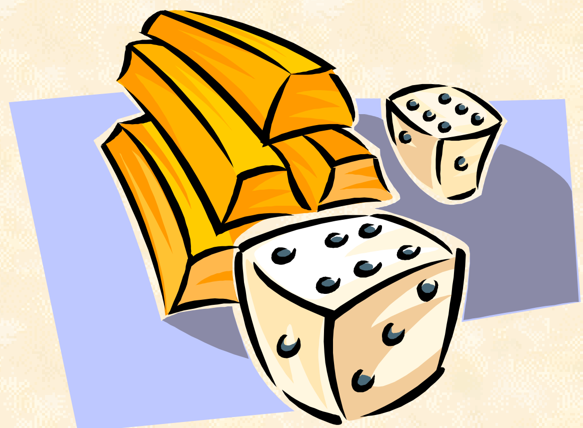
# Entscheidungsfindung in Multiagentensystemen



# Entscheidungsfindung

► Gliederung

- Einführung
- Bewertungskriterien
- Abstimmung
- Auktion
- Verhandlung
- Marktsysteme
- Vertragssysteme
- Agentengruppierung
- Zusammenfassung
- Literatur

# Entscheidungsfindung

► Einführung

*Motivation*

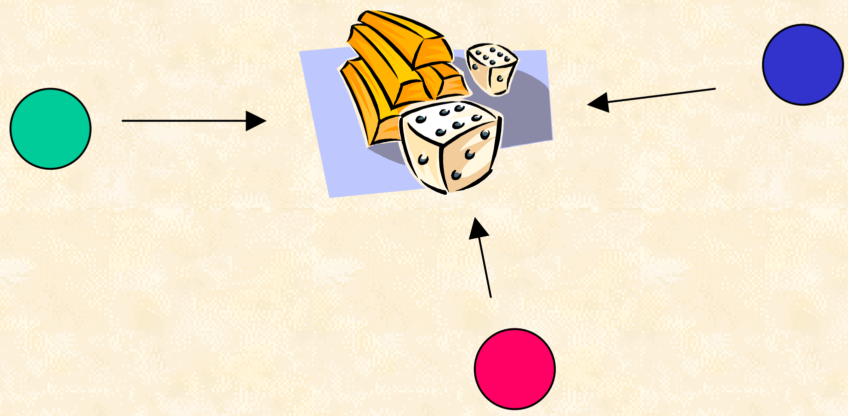
- Protokolle zur Entscheidungsfindung in Modellen komplexer Situationen
  (Geschäftsverhandlungen, Strategische Abwägungen, ...)
- Stabile Protokolle, um unfaire Entscheidungen zu verhindern
- Daraus mögliche Automatisierung ableiten
  (z.B durch Multiagentensysteme)
- Bewertung verschiedener Strategien unter verschiedenen Protokollen

# Entscheidungsfindung

► Einführung

*Grundannahmen zur Modellfindung*

- Menge von Parteien (z.B. Agenten), die in einer gemeinsamen Umgebung handeln
- Versuchen bestimmte Ziele zu erreichen
- Verfolgen alle eigene Strategien, wählen diese selbst



# Entscheidungsfindung

## ► Bewertungskriterien

- Bewerten Protokoll nach bestimmten Kriterien
- können zur Klassifikation verwendet werden

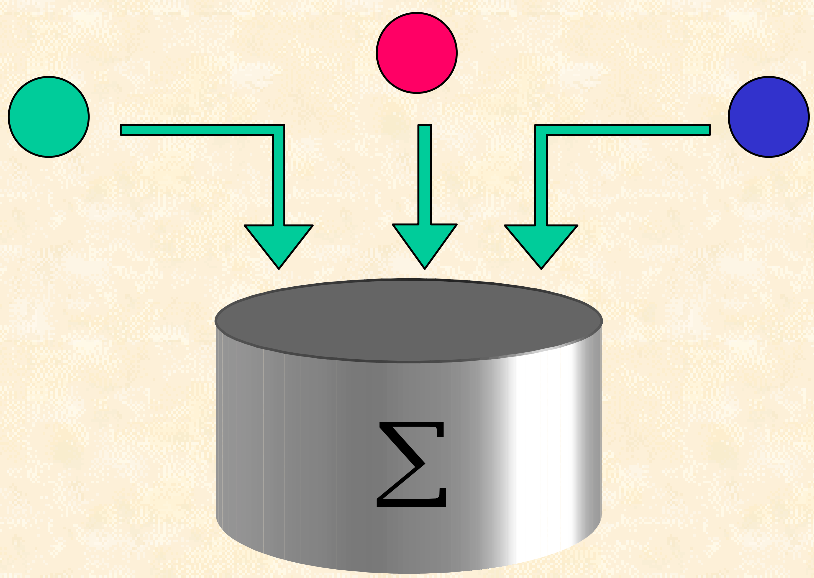
- Eine Auswahl:
  - Soziale Gerechtigkeit
  - Pareto-Effizienz
  - Individuelle Rationalität
  - Stabilität
  - Recheneffizienz
  - Kommunikationseffizienz

# Entscheidungsfindung

► Bewertungskriterien

*Soziale Gerechtigkeit*

- Betrachtet nur Summe aller Einnahmen/Nützlichkeiten aller Agenten
- Ist globales Kriterium



## *Pareto-Effizienz*

- Eine Lösung ist *pareto-effizient*, wenn es keine weitere Lösung gibt, so dass
  - Ein Agent mehr verdient *und*
  - Kein anderer Agent weniger verdient

- maximale soziale Gerechtigkeit ist ein Sonderfall von Pareto-Effizienz

## *Individuelle-Rationalität*

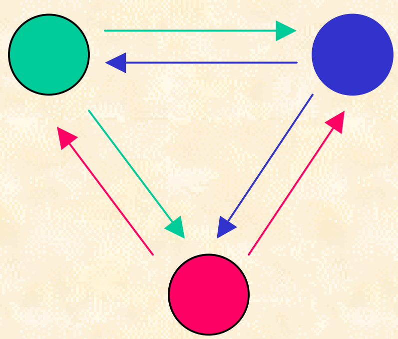
- Teilnahme an einem Handel ist für einen Agenten *individuell-rational*, wenn er bei Nichtteilnahme weniger oder gleichviel verdient
- Eine Lösung ist *individuell-rational*, wenn sie individuell-rational für alle Agenten ist
- Nur individuell-rationale Lösungen sind lebensfähig/sinnvoll

## *Stabilität*

- Systeme sollten nicht von außen manipulierbar sein.
- System bringt die Agenten dazu in gewünschter Weise zu handeln
- Unterscheidung in Systeme mit dominanten und aufeinander abgestimmten Strategien
- Agenten, die dominante Strategien verfolgen kümmern sich nicht um die der anderen

## *Nash-Gleichgewicht*

- Die Strategie jedes Agenten ist die beste gegen die Strategien der anderen Agenten
- Existiert nicht immer, auch nicht immer eindeutig
- Ist ein Maß für die Stabilität eines Protokollverlaufs



# Entscheidungsfindung

► Bewertungskriterien

### *Rechen-Effizienz*

- Erwünscht ist geringer Rechenaufwand
- Gesucht: Abschätzung zwischen Qualität und Rechenzeit

### *Kommunikations-Effizienz*

- Erwünscht sind:
  - Ausfall- und Fehlertoleranz
  - geringe Menge von Kommunikation
- Widersprechen sich in manchen Fällen

# Entscheidungsfindung

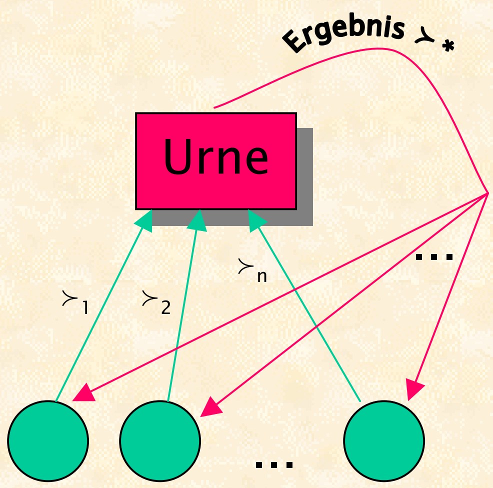
► Abstimmung

## *Modell*

- Ziel: allgemeingültige Lösung für alle finden
- Jeder teilnehmende Agent gibt seine Stimme ab und muss Resultat akzeptieren

## *Wahrheitsgemäße Wähler*

- Jeder Agent $a \in A$ hat eindeutige, asymmetrische transitive Präferenzrelation „$\succ$" über der Menge möglicher Ergebnisse $o \in O$.
- Wahlapparat erhält als Input die Relationen $(\succ_1,\ldots,\succ_{|A|})$ der Agenten und gibt $\succ^*$ als allgemeine Präferenz an alle aus.



## 6 Anforderungen:

1. $\succ^*$ existiert für alle möglichen Eingaben
2. $\succ^*$ muss für jedes Paar $o,o' \in O$ definiert sein
3. $\succ^*$ muss transitiv und antisymmetrisch sein über O
4. Ergebnis Pareto efficient: $\forall i \in A,\ o \succ_i o' \Rightarrow o \succ^* o'$
5. Unabhängig von irrelevanten Alternativen. Z.B.: $\succ$ und $\succ'$ Arrays von Präferenzen, und $o \succ_i o'$, wenn $o \succ_i' o'$ für alle i, dann ist Stellenwert für o und o' der Gleiche
6. Kein Agent D sollte Diktator sein in dem Sinne: $o \succ_D o'$ impliziert $o \succ^* o'$

## Arrow's Unmöglichkeitstheorem:

„Kein gesellschaftlicher Wahlmechanismus erfüllt alle 6 Bedingungen"

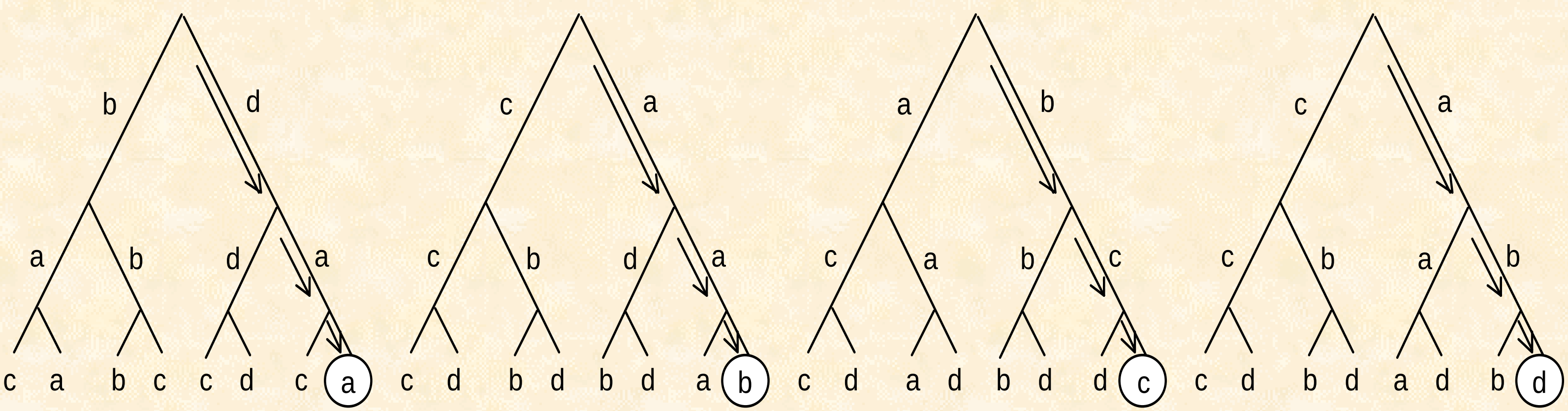
# Entscheidungsfindung

## ► Abstimmung

### *Binärprotokoll*

- Alternativen werden paarweise verglichen
- Gewinner kommt weiter, Verlierer scheidet aus
- Reihenfolge hat großen Einfluß auf $\succ^*$

35% der Agenten bevorzugen $c \succ d \succ b \succ a$
33% der Agenten bevorzugen $a \succ c \succ d \succ b$
32% der Agenten bevorzugen $b \succ a \succ c \succ d$



## *Borda-Protokoll*

- Den Alternativen werden Punkte vergeben:
  |O| wenn sie ganz oben steht
  |O|-1 wenn an zweiter Stelle
  ...
- Gewinner wird Verlierer und Verlierer wird Gewinner Paradoxon kann auftreten (z.B. nach entfernen unwichtiger Variante)

| Agent | Vorlieben |
|---|---|
| 1 | $a \succ b \succ c \succ d$ |
| 2 | $b \succ c \succ d \succ a$ |
| 3 | $c \succ d \succ a \succ b$ |
| 4 | $a \succ b \succ c \succ d$ |
| 5 | $b \succ c \succ d \succ a$ |
| 6 | $c \succ d \succ a \succ b$ |
| 7 | $a \succ b \succ c \succ d$ |
| Borda count | c gewinnt (20), b=19, a=18, d verliert (13) |
| Borda count ohne d | a gewinnt (15), b=14, c verliert (13) |

### *Strategische Wähler*

- Agenten müssen ihre Vorlieben selbst erklären.
- Wenn Agent vom Lügen profitieren kann, so wird er das tun.
- Design des Wahlmechanismus wird komplizierter
- Jeder Agent $a \in A$ hat einen „Typ“ $\theta_i \in \Theta$ der seine Ziele vollständig charakterisiert
- Eine Wahlfunktion $f: \theta \rightarrow O$ bestimmt seine Alternativen
- Schwer zu implementieren, da man Agenten dazu bringen muß ihren „Typ“ anzugeben.

# Entscheidungsfindung

## ► Abstimmung

### *Offenbarungsprinzip*

- Suchen Protokoll, in dem alle Agenten Typ wahrheitsgemäß offenbaren

- Annahme: es existiert ein Protokoll mit Wahlfunktion f in Nashgleichgewicht. Dann ist f per Einzelschrittprotokoll implementierbar, in dem die Agenten ihren „Typ“ wahrheitsgemäß offenbaren.

- <u>Nachweis:</u>

- Protokoll wird geändert, so daß jeder Agent die beste strategische Enthüllung konstruieren kann

- Dann wieder altes Protokoll simulieren, als wenn die Agenten diese Enthüllung selbst konstruiert hätten.

- jeder Agent ist nun motiviert seinen „Typ“ wahrheitsgemäß in einem Schritt, zu enthüllen

## *Gibbart-Satterthwaite Unmöglichkeitstheorem*

- Jedes Agenten “Typ” $\theta_i$ bestehe aus seiner Vorliebenreihenfolge $\succ_i$ auf O
  Keinerlei Beschränkungen für $\succ_i$ und $|O| > 2$.

- Wenn f wahrheitsgemäß in einem Nash-Gleichgewicht implementiert
  werden kann, dann ist f diktatorisch.

## *Umgehungsmöglichkeiten des Gibbard-Satterthwaite Unmöglichkeitstheorems:*

- Einschränken der Vorlieben und der Groves-Clarke Steuer-Mechanismus
- Diktator per Zufall wählen lassen
- Berechnung einer unaufrichtigen Strategie sehr aufwendig machen

## *Groves-Clarke Steuer-Mechanismus*

- Ergebnisse sollen die Form $o=(g, \pi_1,\ldots, \pi_{|A|})$,wobei $\pi_i$ ein Anteil von etwas teilbarem, zählbaren ist (z.B. Geld), das der Agent in dem Ergebnis erhält. g beschreibt die anderen Details des Ergebnisses.
- Die Vorlieben des Agenten werden *quasilinear* genannt, wenn sie in der Form $u_i(o) = v_i(g) + \pi_i$ beschrieben werden können.

> Jeder Agent gibt seine Bewertung $v_i'(g)$ für jedes mögliche g an.
> Wahlergebnis $g^* = \arg\max_g \Sigma_i v_i'(g)$
> Für jeden Agent fällt Steuer: $tax_i = \Sigma_{j\neq i} v_j'(g^*) - \Sigma_{j\neq i} v_j'(\arg\max_g \Sigma_{k\neq i} v_k'(g))$

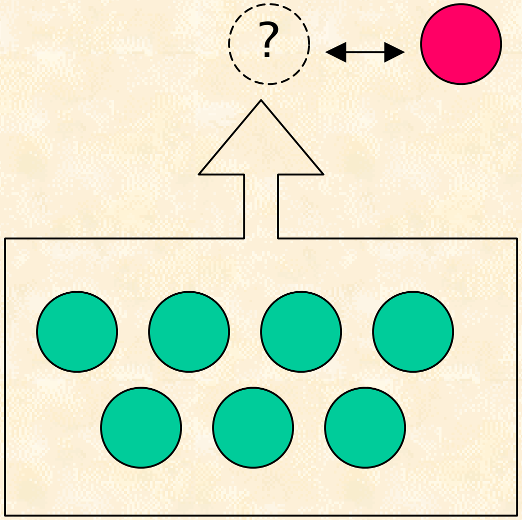
- Steuer ist der Schlüssel → jeder Agent muß sie intern berechnen können für seine Entscheidung.
- Größe der Steuer eines Agenten ist genau soviel, wie seine Stimme den Nutzen der anderen verringert.

# Entscheidungsfindung

► Auktion

*Modell*

- Ziel: Geschäftsabschluss zwischen einem Bieter und dem Auktionär
- Auktionär möchte seinen Gewinn maximieren




*Mögliche Protokolle:*

- Englisch
- First-price sealed-bid
- Dänisch
- Vickrey

# Entscheidungsfindung



*Englische Auktion*

- Jeder Bieter kann Preis erhöhen
- Meistbietender erhält den Zuschlag

*Beste Strategie*

- Bieter legt Wert des Zuschlages für sich fest
- Erhöhung des eigenen Gebots um kleine Schritte bis eigener Wert erreicht

# Entscheidungsfindung

► Auktion

*First-price sealed-bid*

- Jeder Bieter gibt ein Gebot an, ohne das Wissen der anderen Gebote
- Meistbietender erhält den Zuschlag

*Beste Strategie*

- Hängt von den erwarteten Geboten der anderen ab,
  generelle Strategie ist schwer zu finden
- Es lässt sich Nash-Gleichgewicht berechnen:

$$\text{Gebot} = \frac{N - 1}{N} * \text{Wert} \qquad (\text{ N – Anzahl der Agenten})$$

- Also weniger bieten als den eigenen Wert

# Entscheidungsfindung



*Dänische Auktion*

- Preis wird kontinuierlich von einem Startwert an gesenkt
- Erstbietender erhält den Zuschlag

*Beste Strategie*

- Ist völlig analog zu First-price sealed-bid, da niemand Gebote der anderen kennt, bis Enscheidung gefallen ist

## *Vickrey Auktion*

- Jeder Bieter gibt ein Gebot an, ohne das Wissen der anderen Gebote
- Meistbietender erhält den Zuschlag zum zweithöchsten Gebot
- Wird in Agentensystem häufig eingesetzt
- Vorteile: Agenten geben immer wahre Werte an, Spekulieren lohnt nicht
- Nachteil: Auktionär könnte falsches zweithöchstes Gebot angeben

## *Beste Strategie*

- Beste Strategie ist immer, den vollen eigenen Wert zu bieten

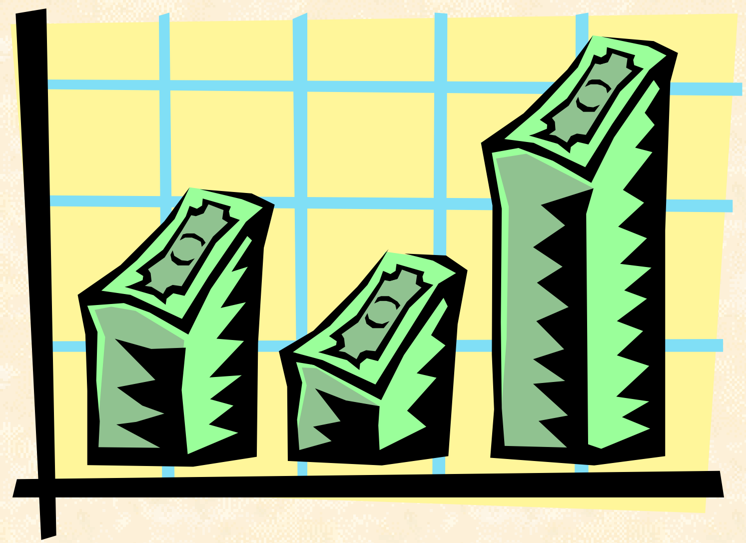
*Weitere Eigenschaften*

- Alle Protokolle vermitteln den Handel an den Meistbietenden
- Sind alle pareto-effizient
- Strategisches Vorausberechnen bei Versteigerung mehrerer abhängiger Objekte kann sehr rechenintensiv werden
- Für den Auktionär sind alle Verfahren gleich, wenn die Bieter unabhängig und risiko-neutral bieten

*Modell*

- Wünschenswerte Eigenschaften einer Verhandlungslösung werden postuliert
- dann wird Lösungskonzept gesucht, das diese Eigenschaften erfüllt.

- Nash-Verhandlungslösung
- Strategische Verhandlungstheorie
- Rubinsteins Verhandlungslösung
- Alternatives Verfahren



- *Nash-Verhandlungslösung*
  - Zwei Agenten entscheiden über eine Lösung $o \in O$; $o_{fallback}$ tritt auf, falls sie sich nicht einigen können
  - Nutzenfunktion $u_i : O \rightarrow \Re$ für jeden Agenten
  - Nutzvektoren $\{(u_1(o), u_2(o)) | o \in O\}$ sollten konvex sein
  - Bei mehreren Lösungen können multiple Nash-Gleichgewichte existieren

**Axiome der Nash-Verhandlungslösung $u^* = (u_1(o^*), u_2(o^*))$:**

- Invarianz: Nutzenfunktionen repräsentieren nur geordnete Präferenzen über Ergebnismenge und sollen umformbar sein: Für eine beliebige streng monoton steigende Funktion f, $u^*(f(o), f(o_{fallback})) = f(u^*(o, o_{fallback}))$
- Anonymität (Symmetrie): Rollentausch der Agenten → Ergebnis const
- Unabhängigkeit von irrelevanten Alternativen: Wenn Ergebnis $o \neq o^*$, aus Lösungsmenge entfernt wird, bleibt $o^*$ die Lösung
- Pareto-Effizienz: Unmöglichkeit beiden Agenten höheren Nutzen als in $u^*$ zu geben

*Theorem: Nash-Verhandlungslösung:*

- Lösung, die diese vier Axiome erfüllt ist:

$$o^* = \arg\max_o [u_1(o) - u_1(o_{fallback})]\,[u_2(o) - u_2(o_{fallback})]$$

- Lösung kann Problemlos auf mehr als zwei Agenten erweitert werden,

# Entscheidungsfindung

► Verhandlung

## *Strategische Verhandlungstheorie*

- Es werden keine Axiome für die Lösung postuliert
- Verhandlungssituation wird als Spiel modelliert
- sequentielle Verhandlung, in der sich die Agenten in vorgeschriebener Reihenfolge Angebote unterbreiten
- Protokoll mit einer begrenzten Anzahl an Angeboten und ohne Zeitbeschränkung → der, der das letzte Angebot macht erhält alles

- Zeitfaktor $\delta$ kann in das Modell eingeführt werden.
- Mit Zeitfaktor wird in einem Teilspiel ein perfektes Nash-Gleichgewicht erreicht für ein endliches Spiel der Länge T.
- da ganze Verhandlungssituation vorausberechenbar, Einigung in Runde 1

*Rubinsteins Verhandlungslösung*

- In einer unendlichen Umgebung mit Zeitfaktor ist in jedem Teilspiel das
 Nash-Gleichgewicht eindeutig
- $a_1$ erhält $(1 - \delta_2) / (1 - \delta_1 \delta_2)$ und Agent 2 erhält den Rest ($\delta_1 \rightarrow$ Zeitfaktor
 für $a_1$, und $\delta_2$ der für $a_2$)
- in der ersten Runde wird die Vereinbarung getroffen.

# Entscheidungsfindung

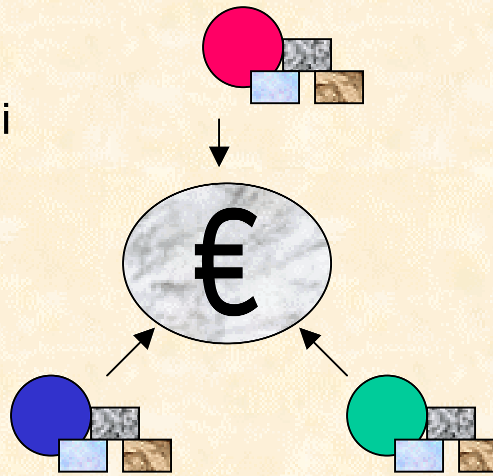


*Alternatives Verfahren*

- sequentielle Verhandlung ohne Zeitfaktor, aber mit konstanten Verhandlungskosten pro Runde
- gleiche Verhandlungskosten → Lösungskonzept nutzlos
- Verhandlungskosten $c_1$ von $a_1$ unter denen von $a_2$ → $a_1$ erhält alles (Wenn $a_2$ $\pi$ in Runde t anbieten würde, dann könnte $a_1$ in t-1, $1-\pi-c_2$ anbieten, woraufhin $a_2$, $\pi+c_2-c_1$ anbieten müsste, u.s.w. Für unendlich viele Runden kommt $a_1$ irgendwann wieder bei 1 an, und $a_2$ bekäme nichts, also kann er sich auch gleich mit 0 begnügen.
- Verhandlungskosten $c_1$ von $a_1$ größer als die von $a_2$ → $a_1$ erhält Betrag, der gleich den Verhandlungskosten von $a_2$ ist und $a_2$ erhält den Rest.

## *Modell*

- Gütermenge $G = (g_1, ..., g_n)$
- Preis $p = [p_1, ..., p_n]$ für jedes $g \in G$
- Anfangsgüter $e_i = [e_{i1}, ..., e_{in}]^T$ für jeden Konsumenten i
- Nutzenfunktion $u_i : [x_{i1}, ..., x_{in}]^T \rightarrow \Re$
legt Wert eines Gütertupels für den Konsumenten i fest
- Produktionsvektoren $y_j = [y_{j1}, ..., y_{jn}]^T$ für jeden
Produzenten j, $Y_j$ ist Menge aller Produktionsvektoren
- Profit des Produzenten $j = p * y_j$
wird unter allen Konsumenten im Verhältnis $\theta_{ij}$ aufgeteilt



## *Allgemeines Gleichgewicht*

(p*, x*, y*) ist *allgemeines Gleichgewicht*, wenn:

1. $$\sum_i x_i^* = \sum_i e_i + \sum_i y_j^*$$ Angebot und Nachfrage gleichen sich aus

2. $$x_i^* = \arg \max_{p^* \cdot x_i \leq p^* \cdot e_i + \sum_j \theta_{ij} p^* \cdot y_j} u_i(x_i)$$ Konsumenten maximieren ihre Nutzenfunktion

3. $$y_j^* = \arg \max_{y_j \in Y_j} p^* \cdot y_j$$ Produzenten maximieren ihren Profit

# Entscheidungsfindung



## *Eigenschaften des Allgemeines Gleichgewicht*

- Besitzt einige sehr wünschenswerte Eigenschaften
  - Pareto-effizient
  - Koalitionsstabil – Aufbau eines Teilmarktes lohnt sich nicht

- Allgemeines Gleichgewicht existiert leider nicht immer
- Es gibt aber Existenz- und Eindeutigkeitskriterien

# Entscheidungsfindung



*Finden eines Allgemeines Gleichgewicht*

- Es existiert eine ganze Reihe von Verfahren, meist Konvergenzverfahren

- Unterschieden in zentral und verteilt
- Finden nicht immer ein existierendes Gleichgewicht

## *Spekulation in Marktsystemen*

- Angabe von falschen Angeboten/Nachfragen der Agenten, um Profit zu maximieren
- Lohnt sich nur in kleinen Marktsystemen, in großen Systemen sinkt Einfluss eines Agenten auf den globalen Preis
- Agent kann Markt dann zu seiner gewünschten Lösung treiben
- Spekulationsstrategien sind sehr rechenintensiv
- Es existieren einige Verfahren, die stabil gegen Spekulation sind, verlieren aber Eigenschaften des allgemeinen Gleichgewichts

# Entscheidungsfindung

► Vertragssysteme

*Modell*

- Kein Vermittler
- Agenten erhalten volle Kontrolle über ihre Informationen
- Preise nicht mehr global
- Verhandlungen weiter dezentralisiert

*Protokoll*

- Aufgabenvermittlungs-Protokolle

## *Aufgabenvermittlung:*

- *<u>Definition</u>*: Besteht aus einer Menge an Aufgaben $T$, einer Menge Agenten $A$, einer Kostenfunktion $c_i$: $2^T \rightarrow \Re \cup \{\infty\}$ und der Anfangsverteilung der Aufgaben auf den Agenten $(T_1^{init}, ..., T_{|A|}^{init})$, mit $\bigcup_{i \in A} T_i^{init} = T$, und $T_i^{init} \cap T_k^{init} = \emptyset$ für alle $i \neq j$.
- Basiert auf marginaler Kostenberechnung
- Normalerweise mit individueller Rationalität
- Agent q nimmt Aufgabe, wenn er mehr bekommt, als seine Kosten zur Erledigung der Aufgabe: $MC^{add}(T^{contract}|T_q) = c_q(T^{contract} \cup T_q) - c_q(T_q)$
- Agent r gibt eine Aufgabe ab, wenn er dem anderen weniger bezahlen muss, als er zur Erledigung benötigt hätte: $MC^{remove}(T^{contract}|T_r) = c_r(T_r) - c_r(T_r - T^{contract})$
- Aufgabenverteilung wird mit jedem Schritt verbessert
- Kann in lokalem Optimum enden

# Entscheidungsfindung

► Vertragssysteme

## *OCSM-Verhandlungen:*

- *<u>Definition</u>*: Paar (**T**, **p**) von $|A| \times |A|$ – Matrizen. Ein Element $T_{i,k}$ ist ein Satz von Aufgaben, den Agent i an Agent k gibt, und $p_{i,k}$ ist der Betrag, den i an k zahlt.
- Man kann zeigen, daß stets eine endliche IR-Sequenz von einer Aufgabenverteilung zum globalen Optimum existiert.
- Keine äußere Steuerung nötig
- Da „immer alles gut ausgehen wird", können Agenten stets einen angebotenen IR-Handel eingehen, wenn er sich bietet
- Kein backtracking nötig, um globales Optimum zu erreichen

# Entscheidungsfindung

► Vertragssysteme

### *Verträge mit Ereignisbindung und Ausstiegsklauseln*

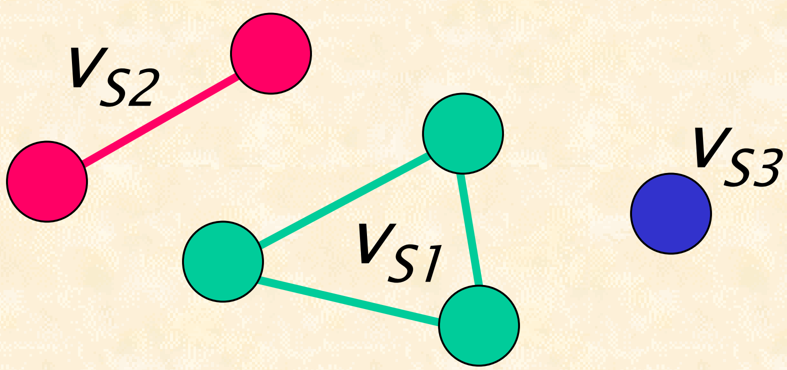
- Aus der Spieltheorie → nicht IR
- Agenten haben Wissen über mögliche Zukunftsereignisse
- Ereignisbindung: Verträge werden in Abhängigkeit von diesem Wissen abgeschlossen
- Probleme:
    - Sehr rechenintensiv bei großer Anzahl von Ereignissen
    - Mögliche Nebeneffekte eines Ereignisses berechnen
    - Unterschiede im Wissen über Ereignisse
- Ausstiegsklauseln: Kündigungspreis wird für beide Seiten definiert
- Kündigungspreis definiert stärke der Vertragsbindung
- Vorteil: Es lohnt sich nicht mehr Ereigniseffekte zu berechnen

# Entscheidungsfindung

► Koalitionsformierung

## *Modell*

- Sei *A* die Menge der Agenten
- Wert einer *Koalition* $S \subseteq A$: $v_S$
- $v_S$ ist unabhängig von Nichtmitgliedern
- Gesucht ist disjunkte Zerlegung von A (Koalitionsstruktur)
- Wird auch als *characteristic function game* (CFG) bezeichnet



## *Bildung einer Koalitionsstruktur*

- Gesucht ist Koalitionsstruktur CS* mit maximaler sozialer Gerechtigkeit

$$CS^* = \arg \max_{CS \in Partitionen(A)} V(CS)$$

- Problem ist *superadditiv*, wenn gilt: $\forall S, T \subseteq A : v_{S \cup T} \geq v_S + v_T$
Dann wäre CS*={A}

- Größere Koalitionen zu formen kann aber z.B. durch Koordinationsaufwand teuer werden, also könnte gelten

$$v_{S \cup T} < v_S + v_T$$

## *Bildung einer Koalitionsstruktur*

- Problem: Anzahl der möglichen Koalitionsstrukturen steigt stark an

$$Partitionen(A) = \Omega(|A|^{|A|/2})$$

- Suche deshalb bei großem |A| nur in N ⊂ Partitionen(A)

$$CS_N^* = \arg\max_{CS \in N} V(CS)$$

- Gesucht ist ein N, so dass CS* und $CS_N$* abgeschätzt werden können
- Es reicht, alle ein- und zweielementigen Partitionen von A für eine Abschätzung zu durchsuchen
- Ist leider immer noch exponentiell

# Entscheidungsfindung



*Lösung des Problems innerhalb einer Koalition*

- Agenten koordinieren Aktivität innerhalb einer Koalition, nicht darüber hinaus
- Aufgaben und Ressourcen werden zusammengelegt
- Ziel ist Maximierung der Einnahmen von außen und Minimierung der internen Kosten
- Komplexes Problem, wird meist näherungsweise gelöst

## *Aufteilung des Profits*

- Faire Aufteilung ist wesentlich für die Stabilität, damit Koalitionsstruktur erhalten bleibt

- Es existieren eine Vielzahl von Verfahren:
  - Core
  - Shapley Value
  - ...

# Entscheidungsfindung



- In komplexen Multiagentensystemen können Agenten schwerer kontrolliert werden
- Strategien können nicht immer von außen erzwungen werden
- Es bedarf stabiler Protokolle, die die Agenten motivieren, wie gewünscht zu handeln
- Rechen- und Kommunikationskapazitäten müssen immer in Betracht gezogen werden
- Technologische und ökonomische Methoden müssen miteinander vereint werden

# Entscheidungsfindung

► Literatur


- Gerhard Weiss: „Multiagent Systems“, MIT Press, Cambridge 1999

- www.multiagent.com

- Matthias von Bechtolsheim: „Agentensysteme“, Vieweg-Verlag 1993

- Ralf Kühnel: „Agentenbasierte Softwareentwicklung“, Addison-Wesley 2001