

February 1999

Eine Multi-Agenten-Simulation zur ökonomischen Analyse der dezentralen Koordination von Wertschöpfungsketten

Torsten Eymann

Universität Freiburg, eymann@iig.uni-freiburg.de

Boris Padovan

Universität Freiburg, padovan@iig.uni-freiburg.de

Follow this and additional works at: <http://aisel.aisnet.org/wi1999>

Recommended Citation

Eymann, Torsten and Padovan, Boris, "Eine Multi-Agenten-Simulation zur ökonomischen Analyse der dezentralen Koordination von Wertschöpfungsketten" (1999). *Wirtschaftsinformatik Proceedings 1999*. 33.

<http://aisel.aisnet.org/wi1999/33>

This material is brought to you by the Wirtschaftsinformatik at AIS Electronic Library (AISeL). It has been accepted for inclusion in Wirtschaftsinformatik Proceedings 1999 by an authorized administrator of AIS Electronic Library (AISeL). For more information, please contact elibrary@aisnet.org.

Eine Multi-Agenten-Simulation zur ökonomischen Analyse der dezentralen Koordination von Wertschöpfungsketten

Torsten Eymann

Universität Freiburg (eymann@iig.uni-freiburg.de)

Boris Padovan

Universität Freiburg (padovan@iig.uni-freiburg.de)

Inhalt

- 1 Motivation**
- 2 Multi-Agenten-Systeme auf Elektronischen Märkten**
- 3 Veränderung von Koordinationsmechanismen durch Einsatz von Informationstechnologie**
- 4 Avalanche – Aufbau einer MAS-Simulation**
- 5 Implementation der Simulationsumgebung**
- 6 Kooperations- und Koordinationsvolatilität als Indikator organisatorischer Veränderungen**
- 7 Simulation ausgewählter Fragestellungen**
 - 7.1 Veränderung der Transaktionskosten
 - 7.2 Veränderung der Transparenz von Angebot und Nachfrage
 - 7.3 Veränderung der Konnektivität
- 8 Schlußbetrachtung**

Abstract

Autonome Software-Agenten werden in Zukunft auf elektronischen Marktplätzen, die in offenen Netzen verteilt liegen, automatisiert und aktiv Handel im Auftrag ihres Anwenders betreiben. Die Komplexität dieser Aufgabe macht es notwendig, dezentrale Koordinationsmechanismen einzusetzen, die der Struktur dieser Netze angepaßt sind.

In diesem Artikel wird ein solches Koordinationskonzept durch Modellierung lokaler Verhaltensregeln und durch die Annahme kompetitiven Verhaltens der Beteiligten vorgestellt und in dem hier beschriebenen Projekt *Avalanche* in einem ökonomischen Kontext implementiert, um Möglichkeiten aufzuzeigen, wie Geschäftsprozesse (z.B. die Koordination von Wertschöpfungsketten) durch autonome, individualistische Softwareagenten dezentral koordiniert werden können. Die entstehenden Handelsnetzwerke werden in einer organisationstheoretischen Fragestellung untersucht, die simulativ Aufschluß darüber geben soll, inwieweit die Variation von Parametern wie Transaktionskosten, Konnektivität oder Markttransparenz (z.B. durch den Einsatz von Informationstechnologie) zu eher marktlichen oder hierarchischen Strukturen führt. Als Meßgröße für die Veränderung dieser Organisationsstrukturen wird das Konzept der Kooperations- und Koordinationsvolatilität vorgestellt.

1 Motivation

In den letzten zwei Jahren sind aus der Synthese von Konzepten der Künstlichen Intelligenz, der Wirtschaftsinformatik und der Wirtschaftswissenschaften neue Softwareanwendungen möglich geworden: Agenten zur Unterstützung wirtschaftlicher Transaktionen, z.B. im Rahmen Elektronischer Märkte und des Elektronischen Geschäftsverkehrs.

Agenten repräsentieren menschliche Anwender. Sie unterscheiden sich von traditionellen Software-Anwendungen vor allem durch ihre relative Autonomie, die als „zielgerichtetes, proaktives und selbst-startendes Verhalten“ begriffen werden kann. Software-Agenten laufen kontinuierlich und selbständig in einer definierten Umgebung, zusammen mit anderen Agenten und Prozessen. Diese Eigenschaften sind insbesondere in dynamischen Umgebungen mit einer Vielzahl an sich ständig ändernden Informationen und konkurrierenden Prozessen, wie dem Elektronischen Geschäftsverkehr in offenen Netzen und auf Elektronischen Marktplätzen, von Nutzen.

Agenten werden auf elektronischen Märkte in absehbarer Zukunft eine zentrale Rolle spielen (Preist 1998). Ein zentrales Forschungsgebiet ist dabei die Entwicklung automatisierter Verhandlungskonzepte: auf elektronischen Marktplätzen werden Käufer- und Verkäufer-Agenten automatisiert und autonom Handel im Auftrag ihres Anwenders betreiben. Die Marktplätze selbst können dabei auf

unterschiedliche Produkte spezialisiert sein: Rohstoffe, Commodities, Informationsgüter, Dienstleistungen. Möglich ist auch der Handel mit virtuellen Gütern, z.B. Bandbreite (Huberman et al. 1997). Agenten werden diese Vielfalt an Märkten nicht nur permanent im Auftrag ihres Absenders beobachten, sondern auf ihnen auch aktiv Handel betreiben: Identifiziert der Agent ein interessantes Kauf- oder Verkaufsangebot, so beginnt er umgehend Verhandlungen mit dem betreffenden Partneragenten. Entsprechen sich Angebot und Nachfrage, werden die Agenten selbständig einen Kauf durchführen. Erste Anwendungen hierzu sind der elektronische Marktplatz Kasbah (Chavez et al. 1996) und die "Information Economies" von IBM (Kephart et al. 1998).

2 Multi-Agenten-Systeme auf Elektronischen Märkten

Die Erfassung und Bewertung einer dynamischen Angebots- und Nachfragesituation, u. U. über mehrere Marktplätze hinweg, übersteigt dabei schnell die Rechenmöglichkeiten eines einzelnen Agenten. Ein Multi-Agenten-System (MAS) (Durfee et al. 1994) von separat entwickelten und miteinander kommunizierenden Agenten kann hingegen seine Handlungsweisen koordinieren und damit Ergebnisse realisieren, die für den einzelnen Agenten nicht erreichbar sind. Bei dem Einsatz von MAS handelt jeder Agent autonom durch Befolgung eigener, lokaler Strategien, unter Berücksichtigung einiger Protokolle die im gesamten MAS gelten. Der Weg zur Bearbeitung einer Aufgabe ist nicht explizit vorgegeben. Erwartet wird eine Lösung, die allein aus den lokalen Interaktionen der einzelnen Agenten resultiert. Gleichzeitig wird die Population in der Lage sein, sich schnell und flexibel exogenen Änderungen anzupassen. In diesem Sinne nutzt sie in starkem Maße die prognostizierten Vorteile eines MAS (Nwana 1996): dynamische Lösungen für komplexe, unregelmäßig verteilte Probleme, in einer modularen, komplexitätsreduzierenden Form, die durch Parallelität, Fehlertoleranz und Redundanz schnell arbeitet.

Der Einsatz von Multi-Agenten-Systemen verspricht den besonderen Anforderungen, die durch die Komplexität und räumliche Ausdehnung der Märkte begründet sind, gerecht zu werden, reicht aber alleine nicht aus. Automatisierte Verhandlungskonzepte (Beam et al. 1996) definieren die Kommunikationsprotokolle und das Kooperationsverhalten der einzelnen Agenten. Die Koordination, im Falle elektronischer Märkte mit dem Ergebnis des Ausgleichs zwischen Angebot und Nachfrage, kann zentral oder dezentral erfolgen. Zentrale Koordinationsmechanismen sind z.B. Auktionen mit einem Auktionator (Gomber et al. 1998) oder die direkte Berechnung eines Gleichgewichtspreises aus der Gesamtheit von Angebot und Nachfrage (Wellmann 1996). In der dezentralen Welt offener Netze, für die prototypisch das Internet steht, halten wir den Einsatz zentraler Koordinationsmechanismen jedoch nur in Einzelfällen für sinnvoll. Benötigt wird ein ökonomisch motivierter Ansatz, der über dezentrale Kommunikation und Kooperation zwischen den Agenten auch eine dezentrale Koordination des Ge-

samtsystems unterstützt (eine genauere Diskussion der Begriffe Koordination und Kooperation findet sich in Schoder et al. 1997). Im Bereich der ökonomischen Koordination von Multi-Agenten-Systemen entspricht das von uns verwendete Koordinationskonzept dem des Forschungsgebiets Agent-based Computational Economics.

Der thematische Schwerpunkt von "Agent-based Computational Economics" (ACE) liegt in der Computersimulation Agenten-basierter ökonomischer Modelle, in denen autonome Agenten dezentral interagieren (Tesfatsion 1997). Ein zentraler Punkt des Forschungsgebietes von ACE ist das Verständnis für anscheinend spontane Erscheinungen globaler Ordnungen in ökonomischen Prozessen, wie die a priori unvorhersehbare Koordination von Handel in dezentralen Märkten, die Ökonomen mit Adam Smiths Begriff der „Unsichtbaren Hand“ beschreiben. Verschiedene Projekte (Tesfatsion 1997) zeigen, wie sich komplexe, globale Handlungsordnungen bottom-up durch die lokale, dezentrale Interaktion autonomer Agenten entwickeln.

Die für ACE-Simulationen charakteristische nicht-lineare räumlich-zeitliche Interaktion zwischen einer hohen Zahl von Teilnehmern resultiert in sehr komplexem Verhalten des künstlichen Simulationssystems. Auch in der Natur sind solche Systeme zu finden: Immunsysteme, Nervensysteme, Zellorganismen, Biotope oder Insektenpopulationen. Die Erforschung natürlicher und künstlicher Systeme wie parallele und verteilte Rechnersysteme, große Kommunikationsnetze, künstliche neuronale Netze, evolutionäre Algorithmen, große Softwaresysteme und Ökonomien ist Thema des Forschungsgebiets Complex Adaptive Systems (CAS). Beispiele für künstliche CAS sind Tierra (Ray 1992) und Sugarscape (Epstein et al. 1996). ACE ist somit eine Spezialisierung von Complex Adaptive Systems im Bereich der Ökonomie.

3 Veränderung von Koordinationsmechanismen durch Einsatz von Informationstechnologie

Auch die in dem hier beschriebenen Projekt zugrunde gelegte Wertschöpfungskette (s. u.) kann als ein von Menschen gebildetes komplexes System beschrieben werden, mit einer Anzahl an Entitäten (Organisationseinheiten) die mittels lokaler Regeln (einfache Regeln zum Kauf und Verkauf von Gütern) zur Kommunikation und Kooperation interagieren. Die Wertschöpfungskette stellt damit nicht mehr da als „a collection of autonomous, problem-solving agents which interact when they have interdependencies“ (Jennings et al. 1996). Der dezentrale Handel der Agenten untereinander und mit ihrer Umgebung soll zum Verständnis des Wachstums von Organisationen und von Koordinationsprozessen dienen: „Was führt eine Gruppe ökonomisch handelnder Agenten dazu, eine Ökonomie zu bilden?“ (Lane 1993). Die Entwicklung von koordinativen Strukturen höherer Ordnung aus den durch die Agenten aufgespannten Handelsnetzwerke, die dem Betrachter als

markt-ähnliche Organisation oder als hierarchie-ähnliche Organisation erscheinen, wird von uns im Sinne von ACE untersucht.

Motiviert wird diese Fragestellung durch den steigenden Einsatz von Informationstechnologie (IT), der zu stetigen Veränderung von Organisationsstrukturen und Koordinationsmechanismen in der realen Welt führt. Der Diskurs fokussiert insbesondere auf die Fragestellung, ob sich zukünftige Koordinationsformen eher marktlich („move-to-the-market“) oder hierarchisch entwickeln werden (Malone et al. 1987; Clemons et al. 1993; Gurbaxani et al. 1995; Klein 1996). Bekannte Erklärungsansätze gehen meist von einem Kontinuum zwischen Markt und Hierarchie aus. Der Mechanismus der Aushandlung zwischen mehreren Partnern führt dabei in der reinen Form zur Institutionalisierung eines Marktes; in ähnlicher Weise wird die Koordination über Anweisungen zu einer hierarchisch geprägten Organisationsstruktur führen. Zwischen diesen beiden Extremen lassen sich jedoch eine Menge an Mischformen lokalisieren, die Attribute beider Ausprägungen miteinander verschmelzen. In der Literatur sind eine Vielzahl von Parametern für die Veränderung der Koordinationsform identifiziert worden (Klein 1996). Das Forschungsziel der hier vorgestellten Simulation ist zu untersuchen, ob und in welchem Ausmaß die Variation der ausgewählten Parameter Transaktionskosten, Transparenz von Angebot und Nachfrage, Konnektivität von Marktplätzen und Kooperationsverhalten der Agenten zu einer Veränderung der Koordinationsmechanismen bzw. zu einer Veränderung in der Stabilität der von den Agenten aufgespannten Handelsnetzwerke führt.

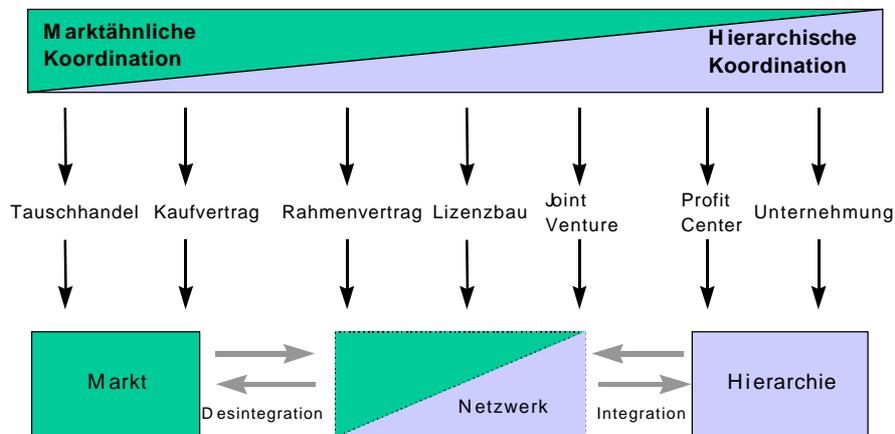


Abbildung 1: Koordinationsmechanismen zwischen Markt und Hierarchie

4 Avalanche – Aufbau einer MAS-Simulation

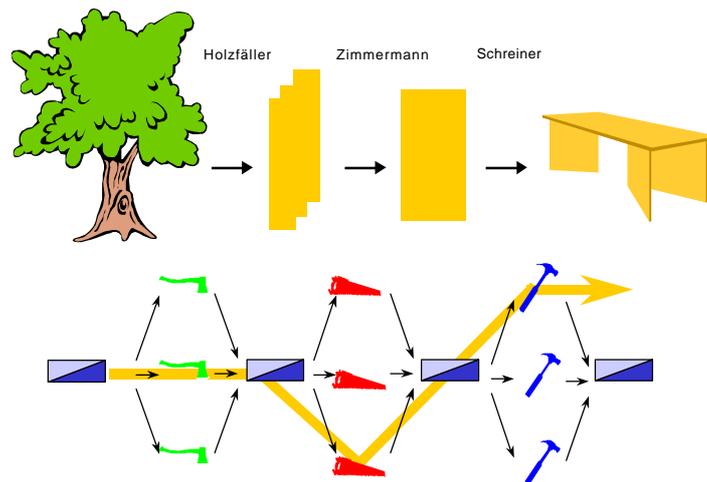


Abbildung 2: Beispiel einer Wertschöpfungskette

Die künstliche Welt unserer Simulation besteht aus mehreren (ca. 5-10) elektronischen Marktplätzen. Zwischen ihnen wandern (ca. 200-400) mobile Agenten, die Holzfäller, Tischler und Schreiner repräsentieren, um nach Angeboten und Nachfragen für ihre Güter zu suchen. Idealtypisch besteht eine solche Wertschöpfungskette aus mehreren verbundenen organisatorischen Einheiten (Porter et al. 1985). Diese Entitäten verarbeiten Rohstoffe mit den Produktionsfaktoren Arbeit und Wissen und erhöhen so den Wert der Produkte. Diese Produkte dienen wiederum als Inputfaktoren der nächste Stufe der Wertschöpfungskette, bis das Endprodukt den Konsumenten erreicht. Diese Kette kann von primitivsten Rohstoffen (Holz, Öl, Gas) zu wesentlich komplexeren Gütern (Fahrzeugen, Gebäuden) erweitert werden, selbst wenn die entstehende Struktur eher einem Netz als einer linearen Kette gleicht. Jedoch kann jede Rohstoff-Endprodukt-Relation als linearer Zusammenhang beschrieben werden, so wie in Abbildung 2 beschrieben – die Entstehung eines Endproduktes (Tisch) aus Rohstoffen (Bäumen) folgt emergent im Zeitablauf der Aushandlungsprozesse. Weder kennt der Holzfäller das endgültige Produkt, das aus seinem gefällten Baum entsteht, noch weiß der Schreiner, von welchem Baum seine Bretter stammen. Trotzdem produzieren alle Agenten aus Sicht des Konsumenten effizient einen hoffentlich qualitativ hochwertigen Tisch – lediglich durch lokale Interaktion, sequentiell den Stufen der Wertschöpfungskette folgend.

Es ist wahrscheinlich, daß es nicht nur zur Bildung einer einzelnen Wertschöpfungskette kommt, sondern daß sich mehrere, parallele, aber auch verflochtene Ketten bilden. Vor diesem Hintergrund betrachten wir die einzelnen Glieder

(Agenten) der Kette als typische „low-level primitives“ in Sinne von CAS (Holland et al. 1991). Die Agenten agieren autonom und folgen lokalen Handelsregeln. Unterscheiden lassen sich die Agenten nach ihren Aufgaben. Ein Typ von Agenten fällt Bäume (Holzfäller), während der in der Kette folgende Typ die Bäume in Bretter zersägt (Zimmerleute). Aus Brettern werden von Schreibern Tische produziert. Die Tische werden als Endprodukte von einer speziellen Gruppe von Agenten konsumiert, d.h. aus der Simulation entfernt. Die unterschiedlichen Agenten werden durch unterschiedliche Symbole in den Abbildungen dargestellt.

5 Implementation der Simulationsumgebung

Die grundlegenden Komponenten unserer Implementation eines ökonomischen MAS mit dem Namen *Avalanche (Agent-Based Value Chain Coordination Experiment)* werden in der Programmiersprache Java realisiert. Um die Gesamtkomplexität des Projektes gering zu halten, wurde bereits bei der Konzeption darauf geachtet, so viele standardisierte Konzepte wie möglich einzusetzen. So werden die Agenten mittels existierender Klassenbibliotheken für mobile Agenten (Mole (Baumann 1996), Voyager (Objectspace 1997)) implementiert. Die Mobilität der Agenten ermöglicht Wanderungen im Netz, um die beste Angebots- und Nachfragesituation zu finden. Autonomie als zentrales Merkmal eines Agenten wird also hier in eine räumliche Dimension übersetzt; die Forschungsfragen werden entsprechend definiert.

Lokationen (Handelsplätze) sind Java Virtual Machines (VM), die als Serverprozesse fest auf einem vorgegebenen Rechner laufen. Der Start der Simulation erfolgt durch eine Initialisierung der Handelsplätze. Diese sind durch eine IP-Port-Adresse in einem TCP/IP-Netz identifiziert (z. B. 127.0.0.1:7777). Der Einsatz von Port-Adressen ermöglicht, auf einem Rechner mehrere Lokationen laufen zu lassen, die für die Agenten eine "Sandbox"-Umgebung zur Interaktion bereitstellen. Sie bieten eine Registratur-Liste, in der Agenten ermitteln können, welche weiteren Agenten sich auf der Lokation befinden. Die Lokation bzw. die Existenz der Registraturliste beeinflusst jedoch zu keiner Zeit das Handeln des einzelnen Agenten und die Koordination zwischen den Agenten.

Agenten sind durch eine eigene ID unterscheidbar. Sie kommunizieren ohne fremde Moderation und bilateral durch Methodenaufruf oder Message-Passing. Das genutzte Verhandlungsprotokoll implementiert zu großen Teilen FIPAs Agent Communication Language (FIPA 1997) und Kontraktnetze (Smith 1980). Modifiziert wird das System durch Elemente, die von (Eriksson et al. 1997) und (Sandholm 1996) vorgeschlagen werden, um das individualistische Verhalten der Agenten zu unterstreichen. Die Agenten laufen gleichzeitig und parallel, um Auswirkungen von sequentiellen Scheduling-Algorithmen zu vermeiden. Die Simulation ist demnach nicht wie andere Projekte auf „Spielrunden“ basiert; die notwendige Synchronisation erfolgt über eine isochron durch den Agenten selbst aufgerufene sog. "heartbeat"-Methode. Der Ablauf in Echtzeit und die ausgeprägte

dezentrale Verteilung unseres Simulationsaufbaus macht es den Agenten unmöglich, eine vollkommene Übersicht der augenblicklichen Marktsituation zu erhalten, ähnlich wie in den Arbeiten von Sandholm in bezug auf automatisierte Verhandlungen zwischen individualistischen Agenten mit limitierter Rechenkapazität (Sandholm 1996).

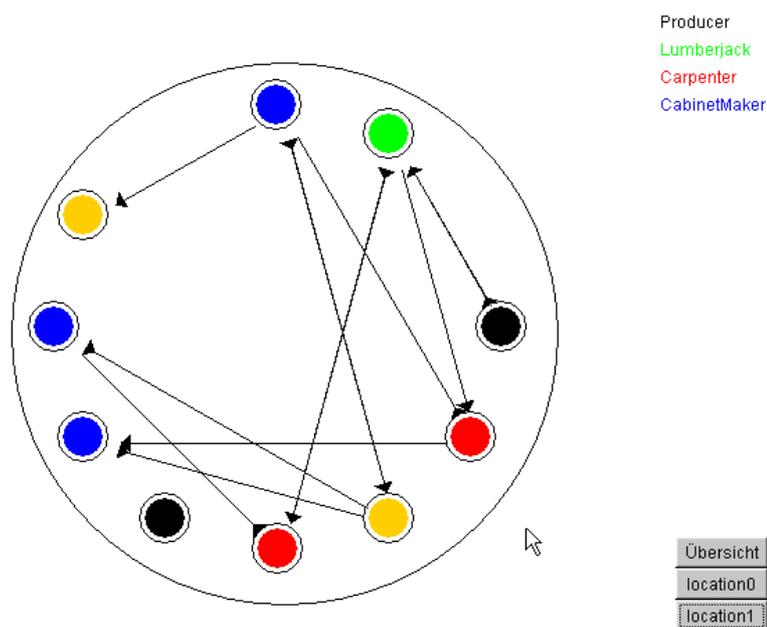


Abbildung 3: Bildschirmdarstellung einer Lokation

Die Strategie des einzelnen Agenten basiert stochastisch auf Parametern wie *acquisitiveness* (die Wahrscheinlichkeit, Angebots- oder Nachfragepreis willkürlich zu ändern), *price-prospect* (die Wahrscheinlichkeit, eine eigenmächtige Preisänderung des Partners zu erwarten), *satisfaction* (die Wahrscheinlichkeit, mit den vorliegenden Angeboten zufrieden zu sein und kein weiteres Angebot eines Anbieters anzufordern) oder *impatience* (die Wahrscheinlichkeit, die aktuelle Lokation zu wechseln, falls eine Unzufriedenheit mit der lokalen Marktsituation besteht). Jede Aktion der Agenten wird entsprechend durch eine stochastische Probe gegen diese Parameter bestimmt. Das Verhalten eines Agenten kann damit nicht vorab berechnet werden, sondern ergibt sich emergent aus der Summe seiner Parameter.

Andere, konstante Parameter sind beispielsweise die Agenten-ID und die jeweilige Produktionsfunktion des Agenten. Eine wichtige Variable ist das Eigenkapital, das nicht nur ein Rechen- und Wertaufbewahrungsmittel bei Kauf und Verkauf von Gütern ist, sondern auch als Indikator des relativen Erfolges des einzelnen Agenten dient. Ein Agent, der schneller oder besser handelt (Phänotyp), wird einen relativ höheren Kapitalbestand erwirtschaften, was wiederum Rückschlüsse auf

die Wettbewerbsfähigkeit seiner Parameterkombination (Genotyp) zuläßt. Erfolgreiche Agenten werden ihren Genotyp (Variablen und Methoden) unter Nutzung „Evolutionärer Algorithmen“ reproduzieren. Dies führt im Zeitablauf der Simulation zu einer relativen Überrepräsentation von erfolgreichen Agenten in der Agentenpopulation und damit zu einer Unabhängigkeit von der Ausgangspopulation. Änderungen der Marktsituationen werden im Zeitablauf durch Änderungen der Agentenpopulation begleitet, ohne daß abrupte Störungen auftreten.

Exemplarisch sei hier der Ablauf eines Angebots dargestellt: Ein Agent gibt durch Eintrag in die Registerliste der aktuellen Lokation bekannt, daß von ihm gefertigte Güter auf dem Markt erhältlich sind. Die Daten umfassen jedoch nur die ID des Agenten sowie die Art des Gutes. Menge und Preis werden erst bilateral auf Anfrage der Nachfrager-Agenten mitgeteilt, anderenfalls könnte die Rangliste bereits als zentraler Koordinator betrachtet werden. Falls das angebotene Gut nicht sofort verkauft wird, besteht das Angebot über einen gewissen Zeitraum in die Zukunft. Um die Angebotsfunktion des Agenten unter Berücksichtigung seines individualistischen Verhaltens zu modellieren, werden heuristische Konzepte von Kasbah (Chavez et al. 1996) verändert um eine stochastische Funktion, die den Fortbestand des Angebotspreises anhand des Parameters *acquisitiveness* des Anbieters überprüft. Falls diese Überprüfung mißlingt, wird der Anbieter seinen Preis in der nächsten Periode senken – ein Verkauf des Gutes wird so zunehmend wahrscheinlicher (unabhängig von den Handlungen potentieller Käufer, die diese Änderungen aber auch nicht antizipieren können). Falls das Gut jedoch nicht verkauft werden kann (z. B. da kein entsprechender Käufer auf dem Marktplatz anwesend ist), kann der Angebotspreis sogar bis auf Null sinken.

Die Agenten, die als Käufer auf einer Lokation auftreten, überprüfen zuerst die Registerliste des aktuellen Standorts. Dem folgt iterativ eine Kommunikation mit den identifizierten Anbietern von Waren und Rohstoffen, so daß der Käufer-Agent für sich selbst eine entsprechende Marktübersicht als "snapshot" des aktuellen Marktgeschehens erzeugt. Eine einfache Präferenzfunktion reiht die Angebote anschließend nach den Preisen; anhand dieser Liste stillt der Agent seine Nachfrage. Da Agenten gleichzeitig agieren, ist es prinzipiell möglich, daß ein Nachfrageüberhang im Augenblick der Kaufentscheidungen entsteht, so daß der Agent auf schlechtere Angebote ausweichen oder die Prozedur wiederholen muß.

Die Nutzung „Evolutionärer Algorithmen“ (EA) in dieser ökonomischen Simulation ist durch die Suche nach solchen Parameterwerten motiviert, die zum Erfolg eines Agenten bzw. der gesamten Agentenpopulation führen (Holland et al. 1991), und die nicht von der Ausgangspopulation abhängen. Jeder Agent repräsentiert mehr oder weniger eine zufällige Verteilung der Parameterwerte. Der Erfolg des einzelnen Agenten ist relativ einfach aus der Höhe des erwirtschafteten Kapitals, im Verhältnis zu den anderen Agenten, abzuleiten. Der Erfolg einer Agentenpopulation als ganzes kann in technischer (Rechen- oder Kommunikationseffizienz) oder ökonomischer Hinsicht (Paretoeffizienz oder soziale Wohlfahrt) ermittelt werden (Sandholm 1996). In unserer Wertschöpfungskette betrachten wir eine Agentenpopulation als erfolgreicher im Vergleich zu einer anderen, wenn die Produktivität in einem Zeitabschnitt höher ist. Durch Aussortierung nicht erfolg-

reicher und Überrepräsentation erfolgreicher Agenten gewinnt die Population im Zeitablauf an wirtschaftlicher Stärke.

Die Literatur über Genetische Algorithmen (Goldberg 1989) unterteilt solche Mechanismen in vier Stufen: Evaluation, Reproduktion, Rekombination und Mutation. Diese müssen für den Einsatz in unserer ökonomischen Simulation auch ökonomisch interpretierbar sein und implementiert werden. Die bloße Übernahme reiner Methoden aus dem Forschungsgebiet des "Artificial Life" ist problematisch (Stender 1994), da ökonomische Institutionen und Organisationen eine theoretisch unbegrenzte Lebenserwartung haben und weder eine Reproduktion im biologischen Sinne stattfindet noch Nachkommen erzeugt werden.

In der Evaluationsphase wird jeder Agent nach einem Fitness-Score beurteilt. Dieser ermittelt sich aus dem aktuellen Kapitalbestand des Agenten. Zu Beginn jedes Simulationsexperiments werden alle Agenten mit dem gleichen Kapitalstock ausgestattet. Alle Kauf- und Verkaufshandlungen haben unmittelbaren Einfluß auf den Kapitalbestand – einerseits werden die erworbenen Güter aus ihm bezahlt, andererseits führt der Verkauf eines Gutes zu einem Kapitalzufluß. Zu jedem Synchronisationszeitpunkt wird unwiderruflich Kapital vom Bestand abgezogen, um so entstehende Lagerhaltungs-, Rechen- und Telekommunikationskosten zu berücksichtigen. Falls der Kapitalbestand Null erreicht ("Konkurs"), wird der ökonomische Tod des Agenten angenommen und dieser aus der Simulation entfernt.

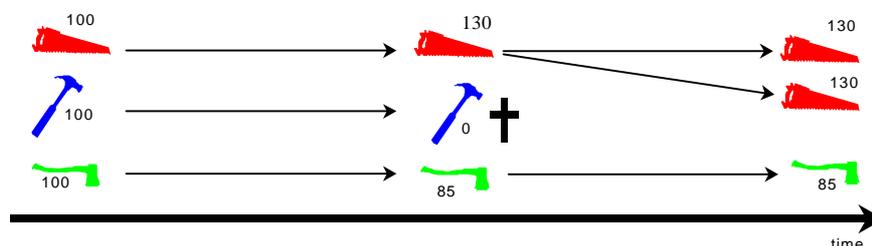


Abbildung 4: Fitness-Evaluation ökonomischer Agenten

In der Phase der Reproduktion werden anhand des Fitness-Scores diejenigen Agenten reproduziert, deren Eigenkapitalzuwachs einen vorgegebenen Faktor überschritten hat. In der Implementation wird ein exakter Klon eines erfolgreichen Agenten der Simulation hinzugefügt. Das plötzliche Auftreten von Agenten, die erfolgreiche Agenten imitieren, kann mikroökonomisch als folgendes Phänomen verstanden werden: Offensichtlicher Erfolg eines Unternehmens auf einem Markt führt zu neuen Unternehmen, die beim Markteintritt das beobachtbare erfolgreiche Handeln adaptieren (Varian 1993).

Als dritte Phase folgt üblicherweise die Rekombination, bei der konsequenterweise die Attribute (Gene) zweier erfolgreicher Agenten des gleichen Typs vermischt und auf einen neuen Agenten abgebildet werden. Diese Phase kann ökonomisch nur schwer interpretiert werden. Auch die letzte Phase der Mutation kann ökonomisch nur durch eine nicht perfekte Adaption erzeugter Klone moti-

viert werden. Auch aus diesen Gründen, und um die Simulation möglichst einfach zu halten, sind die beiden letzten Phasen (Rekombination und Mutation) nicht in *Avalanche* implementiert. Die notwendige genetische Vielfalt muß durch Addition zufällig attributierter Agenten erreicht werden, zusätzlich zu den (nicht perfekten) Klonen erfolgreicher Agenten. Damit gibt es immer eine bestimmte Anzahl an Agenten, die unterschiedlich zu den bereits "beschäftigten" Simulationsteilnehmern sind, und die die evolutionäre Chance nutzen können, das System in ihrem Sinne zu verändern. Durch exogene Eingriffe kann auf diese Weise auch die Auswirkung veränderter Produktionsfunktionen und anderer, sonst als konstant betrachteter Parameter, beobachtet werden.

6 Kooperations- und Koordinationsvolatilität als Indikator organisatorischer Veränderungen

Die organisatorische Struktur und die Koordinationsmechanismen, die von den verschiedenen Stufen der Kette genutzt werden, sind aus der Abbildung 2 nicht abzulesen, da das resultierende Produkt in allen Fällen das gleiche bleibt: ein Tisch. Dies ist unabhängig davon, ob die Entitäten jeweils einzelne Unternehmer sind (markt-ähnliche Koordination) oder zu einer großen Organisation gehören (hierarchie-ähnliche Koordination). Das durch die Agenten aufgespannte Handelsnetzwerk bildet über den Zeitablauf der Simulation zahlreiche und wechselnde Zwischenformen in der organisatorischen Struktur, die sich in der Stabilität der Kooperationsbeziehungen unterscheiden.

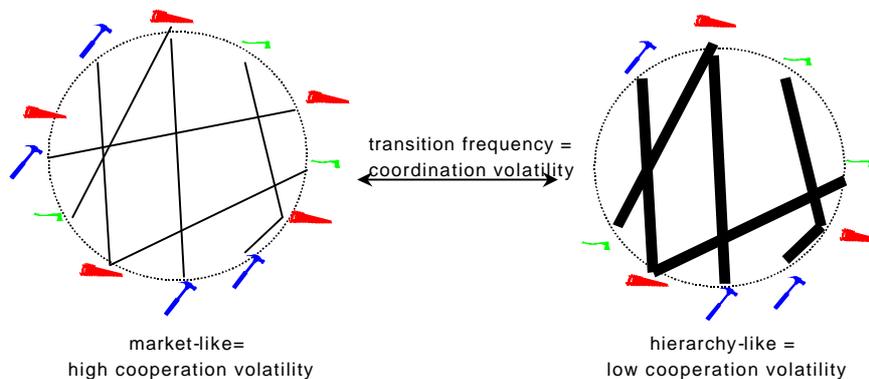


Abbildung 5: Visualisierung der Handelsnetzwerke

In der graphischen Darstellung werden Handelsbeziehungen zwischen Agenten durch Verbindungslinien symbolisiert. Eine dünne Linie, beispielsweise zwischen einem „Zimmermann-Agenten“ und einem „Schreiner-Agenten“, bedeutet, daß der Schreiner zuletzt Produkte vom Zimmermann bezogen hat. Falls beim nächsten Kauf der Schreiner wieder beim selben Zimmermann Güter bezieht, wird die

Linie dicker, um die Wiederholung der Interaktion zwischen den beiden Beteiligten aufzuzeigen. Damit erhalten wir einen numerischen Wert, der darstellt, wie oft sich ein Agent zum Handeln mit neuen Kooperationspartnern entschieden hat: die *Kooperationsvolatilität* zeigt die umgekehrte Wiederholungsfrequenz einer Kooperationsbeziehung an. Diese kann mit einfachen Mitteln gemessen, aggregiert und dargestellt werden. Eine niedrige Kooperationsvolatilität eines Agenten, angezeigt durch geringe Wechsel der Kooperationspartner und damit durch starke Linien, deutet auf einen Marktzustand hin, in dem die ökonomischen Anreize anderer Agenten zu gering sind, um einen Lieferanten- oder Abnehmerwechsel zu veranlassen. Im Gegensatz dazu zeigt eine hohe Kooperationsvolatilität (häufiger Partnertausch), daß unter den gegebenen Simulationseinstellungen eine hohe Partnertreue keine ökonomischen Vorteile bringt.

Bei Beobachtung der mittleren Kooperationsvolatilität aller Agenten können u.U. relativ langfristig stabile Zustände beobachtet werden: falls es stabile Attraktoren im Kontinuum zwischen Markt und Hierarchie gibt, sollte es, durch die Veränderung von Initialpopulationen und Umgebungsvariablen, möglich sein, Trajektorien zu untersuchen und zu unterscheiden, die zu diesen Attraktoren führen (Kauffman 1995). Eine Situation, in der keinerlei Wechsel in den Kooperationsbeziehungen mehr stattfindet, wird von uns als hierarchie-ähnliches Koordinationsmuster interpretiert. Wechselt die mittlere Kooperationsvolatilität zwischen mehreren unterscheidbaren Niveaus, so können die unterschiedlichen Häufigkeiten der mittleren Kooperationswechsel ebenfalls einfach gemessen werden (*Koordinationsvolatilität*). Wir interpretieren häufige Rekonfigurationen als einen (relativ chaotischen) Markt, während stabilere Strukturen mit geringer Kooperationsvolatilität als stabiles Handelsnetzwerk mit klaren hierarchie-ähnlichen Beziehungen gesehen wird.

Es ist möglich, daß verschiedene Szenarien durch die Simulation entstehen. Ein naheliegendes Ergebnis wäre, daß keinerlei Kooperation zustande kommt (unendliche Kooperationsvolatilität, keine Koordinationsvolatilität). Dies bedeutet, daß bei einer gegebenen initialen Parameterausstattung die Agenten durch Handeln ihre Situation nur verschlechtern können. Möglich wäre auch, daß sowohl die Kooperationsvolatilität als auch die Koordinationsvolatilität gegen Null tendieren. Agenten hätten in diesem Falle in kürzester Zeit Handelspartner identifiziert und würden an diesen Kooperationen festhalten, selbst wenn neue Agenten der Umgebung zugeführt werden. Durch die Veränderung der initialen Parameter (Transaktionskosten, Kooperationsverhalten, Übersicht über Angebot und Nachfrage etc.) sollten bei wiederholten Simulationsläufen unterschiedliche Szenarien entstehen, die anschließend interpretiert werden müssen.

7 Simulation ausgewählter Fragestellungen

Anhand einiger Beispiele soll nun gezeigt werden, wie die initialen Parameter *ceteris paribus* in wiederholten Simulationsläufen verändert werden könnten. Eine

ausführliche Behandlung und Identifikation der relevanten Parameter für die Veränderung von Koordinationsmechanismen findet sich bei (Klein 1996). In der hier beschriebenen Simulation werden jedoch nur einige ausgewählte Parameter operationalisiert und implementiert.

7.1 Veränderung der Transaktionskosten

Transaktionskosten entstehen bei jedem Kauf und Verkauf und führen zu einem Vermögensabfluß der beteiligten Transaktionspartner. Durch den Einsatz von Informationstechnologie sollen in einem gegebenen Handelsnetzwerk die Transaktionskosten gesenkt und damit ein „move-to-the-market“ ausgelöst werden können (Malone et al. 1987). Die entsprechende Forschungsfrage scheint einfach, ist aber dennoch schwer a priori zu beantworten: „Würde es auf ein aus Agenten gebildetes Handelsnetzwerk Auswirkungen haben, wenn die Transaktionskosten hoch oder gering sind?“ Simuliert wird die Problematik durch aufeinanderfolgende Simulationsläufe mit einer gleichen Ausgangspopulation, bei der lediglich der Parameter Transaktionskosten schrittweise gesenkt und die sich ergebenden Organisationsstrukturen analysiert werden.

7.2 Veränderung der Transparenz von Angebot und Nachfrage

Ein weiteres Beispiel, das durch einen entsprechenden Aufbau der Simulationsumgebung dargestellt werden kann, ist die Modellierung der Transparenz von Angebot und Nachfrage.

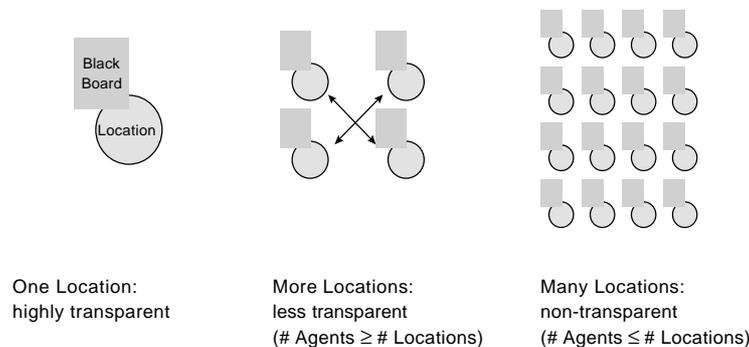


Abbildung 6: Transparenz von Angebot und Nachfrage

Falls nur ein Marktplatz in der Simulation vorhanden ist, ist eine hohe Transparenz gegeben, da es jedem Agenten relativ schnell möglich ist, eine vollkommene Marktübersicht zu erhalten. Dies hat Auswirkungen auf die Entwicklung von Angebots- und Nachfragepreisen. Steigt jedoch die Anzahl der Marktplätze im Verhältnis zu den vorhandenen Agenten, wie in Abbildung 6 gezeigt, sinkt die Transparenz für den einzelnen Agenten wieder. Im Ergebnis könnte dies dazu

führen, daß Agenten mit schlechteren Preisen vergleichsweise länger überleben können.

7.3 Veränderung der Konnektivität

Bei steigender physikalischer Konnektivität (Abbildung 7) zwischen den einzelnen Handelsplätzen wird ein Ortswechsel für den Agenten kostengünstiger; damit kann er sich bei gleichen Kosten eigenständig eine höhere Markttransparenz erarbeiten. Dies führt tendenziell zu einem häufigeren Austausch der Kooperationspartner, sollte damit die Kooperationsvolatilität erhöhen und ebenfalls einen „move-to-the-market“ begründen.

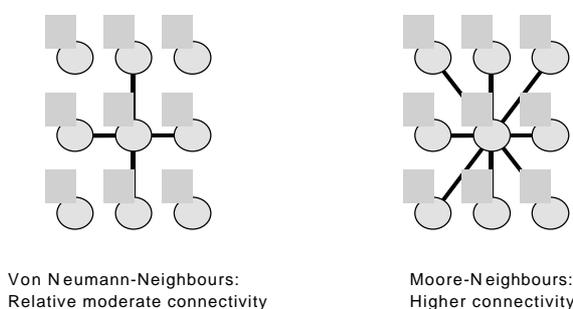


Abbildung 7: Konnektivität von Marktplätzen

8 Schlußbetrachtung

Complex Adaptive Systems erzeugen globale Koordinationsmechanismen durch die Modellierung lokaler Interaktionsprotokolle und bauen auf dem Wettbewerb zwischen Individuen auf. Ein Beispiel ist die Koordination von Leistungserstellungsprozessen durch den Einsatz autonomer Agenten, die mittels ökonomischer Protokolle kooperieren und kommunizieren. Diese grundlegende Idee wird in dem hier vorgestellten Projekt in einen ökonomischen Kontext gestellt: die entstehenden Handelsnetzwerke werden unter einer organisationstheoretischen Fragestellung untersucht, die simulativ Aufschluß darüber geben soll, inwieweit die Variation von Parametern wie Transaktionskosten, Konnektivität oder Markttransparenz (z.B. durch den Einsatz von Informationstechnologie) zu eher marktlichen oder hierarchischen Koordinationsmechanismen führt.

Beginnend mit einer zufällig erzeugten Population ökonomisch handelnder individualistischer Agenten untersuchen wir deren Entwicklung, die durch die Anwendung lokaler Interaktionsregeln und beobachtbarer Koordinationsordnungen bestimmt ist. Die Mobilität der Agenten ermöglicht es ihnen, eine offen vernetzte, verteilte Simulationsumgebung nach der für sie besten Marktsituation

abzusuchen. Agenten, die hierbei erfolgreich sind, können sich durch den Einsatz evolutionärer Algorithmen reproduzieren. Dies führt zu einer Agentenpopulation, die der aktuellen Marktsituation am besten angepaßt ist. Änderungen auf den Märkten werden von Änderungen der Population begleitet, ohne daß von außen eingegriffen werden muß.

Erste Ergebnisse der Simulation zeigen, daß sich die Agenten im Netz verteilen, während sie kooperieren und Handelsbeziehungen betreiben. Die nächsten Arbeitsschritte werden die Veränderung der Parameterwerte beinhalten, um verschiedene Ausgangssituationen zu erzeugen. Die so ermittelten Ergebnisse werden in Zusammenhang mit einer empirischen Untersuchung von Vernetzungsphänomenen kleiner und mittlerer Unternehmen untersucht (Müller et al. 1998). Erste Ergebnisse hierzu sind im Herbst 1999 zu erwarten. In technischer Hinsicht sehen wir, ausgehend von heute üblichen Standards, das hier vorgestellte Konzept nicht nur als vielversprechende Vision, sondern durchaus als ein Beispiel für ein business-to-business-Handelssystem der näheren Zukunft.

Literaturverzeichnis

- Baumann, J (1996): The Mole Mobile Agent Library, White Paper. University of Stuttgart 1996.
- Beam, C./Segev, A. (1996): Electronic Catalogs and Negotiations. CITM Working Paper 96-WP-1016. Berkeley: 1996.
- Chavez A./Maes, P. (1996): Kasbah - An Agent Marketplace for Buying and Selling Goods. In: Proceedings of the First Conference on Practical Applications of Agent Mechanisms, London 1996.
- Clemons, E.K./Reddi, S.P. (1993): Some Propositions Regarding the Role of Information Technology in the Organization of Economic Activity. In: Proceedings of the 26th HICCS, Vol. IV: Collaboration Technology and Organizational Systems & Technology. pp. 809-818. Eds.: J.F. Nunamaker, R. Sprague. IEEE Computer Society Press, Los Alamitos, CA 1993.
- Durfee, E.H./Rosenschein, J.S. (1994): Distributed Problem Solving and Multi-Agent Systems: Comparisons and Examples. In: Proceedings of the Thirteenth International Distributed Artificial Intelligence Workshop, pp. 94-104, July 1994.
- Epstein, J.M./Axtell, R. (1996): Growing Artificial Societies: Social Science from the Bottom Up. MIT Press/Brookings. Cambridge, MA 1996.
- Eriksson, J./Finne, N./Janson, S. (1997): MarketSpace '96 - An Open Agent-Based Market Infrastructure. UPMail Technical Report No. 147. Ed.: S. Janson Uppsala, April 7, 1997.

- FIPA (1997): Foundation for Intelligent Physical Agents, Agent Communication Technical Committee: Agent Communication Language, FIPA '97 Draft Specification: Part 2, <http://www.fipa.org>.
- Goldberg, D. (1989): Genetic Algorithms in Search, Optimization and Machine Learning. Reading, MA, 1989.
- Gomber, P./Schmidt, C./Weinhardt, C. (1998): Auctions in Electronic Commerce - Efficiency versus Computational Tractability. In: Proceedings of ICEC '98, . Seoul, Korea 1998.
- Gurbaxani, V./Whang, S. (1991): The Impact of Information Systems on Organizations and Markets. Communications of the ACM, Vol. 34, No. 1, 1991, pp. 59-73.
- Holland, J.H./Miller, J. (1991): Artificial Adaptive Agents in Economic Theory. In: American Economic Review, Papers and Proceedings, Vol. 81, No. 2, 1991, pp. 365-370.
- Huberman, B. A./Lukose, R. M. (1997): Social Dilemmas and Internet Congestion. In: Science Magazine, Vol. 277, 1997.
- Jennings, N.R./Faratin P./Johnson, M.J./O'Brien, P./Wiegand, M.E. (1996): Using Intelligent Agents to Manage Business Processes, 1996.
- Kauffman, S. (1995): At Home in the Universe. New York 1995.
- Kephart, J.O. (1998): Dynamics of an Information-Filtering Economy. In: Cooperative Information Agents II. Eds.: M. Klusch/G. Weiß. LNAI Series No.1435. Ed.: M. Weiß. Heidelberg 1998.
- Klein, S. (1996): Interorganisationssysteme und Unternehmensnetzwerke - Wechselwirkungen zwischen organisatorischer und informationstechnischer Entwicklung. Wiesbaden 1996.
- Lane, D. A. (1993): Artificial worlds and economics (Part II), in: Journal of Evolutionary Economics, p.177-197. Springer 1993.
- Malone, T.W./Yates, J./Benjamin, R.I. (1987). Electronic Markets and Electronic Hierarchies: Effects of New Information Technologies on Market Structures and Corporate Strategies. In: Communications of the ACM, 30 (1987), p. 484-497.
- Müller, G./Eggs, H./Englert, J. (1998): Potentiale und Risiken von Vernetzungsstrategien, in Vorbereitung. Freiburg 1998.
- Nwana, H.S. (1996): Software Agents: An Overview, in: Knowledge Engineering Review, 11(3), p. 24-29, 1996.
- Objectspace (1997): ObjectSpace Voyager Technical Overview, White Paper. Ed.: ObjectSpace. [http:// www. objectspace. com/ voyager/ VoyagerTechOverview.pdf](http://www.objectspace.com/voyager/VoyagerTechOverview.pdf), 1997.
- Preist, C. (1998): Economic Agents for Automated Trading, HP Technical Report HPL-98-77. Hewlett-Packard Laboratories. Bristol 1998.

- Porter, M. E./Millar, V. E. (1985): How information gives you competitive advantage. In: Harvard Business Review, July-August , pp.149-160. Cambridge 1985.
- Ray, T. S. (1992): An Approach to the Synthesis of Life. In: Langton, C.G.; Taylor, C.; Farmer, J.D.; Rasmussen, S.: Artificial Life II, S.371-408. Ed.: S. Rasmussen. Redwood City 1992.
- Sandholm, T. W. (1996): Negotiation among self-interested computationally limited agents, Dissertation. Amherst 1996.
- Schoder, D./Hummel, T./Müller, G. (1997): Interdisziplinäre Modelle für Entwurf und Einsatz telematischer Systeme. In: Informatik'97. Ed.: M. Jarke. Heidelberg 1997.
- Smith, R.G. (1980): The Contract Net Protocol: High-Level Communication and Control in a Distributed Problem Solver. In: IEEE Transactions on Computers, Vol. 29, 1980, p. 1104-1113.
- Stender, J. (1994): Many-Agent Simulation and Genetic Algorithms – Adaptation Mechanisms in Economic Models. In: Many-Agent Simulation and Artificial Life. Eds.: E. Hillebrand, J. Stender. Amsterdam 1994.
- Tesfatsion, L. (1997): How Economists can get alive. In: The Economy as a Complex Evolving System, II. Eds.: W.B. Arthur, S. Durlauf, D. Lane. Santa Fe Institute Studies in the Sciences of Complexity, Proceedings Vol. XXVII. Santa-Fee 1997.
- Varian, H.R. (1993): Intermediate Microeconomics – A Modern Approach, 3rd Edition. New York 1993.
- Wellman, M. P. (1996): Market-Oriented Programming: Some Early Lessons. In: Market-Based Control: A Paradigm for Distributed Resource Allocation. Ed.: Clearwater. World Scientific 1996.