

Coalitional Skill Games für die Zuweisung von Bauaufträgen

Jonathan Gruber
TU Berlin – DAI Labor
Ernst-Reuter-Platz 7
D-10587 Berlin
0049 30 314 74000

Laura Eleonore Moritz
TU Berlin
Straße des 17. Juni 135
D-10623 Berlin
0049 30 3140

Hendrik Motza
TU Berlin – DAI Labor
Ernst-Reuter-Platz 7
D-10587 Berlin
0049 30 314 74000

jonathan.gruber@dai-labor.de l.moritz@campus.tu-berlin.de hendrik.motza@dai-labor.de

ABSTRACT

This paper addresses the question if a combination of auction and negotiation will help to build an algorithm that fulfill any-time property as well as it produced an optimal result in the end. First the state of the art is observed by going through relevant literature and then the behavior of the implemented algorithm based on different scenarios is tested.

Keywords

Auktionen; Coalition Formation; Spieltheorie; Task Reallocation; Verhandlungstheorie; Utilitaristische Wohlfahrt

1. EINLEITUNG

Die Agententechnologie hat sich als eine der faszinierendsten und wichtigsten Forschungsgebiete in der Informatik etabliert. Ein Agent beschreibt dabei ein Computersystem, das sich in einer bestimmten Umgebung befindet und fähig ist, eigenständige Aktionen in dieser Umgebung durchzuführen, um seine (vorgegebenen) Ziele zu erreichen [5].

Das Anwendungsbeispiel besteht aus Baustellen und (Bau-) Unternehmen. Sowohl die Lage der Baustellen als auch die Lage der (Bau-) Unternehmen sind auf einer Landkarte verzeichnet. Die Baustellen schreiben Bauaufträge aus, diese haben einen Wert und benötigen eine Menge von Skillressourcen $S(R)$, diese setzen sich aus Skills S (z.B. Baggern, Mauern, Elektrik) zusammen und sind durch die Menge an Ressourcen R (z. B. Baggern (3)) hinterlegt. Jedes Unternehmen und somit jeder Agent kann eine Menge von Skillressourcen anbieten. Die soziale Wohlfahrt soll in einem realistischen Szenario maximiert werden.

2. HYPOTHESE

Eine Kombination aus Auktions- und Verhandlungsverfahren liefert in verschiedenen Szenarien zu jeder Zeit ein Ergebnis und führt zu einer optimierten Lösung. Des Weiteren wird schon frühzeitig ein annähernd optimales Ergebnis geliefert.

3. KONZEPTE

3.1 Any-Time

Ein Algorithmus der die Any-Time Eigenschaft erfüllt, liefert zu jedem Zeitpunkt $t > 0$ eine bis zu diesem Zeitpunkt gefundene beste Lösung. Es handelt sich um ein Verbesserungsverfahren, das insbesondere bei modernen Planungs- und Steuerungsalgorithmen in Multi-Agenten-Systemen zum Einsatz kommt [1]. Die untereinander verhandelnden Broker führen zu einem hohen Rechenaufwand, deshalb ist es wichtig, auch in der Zwischenzeit ein Ergebnis geliefert zu bekommen (Vgl. Verhandlung).

3.2 Task Reallocation

Task Reallocation spielt eine Schlüsselrolle in Verhandlungsmechanismen unter Agenten. Falls Aufgaben (engl. tasks) nicht initial den Agenten zugewiesen werden, die ressourcenoptimiert arbeiten, kann durch Neuzuweisung (engl. reallocation) ein besseres Ergebnis erzielt werden [10].

3.3 Standardabweichung

In der deskriptiven Statistik beschreibt die Standardabweichung, wie weit die Stichprobe im Schnitt um das arithmetische Mittel streut. Sie ist also ein Streuungsmaß für Stichproben [2]. In der vorliegenden Studie werden die Standardabweichungen bezogen auf die Distanz einer Baustelle zu Unternehmen genutzt. Damit soll eine vorschnelle Zuordnung einer Baustelle zum nächstliegenden Unternehmen verhindert werden, weil dies zu nicht realistischen Ergebnissen führt. Im Falle einer vorschnellen Zuordnung besteht die Gefahr, dass zuerst die Unternehmen den Baustellen zugeordnet werden, die die kleinste Distanz zu ihnen aufweisen. Folglich werden Baustellen, die weit von den Unternehmen wegliegen, ignoriert, obwohl die Chance besteht, dass ihr Ressourceneinsatz schlussendlich die utilitaristische Wohlfahrt maximieren würde.

3.4 Coalition Formation

Unter Coalition Formation versteht man eine Form der Kooperation, in der nutzenbasierte Agenten bei Bedarf und auf Zeit zusammenarbeiten. Ihr unterliegt die Idee, dass unter Koalitionsbildung der Nutzen von einigen der Teilnehmern superadditiv ist. Voraussetzung ist die soziale Wohlfahrtsmaximierung. Coalition Formation kann in der Wirtschaft zur Kostenreduktion oder zur Profitmaximierung genutzt werden, da eine Agentengruppe größere Verhandlungsstärke oder höhere monetäre Entlohnung erfahren kann [3].

In der vorliegenden Studie eignet sich Coalition Formation um die Beziehung zwischen Unternehmen untereinander abzubilden, da auch sie kooperieren können, um eine Baustelle zu bedienen.

3.5 Auktion

Es existieren vier grundsätzliche Auktionstypen, die die Theorie und Praxis dominieren: Die Vickrey Auktion (verdeckte Zweitpreisauktion) beschreibt eine Form der Auktion, bei der zwar der Höchstbietende den Zuschlag erhält, aber nur das zweithöchste Gebot zahlen muss. Unter der verdeckten Erstpreisauktion versteht man eine Auktionsform, bei der der Höchstbietende den Zuschlag erhält und den von ihm gebotenen Preis zahlen muss, während die Englische Auktion die offene Erstpreisauktion bezeichnet. Als Holländische Auktion beschreibt man die Rückwärtsauktion, bei der der Verkäufer einen Startpreis vorgibt. Der Preis ist also

rückläufig während des gesamten Auktionsprozesses. Der erste Käufer der zustimmt erhält den Zuschlag [8].

In der vorliegenden Studie werden die Grundzüge der Englischen Auktion verwendet, da sie den Anforderungen der Szenarien am nächsten kommen. Im Unterschied zur Englischen Auktion erhält allerdings nicht der Höchstbietende den Zuschlag, sondern der Auktionsteilnehmer mit dem niedrigsten Angebot. Die Auktionen laufen parallel, d.h. die Unternehmen können ihre freien Skillressourcen gleichzeitig auf mehreren Baustellen anbieten. Die Gebote sind jedoch verbindlich, bis diese unterboten werden. Daher darf für jede freie Skillressource zu jedem Zeitpunkt nur ein gültiges Gebot existieren. Außerdem werden die Skillressourcen einzeln versteigert, d.h. Unternehmen bieten nicht auf ganze Baustellen oder Skillressourcenpakete, sondern nur auf einzelne Ressourcen. Auf diese Weise können die Preise, die ein Unternehmen einer Baustelle anbietet, auch innerhalb eines Skilltyps differieren.

3.6 Koalitionsbildung

Um die Menge aller möglichen Koalitionen zu bekommen, wird ein Brute Force Verfahren angewendet. Der Brute Force Ansatz bezeichnet eine triviale Optimierungslösung bei der alle möglichen Ergebnisse berechnet werden, um schlussendlich die eine korrekte oder die beste Lösung zu identifizieren [9].

In der vorliegenden Studie werden aus der Menge aller Koalitionen die herausgefiltert, die die Fahrtkosten minimieren. Anschließend wird, mit dem Ziel der maximalen Fahrtkostenreduktion, eine Kombination von Koalitionen aus dieser Menge gebildet, die nicht miteinander in Konflikt stehen.

3.7 Utilitaristische Wohlfahrt

Eine Utilitaristische Wohlfahrtsfunktion (auch Bergson-Samuelson-Wohlfahrtsfunktion) beschreibt einen speziellen Typ sozialer Wohlfahrtsfunktionen. Sie baut auf individuellen Rangordnungen auf, d.h. alle Individuen einer Gesellschaft verfügen über Präferenzordnungen, die durch eine Nutzenfunktion repräsentiert wird. Sie weist jeder Alternative einen Zahlenwert zu. Dieser Zahlenwert ist höher, wenn eine Alternative besser bewertet wird. Die gesellschaftliche Rangordnung lässt sich so aus der individuellen Rangordnung aller Mitglieder der Gesellschaft ableiten [6].

Sei X also eine Menge von gesellschaftlichen Allokationen, R die Menge aller Präferenzordnungen auf X und $\{1, \dots, n\}$ eine Menge von Individuen. Eine Utilitaristische Wohlfahrtsfunktion ist eine Abbildung

$$W: \mathbb{R}^N \rightarrow \mathbb{R}, W: (u_1(x), \dots, u_n(x)) \mapsto W(u_1(x), \dots, u_n(x)). [7]$$

4. ALGORITHMUS

Der implementierte Algorithmus besteht aus drei Stufen:

1. **Initiale Zuordnung:** Es wird die Standardabweichung der Distanz von Baustelle zu Unternehmen berechnet und nach absteigender Standardabweichung sortiert. Die Skillressourcen werden basierend auf der Sortierung auf nächstgelegene Baustellen verteilt. Das Resultat liegt unmittelbar vor.
2. **Auktion:** Die Baustellen werden mit Preisen aus der ersten Stufe (Initiale Zuordnung) neu ausgeschrieben. Nun haben Unternehmen die Möglichkeiten jede bisher angebotene Skillressource mit ihren freien Skillressourcen zu unterbieten. Die Auktionen laufen parallel und enden erst dann, wenn in

keiner Auktion mehr ein Gebot abgegeben wird oder wenn der Algorithmus vorzeitig unterbrochen wird.

3. **Verhandlungen und Koalitionen:** Die Preise der Baustellen stehen fest. Es kommt ein Algorithmus zu Einsatz, der die Utilitaristische Wohlfahrt mittels Seitenzahlungen maximiert. Da alle Kombinationen von Koalitionen getestet werden soll, kann die Berechnung des finalen Resultats enorm viel Zeit in Anspruch nehmen, weswegen das Verfahren in großen Szenarien unter Umständen vorzeitig abgebrochen werden muss.

4.1 Stufe 1

Der Algorithmus bietet in Stufe 1 nacheinander jeweils die benötigten Skillressourcen einer Baustelle bestimmten Unternehmen an. Diese können, auf Basis bisher unbesetzter Skillressourcen, ein initiales Angebot abgeben. Der Preis dieses Angebots ist beliebig und limitiert sich nur durch das Preisspektrum, in dem das Unternehmen in der zweiten Stufe auf diese Baustelle bieten darf.

Die Reihenfolge bei der Verteilung von Skillressourcen einer Baustelle erfolgt in absteigender Sortierung der Standardabweichung bezüglich der Distanzen der jeweiligen Baustelle zu den übrigen Unternehmen. Die Vorteile dieser Sortierung werden in Szenario 1 (siehe Kapitel 5.1) an einem Beispiel näher erläutert.

Der Bidding-Factor definiert, in welchem Verhältnis der gebotene Preis in dieser Stufe zum minimal erlaubten Gebot in Stufe 2 steht. Bei einem Bidding-Factor von 3 dürfte das Unternehmen minimal ein Drittel des Preises bieten, welchen er maximal in dieser Stufe für einen Skill von der entsprechenden Baustelle verlangt hat. Damit wird verhindert, dass die Unternehmen einen zu weit überzogenen Preis verlangen, da dies anschließend ihre Wettbewerbsfähigkeit in der Auktion verschlechtern würde. Sofern das Unternehmen in der ersten Stufe kein initiales Angebot auf eine Kombination von Baustelle und Skilltyp bereitstellt, hat dieses Unternehmen auch kein minimales Preislimit bei Geboten auf eine Ressource der entsprechenden Kombination.

4.2 Stufe 2

In Stufe 2 des Algorithmus werden zu Beginn alle Unternehmen über sämtliche Baustellen und deren aktuelle Preise informiert. Die Unternehmen haben daraufhin die Möglichkeit in einer parallelen Auktion ihre aus Stufe 1 noch nicht verteilten und somit noch freien Skillressourcen anzubieten und damit vorhandene Angebote zu unterbieten. Um ein gültiges Angebot für eine Skillressource abzugeben, muss das Gebot um einen bestimmten Prozentsatz niedriger sein als das aktuell höchste Gebot. Ausgenommen aus dieser Regel sind nur die letzten Gebote auf einen Skill einer Baustelle. Wenn ein Unternehmen zwar noch ein unterbietendes Gebot abgeben möchte, dieses aber nicht um den geforderten Prozentsatz (welcher im Algorithmus durch den so genannten Bidding-Step definiert wird) niedriger ist, so wird das Gebot noch angenommen, ist aber das letzte zulässige Gebot dieses Unternehmens auf diesen Skill dieser Baustelle. Dies entspricht einem ähnlichen Prinzip wie das All-In beim Pokern. Durch diese Regel lässt sich die Dauer der Auktion begrenzen, so dass nicht in minimalen Schritten unterboten werden kann, aber trotzdem das Unternehmen mit dem geringstmöglichen Gebot den Zuschlag erhält. Sollte ein Unternehmen eine Skillressource auf eine Baustelle bieten, für die es bereits eine entsprechende Skillressource in der Stufe 1 des Algorithmus angeboten hat, so muss das neue Gebot einen Preis aufweisen, der minimal dem Preis

aus Stufe 1 geteilt durch den festgelegten Bidding-Factor entsprechen darf. Gibt ein Unternehmen also beim initialen Angebot einen Preis an, der höher liegt als das Produkt aus dem Bidding-Factor und der wahren Wertschätzung, kann dieses Unternehmen keine weiteren Gebote bis zu seiner wahren Wertschätzung abgeben und verringert somit die Wahrscheinlichkeit den Auftrag behalten zu können. Gebote dürfen die Unternehmen nur dann machen, wenn deren angebotene Skillressourcen noch frei verfügbar sind, also keiner anderen Baustelle zugesichert wurde. Wird die Skillressource eines Unternehmens unterboten, so ist sie wieder als freie Skillressource verfügbar und kann während der Auktion wiederum neu auf dieselbe, oder einer anderen Baustelle angeboten werden. Diese Auktion läuft so lange, bis keine Baustelle mehr ein niedrigeres Angebot machen kann. Nach dem Ende der Auktion werden die aktuell offenen Angebote akzeptiert und ergeben in Ihrer Summe somit die Gesamtkosten der Baustelle. Diese Baustellenkosten stehen ab diesem Zeitpunkt endgültig fest und verändern sich in der nachfolgenden Stufe nicht mehr.

4.3 Stufe 3

In Stufe 3 wird nach möglichen Koalitionen gesucht, welche die Gesamtverluste durch Transport- und Personalkosten minimieren (Utilitaristische Wohlfahrt). Der zusätzlich erwirtschaftete Gewinn durch die Minimierung der Verluste jeder Koalition wird gleichmäßig auf die beteiligten Unternehmen verteilt entsprechend der Menge an Ressourcen, die ein Unternehmen in die jeweilige Koalition einbringt. Zur Bildung der Koalitionen teilt jedes Unternehmen dem Algorithmus seinen Kostenaufwand für jeden möglichen Auftrag mit. Anschließend legt der Algorithmus die zu bildenden Koalitionen fest. Da sich der Gewinn aller Unternehmen gegenüber dem Ergebnis der vorherigen Stufe verbessert, wird jedes (rationale) Unternehmen der festgelegten Koalition zustimmen.

Damit ein Unternehmen eine möglichst hohe Chance hat eine Koalition eingehen zu können, ist es sinnvoll dem Algorithmus die wahre Kostenfunktion offen zu legen. Würde das Unternehmen eine höhere Kostenfunktion vortäuschen, könnte es zwar im Falle einer Koalition den eigenen Gewinn erhöhen, doch die Chance überhaupt erst in diese Koalition zu gelangen würde sinken.

In Stufe 3 werden zuerst alle möglichen Koalitionen generiert und anschließend werden die sinnvollen Koalitionen herausgefiltert, die einen positiven Gewinn erzielen. Die verschiedenen Koalitionen können jedoch miteinander in Konflikt stehen, da jede einzelne Skillressource der Unternehmen nur zu einer Koalition gehören darf. Um eine möglichst hohe Wohlfahrt zu erzielen, müssen möglichst viele sinnvolle Koalitionen kombiniert werden, die untereinander nicht in Konflikt stehen. Hierbei teilt sich die Stufe 3 wieder in zwei Unterstufen auf, welche erneut das Prinzip der Task Reallocation in Bezug auf die Koalitionsbildung verwenden.

Da das Auffinden der idealen Kombination mehrere Koalitionen ein sehr rechenintensiver Vorgang ist, wird in Stufe 3.1 zuerst versucht möglichst schnell eine sehr gute Kombination zu ermitteln, die aber nicht zwangsläufig die beste Kombination sein muss. Dazu werden die Koalitionen nacheinander auf Konflikte mit der aktuellen Auswahl an Koalitionen geprüft. Sofern kein Konflikt existiert, wird die geprüfte Koalition zu dieser aktuellen Auswahl an Koalitionen hinzugefügt. So wird in relativ kurzer Zeit eine Kombination von Koalitionen gebildet, die bereits einen möglichst hohen Gewinn erwirtschaften kann. Allerdings muss es sich auch bei dieser Lösung nicht um das optimale Ergebnis handeln. Daher erfolgt in Stufe 3.2 nochmal ein Brute Force Verfahren, um die

beste Kombination von Koalitionen zu finden. Ab diesem Punkt ist der Algorithmus vollständig abgelaufen und das Resultat beinhaltet eine Lösung, welche die geringstmögliche Summe an Verlusten aufweist.

5. SZENARIEN

In der vorliegenden Studie werden vier Szenarien betrachtet:

1. In Szenario 1 wird ein Beispiel betrachtet, in dem aufgezeigt wird, warum die Nutzung der Standardabweichung in Stufe 1 von Vorteil ist.
2. Unter der Prämisse, dass die Transportkosten nicht mehr, wie angenommen, dominant und ungefähr gleich sind, wird in Szenario 2 demonstriert, wie sich die Verteilung der Skillressourcen in den jeweiligen Stufen verhält.
3. Szenario 3 legt den Fokus auf die Auktion. Es zeigt einen speziellen Fall auf, in dem die Unternehmen nicht auf eine Skillressource bieten, weil die Gefahr besteht, dass sie sich (indirekt) selbst unterbieten.
4. In Szenario 4 werden die Verhaltensweisen der einzelnen Stufen unter regulären Umständen aufgezeigt.

5.1 Szenario 1

Da von dominanten Transportkosten ausgegangen wird und bei der initialen Verteilung die Kostenfunktionen der jeweiligen Unternehmen nicht bekannt sind, besteht die beste Chance auf Wohlfahrtsmaximierung in der Verringerung der Fahrtwege.

Zu diesem Zweck könnte nun für jede Baustelle das nächstgelegene Bauunternehmen beauftragt werden, dass noch über erforderliche Ressourcen verfügt. Auf diesem Wege soll die Summe der abzufahrenden Strecken minimal werden. Dies ist jedoch nicht zwangsläufig der Fall. Je nachdem, welche Baustelle zuerst auf Unternehmen verteilt wird, kann diese Gesamtsumme der Strecken unterschiedlich ausfallen. Das folgende Beispiel verdeutlicht dieses Szenario:

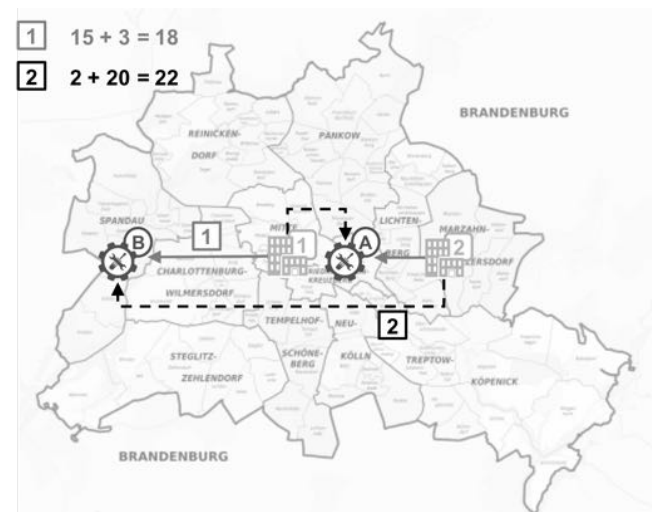


Abbildung 1. Karte für Szenario 1.

Bei diesem Szenario wird vereinfacht davon ausgegangen, dass jede Baustelle als Skillressource einen Bagger benötigt und jedes Unternehmen einen Bagger bereitstellen kann. Bei chronologischer Vorgehensweise würde zuerst Baustelle A einen Bagger von Unternehmen 1 (Distanz: 2 km) und Baustelle B dementsprechend

einen Bagger von Unternehmen 2 (Distanz: 20 km) erhalten (siehe Abb. 1). Die Summe der Entfernungen beträgt somit 22 km. Würde man jedoch die Verteilung tauschen, so müsste der Bagger von Unternehmen A 3 km zur Baustelle 2 fahren, der andere Bagger hätte jedoch nur noch eine Entfernung von 15 km zur Baustelle 1 zurück zu legen. Die Summe beläuft sich daher auf 18 km, wodurch gegenüber der vorherigen Lösung 4 km Strecke eingespart werden.

Die Problematik besteht hierbei in der Tatsache, dass Baustelle A etwa die gleiche Entfernung zu beiden Unternehmen besitzt und es damit nur sehr geringe Auswirkungen hätte, wenn Baustelle 1 das geringfügig weiter entfernte Unternehmen 2 zugeteilt bekäme. Durch den abgelegenen Standort von Baustelle B spielt die Distanz zu den Unternehmen eine erheblich größere Rolle. Dieses Problem wird durch die Sortierung nach der Standardabweichung einer Baustelle zu den Unternehmen in absteigender Reihenfolge gelöst. Die Baustellen mit der höchsten Standardabweichung (in diesem Falle Baustelle B) lassen sich in Bezug auf die Entfernung zu den Unternehmen am besten optimieren und werden somit zuerst zugeteilt. Auf diese Weise gelangt man in dem vorgestellten Szenario zur minimalsten Summe aller Strecken.

5.2 Szenario 2

In Szenario 1 wurde bereits gezeigt, dass die Wege sich leicht minimieren lassen. Diese Vorgehensweise erfolgt jedoch unter der Annahme, dass Transportkosten dominant sind und für alle Unternehmen in einer ähnlichen Größenordnung liegen. Wenn jedoch die Transportkosten wie folgt angepasst werden (Personalkosten werden in diesem Beispiel vernachlässigt), lässt sich zeigen, dass dieses initiale Verfahren bei veränderten Umständen auch zu schlechten Ergebnissen führen kann:

Tabelle 1. Kostenvergleich Variante 1 und 2

Variante	von	nach	Kosten pro km	Strecke	Kosten
1 18km 3003€	1	B	$100 \frac{\text{€}}{\text{km}}$	15km	1500€
	2	B	$1 \frac{\text{€}}{\text{km}}$	3km	1503€
2 22km 220€	1	A	$100 \frac{\text{€}}{\text{km}}$	2km	200€
	2	B	$1 \frac{\text{€}}{\text{km}}$	20km	20€

Da die Transportkosten im Beispiel um den Faktor 100 auseinanderliegen, ist die zweite Variante (siehe Abb. 1 und Tab. 1) kosteneffizienter trotz der längeren Gesamtstrecke.

In diesem Fall sind die nachfolgenden Stufen des Algorithmus essenziell, um die Utilitaristische Wohlfahrt (durch Verringerung der aufsummierten Transportkosten) zu maximieren.

In Stufe 2 würde das Unternehmen 1 bereits feststellen, dass Baustelle A für ihn deutlich günstiger ist. Unter der Annahme, dass Unternehmen 1 keine weiteren Skillressourcen mehr frei hat, kann nicht auf Baustelle A geboten werden und es würde Stufe 3 in Kraft treten. Hier würden beide Unternehmen ihre Aufträge miteinander austauschen und somit zur erheblich günstigeren Variante 2 gelangen.

5.3 Szenario 3

Bei der Auktion in der zweiten Stufe des Algorithmus, kann es bei ungünstigen Verhältnissen zwischen den Anzahlen der Baustellen und der Bauunternehmen zu einer Situation kommen, in der ein Unternehmen zwar noch freie Skillressourcen auf einer Baustelle anbieten könnte, mit diesem Gebot aber ein eigenes Gebot unterbieten würde. Zur Veranschaulichung dient das Folgende

Beispiel. Gegeben Sei eine Baustelle A, welche drei Mal die Skillressource Baggern benötigt. Unternehmen 1 besitzt genau 3 Bagger welche im ersten Schritt des Algorithmus der Baustelle A für je 100 € zugeteilt wurden. Im zweiten Schritt wird nun die Auktion gestartet, in der Unternehmen 2 noch einen Bagger übrig hat und diesen für 90 € der Baustelle A anbietet. Unternehmen 1 hat nun wieder einen Bagger übrig, da dieser von Unternehmen 2 unterboten wurde und hat somit die Möglichkeit diesen erneut für Baustelle A anzubieten. Wenn er den Bagger nun jedoch für 80 € anbietet, würde er damit einen seiner zwei anderen Gebote für je 100 € unterbieten, was unmittelbar oder nach weiteren Geboten zu Verlusten führen kann. Selbst wenn man die Auktionsregularien überarbeitet, so dass nur fremde Skillressourcen unterboten werden können, hätte es denselben Effekt, da der unterbotene Konkurrent in seinem nächsten Zug mit demselben Preis wie zuvor den eigenen Höchstpreis unterbieten könnte. Aus diesem Grund kann es passieren, dass Unternehmen nicht an ihr unteres Preislimit gehen, obwohl sie noch Skillressourcen zur Verfügung hätten. Dieser Effekt lässt sich zum einen durch einen niedrigen initialen Bidding-Factor, sowie eine größere Anzahl an teilnehmenden Unternehmen minimieren. Ein niedriger Bidding-Factor bewirkt, dass sich die Unternehmen schon in der 1. Stufe nahe an ihrer unteren Grenze bewegen müssen, um während der Auktion konkurrenzfähig zu bleiben. Damit ist auch ein viel zu hoher Preis für eine Skillressource unwahrscheinlicher. Wenn sich die Anzahl der teilnehmenden Unternehmen erhöht, wird auf die benötigten Skillressourcen einer einzelnen Baustelle von vielen Konkurrenten geboten, wodurch sich der Preis drücken lässt und sich die Wahrscheinlichkeit für die Situation, dass ein Unternehmen sich selbst unterbieten könnte, erheblich reduziert. Daher gilt: Je höher die Anzahl an unterschiedlichen Unternehmen in einem Szenario, desto geringer ist der Einfluss des Bidding-Factor auf die endgültigen Preise der Baustellen.

5.4 Szenario 4

Das folgende Szenario zeigt ein komplexeres Beispiel, bei dem die Effekte der jeweiligen Stufen im regulären Betrieb (Überschuss an Ressourcen, dominante Transportkosten gleicher Dimension) aufgezeigt werden. Die Ausgangssituation sieht wie folgt aus:



Abbildung 2. Karte für Szenario 4.

In Abbildung 2 ist die geographische Verteilung der Unternehmen und Baustellen dargestellt. Der Algorithmus wird mit dem Bidding-Factor 3 und dem Bidding-Step von 5% durchgeführt.

Die Baustellen benötigen Skillressourcen (Bagger, Maurer, Elektriker) und schreiben diese aus:

Tabelle 2. Benötigte Skillressourcen der Baustellen

Baustelle	Bagger	Maurer	Elektriker
A	5	3	2
B	2	1	1
C	2	0	2

Die Unternehmen können Ressourcen für die entsprechenden Skills in folgenden Quantitäten anbieten:

Tabelle 3. Verfügbaren Skillressourcen der Unternehmen

Unternehmen	Bagger	Maurer	Elektriker
1	5	0	3
2	0	2	0
3	4	2	6
4	2	0	0

Die Kosten (basierend auf den Transportkosten pro Kilometer und den Personalkosten) der Unternehmen differieren sowohl untereinander, als auch bezüglich der verschiedenen Skills:

Tabelle 4. Kosten der Unternehmen

Unternehmen	Bagger	Maurer	Elektriker
1	$7 \frac{\text{€}}{\text{km}} + 20\text{€}$	$3 \frac{\text{€}}{\text{km}} + 35\text{€}$	$1 \frac{\text{€}}{\text{km}} + 50\text{€}$
2	$6 \frac{\text{€}}{\text{km}} + 20\text{€}$	$3 \frac{\text{€}}{\text{km}} + 60\text{€}$	$1 \frac{\text{€}}{\text{km}} + 80\text{€}$
3	$5 \frac{\text{€}}{\text{km}} + 25\text{€}$	$3 \frac{\text{€}}{\text{km}} + 50\text{€}$	$2 \frac{\text{€}}{\text{km}} + 40\text{€}$
4	$5 \frac{\text{€}}{\text{km}} + 40\text{€}$	$4 \frac{\text{€}}{\text{km}} + 55\text{€}$	$1 \frac{\text{€}}{\text{km}} + 60\text{€}$

Entsprechend der aufgeführten Kostenfunktionen rechnen alle Unternehmen mit einem minimalen Gewinn von 10% ihrer aufgewandten Kosten. Der ermittelte Wert ist die Wertschätzung der Unternehmen und somit der minimale Preis, den diese bereit wären zu zahlen. Nach dem Durchlauf der jeweiligen Stufen ergeben sich entsprechend die folgenden Resultate:

Tabelle 5. Stufenweise Auswertung

Cash Flow	Stufe 1	Stufe 2	Stufe 3.1	Stufe 3.2
Wohlfahrt	3518€	1887€	2127€	2127€
Verlust	1759€	1883€	1643€	1643€

In Stufe 1 führt die Ressourcen-Verteilung zu Transportkosten von 1759 €. Dieser Wert liegt bereits in der Nähe des optimalen Wertes von 1643 €, liegt aber ein wenig höher, da es bei den Unternehmen Unterschiede bei den Kostenfunktionen um den Faktor 2 geben kann. Die Wohlfahrt ist zu diesem Zeitpunkt noch sehr hoch, weil durch den Bidding-Factor von 3 Auftragspreise weit über der Wertschätzung möglich sind.

In Stufe 2 sinkt die Wohlfahrt sehr schnell ab, da sich die Unternehmen gegenseitig unterbieten und die Preise somit näher an die tatsächliche Wertschätzung treiben. Nach insgesamt 143 Geboten sind alle Auktionen beendet und die Wohlfahrt beträgt nur noch 1887 €. Die Kosten sind nun jedoch leicht angestiegen auf 1883 €. Dies liegt daran, dass in dieser Stufe die Unternehmen versuchen, die Resultate zu ihren eigenen Gunsten zu verbessern und dies entsprechend negative Auswirkungen auf die anderen Unternehmen haben kann.

Dieser Effekt wird in Stufe 3 korrigiert. Die Preise für die Baustellen stehen dann fest und werden nicht mehr verändert. Der Austausch von Aufträgen hat in dieser Stufe dabei nur noch einen Einfluss auf die Kosten, wobei sich durch die Minimierung der Kosten bei gleichbleibenden Baustellenpreisen die Utilitaristische Wohlfahrt verbessert. In diesem Beispiel wird bereits in Stufe 3.1 die beste Kombination gefunden, welche die Kosten um 240 € verringert, die Kosten damit also auf den optimalen Wert von 1643 € reduziert. Da zu diesem Zeitpunkt jedoch nicht bekannt ist, ob die gefundene Lösung bereits das Optimum ist, läuft Stufe 3.2 ebenfalls bis zum Ende durch und liefert dann dasselbe Ergebnis wie Stufe 3.1.

6. ZUSAMMENFASSUNG

6.1 Abgrenzung

Bei den Skillressourcen kommt es zu einigen Vereinfachungen. Wie lange Ressourcen besetzt sind bzw. wie schnell eine Baustelle bearbeitet werden sollte, ist in den Beispielen nicht konkret angegeben worden. Ebenso wird die Anzahl der Arbeitsstunden vernachlässigt, die eine Ressource zur Erledigung des Auftrags benötigen würde. Diese Eigenschaften werden abstrakt in der Menge an Einheiten einer Skillressource dargestellt und nicht näher unterschieden.

Es wird ebenfalls vernachlässigt, dass Personalkosten oft auch dann abgerechnet werden, wenn das Personal mangels Auftrag keine Arbeit zu verrichten hat. Dies könnte zu einer negativen Bilanz führen, wodurch die Unternehmen unter Umständen bereit wären Aufträge zu noch niedrigeren Preisen anzunehmen, um die durch freie Ressourcen entstehenden Verluste zu minimieren. In der Realität kommen jedoch stets neue Aufträge hinzu, so dass es lohnenswert sein kann auf einen Auftrag zu warten, durch den sich auch ein Gewinn erzielen lässt.

In den Szenarien waren zu Beginn alle Aufträge bekannt und es kamen keine neuen hinzu. Der Algorithmus könnte auch auf zeitlich versetzte Aufträge angepasst werden, damit lassen sich dann aber nur die für den jeweiligen Zeitpunkt optimalen Wege ermitteln und die Unternehmen könnten versuchen freie Ressourcen für eventuell folgende bessere Aufträge aufzusparen, statt diese mit niedrigen Geboten auf aktuelle Aufträge zu verteilen.

In den gegebenen Beispielen wurde nur ein kleiner Kartenausschnitt betrachtet. Dies hat zur Folge, dass Unternehmen in den Randbereichen tendenziell weiter von Baustellen entfernt sind und somit schlechtere Chancen haben, einen Auftrag zu erhalten. In der realen Welt gibt es derartige Abgrenzungen eher selten. Ein Beispiel für eine vergleichbare Abgrenzung könnte eine

Insel sein, wo gewissermaßen eine Trennung von Baustellen jenseits des umgebenden Wassers erfolgt. Auf der Insel jedoch ist ebenfalls mit ausreichend geeigneten Baustellen zu rechnen.

Bei den Berechnungen der Transportkosten wird mit der Luftlinie gerechnet und Faktoren wie der Verkehr werden nicht näher betrachtet. Selbstverständlich könnte die Distanzberechnung alternativ mit einer Routenplanung durchgeführt werden.

Durch die in der Realität große Anzahl von Bauunternehmen würden sich ohnehin einige der Sonderfälle kompensieren, die in den einzelnen Szenarien dargestellt wurden, wie beispielsweise die Gefahr, dass sich ein Unternehmen selbst unterbietet oder dass bei gleichen Gesamtanzahlen von benötigten und freien Ressourcen pro Skill in Stufe 2 kein Unternehmen mehr Gebote abgeben könnte.

6.2 Ergebnisse

Durch die initiale Zuweisung wird unmittelbar ein Ergebnis generiert. Somit liefert die Kombination aus initialer Zuweisung, Auktions- und Verhandlungsverfahren in verschiedenen Szenarien zu jeder Zeit ein Ergebnis (Any-Time). Somit ist der erste Teil der Hypothese belegt.

Unter den gegebenen Voraussetzungen, dass alle Aufträge zu Beginn des Verfahrens bekannt sind, wird am Ende die Lösung gefunden, die die Verluste auf den minimalen Wert optimiert.

Wenn nicht alle Aufträge von Beginn an bekannt sind, kann lediglich die für den aktuellen Zustand optimale Lösung gefunden werden, die in der späteren Entwicklung zu nur noch begrenzt optimierbaren Ergebnissen führen kann.

Falls die erwarteten Umstände gegeben sind, kann der Algorithmus Ergebnisse liefern, welche sich relativ schnell dem optimalen Wert annähern. Da in der Realität der Rechenaufwand für Stufe 3 sehr hoch sein kann, ist es wichtig das Verfahren frühzeitig abbrechen zu können ohne dass sich das Resultat signifikant verschlechtert.

7. LITERATURVERZEICHNIS

- [1] Mönch, Lars. Agentenbasierte Produktionssteuerung komplexer Produktionssysteme. Wiesbaden: Deutscher Universitäts-Verlag, 2006, S. 45
- [2] Zöfel, Peter. Statistik verstehen: ein Begleitbuch zur computergestützten Anwendung. Pearson Deutschland GmbH, 2001, S. 34.
- [3] Horling, Bryan, and Victor Lesser. "A survey of multi-agent organizational paradigms." *The Knowledge Engineering Review* 19.4 (2004): S. 281-316.
- [4] Peters, Ralf. "Elektronische Märkte und automatisierte Verhandlungen." *Wirtschaftsinformatik* 42.5 (2000), S. 413-421.
- [5] Wooldridge, Michael. An introduction to multiagent systems. John Wiley & Sons, 2009, S. 67.
- [6] Abram Bergson: A reformulation of certain aspects of welfare economics. In: *The Quarterly Journal of Economics*. 52, Nr. 2, 1938, S. 310–334
- [7] Heismann, Olga, and Linus Mattauch. "Arrows Unmöglichkeitssatz." In: https://www.mcc-berlin.net/fileadmin/data/pdf/Skript_Seminar_zur_Sozialwahltheorie_Sose_2012.pdf, S. 4
- [8] Kräkel, Matthias. *Auktionstheorie und interne Organisation*. Vol. 106. Springer-Verlag, 2013, S. 83.
- [9] Bogon, Tjorben. "Künstliche Intelligenz und Optimierung." *Agentenbasierte Schwarmintelligenz*. Springer Fachmedien Wiesbaden, 2013. S. 11-38.
- [10] Maes, Pattie, Robert H. Guttman, and Alexandros G. Moukas. "Agents that buy and sell." *Communications of the ACM* 42.3 (1999), S. 81.