

Kombinatorische Auktionen in der betrieblichen Beschaffung

Eine Analyse grundlegender Entwurfsprobleme

Die Autoren

Martin Bichler
Alexander Pikovsky
Thomas Setzer

Prof. Dr. Martin Bichler
Dipl.-Fin.-Math. Alexander Pikovsky
Dipl.-Wi.-Ing. Thomas Setzer
TU München
Fakultät für Informatik (I18)
Lehrstuhl für Internetbasierte Geschäfts-
systeme
Boltzmannstr. 3
85748 Garching/München
martin.bichler@in.tum.de

nung von 5 % des Einkaufsvolumens mit steigender Tendenz [BeCC03].

Eine Auktion wird als Marktinstitution definiert, bei der die Preise und die Ressourcenallokation auf Basis der Gebote der Auktionsteilnehmer nach im Vorhinein fixierten Regeln determiniert werden [McMc87]. Die privaten Bewertungen der Bieter für diese Güter werden durch den Wettbewerb zum Teil offen gelegt. Zu welchem Zeitpunkt und unter welchen Kriterien ein Handel abgeschlossen wird, unterliegt den Regeln der unterschiedlichen Auktionsformate. Eine umfassende Einführung in die Literatur zu klassischen Auktionsverfahren bietet [Klem99]. Zahlreiche spieltheoretische und experimentelle

Untersuchungen zeigen, dass Auktionen im Vergleich zu alternativen Verhandlungsformen eine hohe allokativen Effizienz erzielen [Kage95]. Allerdings wurde der Einsatz klassischer Auktionsverfahren im zwischenbetrieblichen Handel auch stark kritisiert. Beschaffungsverhandlungen sind in der Realität meist zu komplex, als dass sie durch traditionelle Auktionsverfahren ersetzt werden können. Nur in wenigen Fällen liegen Verhandlungen über einfache, standardisierte Produkte vor. Meist umfassen diese Verhandlungen mehrere qualitative Attribute eines Gutes, mehrere Güter oder große Mengen eines Gutes.

In den letzten Jahren wurden zahlreiche neue, *Mehrdimensionale Auktionsmecha-*

■ 1 Einführung

Beschaffungsverhandlungen über komplexe Güter und Dienstleistungen werden meist über Ausschreibung oder über bilaterale Verhandlungen zwischen dem Einkäufer und dem Lieferanten durchgeführt. Zunehmend kommen elektronische Auktionen in der Beschaffung zum Einsatz, um Preisverhandlungen schnell und effizient durchzuführen. Einige Unternehmen wie GlaxoSmithKline nutzen elektronische Auktionen bereits für über ein Drittel ihres Beschaffungsvolumens [Hann04]. Nach einer neueren Studie des Center for Advanced Purchasing Studies unter Nutzern elektronischer Auktionsplattformen liegt der Einsatz elektronischer Einkaufsauktionen im Durchschnitt in der Größenord-

Kernpunkte

Traditionelle Auktionsverfahren sind auf reine Preisverhandlungen mit einfachen, standardisierten Gütern beschränkt. Kombinatorische Auktionen ermöglichen die Abgabe von Bündelgeboten und dadurch die effiziente Durchführung von Verhandlungen über mehrere Güter. Der Einsatz in der betrieblichen Beschaffung ist durch eine Reihe von Besonderheiten gekennzeichnet:

- Die Auswahl der Gewinner führt zu Optimierungsproblemen, bei denen in der Beschaffung zahlreiche betriebswirtschaftlich motivierte Nebenbedingungen beachtet werden müssen.
- Iterative Verfahren sind aus mehreren Gründen die am weitesten verbreiteten Auktionsformate in der Beschaffung.
- Die unterschiedlichen Güter, die in der betrieblichen Praxis beschafft werden, erfordern eine Vielfalt von Gebotstypen zur Berücksichtigung qualitativer Attribute oder von Mengenrabatten, die bisher noch wenig untersucht wurden.

In diesem Beitrag sollen grundlegende Entwurfsprobleme Kombinatorischer Auktionen charakterisiert und Besonderheiten bei Anwendungen in der betrieblichen Beschaffung diskutiert werden.

Stichworte: Kombinatorische Auktion, Mehrdimensionale Auktion, betriebliche Beschaffung, kombinatorische Optimierung

nismen vorgeschlagen, um auch solche komplexen Verhandlungssituationen zu unterstützen. Mehrdimensionale Auktionen basieren auf dem Austausch komplexer Präferenzinformation und sind insbesondere durch die Möglichkeiten des Internets zum schnellen und einfachen Austausch komplexer Datenstrukturen in den Mittelpunkt des Interesses gerückt. Der Begriff leitet sich ab von den verschiedenen Dimensionen (Menge eines Gutes, Qualität eines Gutes, Anzahl der unterschiedlichen Güter), die in kommerziellen Verhandlungen üblicherweise zum Tragen kommen [BiKK02]. Mehrdimensionale Auktionen versprechen hohe allokativen Effizienz auch bei Vorhandensein komplexer Präferenzen der Teilnehmer über diese verschiedenen Dimensionen.

Die derzeit am besten untersuchten Mehrdimensionalen Auktionen sind Kombinatorische Auktionen, die Gebote auf Güterbündel erlauben [CrSS05]. Bisherige spieltheoretische Untersuchungen Kombinatorischer Auktionen und auch die experimentelle Analyse sind noch in den Anfängen [BaLP89; KrRo96; IsJa00; KwLP03; EwMo03]. Trotzdem wurden diese Verfahren bereits in einer Reihe von Fällen erfolgreich eingesetzt. Im Juni 2002 wurde in Nigeria zum ersten Mal eine Kombinatorische Auktion für regional beschränkte Mobilfunklizenzen durchgeführt [KoMM03] und für die Auktionen der US-amerikanischen Federal Communications Commission (FCC) ist der Einsatz Kombinatorischer Auktionen geplant. Auch in der betrieblichen Beschaffung und in der Transportlogistik gibt es erste publizierte Anwendungen. Dazu gehören Auktionen für die Beschaffung von Transportdienstleistungen bei Sears Logistics [LeOP01], die Beschaffung von Gütern und Dienstleistungen bei Mars, Incorporated [HoRR03], Anwendungen bei The Home Depot [ElKe02] und der Einkauf von Mahlzeiten für Schulen in Chile [EpHC02].

Das Forschungsgebiet behandelt grundlegende Fragen der Koordination in verteilten Systemen und fußt auf Forschungsergebnissen aus der Ökonomie, der Künstlichen Intelligenz, der (Wirtschafts-) Informatik und des Operations Research. Ähnlich wie das Ergebnis vieler anderer Arbeiten aus der Wirtschaftsinformatik dienen Mehrdimensionale Auktionen zur effizienten Durchführung komplexer betrieblicher Prozesse und bedürfen der Unterstützung durch spezialisierte Informations- und Kommunikationssysteme [WeHN03]. Ziel dieses Beitrages ist es, die wesentlichen Aspekte bei der Gestaltung Mehrdimensionaler

Auktionssysteme zu charakterisieren. Anhand einer Variante Mehrdimensionaler Auktionen, den so genannten Kombinatorischen Auktionen, beschreiben wir typische Entwurfsprobleme, die bei der Einführung solcher Auktionsverfahren zu beachten sind. Der Schwerpunkt der Betrachtung liegt auf Anwendungen in der betrieblichen Beschaffung, die sich durch eine Reihe von Besonderheiten auszeichnen.

Im nächsten Abschnitt geben wir einen Überblick über den Entwurf Kombinatorischer Auktionen und weiterer Arten Mehrdimensionaler Auktionen, wie sie in der Beschaffung schon eingesetzt wurden. Abschnitt 3 geht dann auf bekannte Auktionsverfahren ein. Wir unterscheiden nach Art der Gebotsabgabe zwischen geschlossenen und offenen Auktionsverfahren. Abschnitt 4 bietet einen kurzen Überblick über derzeitige Anwendungen in der betrieblichen Beschaffung. Der letzte Abschnitt 5 fasst die Kernaussagen des Artikels zusammen.

■ 2 Entwurf Kombinatorischer Auktionen

Bei Mehrgüterauktionen handelt es sich im einfachen Fall um mehrere homogene Güter (engl.: multi-unit auction) und die Gebote bestehen aus Preis und Menge, wie das auf Finanzmärkten üblicherweise der Fall ist. Intensiv diskutiert wurden in den letzten Jahren *Kombinatorische Auktionen*, die auch Verhandlungen über mehrere heterogene Güter erlauben. Eine Kombinatorische Auktion ermöglicht es den Bietern, *Bündelgebote* abzugeben, d. h. einen Preis für eine spezifizierte Menge verschiedener Güter [CrSS05]. Der Preis ist dabei nur für das gesamte Güterbündel gültig und das Gebot ist nicht teilbar (z. B. 10 Einheiten von Gut x und 20 Einheiten von Gut y zu einem Bündelpreis von € 100). Diese Gebote sind überall dort sinnvoll, wo Komplementaritäten zwischen Gütern bestehen, wie das beispielsweise durch Produktions- oder Transportkostensparnisse in der Beschaffung häufig der Fall ist.

Kombinatorische Auktionen werden seit einigen Jahren sehr lebhaft für die Vergabe von Frequenzlizenzen durch die US-amerikanische FCC diskutiert [Milg00]. Diese Lizenzen werden von der FCC in geografische Regionen aufgeteilt und derzeit durch simultane aufsteigende Auktionen (engl.: Simultaneous Multiple Round Auction, SMR) vergeben, d. h. Auktionen

über einzelne Frequenzen werden gleichzeitig durchgeführt. Bieter haben in diesem Markt oft starke Präferenzen für mehrere geografisch aneinandergrenzende Lizenzen, riskieren bei simultanen Auktionen allerdings, dass sie beispielsweise nur eine der gewünschten Lizenzen erwerben, dafür aber einen zu hohen Preis bezahlen. Präferenzen für Güterbündel dieser Art können in Kombinatorischen Auktionen einfach durch Bündelgebote berücksichtigt werden. Noch Mitte der 1990er Jahre wurden Kombinatorische Auktionen als praktisch nicht anwendbar eingeschätzt [McMi94]. Die Gründe dafür sind in zumindest zwei Problembereichen zu suchen:

- die Zeitkomplexität des Ressourcenallokationsproblems und
- die strategische Komplexität für Bieter.

Das Allokationsproblem bei Kombinatorischen Beschaffungsauktionen ist eine Instanz des Mengenüberdeckungsproblems, das zur Klasse der NP-vollständigen Probleme gehört [VrSV03]. Eine ganze Reihe von Arbeiten hat sich dem Allokationsproblem gewidmet. Dieses kann allerdings für viele in der Praxis auftretende Problemgrößen in vertretbarer Zeit gelöst werden [KaBD05]. Als wesentlich anspruchsvoller hat sich die *strategische Komplexität* für Bieter herausgestellt. Bieter müssen ihre Bewertungen für bis zu $2^K - 1$ Kombinationen an Güterbündeln festlegen, wobei K die Anzahl der Güter beschreibt, und darauf aufbauend eine optimale Bietstrategie festlegen. Diese Bewertung könnte beispielsweise auf Basis der Herstellungskosten des Bieters erfolgen. Wenn Bieter unvollständige oder falsche Berechnungen anstellen, kann das zu ineffizienten Ergebnissen führen. Diese Probleme sind derzeit Bestandteil einer intensiven Diskussion (siehe Abschnitt 3).

2.1 Das Allokationsproblem

Vorerst konzentrieren wir uns auf das Ressourcenallokationsproblem bei Kombinatorischen Beschaffungsauktionen. Das nachfolgende vereinfachte Beispiel mit 4 Geboten und 3 Gütern soll zur Illustration dienen. Einkäufer aggregieren oft die Verhandlungen über die Nachfrage an mehreren ihrer Standorte, da Lieferanten durch Einsparungen in Produktions- und/oder Transportkosten entsprechend bessere Gebote abgeben können. In unserem Beispiel benötigt ein Einkäufer kurzfristig unterschiedliche Mengen an Zucker in verschiedenen Produktionsstätten. Jeder Lieferant bietet auf Teilbedarfe (Güterbündel) und jedes Bündel hat einen Preis (siehe Tabel-

Tabelle 1 Beispiel mit Bündelgeboten

Zeile	Güter	Gebote			
		G1	G2	G3	G4
1	1000 t Zucker in München	1	0	1	1
2	800 t Zucker in Bonn	0	1	1	1
3	800 t Zucker in Berlin	1	1	1	0
4	Gebotspreis	€ 150	€ 125	€ 300	€ 125
5	Entscheidungsvariable	x_1	x_2	x_3	x_4

le 1). In diesem Fall müssen Gebote aber zumindest den Gesamtbedarf an einem Standort befriedigen. Durch Einführung von binären Entscheidungsvariablen (x_1, x_2, x_3 und x_4) für jedes Gebot kann ein Optimierungsproblem formuliert werden, in dem versucht wird, die gesamten Beschaffungskosten zu minimieren, unter der Bedingung, dass die Nachfrage an jeder Produktionsstätte gedeckt ist.

Dieses Optimierungsproblem lässt sich wie folgt als binäres Programm formulieren. Es gibt Gebote, $j \in M$, und eine Menge von Gütern L , wobei jedes Gut mit $k = 1, \dots, K$ indiziert wird. Jeder Lieferant $i \in N$ gibt eine Menge M^i von Geboten ab. Jedes Gebot B_{ij} enthält einen Preis p_{ij} zu dem der Bieter das Güterbündel anbietet und einen binären Vektor a_{ij} . Wenn das Gebot B_{ij} die gesamte Nachfrage nach dem Gut k befriedigt, ist $a_{ij}^k = 1$ und sonst 0. Das Optimierungsproblem kann nun entsprechend formuliert werden:

minimiere

$$\sum_{i \in N} \sum_{j \in M} p_{ij} x_{ij}$$

sodass

$$\sum_{i \in N} \sum_{j \in M} a_{ij}^k x_{ij} \geq 1 \quad \forall k \in L \quad (a)$$

$$x_{ij} \in \{0, 1\} \quad \forall i \in N, \forall j \in M^i \quad (b)$$

Die Entscheidungsvariable x_{ij} nimmt den Wert 1 an, wenn das Gebot B_{ij} ein Gewinner in der Auktion ist, ansonsten 0. Die Nebenbedingung (a) legt fest, dass die Gesamtmenge an Gütern in allen ausgewählten Geboten den Bedarf des Käufers für jedes Gut decken muss. In unserem Beispiel in Tabelle 1 werden also die Zeilen 1 bis 3 entsprechend in Nebenbedingungen des Optimierungsproblems umgewandelt, die Zeile 4 in die Zielfunktion. Dabei ist zu beachten, dass eine optimale, kostenminimale Lösung in dieser Formulierung den Bedarf übererfüllen kann, wie das bei den Gewinnergebote {G2, G4} in diesem Beispiel der Fall ist.

Dieses Allokationsproblem ist NP-vollständig, d. h. die in konventionellen Auktionen einfache Allokationsaufgabe führt in kombinatorischen Auktionen zu exponentieller Zeitkomplexität. Rothkopf und Pekec [RoPe98] schlagen daher verschiedene Ansätze vor, um die möglichen Gebote einzuschränken und die Allokation dadurch in kürzerer Zeit zu berechnen. Unabhängig davon wurden verschiedene algorithmische Ansätze zur exakten oder approximativen Lösung des Allokationsproblems in kombinatorischen Auktionen analysiert [VrVo03]. Man hat bestehende Lösungsansätze aus der kombinatorischen Optimierung eingesetzt und auch spezialisierte, neue Algorithmen entwickelt [Sand99]. In zahlreichen Anwendungen haben sich die Problemgrößen als durchaus handhabbar herausgestellt. Auktionen mit mehreren Dutzend Gütern und mehreren hundert Geboten können oft in Sekunden gelöst werden. Die kombinatorische Auktion bei Sears Logistics umfasste beispielsweise 850 Güter [KwLP03]. Für sehr große Auktionen mit sehr vielen Bietern und vielen Gütern wurde der Einsatz von speziellen exakten Lösungsverfahren (z. B. Methode der Spaltengenerierung) wie auch von Meta-Heuristiken (z. B. Simulated Annealing, Genetische Algorithmen) diskutiert. Optimalität der Allokation im mathematischen Sinn spielt für die ökonomische Effizienz von Auktionen im ökonomischen Sinn eine wichtige Rolle. Die Auswahl der zweit- oder drittbesten Lösung kann eine völlig andere Allokation der Güter ergeben. Der Einsatz von Heuristiken für die Lösung des Allokationsproblems ist daher in diesem Fall problematisch. Neben der oben eingeführten, grundlegenden Formulierung kommen in der Praxis Nebenbedingungen zum Einsatz, wie zum Beispiel:

- Die Anzahl der Lieferanten soll ein Minimum nicht unterschreiten, um nicht in Abhängigkeit von nur einem Anbieter zu geraten.

- Die Anzahl der Lieferanten soll ein gewisses Maximum nicht überschreiten, um zu hohe administrative Kosten zu vermeiden.
- Die minimale oder maximale Menge, die pro Lieferant oder pro Gruppe an Lieferanten beschafft wird, soll beschränkt werden (z. B. Quoten für Klein- und Mittelunternehmen).

Solche Nebenbedingungen sind für Anwendungen in der betrieblichen Beschaffung äußerst wichtig, können die Zeit zur Berechnung der Allokation allerdings negativ beeinflussen [DaKa00].

2.2 Wünschenswerte ökonomische Eigenschaften von Auktionsmechanismen

Im Mittelpunkt traditioneller Auktionstheorie stehen Fragen nach dem Erlös bzw. nach optimalen Bietstrategien bei verschiedenen Auktionsverfahren und deren strategischer Komplexität [Wolf96]. Bisher wurden nur wenige solcher Untersuchungen auch für kombinatorische Auktionen angestellt. Einerseits sind kombinatorische Auktionen ein relativ junges Forschungsgebiet. Andererseits sind sie spieltheoretisch auch wesentlich schwieriger zu untersuchen.

Bevor spezielle kombinatorische Auktionsverfahren erläutert werden, soll eine Reihe allgemeiner Eigenschaften aus der ökonomischen Theorie beschrieben werden, die für Auktionen als wünschenswert angesehen werden können. Das Auktionsdesign beschreibt die Regeln einer speziellen Auktion. Diese Regeln sollen Bieter veranlassen, ihre Präferenzen soweit offen zu legen, dass eine optimale Allokation in Bezug auf die privaten Bewertungen bzw. privaten Kosten der Teilnehmer berechnet werden kann. Zwei Optimalitätskriterien werden in der Literatur verbreitet diskutiert [Jack00]:

- Allokative Effizienz** wird erreicht, wenn die Auktion zu einer Lösung führt, welche die Summe der Nutzen aller Teilnehmer maximiert.
- Ertragsmaximierung** (engl.: revenue maximization) führt zu einer Allokation, welche den Nutzen eines speziellen Teilnehmers (meist des Auktionators) maximiert (bzw. in einer Beschaffungsauktion seine Kosten minimiert). Ein entsprechendes Verfahren wird auch als *optimale Auktion* bezeichnet.

Anreizkompatibilität und *Strategiebeständigkeit* (engl.: strategy proofness) sind zwei Eigenschaften, die Teilnehmer dazu bewe-

gen sollen, ihre privaten Bewertungen offen zu legen. Bei Anreizkompatibilität stellt ein entsprechendes „ehrliches“ Bietverhalten ein Bayes-Nash-Gleichgewicht dar, d. h. dieses Bietverhalten ist für einen Bieter optimal, wenn auch alle anderen Bieter einen Preis bieten, der ihrer privaten Bewertung des Gutes entspricht. Die Eigenschaft der Strategiebeständigkeit erfordert sogar ein Gleichgewicht in dominanten Strategien. In anderen Worten, die Strategie ist optimal, unabhängig davon, wie sich andere Bieter verhalten. Dadurch erübrigt sich jede Spekulation und die strategische Komplexität für Bieter reduziert sich auf ein Minimum.

Neben Eigenschaften wie allokativer Effizienz oder Ertragsmaximierung stellt man weitere Ansprüche wie *individuelle Rationalität* und *budgetäre Ausgeglichenheit* (engl.: budget balance) an neue Auktionsmechanismen. Individuelle Rationalität besagt, dass ein Mechanismus für alle Teilnehmer einen positiven erwarteten Nutzen haben muss. Budgetäre Ausgeglichenheit verlangt, dass auch der Auktionator keine Verluste machen darf. Die Literatur in diesem Bereich (engl.: mechanism design) ist gespickt mit einer Reihe von Beweisen, die zeigen, dass es unter bestimmten Annahmen unmöglich ist, Auktionsmechanismen zu entwickeln, die alle diese Eigenschaften erfüllen [MySa83].

Die Spieltheorie ermöglicht die formale Analyse ökonomischer Eigenschaften verschiedener Auktionsverfahren. In der klassischen Auktionstheorie wurde ausgehend von einfachen Annahmen in Modellen mit unabhängigen (engl.: independent private values model) oder auch mit gleichen Bewertungen (engl.: common values model) der Bieter zahlreiche Modellvarianten theoretisch und experimentell untersucht. In diesen Modellvarianten versucht man, Annahmen über die Risikoeinstellung der Bieter, Information über die Anzahl der Bieter, Korrelation oder Symmetrie der Bieterpräferenzen adäquat zu berücksichtigen. Daraus hat sich in den letzten Jahrzehnten eine umfangreiche Literatur entwickelt, die viele Phänomene in der Praxis erklärt.

Die Ergebnisse aus einfachen Auktionen sind nur beschränkt auf kombinatorische Auktionen übertragbar. Spieltheoretische und experimentelle Untersuchungen stehen noch am Anfang. Wegen der Schwierigkeit spieltheoretischer Analysen gehen viele Wissenschaftler neuerdings nicht den Weg von der Theorie zum Experiment, sondern beginnen mit Laborexperimenten zu speziellen Auktionsverfahren, um erste Aus-

sagen über spezielle Auktionsverfahren treffen zu können. Laborexperimente bringen im Gegensatz zur Spieltheorie auch die kognitiven Schwierigkeiten der Bieter bei komplexen Marktmechanismen zum Vorschein.

2.3 Alternative Arten Mehrdimensionaler Auktionsverfahren

Gerade in der betrieblichen Beschaffung werden neben Bündelgeboten in kombinatorischen Auktionen eine Reihe weiterer Gebotstypen eingesetzt. Eine für die Beschaffung interessante Spielart mehrdimensionaler Auktionen sind die so genannten *Mengenrabattauktionen* [DaKa00]. Diese sind besonders in Situationen einsetzbar, in denen große Mengen gehandelt werden. In einer Mengenrabattauktion spezifizieren Gebote den Stückpreis für die Gesamtmenge eines Gutes (z. B. € 500/Einheit bis 100 Einheiten und € 450/Einheit bei mehr als 100 gekauften Einheiten). Meist müssen Nebenbedingungen (z. B. maximale Anzahl von Gewinnern) über mehrere solcher Güter eingehalten werden, die gleichzeitig verhandelt werden, was zu komplexen Allokationsproblemen führt. Die Mengenrabattgebote für zwei Güter sind also aus Sicht des Bieters unabhängig, aber aus Sicht des Käufers von einander abhängig.

Multivariate Beschaffungsauktionen ermöglichen dagegen Gebote auf Preis und qualitative Attribute von Gütern und Dienstleistungen und haben ebenso in der Beschaffung Bedeutung erlangt. Im Gegensatz zu konventionellen Ausschreibungen wird vor der Auktion vom Auktionator eine explizite Zielfunktion definiert, anhand derer die Gebote neben dem Preis auch an verschiedenen qualitativen Kriterien wie Lieferzeitpunkt oder Garantieleistung evaluiert werden [Bich01]. Die Verfahren ermöglichen dadurch einen offenen Wettbewerb bei heterogenen, aber substituierbaren Geboten der Anbieter. Neben grundlegenden spieltheoretischen Modellen [Che93; Bran97] wurden in den letzten Jahren einige Ansätze zur Umsetzung des Konzeptes vorgeschlagen und auch experimentell getestet [BiKS99; Bich00; BiKl00; Stre03]. Je nachdem, ob einfache lineare oder nichtlineare Zielfunktionen eingesetzt werden und welche Information in den Geboten kommuniziert wird, kann die Auswahl der Gewinner zu unterschiedlich komplexen Optimierungsproblemen führen. Bichler und Kalagnanam [BiKa05] beschreiben beispielsweise die Allokationsprobleme bei so genannten *konfigurierbaren Geboten*. Konfigurierbare Gebote

beschreiben den Preis eines Gutes als Funktion der gewählten Attributwerte eines Gutes und erlauben dadurch eine kompakte Darstellung betrieblicher Preisregeln (z. B. bei CPU A kommt ein Aufpreis von € 100 für einen Laptop zum Tragen, bei CPU B ein Aufpreis von € 200; der Kauf des Betriebssystems X mit Textverarbeitungspaket Y führt zu einem Rabatt von € 60; Betriebssystem X und Textverarbeitungspaket Z sind nicht kompatibel; etc.). Diese Regeln können in Geboten beschrieben und bei der Auswertung durch den Käufer automatisiert berücksichtigt werden. Die Art der Zielfunktion und die Art der erlaubten Gebotstypen hat nicht nur Auswirkung auf die Komplexität des Allokationsproblems, sondern auch auf die strategische Komplexität für Bieter. Diese Zusammenhänge wurden bisher noch kaum untersucht.

2.4 Entwurfsprobleme

Grundlegende Überlegungen zum Entwurf kombinatorischer Auktionen spielen natürlich auch bei deren Einsatz in der betrieblichen Praxis eine wichtige Rolle. Einer der zentralen Aspekte beim Entwurf kombinatorischer und generell mehrdimensionaler Auktionen ist der Umgang mit *Komplexität*. Diese tritt in vielerlei Gestalt auf.

- Für den Bieter ergibt sich das Problem der *Bewertungskomplexität* für die zahlreichen möglichen Güterbündel und der *strategischen Komplexität* beim Festlegen einer optimalen Bietstrategie. Wenn die möglichen Bündel nicht eingeschränkt werden, muss ein Bieter bei einer Auktion mit 10 Gütern $2^{10} - 1 = 1023$ Bündel bewerten und sich dann entscheiden, für welche dieser Bündel Gebote abgegeben werden sollen.
- Für den Auktionator ergeben sich Probleme aus der *Zeitkomplexität des Allokationsproblems*, ebenso wie aus der Berechnung von Preisen, wie dies in Kapitel 3.1.2 und 3.2 beschrieben wird.
- *Kommunikationskomplexität* beschreibt daneben die Anzahl der Nachrichten, die zwischen Auktionator und Bietern ausgetauscht werden sollen. Nisan und Segal [NiSe02] zeigen, dass die Kommunikationskomplexität in einem Modell, in dem der Auktionator Preise für jedes Gut kommuniziert, im schlimmsten Fall exponentiell mit der Anzahl der Güter steigt. Ähnliche Probleme können bei multivariaten Auktionen oder Mengenrabattauktionen beobachtet werden [BiKa05; DaKa00].

Bisherige Untersuchungen bei diesen Verfahren haben sich aber größtenteils auf die Zeitkomplexität der jeweiligen Allokationsprobleme konzentriert. Die nachfolgend beschriebenen kombinatorischen Auktionsverfahren haben Vor- und Nachteile in Bezug auf diese Entwurfsprobleme.

3 Kombinatorische Auktionsverfahren

Auktionsformate bzw. -verfahren beschreiben die Regeln verschiedener Bietprotokolle, über die kombinatorische Auktionen durchgeführt werden können. Nachfolgend sollen einige grundlegende Arten kombinatorischer Auktionsverfahren beschrieben werden.

3.1 Geschlossene Auktionsverfahren

Wir unterscheiden grundsätzlich zwischen geschlossenen Verfahren, in denen die Gebote geheim abgegeben werden, und offenen Verfahren, in denen jeder Bieter die Gebote der anderen Bieter sehen kann. Zu den bekannten geschlossenen Verfahren gehören Bestpreisverfahren und Vickrey-Clarke-Groves-Verfahren.

3.1.1 Geschlossene Bestpreisverfahren

Einige Anwendungen kombinatorischer Auktionen basieren auf dem Prinzip einer geschlossenen Bestpreisauktion [ElKe02; EpHC02; RaSB82]. Alle Gebote werden verschlossen bis zu einem bestimmten Termin abgegeben, worauf die kostenminimierende Kombination an Geboten gewählt wird. Eine Reihe von Eigenschaften einfacher Bestpreisauktionen lässt sich auch bei kombinatorischen Verfahren beobachten. Bestpreisauktionen sind im Allgemeinen stabil gegen Absprachen von Bietern (Bietringe) [Robi85]. Allerdings ist die strategische Komplexität für Bieter im Vergleich zu Vickrey-Auktionen oder offenen, iterativen Auktionen hoch. Der Bieter mit den niedrigsten Kosten für das Gut/die Güter kann beispielsweise spekulieren, dass die anderen Bieter höhere Kosten haben und über seinen privaten Kosten bieten, wodurch die Gefahr besteht, dass Bieter mit den niedrigsten Kosten für die Produktion, aber spekulativem Bietverhalten die Auktion nicht gewinnen. Die strategische Komplexität in einer Bestpreisauktion besteht darin, ein im erwarteten Sinne opti-

males Gebot festzulegen, wohingegen es in einfachen Englischen Auktionen eine dominante Strategie gibt, so lange mit zu bieten, bis die Kosten erreicht wird, oder man die Auktion gewinnt.

3.1.2 Vickrey-Clarke-Groves-Verfahren

Vickrey-Clarke-Groves-Mechanismen (VCG) bezeichnen die Klasse strategiebeständiger ökonomischer Mechanismen [Vick61; Grov73], bei denen die Gebote ebenfalls in einer Runde verschlossen an den Auktionator geschickt werden. Das Prinzip kann auch auf kombinatorische Auktionen angewendet werden und wird oft als verallgemeinerte Vickrey-Auktion bezeichnet (engl.: generalized Vickrey auction, GVA). Theoretisch stellen verallgemeinerte Vickrey-Auktionen einen sehr interessanten Ansatz dar, der auch beim Einsatz in der betrieblichen Beschaffung eine Rolle spielen könnte. Die Vor- und Nachteile dieses theoretischen Konzeptes sollen daher kurz diskutiert werden.

Ähnlich wie in der konventionellen Vickrey-Auktion besteht die dominante Strategie darin, die private Bewertung, bzw. die privaten Herstellungskosten für jede mögliche Kombination an Gütern zu bieten. In Vickrey-Zahlungen wird der Beitrag des Gewinners zur Senkung der Gesamtkosten des Käufers an diesen rückerstattet. Angenommen, zwei Güter x und y sollen gekauft werden. Die Gebote der Lieferanten 1 und 2 seien wie in der Tabelle 2 angegeben. Die Gesamtkosten werden mit € 25 minimiert, indem man $\{x\}$ von Lieferant 2 und $\{y\}$ von Lieferant 1 kauft. Lieferant 1 verlangt € 11 für $\{y\}$, bekommt aber eine Vickrey-Zahlung von € 26 – € 25 = € 1, da ohne seine Teilnahme die Gesamtkosten bei € 26 liegen würden. Das heißt, die Nettzahlung des Käufers an Lieferant 1 ist € 11 + € 1 = € 12. Lieferant 2 bietet $\{x\}$ für € 14, bekommt aber eine Vickrey-Zahlung von € 30 – € 25 = € 5, da die Auktion ohne seine Gebote Kosten von € 30 nach sich gezogen hätte. Die Nettzahlung des Käufers an Lieferant 2 ist somit € 14 + € 5 = € 19. Ähnlich wie in der

konventionellen Vickrey-Auktion besteht durch die so berechneten Vickrey-Zahlungen für die Lieferanten eine einfache dominante Strategie, ihre wahren Wertigkeiten zu bieten.

VCG-Mechanismen führen zu einer einfachen dominanten Strategie für Bieter, kämpfen aber in der Praxis mit einer Reihe von Problemen:

- Das Verfahren erfordert von Bietern, eine Bewertung von $2^K - 1$ Güterbündeln durchzuführen. Auch wenn diese Gebote nicht in die Allokation aufgenommen werden, können sie die Zahlungen anderer Bieter beeinflussen. Dieser Aspekt wird auch als *Bewertungskomplexität* bezeichnet. Einige Autoren haben vorgeschlagen, das Problem dadurch besser in Griff zu bekommen, dass der Auktionator in einem mehrstufigen Interview die Bieter systematisch nach ihrer Bewertung für bestimmte Güterbündel befragt, um dadurch nur die minimal nötige Menge an Information erheben zu müssen und dominierte Lösungen frühzeitig auszuschließen [CoSa01]. Bisherige Überlegungen dazu sind aber noch theoretischer Natur.

- Neben der Komplexität des Allokationsproblems, in dem sämtliche Bewertungen aller Bieter berücksichtigt werden müssen, werden auch noch Vickrey-Zahlungen berechnet, was wiederum ein NP-vollständiges Problem darstellt.

- Ein allgemeines Problem in Vickrey-Auktionen ist, dass sie einen vertrauenswürdigen Auktionator voraussetzen. Ein nicht vertrauenswürdiger Auktionator könnte beispielsweise unbemerkt künstliche Gebote einfügen, um die Vickrey-Zahlungen zu reduzieren. Ebenso sind Bieter oft nicht bereit, ihre private Bewertung/Kosten preiszugeben, da diese Information ihre zukünftige Verhandlungsposition beeinträchtigen könnte. Da viele Beschaffungsauktionen vom Einkäufer selbst und nicht von einem externen Auktionator durchgeführt werden, ist dieser Aspekt besonders wichtig. Entsprechende Probleme und Lösungsansätze aus der Kryptographie werden in [Bran03] diskutiert.

Daneben basieren die grundlegenden Argumente aus der Theorie zu VCG-Verfahren auf der Annahme privater, unabhängiger Bewertungen der Bieter. Bei korrelierten Werten der Bieter erachten theoretische Analysen iterative Verfahren wie die klassische Englische Auktion als geeigneter, bei denen Gebote in mehreren Runden offen und damit für alle Bieter einsehbar abgegeben werden [MiWe82].

Tabelle 2 VCG Beispiel

	Gebote (Bündelpreise)		
	$\{x\}$	$\{y\}$	$\{x, y\}$
Lieferant 1	20	11	30
Lieferant 2	14	14	26

3.2 Offene Verfahren

Ein offenes Verfahren ermöglicht es Bietern, Information über die privaten Bewertungen der Wettbewerber zu erfahren, was dazu führen kann, dass sie ihre eigenen Bewertungen anpassen [McMc87]. Diese Verfahren werden meist in mehreren Runden, also *iterativ* durchgeführt. Im Vergleich zu geschlossenen Kombinatorischen Auktionen, in denen potenziell sehr viele Gebote (bis zu $2^K - 1$) abgegeben werden müssen, reicht es bei iterativen Verfahren, in jeder Runde nur wenige Gebote abzugeben. Die FCC hat bisher fast ausschließlich iterative Verfahren in Betracht gezogen. Ebenso scheinen iterative Verfahren für die betriebliche Beschaffung besonders attraktiv zu sein [HoRR03].

3.2.1 Vorteile und Problembereiche

Cramton [Cram98] fasst eine Reihe weiterer allgemeiner Argumente für iterative Auktionen zusammen, die auch für Kombinatorische Auktionen gültig sind. Unter anderem haben Bieter die Möglichkeit, in späteren Runden Gebote auf Bündel abzugeben, die sie zu Beginn nicht in Betracht gezogen haben. In den letzten Jahren wurden verschiedene iterative Kombinatorische Auktionen entwickelt [BrPl96; Park99; DeKL02; WuWe00; BiOs01; AuMi02]. Die Wissenschaftler suchen nach Mechanismen mit minimaler Komplexität für Bieter und Auktionator, ohne dabei auf wichtige ökonomische Eigenschaften wie allokativen Effizienz, Strategiebeständigkeit, Budgetausgeglichenheit und individuelle Rationalität verzichten zu müssen. Einige der Schwierigkeiten, die bei iterativen Mechanismen auftreten, sollen nachfolgend besprochen werden.

Das Schwellwertproblem (engl.: threshold problem) beschreibt die Schwierigkeiten von Bietern, wenn es darum geht, gegen ein großes Bündelgebot zu gewinnen. Angenommen drei Güter x , y , und z sollen gekauft werden. Die Bieter 1, 2 und 3 wären bereit, jeweils eines der Güter für € 3 zu verkaufen. Bieter 4 möchte € 10 für alle drei Güter (private Bewertung). Die Bieter 1, 2 und 3 haben in der aktuellen Runde jeweils € 4 geboten, Bieter 4 hat bereits € 10 für das Güterbündel geboten. Keiner der Bieter 1, 2 und 3 kann alleine das derzeitige Gewinnergebot von Bieter 4 unterbieten. Einer der Bieter müsste dazu das Gebot um mehr als € 2 senken, was unter seiner privaten Bewertung (Kosten) liegen würde. Das Schwellwertproblem erfordert daher Koordination zwischen den Bietern, was in

der Praxis oft schwer zu bewerkstelligen ist. Iterative Auktionen laufen dadurch Gefahr keine allokativ effiziente und damit auch nicht die kostenminimale Lösung für den Käufer zu erreichen.

Das Bloßstellungsproblem (engl.: exposure problem) wird vor allem in Zusammenhang mit simultan durchgeführten Auktionen, wie beispielsweise SMR, diskutiert. Wenn zwei Güter zum Verkauf stehen und ein Bieter beide und nicht nur eines der beiden ersteigern möchte, riskiert dieser in simultanen Auktionen nur eines der Güter zu einem Preis unter seinen Kosten zu ersteigern. In solchen Situationen verhalten sich Bieter oft zurückhaltend, was zu ineffizienten Ergebnissen führen kann. Durch den Einsatz von Bündelgeboten wird dieses Problem weitgehend gelöst.

Ein ähnliches Problem kann allerdings auch bei Kombinatorischen Auktionen entstehen. Angenommen zwei Güter x und y sollen gekauft werden. Möchte ein Bieter nur eines der beiden Güter verkaufen, nicht aber beide, so besteht ebenso die Gefahr unerwünschter Ergebnisse. Dieses Bloßstellungsproblem führt speziell zu Schwierigkeiten in iterativen Auktionen. Wenn Lieferanten Gebote in einer neuen Runde abgeben, möchten sie gewährleistet haben, dass die Gebote für komplementäre Güter aus der letzten Runde auch in der neuen Runde noch gültig sind. Oft werden daher einfach die derzeit besten Gebote eines Bieters auf bestimmte Güterbündel in die nächste Runde eingebracht. Andererseits möchte der Bieter eines in der aktuellen Runde nicht gewinnenden Gebotes unter Umständen ein Gebot auf eine andere Kombination an Gütern abgeben, ohne dadurch Gefahr zu laufen, dass in der nächsten Runde beide Gebote gewählt werden. Um diese Problematik zu umgehen, wurde diskutiert, den Bietern zu erlauben, Gebote zurückzuziehen bzw. Kommunikation zwischen den Bietern vor jeder neuen Bieterunde zu erlauben, bevor ein Gebot endgültig bestätigt wird.

Ein anderer Ansatz besteht darin, logische Verknüpfungen von Geboten zu erlauben [ElKe02]. Logische Bietsprachen sollen es ermöglichen, beliebige Präferenzen einfach zu beschreiben. Im einfachen Fall wird maximal ein Gebot jedes Bieters ausgewählt (XOR-Gebote). Bei OR-verknüpften Geboten können auch mehrere Gebote eines Bieters Gewinnergebote werden. Eine Bietsprache kann aber auch aus OR und XOR zusammengesetzte Gebote zulassen [Nisa00; FuLS99]. Diese Bietsprachen ermöglichen es, das Bloßstellungspro-

blem zu umgehen, indem Kombinationen an logisch verknüpften Geboten abgegeben werden. Allerdings steigen dadurch auch die Komplexität des Allokationsproblems und die Anforderungen an die Benutzerschnittstelle des Systems.

Gleichwertige Allokationen: In herkömmlichen Auktionen wird bei zwei gleich guten Geboten oft dasjenige gewählt, das als erstes abgegeben wurde. In Kombinatorischen Auktionen besteht eine Allokation oft aus mehreren Geboten und in einer Auktionsrunde können mehrere unterschiedliche, aber gleich gute Allokationen zustande kommen. Eine mögliche Lösung dafür sind Zeitstempel, wobei die Allokation gewählt wird, die insgesamt als erstes zustande gekommen ist oder welche den kleinsten durchschnittlichen Zeitstempel besitzt [HoRR03].

Berechnung von Gleichgewichtspreisen: Wenn das Bündelgebot eines Bieters in der aktuellen Auktionsrunde einer iterativen Auktion nicht gewinnt, helfen Marktpreise für Güter und Güterbündel den Bietern dabei, ihre Gebote zu verbessern. In einfachen Englischen Auktionen stellt der Preis des Bestbieters den aktuellen Marktpreis des Gutes dar. Lieferanten, deren Gebot darunter liegt, müssen diesen Marktpreis unterbieten, um die Auktion zu gewinnen. In iterativen Kombinatorischen Auktionen ist die Festlegung solcher Preise wesentlich schwieriger. Eine grundlegende Anforderung an Marktpreise in Beschaffungsauktionen besteht darin, dass diese niedriger als die Preise von Verlierergeboten sein sollen und mindestens so hoch wie die Preise von Gewinnern der aktuellen Auktionsrunde. Weiters soll es für die gegebenen Marktpreise keine bessere Allokation der Güter geben. Wir nennen Marktpreise, die diese Anforderung erfüllen, auch *Gleichgewichtspreise*. Am einfachsten verständlich sind *lineare Preise*. Das bedeutet, der Gleichgewichtspreis für ein Güterbündel entspricht der Summe der Preise in diesem Güterbündel. Allerdings lassen sich in Kombinatorischen Auktionen oft keine linearen Preise berechnen. Teilweise ist es nicht einmal möglich, *anonyme nicht-lineare Preise*, also nichtpersonalisierte Preise für Güterbündel, zu berechnen und man muss zu *personalisierten nicht-linearen Preisen* greifen, d. h., unterschiedliche Bieter bekommen unterschiedliche Preise für dieselben Güterbündel. Die Art der Preissetzung ist eines der wichtigen Unterscheidungskriterien bei den bisher vorgeschlagenen Verfahren zur Durchsetzung iterativer Kombinatorischer Auktionen.

3.2.2 Ausgewählte Implementierungsansätze

Führende Auktionsexperten haben in den vergangenen Jahren begonnen (vor allem im Rahmen der Diskussion um die Durchführung der FCC-Auktionen), unterschiedliche Vorschläge zu machen, wie iterative Verfahren für Kombinatorische Auktionen durchgeführt werden können. *Adaptive User Selection Mechanism* (AUSM) war einer der ersten Ansätze [BaLP89]. Bei diesem Verfahren wird das Allokationsproblem an die Bieter delegiert und eine öffentliche Anschlagtafel soll diesen helfen, sich mit Bietern komplementärer Güter zu koordinieren, um eine optimale Allokation vorzuschlagen. Die meisten alternativen Verfahren sind neueren Datums und lassen die optimale Allokation zentral vom Auktionator berechnen [WeGS99; DeKL02; PoRR03; Park99; WuWe00; AuMi02; VrSV03]. Ein bewertender Vergleich würde ausgedehnte experimentelle Analysen erfordern, die derzeit nicht vorliegen und den Rahmen dieses Artikels auch übersteigen würden. Eine vertiefende Analyse iterativer Kombinatorischer Auktionen findet sich in [PiBi05]. Nachfolgend soll eine kurze Übersicht über die verschiedenen Vorschläge gegeben werden.

Einer der ersten Vorschläge bestand in der Berechnung approximativer linearer Preise. *Resource Allocation Design* (RAD) ist ein Beispiel dafür, welches daneben eine Reihe von Aktivitätsregeln aus SMR einsetzt. Wie in SMR wird in jeder Runde ein minimales Bietinkrement vorgeschrieben. Ebenso ist die Anzahl der Güter, auf die ein Teilnehmer bietet, beschränkt durch die Anzahl der Güter, auf die dieser in der letzten Runde geboten hat. Kennzeichnend für RAD ist jedoch eine Heuristik zur Berechnung von indikativen, linearen Gleichgewichtspreisen [DeKL02].

Ein alternativer und sehr einfacher Ansatz wurde von Porter et al. [PoRR03] vorgeschlagen. Die CC-Auktion (engl.: *combo clock auction*) arbeitet ähnlich wie eine Japanische Auktion für mehrere Güter. Für jedes Gut wird eine Auktionsuhr installiert, die den aktuellen Preis pro Gut anzeigt. Die Uhren starten bei Einkaufsauktionen bei einem sehr hohen Preis und werden Runde für Runde gesenkt. In jeder Runde legen Bieter fest, welche Güterbündel sie zu den momentanen Preisen verkaufen würden. Die Bündelpreise errechnen sich somit aus der Summe der Güterpreise. Bei Gütern, bei denen das Angebot die Nachfrage übersteigt, sinkt der Preis der Auktionsuhr in der nächsten Runde. Nach

einer unbestimmten Anzahl von Iterationen stellen sich somit lineare Gleichgewichtspreise für die Güter ein, zu denen diese dann an die Bestbietenden vergeben werden. Schwierige Optimierungsprobleme werden in diesem Ansatz bis auf Fälle, in denen am Ende der Auktion ein Nachfrageüberschuss auftritt, vermieden. In ersten experimentellen Untersuchungen führte die CC-Auktion verglichen mit SMR zu höherer Effizienz. Der Ansatz vermeidet das Bloßstellungsproblem, beschränkt Bieter allerdings wiederum auf lineare Gebote, was zu Ineffizienzen führen kann. Einige Autoren schlagen zusätzlich auch Bietagenten vor (engl.: *proxy bidding, bidding agents*), wie sie in Internet-Auktionshäusern wie eBay eingesetzt werden [AuCM03].

Eine Reihe von Wissenschaftlern versuchte in den letzten Jahren, die Ineffizienzen, die sich aus der Verwendung linearer Preise ergeben, zu adressieren [Park99; WuWe00; AuMi02; VrSV03]. Bikhchandani und Ostroy [BiOs01] beschreiben, wie primal-duale Algorithmen aus der mathematischen Programmierung [NeWo88] als Auktionen interpretiert werden können, bei denen die dualen Variablen Preise darstellen. Sie zeigen, dass in Kombinatorischen Auktionen immer nichtlineare, personalisierte Gleichgewichtspreise berechnet werden können, aber nicht immer lineare Preise. *iBundle* ist eines der Verfahren, das sich diese Erkenntnisse zu Nutze macht und während des Auktionsablaufes nichtlineare sowie personalisierte nichtlineare Gleichgewichtspreise berechnet [PaUn00]. Die Verfahren versprechen höhere allokativen Effizienz, wurden bisher aber noch nicht ausreichend analysiert.

4 Einsatz in der betrieblichen Beschaffung

Die Unternehmen *CombineNet* (<http://www.combine.net>), *NetExchange* (<http://www.netex.com>) und *Trade Extensions* (<http://www.tradeextensions.com>) bieten derzeit bereits Software für Kombinatorische Auktionen an. Andere Unternehmen sind uns derzeit nicht bekannt. Leider gibt es bisher aber kaum publizierte Information über den Einsatz Kombinatorischer Auktionen in der betrieblichen Beschaffung. Die Autoren haben daher mit Hilfe eines Fragebogens eine Reihe von Telefoninterviews mit den Vertretern der oben genannten Unternehmen durchgeführt, um erste Aussagen über den Einsatz Kombinatorischer Auktionen tref-

fen zu können. Die wichtigsten Ergebnisse daraus werden nachfolgend zusammengefasst.

Danach wurden Kombinatorische Auktionen für die Beschaffung unterschiedlicher Güter (Bürobedarf, Chemikalien, Transportdienstleistungen, Verpackungsmaterial, etc.) bei Kunden der oben genannten Unternehmen eingesetzt. Es handelte sich meist um größere Mengen von Gütern, die hohe Komplementarität aufwiesen. Die Anzahl der Güter in einzelnen Auktionen reichte von Auktionen mit 10 Gütern bis zu Anwendungsfällen mit fast 100.000 Gütern. Die Anzahl der Bieter war ebenso unterschiedlich. Es gab Fälle mit mehreren hundert Bietern, 10 bis 20 Bieter waren in der betrieblichen Beschaffung aber eher die Norm. Diese Aussagen untermauern die breite Einsetzbarkeit der Verfahren.

Bisherige Anwendungen in der betrieblichen Beschaffung wurden großteils als iterative Verfahren durchgeführt, die aber teilweise sehr einfach gestaltet waren und keine Preise, sondern oft nur Information über die aktuellen Gewinnergebote bekannt gaben. Geschlossene Bestpreisauktionen oder VCG-Auktionen wurden hingegen kaum eingesetzt. Die Möglichkeit, betriebswirtschaftlich motivierte Nebenbedingungen bei der Allokation zu berücksichtigen, ebenso wie die Verwendung weiterer Mehrdimensionaler Gebotstypen wurden von den Softwareherstellern generell als wichtig bewertet. Insbesondere spielte die Einbeziehung qualitativer Attribute in die Analyse neben Preis und Menge eine große Rolle in vielen Anwendungsfällen. Auf die Frage nach den betriebswirtschaftlichen Zielen erhielten wir folgende Antworten:

Kosteneinsparungen: Kosteneinsparungen bei Einkäufern wurden als wichtigste Motivation für den Einsatz Kombinatorischer Auktionen in der Praxis gesehen. Tatsächlich hat der Einsatz Kombinatorischer Auktionen nach deren Angaben auch zu beträchtlichen Einsparungen geführt (nach Angaben eines Softwareherstellers im Durchschnitt bei 13%), die teilweise aber auch durch damit einhergehende Prozessverbesserungen entstanden sind.

Senkung der Transaktionskosten für die Durchführung komplexer Verhandlungen: Kombinatorische Auktionen erlauben die effektive Durchführung komplexer Verhandlungen über mehrere Güter. Die Alternative zu Kombinatorischen Auktionen sind meist parallel stattfindende bilaterale Verhandlungen, deren Durchführung zeitraubend und teuer ist. Hoher

et al. [HoRR03] berichten beispielsweise einen Fall, in dem ein Verhandlungsprozess, der üblicherweise 2 Wochen dauerte und mehrere Flüge der Einkäufer zu den Lieferanten umfasste, durch eine 40-minütige Kombinatorische Internetauktion ersetzt werden konnte.

Transparenz: Die Durchführung offener, iterativer Auktionen führt auch zu einer wesentlich höheren Markttransparenz für die Lieferanten, was von diesen als sehr positiv bewertet wird.

Allokative Effizienz: Daneben führt der Einsatz Kombinatorischer Auktionen in ersten Analysen zu hoher allokativer Effizienz, besonders verglichen mit parallelen bilateralen Auktionen [PoRR03].

Fairness: Ein weiterer Vorteil ist die Tatsache, dass alle Lieferanten nach den gleichen Regeln beurteilt werden. Dieser Aspekt spielt in der öffentlichen Beschaffung eine große Rolle.

5 Fazit

Aus betriebswirtschaftlicher Sicht ist die Anwendung Kombinatorischer Auktionen in der Beschaffung viel versprechend. Die Vorteile umfassen Kosteneinsparungen, die effektive Durchführung komplexer Verhandlungen über mehrere Güter, die Transparenz der Verhandlungen für die Teilnehmer, Fairness sowie hohe allokativer Effizienz. Beim Einsatz Kombinatorischer Auktionen in der Beschaffung kommt eine Reihe grundlegender Entwurfsprobleme zum Tragen. Daneben ist diese Domäne aber auch durch eine Reihe spezieller Anforderungen gekennzeichnet, wie zum Beispiel den Einsatz einer Vielzahl betriebswirtschaftlich motivierter Nebenbedingungen für das Allokationsproblem sowie die Verwendung alternativer Mehrdimensionaler Gebotstypen. Die intensive Forschung an Kombinatorischen Auktionen in den letzten Jahren hat zu zahlreichen theoretischen Erkenntnissen geführt, die wir in diesem Artikel erörtert haben. Diese Erkenntnisse spielen für den Entwurf entsprechender Informations- und Kommunikationssysteme in der Beschaffung eine zentrale Rolle. Es steht zu hoffen, dass diese Arbeiten in den kommenden Jahren zu Softwaresystemen führen, mit denen Kombinatorische Auktionen verbreitet in der Praxis eingesetzt werden können.

Literatur

- [AuCM03] *Ausubel, L.; Cramton, P.; Milgrom, P.:* A Practical Combinatorial Auction: The Clock-Proxy Auction. Working paper, Stanford University, 2003.
- [AuMi02] *Ausubel, L.; Milgrom, P.:* Ascending Auctions with Package Bidding. Working paper, University of Maryland, 2002.
- [BaLP89] *Banks, J. S.; Ledyard, J. O.; Porter, D.:* Allocating uncertain and unresponsive resources: An experimental approach. In: RAND Journal of Economics 20 (1989), S. 1–25.
- [BeCC03] *Beall, S.; Carter, C.; Carter, P. L. et al.:* The Role of Reverse Auctions in Strategic Sourcing. Techn. Ber. ISBN 0-945968-57-4, Center for Advanced Purchasing Studies (CAPS), 2003.
- [Bich00] *Bichler, M.:* An Experimental Analysis of Multi-Attribute Auctions. In: Decision Support Systems 28 (2000) 3.
- [Bich01] *Bichler, M.:* The Future of eMarkets: Multi-Dimensional Market Mechanisms. Cambridge University Press, Cambridge, UK 2001.
- [BiKa05] *Bichler, M.; Kalagnanam, J.:* Configurable Offers and Winner Determination in Multi-Attribute Auctions. In: European Journal of Operational Research to appear (2005).
- [BiKK02] *Bichler, M.; Kalagnanam, J.; Kaircioglu, K. et al.:* Applications of Flexible Pricing in Business-to-Business Electronic Commerce. In: IBM Systems Journal 41 (2002) 2.
- [BiKL00] *Bichler, M.; Klimesch, R.:* Simulation multivariater Auktionen – Eine Analyse des Handels mit Finanzderivaten. In: Wirtschaftsinformatik 42 (2000) 3.
- [BiKS99] *Bichler, M.; Kaukal, M.; Segev, A.:* Multi-attribute auctions for electronic procurement. In: First IBM IAC Workshop on Internet Based Negotiation Technologies, Yorktown Heights, NY, USA 1999.
- [BiOs01] *Bikhchandani, S.; Ostroy, J.:* The Package Assignment Model. Techn. Ber., UCLA, 2001.
- [Bran97] *Branco, F.:* The Design of Multidimensional Auctions. In: RAND Journal of Economics 28 (1997) 1, S. 63–81.
- [Bran03] *Brandt, F.:* Fully Private Auctions in a Constant Number of Rounds. In: Financial Cryptography, Gosier, Guadeloupe 2003.
- [BrPl96] *Brewer, P. J.; Plott, C. R.:* A Binary Conflict Ascending Price (BICAP) Mechanism for the Decentralized Allocation of the Right to Use Railroad Tracks. In: International Journal of Industrial Organization 14 (1996) 6, S. 857–886.
- [Che93] *Che, Y. K.:* Design Competition Through Multidimensional Auctions. In: RAND Journal of Economics 24 (1993) 4.
- [CoSa01] *Conen, W.; Sandholm, T.:* Preference elicitation in combinatorial auctions. In: ACM Conference on Electronic Commerce, Tampa, FL 2001, S. 256–259.
- [Cram98] *Cramton, P.:* Ascending auctions. In: European Economic Review 42 (1998) 3–5, S. 745–756.
- [CrSS05] *Cramton, P.; Shoham, Y.; Steinberg, R. (Hrsg.):* Combinatorial Auctions. MIT Press 2005.
- [DaKa00] *Davenport, A.; Kalagnanam, J.:* Price Negotiations for Procurement of Direct Inputs. Workshop report, IMA Hot Topics Workshop: Mathematics of the Internet: E-Auction and Markets, December 3–5, 2000.
- [DeKL02] *DeMartini, C.; Kwasinak, T.; Ledyard, J. O. et al.:* A New and Improved Design For Multi-Object Iterative Auctions. Social Science Working Paper 1054, California Institute of Technology, 2002.
- [ElKe02] *Elmaghraby, W.; Keskinocak, P.:* Combinatorial Auctions in Procurement. Techn. Ber., Georgia Tech, 2002.
- [EpHC02] *Epstein, R.; Henriquez, L.; Catalan, J. et al.:* A Combinatorial Auction Improves School Meals in Chile. In: Interfaces 32 (2002) 6.
- [EwMo03] *Ewerhart, Ch.; Moldovanu, B.:* The German UMTS Design: Insights From Multi-Object Auction Theory. In: Illing, G. (Hrsg.): Spectrum Auction and Competition in Telecommunications. MIT Press 2003.
- [FuLS99] *Fujishima, Y.; Leyton-Brown, K.; Shoham, Y.:* Taming the Computational Complexity of Combinatorial Auctions: Optimal and Approximate Approaches. In: International Joint Conference on Artificial Intelligence (IJCAI), Stockholm, 1999.
- [Gro73] *Groves, T.:* Incentives in teams. In: Econometrica 41 (1973), S. 617–631.
- [Hann04] *Hannon, D.:* GSK closes the loop using e-sourcing tools. In: Purchasing Magazin. Accessed July 28, 2004 2004.

Abstract

An Analysis of Design Problems in Combinatorial Procurement Auctions

Combinatorial auctions are promising auction formats for industrial and public procurement. Potential advantages of using combinatorial auctions include decreased overall spend, low transaction costs for multi-item negotiations, fairness and market transparency for suppliers, as well as high allocative efficiency. A number of fundamental design considerations are relevant to the application of combinatorial auctions in procurement. In addition, procurement specialists need to consider several domain-specific requirements, such as additional side constraints as well as alternative multidimensional bid types.

Keywords: Combinatorial Auction, Multidimensional Auction, Procurement, Combinatorial Optimization

- [HoRR03] *Hohmer, G.; Rich, J.; Reid, G. et al.*: Combinatorial and Quantity-Discount Procurement Auctions Benefit Mars Incorporated and its Suppliers. In: *Interfaces* (2003).
- [IsJa00] *Isaac, M. R.; James, D.*: Robustness of the Incentive Compatible Combinatorial Auction. In: *Experimental Economics* 3 (2000) 1.
- [Jack00] *Jackson, M. O.*: Mechanism theory. In: *The Encyclopedia of Life Support Systems*. EOLSS Publishers 2000.
- [KaBD05] *Kalagnanam, J.; Bichler, M.; Davenport, A. et al.*: Industrial Procurement Auctions. In: *Cramton, P.; Shoam, Y.; Steinberg, R.* (Hrsg.): *Combinatorial Auctions*. MIT Press 2005.
- [Kage95] *Kagel, John*: Auctions – a survey of experimental research. In: *Kagel, John; Roth, Al* (Hrsg.): *The Handbook of Experimental Economics*. Princeton University Press 1995, S. 501–585.
- [Klem99] *Klemperer, P.*: Auction Theory: A Guide to the Literature. In: *Journal of Economic Surveys* 13 (1999) 3, S. 227–286.
- [KoMM03] *Koboldt, Ch.; Maldoom, D.; Marsden, R.*: The First Combinatorial Spectrum Auction. Discussion Paper 03/01, econ, 2003.
- [KrRo96] *Krishna, V.; Rosenthal, R. W.*: Simultaneous Auctions with Synergies. In: *Games and Economic Behavior* 17 (1996), S. 1–31.
- [KwLP03] *Kwasinak, T.; Ledyard, J. O.; Porter, D. et al.*: A new and improved design for multi-objective iterative auctions. In: *Management Science* (2003).
- [LeOP01] *Ledyard, J. O.; Olson, M.; Porter, D. et al.*: The first use of a combined value auction for transportation services. In: *Interfaces* (2001).
- [McMc87] *McAfee, R.; McMillan, P. J.*: Auctions and Bidding. In: *Journal of Economic Literature* 25 (1987), S. 699–738.
- [McMi94] *McMillan, J.*: Selling spectrum rights. In: *Journal of Economic Perspectives* 8 (1994) 3, S. 145–162.
- [Milg00] *Milgrom, P.*: Putting Auction Theory to Work: The Simultaneous Ascending Auction. In: *Journal of Political Economy* 108 (2000) 21, S. 245–272.
- [MiWe82] *Milgrom, P. R.; Weber, R. J.*: A Theory of Auctions and Competitive Bidding. In: *Econometrica* 50 (1982), S. 1089–1122.
- [MySa83] *Myerson, R. B.; Satterthwaite, M. A.*: Efficient Mechanisms for Bilateral Trade. In: *Journal of Economic Theory* 29 (1983), S. 265–81.
- [NeWo88] *Nemhauser, G.; Wolsey, L.*: *Integer and Combinatorial Optimization*. John Wiley & Sons, Chichester 1988.
- [Nisa00] *Nisan, N.*: Bidding and allocations in combinatorial auctions. In: *ACM Conference on Electronic Commerce (EC-2000)*, Minneapolis, MI 2000.
- [NiSe02] *Nisan, N.; Segal, I.*: *The Communication Complexity of Efficient Allocation Problems*. Techn. Ber., Hebrew University, 2002.
- [Park99] *Parke, D. C.*: iBundle: An efficient ascending price bundle auction. In: *ACM Conference on electronic commerce*, Denver 1999, S. 148–157.
- [PaUn00] *Parke, D. C.; Ungar, L. H.*: Preventing Strategic Manipulation in Iterative Auctions: Proxy-Agents and Price-Adjustment. In: *17th National Conference on Artificial Intelligence (AAAI-00)* 2000.
- [PiBi05] *Pikovsky, A.; Bichler, M.*: Information Feedback and Decision Support in Iterative Combinatorial Auctions. In: *Konferenz Wirtschaftsinformatik (WI 2005)*, Bamberg, Springer 2005.
- [PoRR03] *Porter, D.; Rassenti, S.; Roopnarine, A. et al.*: Combinatorial auction design. In: *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America (PNAS)* to appear (2003).
- [RaSB82] *Rassenti, S. J.; Smith, V.; Bulfin, R. L.*: A combinatorial auction mechanism for airport time slot allocation. In: *Bell Journal of Economics* 13 (1982), S. 402–417.
- [Robi85] *Robinson, M. S.*: Collusion and the Choice of Auction. In: *Rand Journal of Economics* 16 (1985), S. 141–145.
- [RoPe98] *Rothkopf, M. H.; Pekec, A.*: *Computationally Manageable Combinatorial Auctions*. In: *Maryland Auction Conference*, Maryland, USA 1998.
- [Sand99] *Sandholm, Tuomas*: Approaches to winner determination in combinatorial auctions. In: *Decision Support Systems* 28 (1999) 1, S. 165–176.
- [Stre03] *Strecker, S.*: Preference revelation in multi-attribute reverse English auctions: A laboratory study. In: *International Conference on Information Systems (ICIS)*, Seattle, WA, USA 2003.
- [Vick61] *Vickrey, William*: Counterspeculation, auctions and competitive sealed tenders. In: *Journal of Finance* 16 (1961) 1, S. 8–37.
- [VrSV03] *de Vries, S.; Schummer, J.; Vohra, R.*: On Ascending Vickrey Auctions for Heterogeneous Objects. In: *FCC Combinatorial Bidding Conference* 2003 2003.
- [VrVo03] *de Vries, S.; Vohra, R.*: Combinatorial Auctions: A Survey. In: *INFORMS Journal of Computing* 15 (2003) 3, S. 284–309.
- [WeGS99] *Weinhardt, Ch.; Gomber, P.; Schmidt, C.*: Pricing in Multi-Agent Systems for Transportation Planning. In: *Journal of Organizational Computing and Electronic Commerce* (1999).
- [WeHN03] *Weinhardt, Ch.; Holtmann, C.; Neumann, D.*: Market Engineering. In: *Wirtschaftsinformatik* 45 (2003) 6.
- [Wolf96] *Wolfstetter, E.*: Auctions: An Introduction. In: *Journal of Economic Surveys* 10 (1996) 4, S. 367–420.
- [WuWe00] *Wurman, P.; Wellman, M. P.*: AkBA: A progressive, Anonymous-Price Combinatorial Auction. In: *ACM Conference on Electronic Commerce*, Minneapolis 2000, S. 21–29.