

Modellierung und Petrinetze

Reflexive Selbstorganisation in Multiagentensystemen

Michael Köhler

Department für Informatik
Universität Hamburg

14. November 2007

Sicht der *verteilten künstlichen Intelligenz* (VKI)
(engl. distributed artificial intelligence, DAI) auf MAS:

Nach [Wei99]

“DAI is the study, construction, and application of multiagent systems, that is, systems in which several interacting, intelligent agents pursue some set of goals or perform some tasks.”

zentrale Aspekte von Agentensystemen:

- 1 Erstens handelt es sich bei den Systemkomponenten um Agenten, d.h. um lose gekoppelte Einheiten, die im Rahmen ihrer Möglichkeiten autonom handeln.

Multiagentensysteme (MAS) II

- 2 Zweitens sind die Systemeinheiten intelligent, worunter man grob verstehen kann, dass Agenten in der Lage sind, auch in verschiedenen Umgebungen flexibel zu agieren, dass sie in der Lage sind, rational zu planen, und dass sie die Fähigkeit besitzen zu lernen.
- 3 Drittens spielt die Interaktion der Agenten eine zentrale Rolle, da nicht nur die Einheiten verteilt sind, sondern auch Fähigkeiten, Daten und Ressourcen.

Konzeptionelle Abgrenzung der VKI zur KI

- KI stellt mit dem *intelligenten Problemlösen* eines einzelnen situierten Systems die kognitive Aspekte in den Vordergrund.
- Für die VKI besteht der Kontext eines Agenten nun wiederum aus Agenten. Damit steht hier der Interaktionszusammenhang zwischen den Agenten im Vordergrund.
- Intelligenz des Ganzen ergibt sich aus dem Zusammenspiel der Teile.
- Neuausrichtung in Hinblick auf die Nachbardisziplinen: Während die KI der Psychologie und der Neurologie nahesteht, orientiert sich die VKI in Richtung der Sozial- und Wirtschaftswissenschaften.

Interaktionszusammenhänge sind sie zweiseitig ausgerichtet:

- Ausrichtung auf die Mikro-Ebene: Agenten, der in die Interaktionszusammenhänge eingebettet ist und dessen Handeln somit kontexttualisiert wird.
- Makro-Zusammenhänge auf Ebene des Gesamtsystems: Es sind nicht die Handlungen des einzelnen relevant, sondern vielmehr der Prozess mit seinen Mustern insgesamt.
- Diese Mikro-Makro-Dualität wird uns in den weiteren Ausführungen begleiten.

Die Möglichkeit – und meist auch der Zwang – zur Interaktivität der Agenten bildet das Leitmotiv für die VKI-Forschung:

„Wer kommuniziert wann mit wem worüber?“

Koordination als verteilter Algorithmus I

- Koordination wird durch Protokolle (verteilte Algorithmen) geregelt.
- Typischerweise ist aus der Protokollsicht jeder Agent des Systems ein potentieller Interaktionspartner.
- Offensichtlich steigt mit der Anzahl der Agenten die Komplexität, geeignete Interaktionspartner zu finden, die Ziele mit ihnen abzustimmen und die Pläne konfliktfrei zu gestalten.
- Ziel muss aber $O(n)$ sein, da man dann die Reaktionszeiten auch bei steigenden Agentenzahlen konstant halten kann, indem man die Zahl der Rechner im MAS-Netzwerk entsprechend aufstockt.
- Typische verteilte Algorithmen weisen Kommunikationskomplexitäten von $O(n \log n)$ oder $O(n^2)$ auf.
- Dieser Zuwachs an Koordinierungsaufwand ist als *Skalierungsproblematik* der VKI bekannt.

Koordination als verteilter Algorithmus II

- Ihr kann nur begegnet werden, indem man Strukturen schafft, die den Koordinationsprozess regeln.

Die Skalierungsproblematik I

- Die Skalierungsproblematik wirft somit Fragen auf, die über die Ebene einzelner Agenten hinausgeht und sich nur auf der Systemebene behandeln lässt.
- Es ist daher wichtig, sich mit der Formation von Teams und der Organisationsstruktur von Multiagentensystemen zu beschäftigen.
- Einige Autoren postulieren, dass die Skalierungsproblematik nur dann zu lösen ist, wenn die Organisationsstruktur explizit repräsentierter Bestandteil des Systems ist und das Systems aktiv auf diese Einfluss nehmen kann.

- “Thus, the current state of the art is challenged by MASs that are larger or where the magnitude or speed of agent population variability confounds one overall design. To tackle both these problems we hypothesize that MASs should be *self-building* (able to determine the most appropriate organizational structure for the system by themselves at run-time) and *adaptive* (able to change this structure as their environment changes).” [TJ01]
- *Reflexivität* des MAS: Die Organisation wird zur Variablen erklärt, die durch das Handeln der Akteure geformt wird.
- Stichwort: *lernende Organisation*

Definition

Agenteneigenschaften:

- 1 Agenten sind in einer Umgebung situierte Einheiten.
- 2 Jeder Agent ist autonom, d.h. im Rahmen der operationalen Randbedingungen (interne wie externe) ist er in seiner Handlungswahl frei. Restriktionen sind nur von ihm selbst auferlegt.
- 3 Jeder Agent ist in dem Sinne intelligent, als dass er zielverfolgend ist und dass hiermit eine gewisse Flexibilität bezüglich der Zielrealisierung verbunden ist, so dass ein Agent auch auf sich verändernde Randbedingungen reagieren kann.
- 4 Agent der VKI: Die Umgebung besteht aus anderen Agenten.
- 5 Aus der Tatsache, dass ein Agent in der Lage ist, auf die Umwelt einzuwirken, folgt die *Interaktivität*.

Agent vs. Objekt

- Diese Eigenschaften grenzen Agenten von Objekten ab:
 - 1 Objekte sind weder autonom
 - 2 noch lernend
 - 3 oder zielverfolgend.
- Die engste Verbindung finden Agenten noch zu den aktiven Objekten [Nie93], bei denen jedem Objekt ein eigener Kontrollfluss (engl. thread) zugeordnet wird.
- Agenten sind ebenso spezifischer als Expertensysteme.

Aufbau eines Agenten

- Da Zielverfolgung und Planung ein zentraler Gegenstand der KI ist, entstammen viele Strukturierungsansätze aus dem Bereich der formalen Logik.
- Hier werden Modallogiken zur Wissensrepräsentation [LL00] oder
- zur Spezifikation der temporalen Aktivitäten [WJ95, Woo00] verwendet.
- praktische Systeme: METAMEM [BFG⁺90], Congolog [GLL00]
- Ein weit verbreiteter Ansatz ist das Design von Agenten nach dem BDI-Paradigma [Bra87, RG91]:
 - Wissen (engl. beliefs),
 - Wünsche (engl. desires) sowie
 - Absichten (engl. Intentions) eines Agenten

- Modalitäten sind Operatoren der Logik, die sich auf den Wahrheitswert von Formeln beziehen.
- Dies ist in der Prädikatenlogik nicht möglich, da man in ihr keine Prädikate über Formeln ausdrücken kann.
- Der folgende Ausdruck ist demnach ungeeignet, um auszudrücken, dass Alice glaubt, dass Tweety ein Vogel sei:

$\text{believes}(\textit{alice}, \textit{is-a-bird}(\textit{tweety}))$

- Das Problem besteht darin, dass die Argumente des Prädikats *believes* Terme sein müssen, *is-a-bird(tweety)* jedoch eine Formel ist.
- Die klassischen Modalitäten sind die der Notwendigkeit und die der Möglichkeit [HC84].

Logik-Architekturen II

- Eine Formel ϕ ist *notwendigerweise* wahr, wenn man sich keine Welt vorstellen kann, in der ϕ nicht wahr wäre: $\Box\phi$
- ϕ ist *möglicherweise* wahr, wenn Welten vorstellbar sind, in denen ϕ wahr ist, aber auch welche, in denen das nicht gilt: $\Diamond\phi$
- Erweitert man die Aussagenlogik um diese beiden Modalitäten, so erhält man die propositionale Modallogik.
- Um die Semantik der Modalitäten exakt festzuhalten, fordert man axiomatisch die Gültigkeit gewisser Formeln:

| Name | Axiom | Bedingung |
|------|--|-----------|
| K | $\Box(\phi \implies \psi) \implies (\Box\phi \implies \Box\psi)$ | |
| N | $\phi \implies \Box\phi$ | |
| T | $\Box\phi \implies \phi$ | reflexiv |
| D | $\Box\phi \implies \Diamond\phi$ | seriell |
| 4 | $\Box\phi \implies \Box\Box\phi$ | transitiv |
| 5 | $\Diamond\phi \implies \Box\Diamond\phi$ | Euklid |

Modalität des Wissens I

- Notwendigkeit ist nicht die einzige Interpretation von \Box .
- Interpretiert man die Modalität $\Box\phi$ als „ ϕ wird gewusst“, so kann man hiermit eine Logik des Glaubens/Wissens formalisieren.
- Dies hat zur Konsequenz, dass aus dem Notwendigkeitsaxioms $\phi \implies \Box\phi$ folgt, dass *alle* Tautologien gewusst werden.
- Außerdem ist Wissen unter Implikation abgeschlossen, d.h. alle gültige Folgerungen $\phi_1 \wedge \dots \wedge \phi_n \implies \phi$ werden gewusst.
- Gilt das D-Axiom ($\Box\phi \implies \Diamond\phi$ und $\Diamond\phi \equiv \neg\Box\neg\phi$), so ist Wissen widerspruchsfrei.
- Gilt das T-Axiom ($\Box\phi \implies \phi$), so können nur Wahrheiten gewusst werden.
- Gilt das 4-Axiom ($\Box\phi \implies \Box\Box\phi$), so besteht Wissen über das Gewusste.
- Gilt das 5-Axiom ($\neg\Box\neg\phi \implies \Box(\neg\Box\neg\phi)$), so besteht Wissen über das Ungewusste.

In der *BDI-Logik* werden die Überzeugungen (*beliefs*), die Bedürfnisse (engl. *desires*) und die Absichten eines Agenten (engl. *intentions*) eines Agenten durch Modalitäten modelliert [PJN02].

- Die Tatsache, dass der Agent a zum Zeitpunkt t der Überzeugung ist, dass ϕ gilt, wird als $\mathbf{Bel}(a, \phi)(t)$ dargestellt. Es gelten die Axiome KD45:

$$\begin{aligned}\mathbf{Bel}(a, \phi)(t) \wedge \mathbf{Bel}(a, (\phi \implies \psi))(t) &\implies \mathbf{Bel}(a, \psi)(t) \\ \mathbf{Bel}(a, \phi)(t) &\implies \neg \mathbf{Bel}(a, \neg \phi)(t) \\ \mathbf{Bel}(a, \phi)(t) &\implies \mathbf{Bel}(a, \mathbf{Bel}(a, \phi))(t) \\ \neg \mathbf{Bel}(a, \phi)(t) &\implies \mathbf{Bel}(a, \neg \mathbf{Bel}(a, \phi))(t)\end{aligned}$$

- Die Bedürfnisse und Ziele eines Agenten drücken die Zustände der Welt aus, die er gern erreichen möchte.

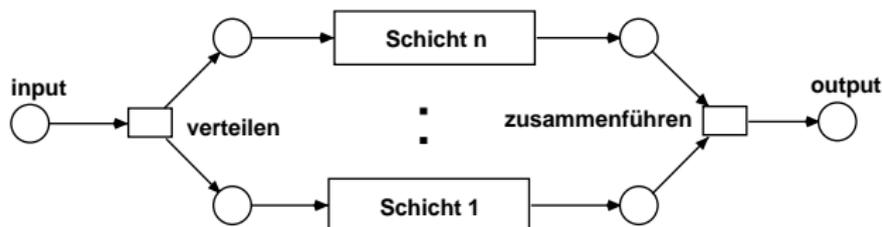
- Die Tatsache, dass der Agent a hat zum Zeitpunkt t das Bedürfnis hat, ϕ zu erreichen, wird als **Des**(a, ϕ)(t) dargestellt,
- Ziele als **Goal**(a, ϕ)(t).
- Der Unterschied zwischen Zielen und Bedürfnisse liegen darin, dass Bedürfnisse inkonsistent und sogar unerfüllbar sein können,
- während Ziele als Menge *konsistenter und realisierbarer* Zustände definiert sind, von denen man annehmen kann, dass der Agent sie erreichen kann.
- Agenten haben keine den Überzeugungen widersprechenden Ziele.
- Die Absichten eines Agenten sind immer auf einen bestimmten erstrebenswerten Zustand der Welt ausgerichtet.

- Besitzt ein Agent die individuelle Absicht, einen Zustand zu erreichen, so ist er sich selbst gegenüber verpflichtet (*self-commitment*), entsprechend zu handeln.
- Die Absicht des Agenten a , zum Zeitpunkt t einen Zustand, in dem ϕ gilt, anzustreben, wird $\mathbf{Int}(a, \phi)(t)$ notiert.
- Ein Agent besitzen keine Absichten, die seinen Überzeugungen widersprechen:

$$\mathbf{Int}(a, \phi)(t) \implies \neg \mathbf{Bel}(a, \neg \phi)(t)$$

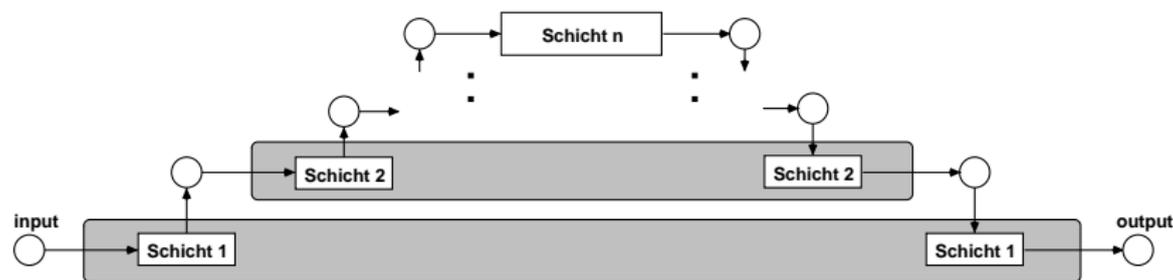
- Abkehr von planenden Ansätzen
- Agenten bauen kein Weltmodell auf, speichern keine – oder nur geringe – Zustandsinformation und treffen ihre Wahl anhand einer Liste einfacher Wenn-Dann Regeln.
- Vorteile: geringe Darstellungsgröße und kurze Reaktionszeiten.
- Anwendungsbereich: Robotik [Bro90].
- Schlagwort: Schwarmintelligenz [KE01]
- Tierpopulationen (wie Ameisenkolonien, Fisch- oder Vogelschwärme) in der Lage sind, global kohärentes (um nicht zu sagen: intelligentes) Verhalten aufweisen
- Das einzelne Individuum ist dazu kognitiv aber gar nicht in der Lage.
- So kann eine einzelne Ameise keine Wegewahloptimierung bei der Futtersuche betreiben, die Kolonie als ganzes schon.

Horizontale Agentenarchitektur



- Weitere typische Ansätze stellen die Schichtenarchitekturen dar. Hierbei unterscheidet man zwischen sogenannten horizontalen und vertikalen Schichtungen.
- Bei der horizontalen Schichtung erhalten alle Planungsschichten die gleiche Eingabe.
- Ihre Ergebnisse werden dann zu einer Gesamtentscheidung zusammengesetzt.
- Beispiel für eine horizontale Schichtung: Touring-Machines [Fer92].

Vertikale Agentenarchitektur



- Vertikale Architekturen bearbeiten die Eingabe und geben ihre Ergebnisse an die nächste Ebene weiter.
- Man unterscheidet Systeme, bei denen die Bearbeitung in der letzten Schicht zu Ende ist (one-pass),
- von solchen, bei denen die letzte Schicht ihre Ergebnisse wieder zurück reicht, so dass sie die gesamte Schichtung in rückwärtiger Richtung durchläuft (two-pass).
- Beispiel für eine vertikale Schichtung: INTERARP [MP94]

Agentenorientierte Sprachen

Daneben existieren als Erweiterung der objektorientierten Programmiersprachen auch agentenorientierte Sprachen wie:

- Agent-0 [Sho90]
- Agentspeak [Rao96]
- JASON[BHW07]
- JADE [BPR01]
-

- Agenten existieren nicht isoliert, sondern stets im Kontext anderer Agenten.
- Die *Interaktion* ist eine natürliche Betrachtungsebene des sozialen Agenten.
- Durch den Aspekt der *Sozialität* von Agenten geht das Agentenkonzept der VKI über das der KI hinaus.
- Dies legt nahe, das Charakteristische von Agenten (wie *Autonomie*, *Flexibilität*, *Intelligenz* usw.) nicht primär als eine interne Eigenschaften zu deuten, sondern es vielmehr als ein relationales Konstrukt zu betrachten, das sich z.B. in den Interaktionsbeziehungen als Abhängigkeitsverhältnis äußert.
- Abhängigkeitsverhältnisse ergeben sich hierbei beispielsweise aus der funktionalen Spezialisierung der Agenten oder dem Besitz relevanter Ressourcen.

- Die Interaktion von Agenten wird in Form von Nachrichtenkommunikation modelliert.
- Es ist es notwendig, dass sich beide Parteien über die Bedeutung der Nachricht einigen.
 - 1 Gemeinsame Darstellungssprache
 - 2 Eine Taxonomie (auch: Ontologie), die das Diskursuniversum beschreibt.
 - 3 Eine Beschreibung der Intention, die mit der Nachricht verbunden ist.
- Eine Spezifikationssprache für diese drei Elemente wird als *Agentenkommunikationssprache* bezeichnet.
- Ontologien oder Konzeptbeschreibungssprachen finden sich im Kontext des *semantic web* [SHSV03].
- Beispiele: DAML [OO02] oder OWL [SWM04].

- Als formales Konzept der Kommunikation greift die VKI auf die Theorie der Sprechakte (engl. speech act theory) nach [Sea70] zurück:
- Kommunikationen sind Handlungen, die den Empfänger zu einer bestimmten Reaktion veranlassen sollen.
- Sprechakte sind informierend, anfragend, fordernd usw.
- Beispiele für Agentenkommunikationssprache sind die Spezifikationssprachen KQML (*knowledge query and manipulation language*) [KSIEIWG93] und FIPA-ACL (*FIPA agent communication language*) [FIP98].

Grobe Unterteilung: Medium vs. Protokoll

- Objektive Koordination bedient sich eines Mediums, um die Agenten zu koordinieren.
- Als klassischen Ansatz sind hier die *blackboard*-Systeme zu nennen, bei denen Agenten Nachrichten wie an einem Schwarzen Brett hinterlassen.
- Ein Agent, der eine Teilaufgabe delegieren möchte, schreibt die Aufgabenbeschreibung an das Schwarze Brett. Alle anderen Agenten können dann diese Nachricht sehen und bei Interesse die erarbeitete Lösung wieder an Brett hängen.
- Eine direkte Kommunikation ist daher nicht notwendig.
- Beispiel: *tuple spaces* in LINDA [CG89].
- Subjektive Koordination: Ablaufprotokolle regeln die direkte Kommunikation der Agenten.
- Beispiele: das *Contract-Net* Protokoll [Smi77] und das *Partial Global Planning* Protokoll [DL91] (s.u.).

- Kommunikationsbeziehung durch Delegationsbeziehungen oder funktionale sowie temporale Abhängigkeiten.
- Im allgemeinen sind dabei alle Agenten zu berücksichtigen.
- In natürlichen Sozialsystemen treffen die Akteure jedoch nicht beliebig aufeinander, und sie müssen auch nicht alle ihre Pläne mit allen anderen bis ins kleinste abstimmen.
- Dies liegt daran, dass soziale Systeme bereits vorstrukturiert sind.
- Es existieren Strukturen, die regeln, welche Interaktionsgruppen sich bilden können.
- Daneben existieren Normen in Form von *Rollen*, die unabhängig von ihrem Träger Rechte und Verpflichtungen beschreiben.
- Damit reduziert sich der Abstimmungsaufwand der Einzelpläne enorm.

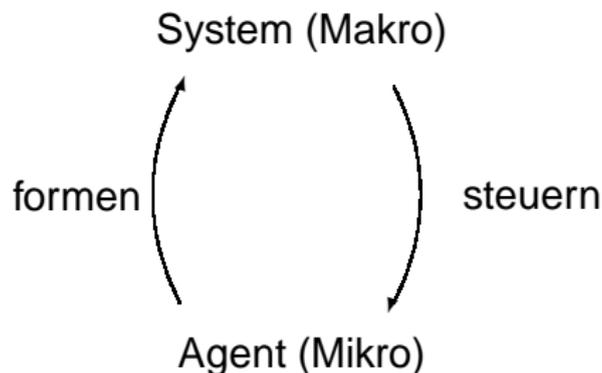
Organisation vs. Autonomie

- Die Einschränkungen, die soziale Strukturen für die Agenten darstellen, stehen nicht im Widerspruch zur Autonomie
- Obwohl die Agenten den Erwartungen einer Rolle genügen müssen, so sind sie doch prinzipiell in ihrer Wahl, ob sie eine Rolle einnehmen, frei.
- Natürlich sind die Agenten nur so frei, wie es die Abhängigkeiten zulassen.

- Beispiele für Sozialstrukturen sind Organisationsstrukturen.
- Sie grenzen durch Hierarchien und Kompetenzen die Menge der potentiellen Teammitglieder ein.
- Gleichzeitig legen sie deren Verhalten bereits grob fest.
- Die Abläufe, die die Zusammenarbeit von Rolleninhabern regeln, sind meist durch Geschäftsprozesse (engl. „business processes“) standardisiert.
- In der Literatur werden solche Systeme auch unter dem Begriff der elektronischen Institution oder unter dem des elektronischen Marktes behandelt.
- Diese sozialen Strukturen existieren unabhängig von den Akteuren.
- Sie bilden die Grundlage für die Koordinationsfähigkeit eines MAS.

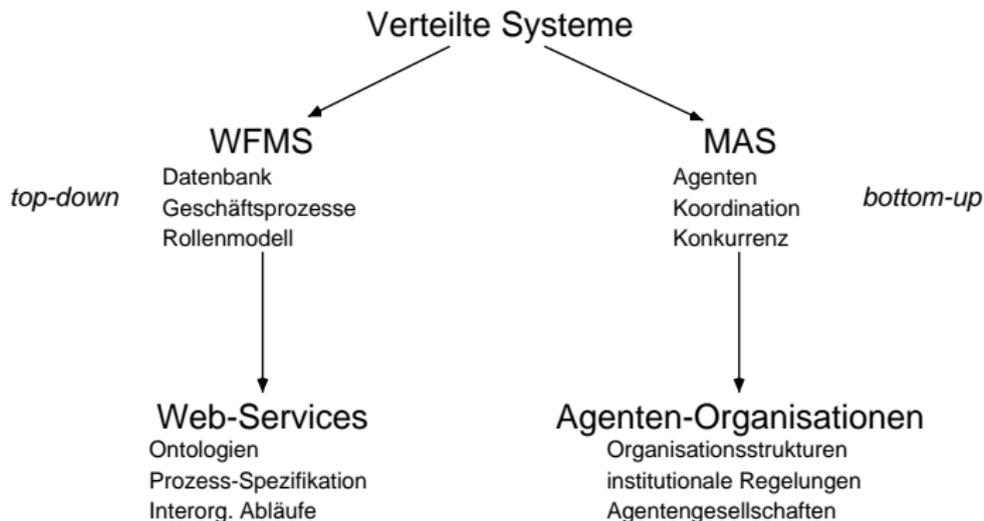
Subjektive vs. objektive Koordination

- Die subjektive Form stellt dabei die Perspektive der Agenten auf den Koordinationsprozess dar,
- *Zusicherungen* (engl. commitments): Durch Zusicherungen legen Agenten ihr zukünftiges Verhalten gegenüber anderen fest,
- Annahme: Gewisse Rahmenbedingungen bleiben in der Zwischenzeit unverändert.
- Darauf aufbauend gelangt man von individuellen BDIs zu den innerhalb der Gruppe geteilten.
- Die Gruppenmitglieder legen einander insbesondere durch die gemeinsamen Absichten (engl. joint intentions) fest.
- Die objektive Perspektive die des betrachtet die Interaktionsstruktur an sich, losgelöst von der Agentenperspektive.
- Die konkreten Realisierungsformen der Organisationsstrukturen werden im Rahmen der *Organisationstheorie* untersucht (s.u.)



- Die adäquate Modellierung der Wechselwirkung gilt als Schlüssel zur Skalierung.
- Herausforderung für das MAS-Design: dynamische Anpassbarkeit von Systemstrukturen und -verhalten voraus.
- Problem Wie kann eine zielgerichtete Steuerung solch flexibler Systeme erreicht werden?

Konvergenz von MAS und WFMS:





H. Barringer, M. Fisher, D. Gabbay, G. Gough, and R. Owens.

Metatem: a framework for programming in temporal logic.

In *REX workshop: Proceedings on Stepwise refinement of distributed systems: models, formalisms, correctness*, pages 94–129, New York, NY, USA, 1990. Springer-Verlag New York, Inc.



Rafael H. Bordini, Jomi Fred Hübner, and Michael Wooldridge.

Programming Multi-Agent Systems in AgentSpeak using Jason.

Wiley, 2007.



Fabio Bellifemine, Agostino Poggi, and Giovanni Rimassa.

Developing multi-agent systems with JADE.

In Cristiano Castelfranchi and Yves Lespérance, editors, *Seventh International Workshop on Agent Theories, Architectures, and Languages (ATAL-2000)*, volume 1986 of *Lecture Notes in Computer Science*, pages 89–103. Springer-Verlag, 2001.



M. E. Bratman.

Intentions, Plans, and Practical Reason.

Harvard University Press, Cambridge, 1987.



Rodney A. Brooks.

A robust layered control system for a mobile robot.

pages 2–27, 1990.



N. Carriero and D. Gelernter.

Linda in context.

Communications of the ACM, 32:444–458, 1989.



Edmund H. Durfee and Victor R. Lesser.

Partial global planning: A coordination framework for distributed hypothesis formation.

IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, 21(5):1167–1183, September 1991.



I. A. Ferguson.

Towards an architecture for adaptive, rational, mobile agents.

In *Decentralized Artificial Intelligence*, volume 3, pages 249–262. Elsevier Science, 1992.



FIPA.

FIPA 97 Specification, Part 2 - Agent Communication Language.

Technical report, <http://www.fipa.org>, Oktober 1998.



Les Gasser.

Social conceptions of knowledge and action: Dai foundations and open systems semantics.

Artificial Intelligence, 47:107–138, 1991.



Giuseppe De Giacomo, Yves Lespérance, and Hector J. Levesque.

Congolog, a concurrent programming language based on the situation calculus.

Artificial Intelligence, 121(1-2):109–169, 2000.



George E. Hughes and Maxwell J. Cresswell.
A companion to modal logic.
Methuen, 1984.



James Kennedy and Russell C. Eberhart.
Swarm intelligence.
Morgan Kaufmann Publishers Inc., San Francisco, CA, USA, 2001.



The DARPA Knowledge Sharing Initiative External Interfaces Working Group.
Specification of the KQML Agent-Communication Language.
Draft, DARPA, Juni 1993.



Hector Levesque and Gerhard Lakemeyer.
The logic of knowledge bases.
MIT Press, Cambridge, Massachusetts, 2000.



Jörg P. Müller and Markus Pischel.
An architecture for dynamically interacting agents.
Journal of Intelligent and Cooperative Information Systems, 3(1):25–45, 1994.



Oscar Nierstrasz.
Composing active objects.
In *Research directions in concurrent object-oriented programming*, chapter 5. MIT Press, 1993.



Uche Ogbuji and Roxane Ouellet.

Daml reference.

online: <http://www.xml.com/pub/a/2002/05/01/damlref.html>, 2002.



Pietro Panzarasa, Nicholas R. Jennings, and Timothy J. Norman.

Formalizing collaborative decision-making and practical reasoning in multi-agent systems.

Journal of Logic and Computation, 12(1):55–117, 2002.



Anand S. Rao.

AgentSpeak(L): BDI agents speak out in a logical computable language.

In Rudy van Hoe, editor, *Seventh European Workshop on Modelling Autonomous Agents in a Multi-Agent World*, 1996.



Anand S. Rao and Michael P. Georgeff.

Modeling rational agents within a BDI-architecture.

In James Allen, Richard Fikes, and Erik Sandewall, editors, *Proceedings of the 2nd International Conference on Principles of Knowledge Representation and Reasoning (KR'91)*, pages 473–484. Morgan Kaufmann, 1991.



John R. Searle.

Speech acts: An essay in the philosophy of Language.

Cambridge University Press, 1970.



Yoav Shoham.

Agent-oriented programming.

Technical report, Stanford, Calif.: Department of Computer Science, Stanford University, 1990.



Rudi Studer, Andreas Hotho, Gerd Stumme, and Raphael Volz.

Semantic web – state of the art and future directions.

Künstliche Intelligenz, 3:5–9, 2003.



Reid G. Smith.

The contract net: A formalism for the control of distributed problem solving.

In *Proceedings of the Fifth International Joint Conference on Artificial Intelligence (IJCAI-77)*, 1977.



Michael K. Smith, Chris Welty, and Deborah L. McGuinness.

Owl web ontology language guide. w3c recommendation.

<http://www.w3.org/TR/owl-guide/>, 2004.



Phillip J. Turner and Nicholas R. Jennings.

Improving the scalability of multi-agent systems.

In *Proceedings of the First International Workshop on Infrastructure for Scalable Multi-Agent Systems*, volume 1887 of *Lecture Notes in Computer Science*, page 246ff. Springer-Verlag, 2001.



Gerhard Weiß, editor.

Multiagent systems: A modern approach to Distributed Artificial Intelligence.

MIT Press, 1999.



Michael J. Wooldridge and Nicholas R. Jennings.

Agent theories, architectures, and languages: a survey.

In M. J. Wooldridge and N. R. Jennings, editors, *Intelligent Agents*, pages 1–22.

Springer-Verlag, 1995.



Michael Wooldridge.

Reasoning about Rational Agents.

Intelligent robotics and autonomous agents. MIT Press, Cambridge, Massachusetts/London, 2000.