertes. Gleichzeitig weisen die Ergebnisse das KA-P die geringste Streuung auf (c_v : 10,2%, 82,2% bzw. 24,5%). Das Benchmarkprotokoll WTIA-P erreicht allerdings in Szenario 3 anhand des mittleren Ranges ein besseres Ergebnis als das KA-P (17214,5 vs. 14330,5), im arithmetischen Mittel übertrifft das KA-P das WTIA-P (56,7% vs. 42,0%). Aufgrund dieser Diskrepanz zwischen Rang und Mittelwert wurde ein Wilcoxon-Mann-Whitney-Test (Wilcoxon-Rangsummentest) durchgeführt, der jedoch keine ausreichende Signifikanz für eine unterschiedliche Tendenz zeigen konnte. Wahrscheinlich wirken der hohe Variationskoeffizient ($c_v > 1$) und die große Anzahl an negativen statistischen Ausreißern hierbei verzerrend auf den Mittelwert des WTIA-P. Der Wilcoxon-Vorzeichen-Rang-Test, der im Gegensatz zum Wilcoxon-Rangsummentest nicht nur das Vorzeichen der Differenz, sondern auch deren Höhe in Betracht zieht, liefert beim Test der Alternativhypothese, dass der Mittelwert von KA größer als der Mittelwert von WTIA ist, jedoch ein sehr hohes Signifikanzniveau (p -Wert $< 1\%$).

Der Agententyp SA erreicht stets bessere Ergebnisse als der Agententyp HC, bei gleichzeitig geringerer Varianz. Das HC-P erreicht in Szenario 2 und 3 geradezu desaströse Ergebnisse mit negativer sozialer Wohlfahrt (-49,2% bzw. -6,0%) und erreicht einen Variationskoeffizienten von -441,7% bzw. -1622,6%, d.h., die Standardabweichung ist über viermal bzw. sechszehnmals größer als der Mittelwert. Das SA-P erreicht in Szenario 1 gute Ergebnisse (70,4%), ist jedoch in Szenario 2 und 3 beiden auktionsbasierten Protokollen – teilweise deutlich – unterlegen (29,8% bzw. 38,8%). Bei genauer Betrachtung ist das Abschneiden des GV-P nicht überraschend. Die gegensätzliche Bewertung in Szenario 3 führt dazu, dass beim HC-P kein Vertrag nach dem Initialvertrag des Mediators angenommen wird, da stets mindestens einer der Agenten den Vertrag ablehnt.

Beim SA-P werden diese Verträge nur aufgrund der Annealing-Funktion angenommen. Ein ähnliches Problem stellt sich in Szenario 2, in dem die kleine Größe des Vertragsvektors schneller zum Verharren in einem lokalen Maximum führt. Die Vertragsgröße hat nur einen sehr geringen Einfluss auf die Ergebnisse des KA-P, lediglich die Varianz steigt. Die gegensätzliche Bewertung stellt zwar im Vergleich ein größeres Hindernis dar, die Ausmaße fallen jedoch ebenfalls relativ gering aus. Die Abbildungen 4 bis 6 zeigen eine grafische Übersicht der Leistungsergebnisse in Prozent des optimalen Vertrages.

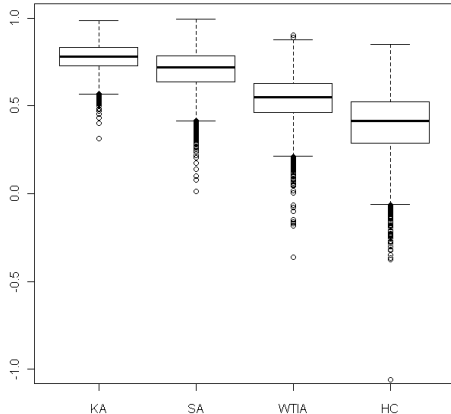


Abbildung 4. Boxplots der Ergebnisse – Szenario 1

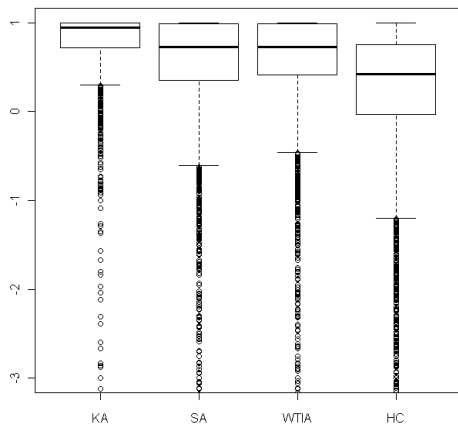


Abbildung 5. Boxplots der Ergebnisse – Szenario 2 (Ausschnitt)

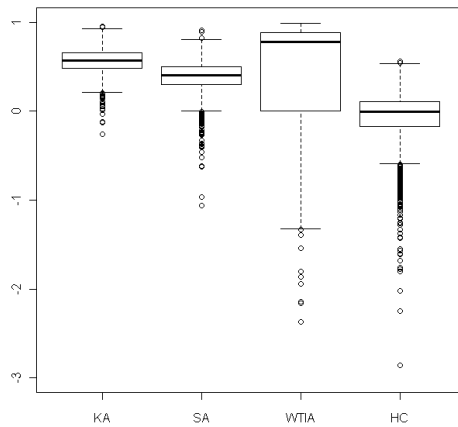


Abbildung 6. Boxplots der Ergebnisse – Szenario 3 (Ausschnitt)

Tabelle 2. Rechenzeit des KA-P im Vergleich (SA-P = 100%)

	$J=3$	$J=6$	$J=9$
N=50	40%	46%	49%
N=100	25%	32%	37%
N=150	29%	36%	46%

Das KA-P (mit Hilfe von CPLEX zur Lösung des WDP) benötigte für die gewählten Parametrisierungen weniger als die Hälfte der Laufzeit des SA-P in der Simulation. Die Ermittlung der relevanten maximalen Gebote pro Eigenschaftskombination ($\frac{(N+1)+N}{2}$ Gebote) sowie die VCG-Mechanismen führen dazu, dass das KA-P bei einem Anstieg der Anzahl der Agenten eine längere relative Rechenzeit aufweist. Die Vergrößerung der Vertragslänge führt zuerst zu einer Abnahme der relativen Rechenzeit, anschließend jedoch zu einem Anstieg. Ein weiterer Anstieg der relativen Rechenzeit bei einer fortlaufenden Vergrößerung der Vertragslänge ist zu erwarten.

Bei der Laufzeitanalyse ist anzumerken, dass das GV-P ein iterativer Prozess mit skalierbarer Laufzeit darstellt. Die willkürlich gewählte Länge von 50.000 Verhandlungsrunden erwies sich im Experiment als angemessener Kompromiss zwischen Laufzeit und Leistung.

Beim KA-P sind insbesondere die VCG-Mechanismen sehr laufzeitintensiv, da diese das Winner Determination Problem mehrmals wiederholen und die Anzahl der Wiederholungen proportional zur Anzahl der Agenten steigt. Allerdings sind die VCG-Mechanismen unerlässlich für eine wahrheitsgetreue Gebotsabgabe.

Die Auswertung der Laufzeit zeigt ein heterogenes Bild. Hierzu wurden testweise 100 Simulationen mit verschiedenen Vertragsgrößen und Agentenzahlen für das Szenario 1 durchgeführt. Dabei wurde die durchschnittliche Rechenzeit gemessen. Tabelle 2 zeigt die Ergebnisse für das KA-P im Vergleich mit dem SA-P. Das HC-P erreicht vergleichbare Ergebnisse wie das SA-P (marginal schneller), während das WTIA-P im Laufzeittest äußerst schnell war und in keinem Fall eine bedeutende Laufzeit benötigte.

Das KA-P wird somit bei einer großen Anzahl an Agenten schnell laufzeitintensiv und ist somit nicht für Anwendungsprobleme wie verteiltes Rechnen (außerhalb von kleinen Agentenzahlen wie in Forschungsnetzwerken) oder Routing geeignet. Wie bereits in der Zielsetzung in Kapitel 1 erläutert, soll das KA-P jedoch ein Protokoll für Anwendungen wie betriebliche Planung und Entscheidungsfindung, Smart Grids, Smart Houses oder das Internet der Dinge darstellen. Diese Problembereiche sind in der Regel durch eine überschaubare Anzahl an Agenten gekennzeichnet. Verhandlungen finden meist nur zwischen einer Teilmenge der Gesamtzahl an Agenten oder bilateral mit einem zentralen Steuerungsagenten statt. Sehr viel Rechenzeit musste für die Übermittlung der Probleminstanz an den CPLEX-Solver verwendet werden, während der Solver im Regelfall für das Lösen des Winner Determination Problem auch bei 200 Vertragseigenschaften weit weniger als eine Sekunde benötigte. Es existieren zudem, wie bereits in Kapitel 2 angesprochen, leistungsfähige Approximationsalgorithmen mit moderaten Laufzeitanforderungen, die eine übermäßige Laufzeitzunahme verhindern könnten.

Bezüglich der Anreizkompatibilität sind die auktionsbasierten Protokolle, KA-P und WTIA-P, aufgrund der VCG-Mechanismen individuell rational. VCG-Mechanismen, als Verallgemeinerung der Vickrey-Auktion (Zweitpreisauktion) für den Mehrgüterfall, führen aufgrund ihrer Eigenschaft als dominante Strategie zur wahrheitsgemäßen Offenlegung der Zahlungsbereitschaft und somit zu einer effizienten Allokation oder in diesem Fall zu einer effizienten Rechtevergabe [35].

Im Gegensatz dazu weist das SA-P keine Anreizkompatibilität auf. Bisher wurde angenommen, dass die Agenten entweder dem Typ HC oder dem Typ SA angehören. Sobald diese Festlegung jedoch aufgelöst wird und eine freie Wahlmöglichkeit gegeben wird, zeigt sich die fehlende Anreizkompatibilität. Tabelle 3 repräsentiert eine Auszahlungsmatrix bei einem Zwei-Agenten-Spiel. Es kann ein Agent dabei entweder auf denselben Agententyp ({HC;HC} bzw. {SA;SA}) oder einen Agenten anderen Typs ({HC;SA} bzw. {HC;SA}) treffen.

Das Nash-Gleichgewicht repräsentiert das strategische Gleichgewicht und führt zu einer individuell rationalen, stabilen Lösung, die somit anreizkompatibel ist. Das Nash-Gleichgewicht wird wie folgt definiert: „Ein Nash-Gleichgewicht ist eine Strategieprofil a^* mit der Eigenschaft, dass Spieler i sich nicht durch die Wahl einer Strategie verschieden von a_i^* verbessern kann, sofern Spieler j an der Strategie a_j^* festhält.“ ([26], S. 22, Originalzitat auf Englisch)

Das Spiel in Tabelle 3 stellt ein Gefangenendilemma dar. Das Nash-Gleichgewicht ist das Strategieprofil {HC;HC} und nicht das wohlfahrtsmaximierende Profil {SA;SA}. Des Weiteren ist das Nash-Gleichgewicht sogar das Strategieprofil mit der niedrigsten sozialen Wohlfahrt. HC kann man stellvertretend auch als opportunistisch und SA als kooperativ ansehen. Sofern der Konterpart sich kooperativ zeigt, ist eine Abweichung von der kooperativen Strategie zur opportunistischen lohnend (100% → 132%). Der andere Agent hat dann – und bereits vorher in {SA;SA} bei simultaner Wahl – ebenfalls einen Anreiz, zum Opportunismus zu wechseln (35% → 78%/74%). Im Strategieprofil {HC;HC} hat keiner der Agenten einen Anreiz, zur Kooperation (SA) zu wechseln, da er sich somit schlechter stellen würde (78%/74% → 35%).

Tabelle 3. Die beiden Agententypen im Vergleich (Nutzenwerte in Relation zum wohlfahrtsmaximierenden Vertrag – Mittelwerte über 250 Simulationen) ⁴

		Agent 2	
		HC	SA
Agent 1	HC	72% 78% ; 74%	80% 132% ; 35%
	SA	80% 35% ; 132%	95% 100% ; 100%

Schema:

[Soziale Wohlfahrt] [Agent 1] ; [Agent 2]
--

Zwar weist das SA-P folglich keine Anreizkompatibilität auf, es existieren jedoch in der Literatur verschiedene Ansätze, um dies zu beheben: So schlägt Klein et al. [16] einen „abkühlenden“ Mediator vor, der jedoch signifikant schlechtere Ergebnisse hervorbringt als „abkühlende“ Agenten. Ein weiterer Lösungsansatz wurde mit stärker oder schwächer gewichteten Zustimmungen bzw. Ablehnungen zu einem Vertrag vorgeschlagen, was allerdings wiederum einen Anreiz zu un wahrheitsgemäßen Verhalten seitens der Agenten bietet. Um dies zu beheben, wurde eine bestimmte Quote für jede der Gewichtungsmöglichkeiten gefordert. Ähnlich argumentiert auch Fink [7], der eine Mindestakzeptanzquote für die Agenten fordert, beruhend auf der Annahme, dass die Agenten daraufhin die Strategie SA in einer Form wählen, dass die geforderte Akzeptanzhäufigkeit genau erreicht wird. Abschließend lässt sich feststellen, dass alle Versuche, eine Anreizkompatibilität für den Agententyp SA durch Veränderung des Verhandlungsprotokolls herzustellen, im besten Fall zu Ergebnissen vergleichbar mit denen des SA-P führen können. Das SA-P stellt die obere Schranke, da das Protokoll sich nicht durch Mechanismen zur Anreizkompatibilität verbessern kann. Vielmehr ist von einer mindestens marginalen Verschlechterung, sowohl in Hinblick auf Leistung als auch auf Rechenzeit, aufgrund dieser Mechanismen auszugehen.

6. Fazit und Ausblick

Die Forschungsarbeit schlägt ein neuartiges kombinatorisches Auktionsverhandlungsprotokoll zu automatisierten Verhandlungen innerhalb bspw. der betrieblichen Planung, beim E-Commerce und im Zusammenhang mit intelligenten Multi-Agenten-Systemen vor und evaluiert dieses. Hierzu wurde ein Forschungsszenario mit drei konkreten Szenarioeinstellungen entworfen und das vorgeschlagene Protokoll sowie

⁴ Die Tatsache, dass die soziale Wohlfahrt in diesem Zwei-Spieler-Spiel nicht dem Mittelwert der beiden Individualnutzen entspricht, und dass die Individualnutzen über 100% des wohlfahrtsmaximierenden Optimums erreichen, soll anhand eines Zahlenbeispiels erläutert werden: Agent 1 und 2 erhalten einen Nutzen in Höhe von 10 bzw. 5, wohingegen sie im Wohlfahrtsoptimum 13 und 3 erhalten würden. Sie erhalten somit einen Nutzen in Abhängigkeit vom Optimum in Höhe von 76,9% bzw. 166,67%. Die Wohlfahrt der beiden Agenten beträgt allerdings nur 93,75%.

Benchmarkprotokolle auf Leistung, Rechenaufwand und Anreizkompatibilität untersucht. Aus dieser Untersuchung ergab sich, dass das vorgeschlagene Protokoll eine sehr gute soziale Wohlfahrt gewährleisten kann und zudem anreizkompatibel ist. Als Nachteil zeigt sich jedoch ab einer bestimmten Vertragsgröße respektive einer bestimmten Anzahl an Verhandlungsteilnehmern eine erhöhte Rechenzeit. Die Anwendungsmöglichkeiten können somit nicht um Massenumgebungen, charakterisiert durch eine große Anzahl an Akteuren (wie beim Routing), erweitert werden.

Ein kombinatorisches Auktionsrahmenwerk innerhalb von automatisierten Verhandlungen erweist sich als interessantes und leistungsstarkes Instrument und ermutigt zu zukünftiger Forschung. Daher werden sich künftige Arbeiten unter anderem auf die Implementierung von Heuristiken für das Winner Determination Problem erstrecken, um eine schnellere Rechenzeit zu erreichen. Des Weiteren soll eine anreizkompatible Variante des generischen Verhandlungsprotokolls mit einem Simulated-Annealing-Agententyp entwickelt und integriert werden. Zudem soll die Untersuchung auf weitere, nicht-binäre Vertragseigenschaften erweitert werden wie bspw. Vorgänger-Nachfolger-Beziehungen oder bestimmte Positionen in einer Abfolge (Fertigungsplanung). Schließlich sollen weitere Szenarioeinstellungen mit vier oder mehr Agenten, unterteilt in Gruppen mit teilweise ähnlichen Nutzenwerten, entworfen werden. Dies soll Aufschluss geben, inwiefern Koalitionsbildung einen Einfluss auf das Verhandlungsergebnis haben kann und wie das kombinatorische Auktionsprotokoll dadurch beeinflusst wird.

7. Literatur

- [1] Asimov, I. 1982. *Asimov's Biographical Encyclopedia of Science and Technology*. 2. Auflage, Doubleday, Garden City, NY, USA.
- [2] Brunner, C., Goeree, J.K., Holt, C.A. und Ledyard, J.O. 2009. An Experimental Test of Flexible Combinatorial Spectrum Auction Formats An Experimental Test of Flexible Combinatorial Spectrum Auction Formats. *Working Paper* No. 431, Zürich.
- [3] Bulow, J. und Klemperer, P. 1996. Auctions Versus Negotiations. *The American Economic Review* 86, 1, 180-194.
- [4] Collins, J., Gini, M. und Mobasher, B. 2002. Multi-Agent Negotiation using Combinatorial Auctions with Precedence Constraints. *Technical Report* 02-009, Minneapolis, MN, USA.
- [5] Conitzer, V. 2010. Making Decisions Based on the Preferences of Multiple Agents. *Communications of the ACM* 53, 3, 84-94.
- [6] Cramton, P., Shoham, Y. und Steinberg, R. 2007. An Overview of Combinatorial Auctions. *ACM SIGecom Exchanges* 7, 1.
- [7] Fink, A. 2003. Automatisierte Koordinationsmechanismen zur Ausgestaltung komplexer Verträge im Rahmen mediatisierter Verhandlungsprozesse. In W. Uhr, W. Esswein, E. Schoop (Hrsg.), *Wirtschaftsinformatik 2003, Band I, Medien - Märkte - Mobilität*, Springer, Berlin/Heidelberg, 281-301.
- [8] Fink, A. 2006. Supply Chain Coordination by Means of Automated Negotiations Between Autonomous Agents. In B. Chaib-draa, J. Müller (Hrsg.), *Multiagent based Supply Chain Management* (Studies in Computational Intelligence, Vol. 28), Springer, Berlin (2006), 351-372.
- [9] Fink, A. 2007. Barwertorientierte Projektplanung mit mehreren Akteuren mittels eines verhandlungs basierten Koordinationsmechanismus. In A. Oberweis, C., Weinhardt, H. Gimpel, A. Koschmider, V. Pankratius, B. Schnizler (Hrsg.), *eOrganisation: Service-, Prozess-, Market-Engineering, Band 2*, Universitätsverlag Karlsruhe, 465-482.
- [10] Hattori, H., Klein, M. und Ito, T. 2007. Using Iterative Narrowing to Enable Multi-Party Negotiations with Multiple Interdependent Issues. *Proceedings of the Sixth International Joint Conference on Autonomous Agents and Multi-Agent Systems*.
- [11] Homberger, J. 2010. Decentralized Multi-level Uncapacitated Lot-sizing by Automated Negotiation. *4OR: A Quarterly Journal of Operations Research* 8, 2, 155-180.
- [12] Jennings, N.R., Faratin, P., Lomuscio, A., Parsons, S., Sierra, C. und Wooldridge, M. 2001. Automated Negotiation: Prospects, Methods and Challenges. *Group Decision and Negotiation* 10, 2, 199-215.
- [13] Kalai, E. and Smorodinsky, M. 1975. Other Solutions to Nash's Bargaining Problem. *Econometrica* 43, 3, 513-518.
- [14] Karnouskos, S. und Holanda, T.N. 2009. Simulation of a Smart Grid City with Software Agents. *Third UKSim European Symposium on Computer Modeling and Simulation*, 424-429.
- [15] Katasonov, A., Kaykova, O., Khriyenko, O., Nikitin, S. und Terziyan, V. 2008. Smart Semantic Middleware for the Internet of Things. *Proceedings of the 5th International Conference on Informatics in Control, Automation and Robotics (ICINCO'08)*, 169-178.
- [16] Klein, M., Faratin, P., Sayama, H. und Bar-Yam, Y. 2007. Negotiating Complex Contracts. *MIT Sloan Working Paper* No. 4196-01, Cambridge, MA.
- [17] Kraus, S. 2001. Automated Negotiation and Decision Making in Multiagent Environments. In M. Luck, V. Marik, O. Stepankova and R. Trappl (Hrsg.), *Multi-agents Systems and Applications*. Springer, New York, NY, USA, 150-172.
- [18] Lai, G. und Sycara, K. 2008. A Generic Framework for Automated Multi-attribute Negotiation. *Group Decision and Negotiation* 18, 2, 169-187.
- [19] Lai, G., Li, C. und Sycara, K. 2006. Efficient Multi-Attribute Negotiation with Incomplete Information. *Group Decision and Negotiation* 15, 5, 511-528.
- [20] Lehmann, D., Müller, R. und Sandholm, T. 2006. The Winner Determination Problem. In P. Cramton, Y. Shoham and R. Steinberg (Hrsg.), *Combinatorial Auctions*. The MIT Press, Cambridge, MA, USA, 297-318.

- [21] Lomuscio, A., Wooldridge, M. und Jennings, N.R. 2003. A classification scheme for negotiation in electronic commerce. *Group Decision and Negotiation* 12, 1, 31–56.
- [22] Michalewicz, Z. und Fogel, D.B. 2004. *How to Solve It: Modern Heuristics*. 2. Auflage, Springer, Berlin/Heidelberg, Germany.
- [23] Milgrom, P.R. 2004. *Putting auction theory to work*. 1. Auflage, Cambridge University Press, Cambridge, MA, USA.
- [24] Nash, J.F. 1950. The Bargaining Problem. *Econometrica* 18, 2, 155-162.
- [25] Nash, J.F. 1951. Non-Cooperative Games. *Annals of Mathematics* 54, 2, 286-295.
- [26] Osborne, M.J. 2010. *An Introduction to Game Theory*. International Edition, Oxford University Press, New York, NY, USA.
- [27] Pekec, A. und Rothkopf, M.H. 2003. Combinatorial Auction Design. *Management Science* 49, 11, 1485-1503.
- [28] Rassenti, S.J., Smith, V.L. und Bulfin, R.L. 1982. A Combinatorial Auction Mechanism for Airport Time Slot Allocation. *The Bell Journal of Economics* 13, 2, 402-417.
- [29] Rubinstein, A. 1982. Perfect Equilibrium in A Bargaining Model. *Econometrica* 50, 1, 97-110.
- [30] Sandholm, T., Suri, S., Gilpin, A. und Levine, D. 2002. Winner Determination in Combinatorial Auction Generalizations. *Proceedings of the First International Joint Conference on Autonomous Agents and Multiagent Systems (AAMAS)*, 69.
- [31] Sandholm, T. 2006. Optimal Winner Determination Algorithms. In P. Cramton, Y. Shoham and R. Steinberg (Hrsg.), *Combinatorial Auctions*. The MIT Press, Cambridge, MA, USA, 337-368.
- [32] Scheffel, T., Ziegler, G., Bichler, M. und Jacob, R. 2008. Selling Spectrum Licenses via Combinatorial Auctions: An Experimental Analysis of Bidding Strategies. *Working Paper MS-0001-1922.65*, München.
- [33] Ströbel, M. und Weinhardt, C. 2003. The montreal taxonomy for electronic negotiations. *Group Decision and Negotiation* 12, 2, 143–164.
- [34] Varian, H.R. 2010. *Intermediate Microeconomics: A Modern Approach*. 8. Internationale Auflage, W. W. Norton & Company, New York, NY, USA.
- [35] de Vries, S., Schummer, J. und Vohra, R. 2007. On ascending Vickrey auctions for heterogeneous objects. *Journal of Economic Theory* 132, 1, 95-118.