

# **Multiagentensysteme**

**Vorlesung an der Technischen Universität Chemnitz**

**Wintersemester 2004/2005**

**Prof. Dr. Werner Dilger**

| <b>Inhalt</b>                                                | <b>Seite</b> |
|--------------------------------------------------------------|--------------|
| 1. Einführung.....                                           | 4            |
| 1.1. Kollektive Intelligenz .....                            | 4            |
| 1.2. Agent und Gesellschaft.....                             | 7            |
| 1.3. Anwendungsgebiete.....                                  | 12           |
| 1.4. Grundlegende Aspekte der Konstruktion von MAS .....     | 18           |
| 2. Interaktionen und Kooperation .....                       | 19           |
| 2.1. Interaktionssituationen.....                            | 19           |
| 2.2. Komponenten von Interaktionen.....                      | 19           |
| 2.3. Interaktionstypen .....                                 | 20           |
| 2.4. Formen der Kooperation .....                            | 22           |
| 2.5. Methoden der Kooperation .....                          | 26           |
| 2.6. Organisationen und Kooperation .....                    | 27           |
| 3. Multiagenten-Organisationen .....                         | 29           |
| 3.1. Was ist eine Organisation? .....                        | 29           |
| 3.2. Funktionale Analyse .....                               | 30           |
| 3.3. Strukturelle Analyse.....                               | 35           |
| 3.4. Konkretisierungsparameter .....                         | 38           |
| 3.5. Analyse einer konkreten Organisation .....              | 39           |
| 3.6. Individuelle Organisationen.....                        | 43           |
| 4. Aktion und Verhalten .....                                | 47           |
| 4.1. Modellierung.....                                       | 47           |
| 4.2. Aktion als Transformation eines globalen Zustands ..... | 49           |
| 4.3. Aktion als Antwort auf Einflüsse.....                   | 50           |
| 4.4. Aktion als Prozesse in der Informatik.....              | 52           |
| 4.5. Aktion als Ortsveränderung .....                        | 56           |
| 4.6. Aktion als lokale Modifikation .....                    | 57           |
| 4.7. Aktion als Befehl .....                                 | 58           |
| 4.8. Tropistische und hysteretische Agenten .....            | 59           |
| 4.9. Tropistische Agenten .....                              | 60           |
| 4.10. Hysteretische Agenten .....                            | 63           |
| 4.11. Modellierung von MAS in BRIC.....                      | 65           |
| 5. Mentale Zustände.....                                     | 73           |
| 5.1. Mentale Zustände und Intentionalität .....              | 73           |
| 5.2. Das Interaktionssystem .....                            | 74           |
| 5.3. Das Repräsentationssystem.....                          | 75           |
| 5.4. Inhalte von Repräsentationen.....                       | 84           |
| 5.5. Das conative System.....                                | 86           |
| 5.6. Motivationen: Quellen der Aktion .....                  | 87           |
| 5.7. Reaktive Ausführung von Aktionen .....                  | 92           |
| 5.8. Intentionale Ausführung von Aktionen.....               | 98           |
| 6. Kommunikation .....                                       | 104          |
| 6.1. Aspekte der Kommunikation .....                         | 104          |
| 6.2. Sprechakte.....                                         | 109          |

**Literatur**

Y. Demazeau, J.-P. Müller (eds.): Decentralized AI. Elsevier Publ., Amsterdam, 1990.

J. Ferber: Multi-Agent Systems. An Introduction to Distributed Artificial Intelligence. Addison-Wesley, Harlow, 1999.

M.N. Huhns (ed.): Distributed Artificial Intelligence. Morgan Kaufmann and Pitman Publ., London, 1987

M.N. Huhns, M.P. Singh (eds.): Readings in Agents. Morgan Kaufmann Publ., San Francisco, CA, 1998.

J. Müller (Hrsg.): Verteilte Künstliche Intelligenz. Methoden und Anwendungen. BI Wissenschaftsverlag, Mannheim, 1993.

# 1. Einführung

## 1.1. Kollektive Intelligenz

### 1.1.1. Die denkende Maschine

Ein Ziel der traditionellen KI-Forschung ist, eine Maschine zu bauen, die ein ähnlich intelligentes Verhalten zeigt wie ein Mensch, die z.B. logische Schlüsse ziehen kann oder die Handlungen auf Grund einer Zielvorgabe planen und dann ausführen kann. Das wirft Fragen auf wie: „Kann eine Maschine denken?“, „Kann eine Maschine intelligent sein?“, „Sollte eine solche Maschine einen rechtlichen Status wie ein Mensch haben?“ Um die Frage nach der Intelligenz zu beantworten schlug Turing den *Turing-Test* vor.

Die Sichtweise von Computerprogrammen als denkenden Wesen ist typisch für die sog. *Experten-systeme*. In ihnen ist das Fach- und Erfahrungswissen von Experten auf irgendeinem Gebiet angesammelt, außerdem ihr Know How zur Verwendung dieses Wissens (Schlussfolgern). Experten-systeme haben sich auf ihrem jeweiligen Gebiet als ähnlich leistungsfähig erwiesen wie durchschnittliche Experten.

Diese Sichtweise der traditionellen KI wird heute aus verschiedenen **Gründen** in Frage gestellt:

**Das soziologische Argument:** Intelligenz charakterisiert ein Individuum nicht losgelöst von dem sozialen Kontext, in dem sie zum Ausdruck kommt. Intelligenz basiert zwar auf der Gehirnstruktur menschlicher Individuen, aber sie ist in noch stärkerem Maß durch unsere Interaktion mit der Umwelt, insbesondere mit der menschlichen Gesellschaft bestimmt.

**Das Komplexitätsargument:** Computerprogramme werden immer komplexer. Um sie zu beherrschen, muss man sie in schwach gekoppelte kleinere Module zerlegen, die unabhängig voneinander operieren und in wohldefinierter eingeschränkter Form miteinander interagieren. An die Stelle einer zentralisierten Architektur tritt eine Menge lokal definierter und operierender interagierender Einheiten. Statt eines Programms hat man nun eine Organisation unabhängiger Einheiten.

**Das Argument des verteilten Wissens:** In komplexen technischen Domänen ist das Wissen generell auf verschiedene Experten verteilt. Diese kommunizieren in Gruppen, tauschen ihr Wissen aus und arbeiten bei der Ausführung von Aufgaben zusammen. Jedoch ist es schwierig oder unmöglich, dieses Wissen in eine einzige Wissensbasis zu integrieren, weil es mit verschiedenen Sichtweisen verbunden und manchmal sogar widersprüchlich ist. Die Experten lösen die gestellten Aufgaben durch Diskussion und durch Techniken der Konfliktbeseitigung.

**Das Argument der verteilten Probleme:** Viele Probleme sind von Natur aus verteilt, d.h. es gibt bei ihnen unabhängig voneinander operierende aber interagierende Einheiten. Beispiele sind explorative Robotersysteme oder Flugverkehrssteuerung. Solche Systeme lassen sich am besten in verteilter Weise modellieren.

### 1.1.2. Künstliche Organisationen

Im Unterschied zur traditionellen KI werden hier intelligente Leistungen als etwas betrachtet, was durch Interaktion zwischen relativ unabhängigen und autonomen Einheiten, genannt *Agenten*, zustande kommt. Sie kooperieren in Gemeinschaften durch Koordination oder Wettbewerb. Durch die Kooperation entstehen organisierte Strukturen, die ihrerseits das Verhalten der Agenten beeinflussen. Es wird ein wissenschaftliches Programm entworfen, das daraus besteht, Organisationen

künstlicher Agenten zu planen, zu entwerfen und zu erstellen. Die Agenten können handeln, bei gemeinsamen Aufgaben zusammenarbeiten, kommunizieren, sich anpassen, sich reproduzieren, die Umgebung wahrnehmen und ihre Aktionen planen. Sie sind damit in der Lage Ziele zu erreichen, die ihnen entweder von außen gestellt wurden oder die sie sich selbst gestellt haben, im zweiten Fall dienen sie zur Sicherung des Überlebens.

Das Programm der Kenetik ist sowohl eine Wissenschaft als auch eine Technik. Letztere zielt auf die Konstruktion von Multiagentensystemen (MAS) ab. Im Einzelnen hat die Kenetik folgende Ziele:

1. Definition einer wissenschaftlichen Disziplin, die die Interaktion zwischen Agenten als Grundlage für das Verständnis der Funktion und Evolution von Systemen betrachtet.
2. Definition verschiedener Formen der Interaktion wie Kooperation, Wettbewerb, Kollaboration, Obstruktion und Erklärung von Selbstorganisation, Performanz und Überleben von Systemen auf der Grundlage dieser Interaktionen.
3. Darstellung der wichtigsten Mechanismen, die zu Selbstorganisation führen, wie Gruppenbildung, Spezialisierung, Verteilung von Aufgaben und Ressourcen, Koordination von Aktionen, Konfliktlösung usw.
4. Definition operationaler Modelle dieser Interaktionen durch Beschreibung der Funktionsweise von Agenten und MAS.

Für die Beschäftigung mit der verteilten Intelligenz, also mit dem Programm der Kenetik, lässt sich eine Reihe von Gründen angeben:

- (a) **Probleme sind physisch verteilt.** Viele in der Praxis vorkommende Systeme sind physisch verteilt. Beispiele sind Transportnetze, große Produktionsanlagen und Verkehr. In allen Fällen ist es adäquat die daran beteiligten Einheiten als autonome Einheiten zu modellieren, die miteinander interagieren.
- (b) **Probleme sind weit verteilt und funktional heterogen.** Der Entwurf und die Produktion komplexer technischer Systeme erfordert die Zusammenarbeit einer großen Zahl von Spezialisten. Jeder von ihnen hat eine besondere Sicht des Systems und keiner kann das ganze System allein herstellen.
- (c) **Netze erzwingen eine verteilte Sichtweise.** Netze wie das Internet sind heute über die ganze Erde verteilt. In der Zukunft werden sie sogar interplanetar sein. Wegen ihrer enormen Größe und des Grades an Verteiltheit (mehrere hunderttausend Knoten im Internet), ist eine globale Sichtweise nicht möglich. Solche Netze müssen als offene Systeme betrachtet werden und die Knoten müssen vollständig interoperabel sein. Entsprechendes gilt für das Mobile Computing. Tokoro hat dafür den Begriff des *computing field* vorgeschlagen.
- (d) **Die Komplexität der Probleme erzwingt eine lokale Sichtweise.** Probleme, die als ganze schwer zu analysieren sind, lassen sich oft mit lokalen Betrachtungsansätzen leichter lösen. Allerdings lässt sich die Korrektheit solcher Lösungen theoretisch schwerer nachweisen. Es lässt sich aber empirisch nachweisen, dass die Lösungen korrekt sind und sie erscheinen als „natürlicher“.
- (e) **Systeme müssen in der Lage sein, sich an Veränderungen in der Struktur oder der Umgebung anzupassen.** Der Einsatzbereich von Computersystemen ist selten statisch, vielmehr mehr oder weniger stark veränderlich durch neue Umgebungsbedingungen, neue Anforderungen und Umstrukturierungen im System selbst. Mit globalen Lösungen lassen sich diese Gesichtspunkte

nicht genügend berücksichtigen, sie sind aber für die Lebensdauer solcher Systeme von entscheidender Bedeutung.

- (f) **Beim Software-Engineering gibt es eine Tendenz zum Gebrauch von Konzepten autonomer interagierender Einheiten.** Diese Tendenz ist in der Geschichte des Software-Engineering zu sehen und wird besonders mit den objektorientierten Programmiersprachen und dem damit verbundenen objektorientierten Entwurf manifest. Hier werden autonome Module erstellt, die miteinander interagieren, Die Entwicklung erfolgt oft verteilt über verschiedene Entwicklungsteams, manchmal sogar über mehrere Orte verteilt.

## 1.2. Agent und Gesellschaft

### 1.2.1. Definitionen

| Definition <i>Agent</i>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                            |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <p>Ein Agent ist eine physikalische oder virtuelle Einheit,</p> <ul style="list-style-type: none"><li>(a) die in einer Umgebung handeln kann,</li><li>(b) die mit anderen Agenten direkt kommunizieren kann,</li><li>(c) die durch eine Menge von Tendenzen getrieben ist (individuelle Ziele oder eine Befriedigungs/Überlebens-Funktion, die sie zu optimieren versucht),</li><li>(d) die eigene Ressourcen besitzt,</li><li>(e) die in beschränktem Umfang ihre Umgebung wahrnehmen kann,</li><li>(f) die nur eine partielle Repräsentation der Umgebung oder gar keine hat,</li><li>(g) die Fähigkeiten besitzt und Dienste anbieten kann,</li><li>(h) die sich eventuell selbst reproduzieren kann,</li><li>(i) deren Verhalten auf die Erfüllung ihrer Ziele abzielt, unter Berücksichtigung der ihr zur Verfügung stehenden Ressourcen und Fähigkeiten und in Abhängigkeit von ihrer Wahrnehmung, ihren Repräsentationen und ihrer Kommunikation.</li></ul> |

| Definition <i>Multiagentensystem</i>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                           |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <p>Ein Multiagentensystem (MAS) ist ein System, das folgende Elemente enthält:</p> <ul style="list-style-type: none"><li>(a) Eine Umgebung <math>E</math>, d.h. ein Raum, der im Allgemeinen eine Ausdehnung hat.</li><li>(b) Eine Menge <math>O</math> von Objekten. Die Objekte sind situiert, d.h. zu jedem Zeitpunkt kann jedem Objekt eine Position in <math>E</math> zugeordnet werden. Die Objekte sind (soweit sie nicht Agenten sind) passive Einheiten, d.h. sie können von Agenten wahrgenommen, hergestellt, zerstört und modifiziert werden.</li><li>(c) Eine Menge <math>A</math> von Agenten, die spezielle Objekte sind (also <math>A \subseteq O</math>) und die aktiven Einheiten des Systems darstellen.</li><li>(d) Eine Menge <math>R</math> von Relationen, die Objekte (und damit auch Agenten) zueinander in Beziehung setzen.</li><li>(e) Eine Menge <math>Op</math> von Operationen, mittels derer die Agenten die Objekte wahrnehmen, produzieren, verbrauchen, umformen und manipulieren.</li><li>(f) Eine Menge <math>GU</math> von Operatoren, die die Anwendung der Operationen aus <math>Op</math> und die Reaktionen der Welt auf diese Anwendung repräsentieren, genannt „Gesetze des Universums“.</li></ul> |

**Definition Rein kommunikativer Agent**

Ein rein kommunikativer Agent (oder Softwareagent) ist eine rechnende Einheit, die

- (a) Element eines offenen rechnenden Systems ist,
- (b) mit anderen Agenten kommunizieren kann,
- (c) durch eine Menge von eigenen Zielen getrieben ist,
- (d) eigene Ressourcen besitzt,
- (f) nur eine partielle Repräsentation anderer Agenten hat,
- (g) Fähigkeiten besitzt und anderen Agenten Dienste anbieten kann,
- (i) Verhalten zeigt, das auf die Erfüllung ihrer Ziele abzielt, unter Berücksichtigung der ihr zur Verfügung stehenden Ressourcen und Fähigkeiten und in Abhängigkeit von ihren Repräsentationen und ihrer Kommunikation.

**Definition Rein situierter Agent**

Ein rein situierter Agent ist eine physikalische Einheit (oder im Fall einer Simulation eine rechnende Einheit), die

- (a) in einer Umgebung situiert ist,
- (c) durch eine Befriedigungs/Überlebens-Funktion getrieben ist,
- (d) eigene Ressourcen in Form von Energie und Werkzeugen besitzt,
- (e) in beschränktem Umfang ihre Umgebung wahrnehmen kann,
- (f) praktisch keine Repräsentation der Umgebung hat,
- (g) Fähigkeiten besitzt,
- (h) sich selbst reproduzieren kann,
- (i) Verhalten zeigt, das auf die Erfüllung ihrer Befriedigungs/Überlebens-Funktion abzielt, unter Berücksichtigung der ihr zur Verfügung stehenden Ressourcen, Wahrnehmungen und Fähigkeiten.

**1.2.2. Organisationsebenen**

Die folgenden drei Organisationsebenen werden in MAS unterschieden:

- (1) Die *mikrosoziale Ebene* bezieht sich auf die Interaktionen zwischen Agenten und die verschiedenen Arten von Verbindungen zwischen einer kleinen Zahl von Agenten.
- (2) Die *Gruppenebene* bezieht sich auf die vermittelnden Strukturen, die beim Aufbau vollständigerer Organisationen eine Rolle spielen. Hier werden die Differenzierung der Rollen und Aktivitäten der Agenten, die Entstehung organisationaler Strukturen zwischen Agenten und das Problem der Aggregation von Agenten bei der Konstitution von Organisationen betrachtet.
- (3) Die *Ebene globaler Gesellschaften* oder *Populationen* bezieht sich auf die Dynamik einer großen Zahl von Agenten, die allgemeine Struktur des Systems und seine Entwicklung.

Bei der Analyse und beim Entwurf von MAS kann man eine Top-Down- oder eine Bottom-Up-Vorgehensweise einschlagen. Bei der ersten geht man von der Gesellschaft als Ganzer und ihren Eigenschaften aus und versucht nach diesen Eigenschaften die Architektur der Agenten zu spezifizieren, bei der zweiten von einer genauen Definition der Agenten und versucht die Eigenschaften der Gesellschaft als Folge der Interaktionen zwischen den Agenten zu ermitteln.

Die Agenten und ihre Organisation beeinflussen sich gegenseitig. Die Organisation ist das Ergebnis der Interaktionen zwischen den Agenten und das Verhalten der Agenten ist durch die organisationalen Strukturen eingeschränkt, vgl. Abbildung 1.1.

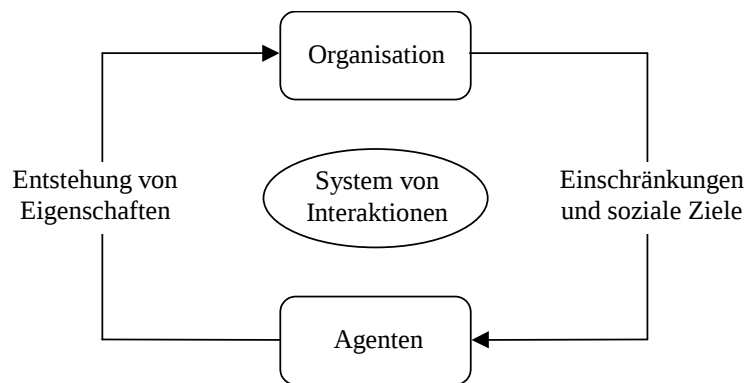


Abbildung 1.1

### 1.2.3. Sind MAS soziale oder biologische Organisationen?

#### Kognitive und reaktive Agenten

Ein *kognitiver Agent* ist ein „intelligenter“ Agent. Er besitzt eine Wissensbasis, in der die Daten und das Know How gespeichert sind, die der Agent für die Lösung von Aufgaben und für Interaktionen mit anderen Agenten und mit der Umgebung braucht. Kognitive Agenten sind ferner *intentional*, d.h. sie haben Ziele und können Pläne zum Erreichen der Ziele entwerfen. Die Kooperation zwischen kognitiven Agenten gleicht der in kleinen Gruppen von Individuen, in denen Aktivitäten koordiniert und Konflikte durch Verhandlungen aufgelöst werden müssen.

Ein *reaktiver Agent* ist ein sehr einfaches Wesen, das nur auf wahrgenommene Ereignisse reagiert. Er kann keine Ziele erklären und verfügt nicht über Planungsfähigkeit, er besitzt keine oder höchstens eine primitive Repräsentation der Umgebung. Trotzdem sind Gesellschaften reaktiver Agenten in der Lage, erstaunliche Problemlösungen zu erzeugen, die hauptsächlich durch das Ziel des Überlebens der Gesellschaft gesteuert sind. Beispiele aus der Biologie sind Insektenstaaten.

#### Intentionen, Triebe, Reflexe

Die klassische Unterscheidung zwischen kognitiven und reaktiven Agenten ist zu einfach um der Realität zu genügen. Eine genauere Betrachtung berücksichtigt zwei Aspekte:

- (1) Der Gegensatz zwischen *teleonomischem* Verhalten, das auf explizite Ziele ausgerichtet ist, und *reflexivem* Verhalten, das durch Wahrnehmungen reguliert wird. Alle Agenten sind getrieben durch Tendenzen, aber einige davon kommen aus der Umgebung, andere liegen explizit in den Agenten vor. Im ersten Fall ist das Verhalten reflexiv, im zweiten teleonomisch.
- (2) Die Beziehung zwischen Agent und Umgebung als Fall des klassischen Subjekt-Objekt-Problems, d.h. die Frage, ob der Agent über eine symbolische und explizite Repräsentation der Welt verfügt, über der er schlussfolgern kann, oder ob seine Repräsentation subsymbolisch ist,

d.h. in seinen senso-motorischen Apparat integriert. Der erste Typ von Agenten heißt *kognitiv*, der zweite *reaktiv*.

Damit sind vier Kriterien definiert, nach denen sich vier Haupttypen von Agenten wie in der folgenden Tabelle dargestellt klassifizieren lassen.

| <b>Beziehung zur Welt</b><br><b>Verhalten</b> | <b>kognitiv</b>        | <b>reaktiv</b>         |
|-----------------------------------------------|------------------------|------------------------|
| <b>teleonomisch</b>                           | Intentionale Agenten   | Trieb-basierte Agenten |
| <b>reflexiv</b>                               | Modul-basierte Agenten | Tropistische Agenten   |

Kognitive Agenten können auf Grund ihrer Fähigkeit zur Repräsentation der Welt und zum Schlussfolgern über der Repräsentation relativ unabhängig operieren. Sie können individuell relativ komplexe Aufgaben ausführen und sie können ihr Verhalten ausdrücken. Reaktive Agenten zeigen wegen ihrer simplen Struktur und ihrer geringen Ressourcen nur einfache Verhaltensweisen. Sie können aber leicht Gruppen oder Populationen bilden, die sich an unterschiedliche Umgebungen anpassen können. Sie haben wenig oder gar keine Individualität, aber da sie große Gruppen bilden können, sind sie darin wegen der Redundanz in der Lage, komplexe Probleme zu lösen.

### Antizipation und Reaktion

Ein wesentlicher Unterschied zwischen kognitiven und reaktiven Agenten besteht in ihrer Fähigkeit zukünftige Ereignisse zu antizipieren und sich darauf vorzubereiten. Reaktive Agenten haben diese Fähigkeit nicht, denn sie besitzen keine Repräsentation ihrer Umgebung oder anderer Agenten, die dafür notwendig wäre. Kognitive Agenten besitzen Repräsentationen, können darüber schlussfolgern und sind deshalb in der Lage sich Situationen zu merken, sie zu analysieren und mögliche Reaktionen auf ihre eigenen Aktionen vorherzusehen. Dies können sie dazu nutzen eine Art virtuelle Welt zu konstruieren und ihr eigenes zukünftiges Verhalten darin zu planen.

Kognitive und reaktive Agenten sollten nicht als extreme Gegensätze betrachtet werden. In der Praxis gibt es vielmehr ein Kontinuum des Übergangs zwischen beiden Formen. Zwischenformen sind z.B. Agenten, die sich anpassen können durch Memorieren bestimmter Daten in Form digitaler Parameter, oder Agenten, die eine „mentale Landkarte“, d.h. eine analoge Repräsentation ihrer Umgebung, besitzen. Das Kontinuum zwischen den Formen ist durch Abbildung 1.2 illustriert. Es gibt Arbeiten, in denen kognitive Agenten in reaktiven Organisationen beschrieben werden, oder in denen hybride Formen von Agenten definiert werden, die sowohl kognitive als auch reaktive Fähigkeiten haben und diese nach Bedarf einsetzen.

#### 1.2.4. Architektur und Verhalten

Ein Agent ist im Wesentlichen durch seine Architektur, also seinen inneren Aufbau, und sein Verhalten, d.h. seine Aktionen, charakterisiert. Die Architektur wird durch den Entwerfer festgelegt. Die Leitfrage beim Entwurf ist: Wie können die verschiedenen Teile eines Agenten so zusammengebaut werden, dass er die Aktionen ausführt, die von ihm erwartet werden?

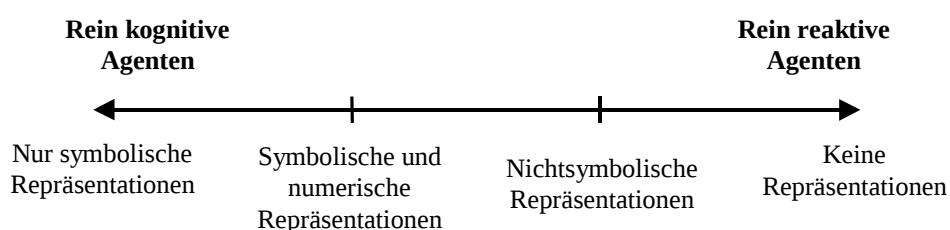


Abbildung 1.2

Diese Leitfrage zieht andere Fragen nach sich: Besitzt der Agent eine interne Repräsentation seiner Umgebung oder reagiert er nur auf die Reize, die er wahrnimmt? Kann der Agent auf der Basis symbolischer Information schlussfolgern oder führt er nur vordefinierte Aktionen aus? Die Architektur eines Agenten gibt Antwort auf diese Fragen. Es gibt eine Menge verschiedener Architekturen, die nach verschiedenen Gesichtspunkten optimiert sind: hinsichtlich Effizienz, Flexibilität oder Einfachheit.

Das Verhalten eines Agenten kann im Unterschied dazu durch einen Beobachter bestimmt werden, ohne Einblick in die Architektur. Er sieht die Aktionen des Agenten und beschreibt das Verhalten als Beziehung zwischen dem Agenten, seiner Umgebung und anderen Agenten. Das Verhalten charakterisiert alle Eigenschaften, die der Agent in seiner Umgebung zeigt. Die Beobachtung des Verhaltens führt zu Verhaltensmodellen, die unabhängig von der Architektur sind. Allerdings ist das Verhalten in der Architektur angelegt, deshalb tendieren verschiedene Architekturen jeweils zu bestimmten Verhaltensweisen.

### 1.2.5. Sprachen

Die zur Entwicklung und Implementierung von MAS verwendeten Sprachen lassen sich in fünf Gruppen einteilen, die in Abbildung 1.3 dargestellt sind.

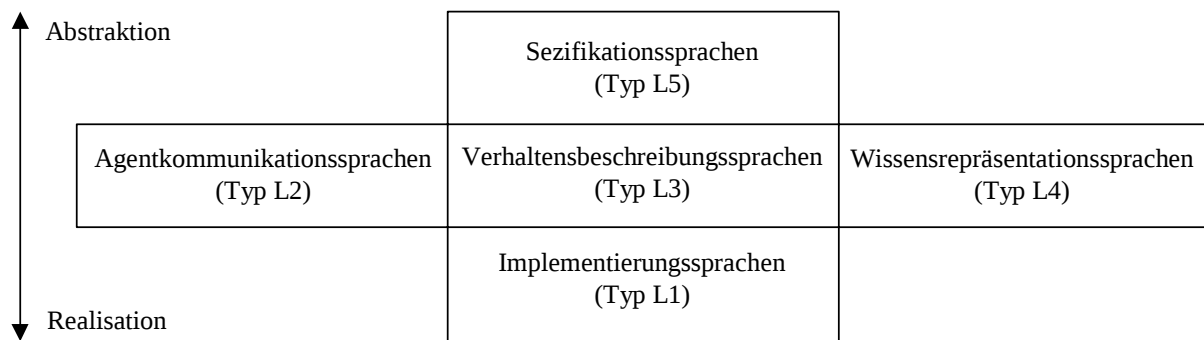


Abbildung 1.3

#### Typ 1: Implementierungssprachen

Sie werden zur Implementierung von MAS benutzt. Dazu gehören Berechnungsvorschriften für Agenten und Umgebung (falls sie simuliert ist) und für Parallelverarbeitung zwischen und innerhalb von Agenten, ferner die Implementierung von Verhalten, Verarbeitung von Nachrichten und Wahrnehmung von Objekten. Übliche Programmiersprachen sind Lisp, C, C++, Prolog, Java, Smalltalk, Actor-Sprachen oder Regelsysteme.

#### Typ 2: Kommunikationssprachen

Sie beschreiben die Interaktionen zwischen Agenten durch Datenübertragungen und gegenseitige Anforderungen nach Informationen und Diensten. Sie ermöglichen dadurch die Kooperation zwischen Agenten zum Erreichen gemeinsamer Ziele. Ein Beispiel einer Kommunikationssprache ist KQML.

#### Typ 3: Verhaltensbeschreibungssprachen

Sie beschreiben auf abstrakter Ebene das Verhalten von Agenten und die Gesetze des Universums, die das Verhalten der Umgebung bestimmen. Die Beschreibung ist unabhängig von der Implemen-

tierung der Agenten, sie stellt wesentliche Prinzipien heraus und dient zum Verständnis des ganzen MAS. Trotzdem sind die Sprachen operational, d.h. sie beschreiben, was geschieht, wenn auch auf abstrakte Weise. Als Verhaltensbeschreibungssprachen kommen regelbasierte Sprachen, Automatendefinitionen oder Petri-Netze in Frage.

#### Typ 4: Wissensrepräsentationssprachen

Sie werden von kognitiven Agenten zur Darstellung interner Modelle der Welt benutzt, die zum Schlussfolgern über die Welt und zum Planen von Aktionen verwendet werden. Ferner werden mit ihnen mentale Zustände, Ziele, Annahmen und das Verhalten von Agenten beschrieben. Wissensrepräsentationssprachen sind meistens Logiksprachen, aber auch regelbasierte Sprachen, Blackboard-basierte Sprachen, semantische Netze und Frames werden verwendet. Bei reaktiven Agenten wird diese Sprachschicht meist nicht benötigt.

#### Typ 5: Spezifikationssprachen

Sie formalisieren einerseits, was man unter einem MAS versteht, indem sie Konzepte wie Interaktion, Intention usw. beschreiben, andererseits spezifizieren sie die Bedingungen, die bei der Modellierung und Implementierung von MAS beachtet werden müssen. Sie haben im Verhältnis zu den anderen Sprachen den Charakter von Metasprachen. Als Basis für Spezifikationssprachen kann z.B. die Modallogik verwendet werden.

### 1.3. Anwendungsgebiete

Es gibt eine große und rasch wachsende Zahl von Anwendungen von MAS. Sie lassen sich aber in fünf Kategorien einordnen, die in Abbildung 1.4 dargestellt sind und im Folgenden beschrieben und mit Beispielrealisierungen illustriert werden.

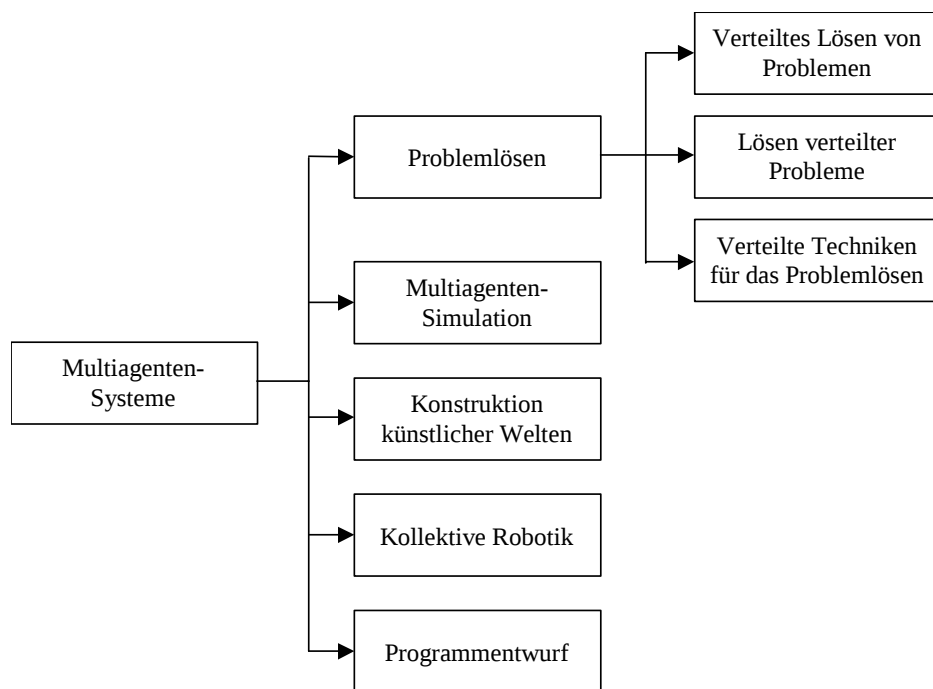


Abbildung 1.4

### 1.3.1. Problemlösen

Problemlösen im weitesten Sinn des Wortes bezeichnet alle Prozesse, in denen Softwareagenten Aufgaben lösen, die für Menschen nützlich sind. Beim Problemlösen mit Agenten (statt mit klassischen KI-Programmen) kann man die drei Unterfälle unterscheiden, die in Abbildung 1.4 dargestellt sind.

#### Verteiltes Lösen von Problemen

Das ist notwendig, wenn die zu lösende Aufgabe komplex ist und nicht von einem Agenten allein gelöst werden kann, vielmehr mehrere spezialisierte Agenten erforderlich sind, die sich bei der Lösung ergänzen. Die Aufgabe selbst ist nicht verteilt, die Agenten müssen also bei der Lösung in geeigneter Form zusammenarbeiten. Typische Beispiele sind medizinische Diagnose, Entwurf und Herstellung komplexer technischer Produkte (Autos, Flugzeuge, Maschinen aller Art), Wissenserwerb, Fehlersuche in Netzen, Sprachverstehen und Steuerung und Überwachung von Telekommunikationsnetzen.

#### Lösen verteilter Probleme

Hier kommt als zusätzlicher Aspekt hinzu, dass das Problem selbst gewissermaßen von Natur aus verteilt ist. Das Problemlösen erfolgt selbstverständlich auch verteilt. Verteilte Probleme hat man typischerweise bei der Analyse, Identifikation, Fehlersuche und Steuerung von physisch verteilten Systemen, bei denen eine zentralisierte Übersicht schwierig ist. Ein Beispiel ist die Steuerung eines Kommunikations- oder Energienetzes, wo der Anwendungsbereich, das Netz, bereits ein verteiltes System darstellt. Hier wird versucht, die Überwachung und Steuerung soweit wie möglich auf die einzelnen Knoten des Netzes zu verteilen. Ein anderes Beispiel ist das DVMT (distributed vehicle monitoring testbed), das zur Überwachung von Verkehrsströmen dient. An verschiedenen Stellen in einem Bereich sind Kontrollstationen installiert, die miteinander kommunizieren um die Routen einzelner Fahrzeuge zu überwachen.

#### Verteilte Techniken für das Problemlösen

Hier handelt es sich um Probleme, die im Prinzip ein einzelner Agent lösen kann. Weder ist der Anwendungsbereich noch die Expertise verteilt. Die verteilte Herangehensweise an das Problem kann aber zu einfacheren Lösungen führen. Typische Probleme dieser Art sind etwa das Aufeinanderstapeln von Würfeln oder das Zusammenbauen von Teilen zu einem größeren Ganzen. Hier werden die Würfel oder die Teile als Agenten betrachtet, die genau definierte Ziele haben, vorgegeben vom Entwerfer, wobei die Verbindungen zwischen den Agenten die Constraints sind, die die Agenten beachten müssen.

### 1.3.2. Multiagenten-Simulation

Bei der klassischen Simulation von Phänomenen aus der Natur werden Modelle der Realität konstruiert und in irgendeiner programmierten Form auf dem Rechner zum Laufen gebracht. Die Modelle bestehen typischerweise aus mathematischen Beziehungen zwischen Variablen, die in der Realität messbare physikalische Werte repräsentieren. Häufig verwendete Beziehungen sind Differentialgleichungen, Transitionsmatrizen u.a.. Sie stellen eine Beziehung zwischen Eingangs- und Ausgangsvariablen her, die man sich als Kausalzusammenhang vorstellt. Ein typisches Beispiel ist das Modell des Wachstums einer Population von Beutetieren und Jägern, die im selben Territorium leben. Es wird durch die folgenden Gleichungen beschrieben:

$$\frac{dN_1}{dt} = r_1 N_1 - P N_1 N_2 \quad \frac{dN_2}{dt} = a P N_1 N_2 - d_2 N_2$$

Dabei ist  $P$  der Beutekoeffizient,  $N_1$  und  $N_2$  sind die Anzahlen der Beutetiere und der Jäger,  $a$  ist die Rate, mit der die Jäger Nahrung in Nachwuchs umsetzen,  $r_1$  gibt die Fruchtbarkeit der Beutetiere an und  $d_2$  die Sterblichkeitsrate der Jäger. Trotz der Nützlichkeit dieses und ähnlicher Modelle für die Forschung sind folgende Einwände dagegen zu machen:

- Abgeschlossenheit der Analyseebene: Die Parameter der Modelle liegen alle auf derselben Ebene. Diese Ebene ist abgeschlossen, denn es ist nicht möglich, Verhaltensweisen auf der Mikroebene zu Parametern auf der Makroebene in Beziehung zu setzen.
- Komplexität und Realitätsnähe der Parameter: Die Modelle enthalten oft eine große Zahl von Parametern, deren Werte schwer abzuschätzen sind und die mehr oder weniger realitätsfern sind.
- Schwierigkeit der Darstellung von Aktionen: Aktionen von Individuen und damit daraus folgende Änderungen der Umgebung können nur schwer oder gar nicht in den Modellen dargestellt werden. Phänomene, die durch die Interaktion von Individuen entstehen, können somit kaum beschrieben werden.
- Mangel an qualitativer Darstellungsfähigkeit: Digitale Simulationen setzen quantitative Parameter voraus. Viele Daten, die in der Realität gesammelt werden, sind aber qualitativ.

Im Gegensatz zu traditionellen Modellen geht die Multiagenten-Simulation davon aus, dass das Verhalten aktiver Einheiten in der Welt in computergerechter Form repräsentiert werden kann und dass damit bestimmte Phänomene als Folgen der Interaktionen einer Menge von Agenten mit eigener operationaler Autonomie dargestellt werden kann.

In Modellen der Multiagenten-Simulation sollen sowohl quantitative als auch qualitative Parameter repräsentierbar sein. Man spricht deshalb auch von mikroanalytischen Modellen oder individuenzentrierter Simulation. Die Repräsentation liegt hier auf der Ebene der Individuen, die miteinander und mit der simulierten Umgebung interagieren. Damit werden künstliche Mikrowelten konstruiert, die wie Labore benutzt werden können, in denen man mit unterschiedlichen Vorgaben Experimente durchführen kann.

Die Vorteile der Multiagenten-Simulation sind in ihrer Fähigkeit zur Integration und ihrer Flexibilität begründet. Man kann in einem Modell z.B. quantitative Variable, Differentialgleichungen und durch Regeln beschriebene Verhaltensweisen integrieren. Man kann die Modelle leicht modifizieren, indem man z.B. neue Agenten mit besonderen Verhaltensweisen hinzufügt, die mit den bereits vorhandenen interagieren. Vor allem aber kann man mit diesen Modellen demonstrieren, wie das globale Verhalten eines Systems auf der Makroebene durch die Interaktionen der Agenten auf der Mikroebene entsteht.

### 1.3.3. Konstruktion synthetischer Welten

Synthetische Welten sind MAS, die zu dem Zweck entworfen werden, bestimmte Interaktionsmechanismen genau zu untersuchen. Sie können sich an Erscheinungen der realen Welt anlehnen, und meistens kommen die dargestellten Interaktionsmechanismen dort vor, aber sie können auch vollkommen künstlich sein. Im Folgenden werden einige Beispiele für synthetische Welten dargestellt.

## Die Jagd

Die Welt besteht aus einem Gitter mit mehreren quadratischen Feldern. Über diese bewegen sich Beutetiere und Jäger. Die Jäger müssen die Beutetiere fangen, indem sie sie umringen. Dies ist in Abbildung 1.5 dargestellt.

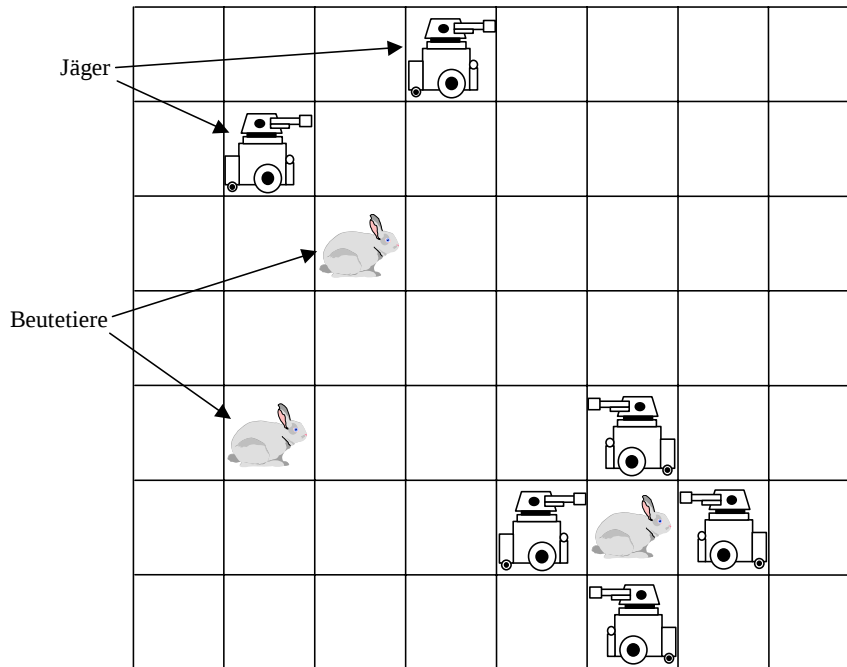


Abbildung 1.5

Es worden folgende Festlegungen getroffen:

- (1) Die Umgebung (das Gitter) hat endliche Größe.
- (2) Jäger und Beutetiere bewegen sich mit fester Geschwindigkeit, im Allgemeinen mit der selben.
- (3) Die Beutetiere bewegen sich zufallsgesteuert und führen eine Art Brownscher Bewegung aus, d.h. sie wählen zu jedem Zeitpunkt eine zufällige Position aus.
- (4) Die Jäger können die Ecken und Seiten des Gitters benutzen um die Wege der Beutetiere zu blockieren.
- (5) Die Jäger haben beschränkte Wahrnehmungsfähigkeit, sie sehen ein Beutetier nur, wenn es sich in einem der Felder befindet, die in ihrem Wahrnehmungsbereich liegen.

Man kann diese synthetische Welt mit kognitiven und mit reaktiven Agenten entwerfen. Beim kognitiven Entwurf geht man im Allgemeinen top down vor, indem man die verschiedenen Funktionen definiert, die das System auszuführen hat: Entdecken von Beutetieren, Bildung von Jagdteams, Zuordnung von Rollen zu den einzelnen Jägern (z.B. Angriffsrichtungen), Reorganisation von Jagdteams usw. Dies alles ist im Verhalten der Agenten definiert. Sie benötigen ferner ein Kommunikationssystem mittels dessen sie in verteilter Weise Entscheidungen treffen können. Die Agenten haben Ziele und handeln rational mit Bezug auf die Ziele, eventuell bestimmen sie einen Anführer, wenn dies zweckmäßig erscheint.

Beim reaktiven Entwurf setzt man voraus, dass die Beutetiere ein Signal aussenden, das die Jäger anzieht und das mit zunehmender Entfernung abnimmt. Je näher ein Jäger an einem Beutetier ist, desto stärker wird er von ihm angezogen. Ein Jäger wird also das Beutetier verfolgen, dem er am

nächsten ist, auch wenn er die Signale anderer Beutetiere empfängt. Damit nicht alle Jäger sich am selben Platz einfinden, senden sie ein Signal aus, das auf andere Jäger abstoßend wirkt. Ein Jäger wird also von dem Signal eines Beutetiers angezogen und gleichzeitig von den Signalen anderer Jäger (schwach) abgestoßen. Aus der Summe dieser Wahrnehmungen ergibt sich sein Verhalten.

Im Vergleich zwischen kognitivem und reaktivem Modell kann man feststellen, dass im kognitiven Modell die Kooperation der Agenten *intentional* ist, denn sie können sich unterhalten und explizite Aufgaben festlegen, während sie im reaktiven Modell *reaktiv* ist und sich als Nebeneffekt des individualistischen Verhaltens der Agenten ergibt.

### Explorative Roboter auf dem Mars

Die Aufgabe der explorativen Roboter ist das Sammeln von Erzproben. Dieses Problem stellt eine ideale Spielsituation zur Untersuchung unterschiedlicher Kooperationsstrategien dar. Das Szenario ist wie folgt: Eine Basis steht fest oder bewegt sich nur geringfügig, von der aus mehrere Roboter ein ihnen unbekanntes Gebiet erforschen und darin nach Erzproben suchen, die sie aufnehmen und zu der Basis bringen sollen. Die Aufgabe besteht also darin, die Struktur und das Verhalten der Roboter sowie die Organisation der Robotergesellschaft so zu definieren, dass sie ihre Aufgabe möglichst effizient erfüllt. Abbildung 1.6 stellt das Szenario dar.

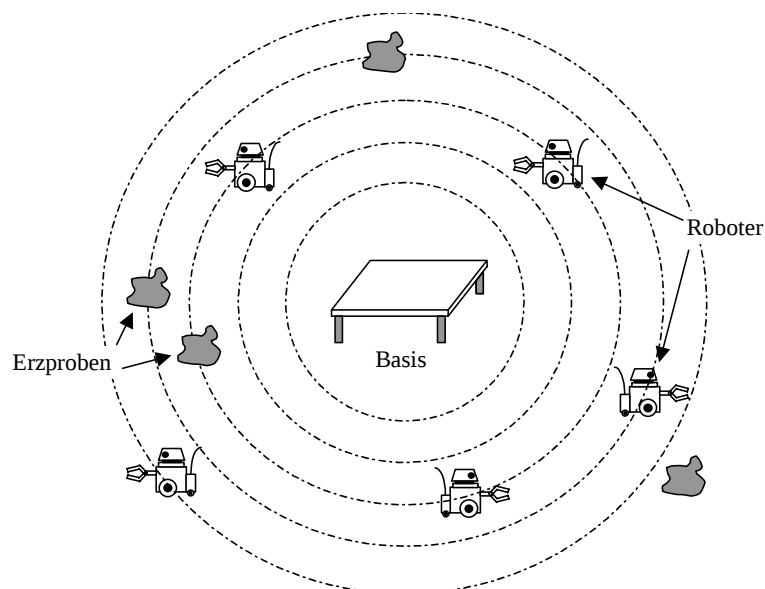


Abbildung 1.6

Für die Definition eines MAS, das die Roboter simuliert, müssen folgende Schritte durchgeführt werden:

1. Definition der verschiedenen Typen von Robotern: Sollen sie identisch oder in unterschiedlicher Weise spezialisiert sein?
2. Festlegung der kognitiven Fähigkeiten der Agenten: Können sie sich das Gelände, in dem sie sich bewegen, merken und Karten erstellen, sind sie rein reaktiv und haben nur lokal beschränkte Wahrnehmungsfähigkeit, oder können sie miteinander kommunizieren indem sie sich über größere Distanzen Nachrichten schicken?
3. Beschreibung der kollektiven Arbeitsstrukturen: Arbeiten sie in einer Gruppe oder einzeln? Sind die Teams fest oder dynamisch? Können sie Unterstützung bekommen und wenn ja, wie, oder sind sie ausschließlich auf ihre eigenen Ressourcen angewiesen?

4. Definition der Kooperationsmechanismen und der Interaktionsprotokolle: Sie dienen zur Durchführung der kollektiven Arbeit und reduzieren die Zahl der möglichen Konflikte.
5. Bereitstellung von Verfahren zur Auswertung von Entscheidungen und zum Vergleich mit anderen Organisationstypen.

### **Eine autonome Produktionshalle**

Die Aufgabe besteht darin, eine Reihe von Produkten  $A_1, \dots, A_k$  herzustellen. Dafür stehen die Maschinen  $M_1, \dots, M_n$ , die Rohmaterialien  $P_1, \dots, P_j$  und die Transportroboter  $T_1, \dots, T_m$  zur Verfügung. Die Rohmaterialien kommen am Anfang der Produktionslinie an und die fertigen Produkte verlassen sie am Ende. Wie muss der Ablauf organisiert werden, damit er auf spezielle Produktionsanforderungen flexibel reagieren kann? Die Aufgabe besteht also darin, dass jede einzelne Produktionseinheit ihre Aufgabe erfüllt und dass die Einheiten so zusammenarbeiten, dass das gewünschte Ergebnis erreicht wird und dass sie auf Störungen so flexibel reagieren, dass die Produktion nicht unterbrochen wird.

#### **1.3.4. Kollektive Robotik**

Die kollektive Robotik beschäftigt sich mit realen Agenten, die in einer realen Umgebung operieren. Sie müssen zusammenarbeiten, um die ihnen gestellte Aufgabe zu erfüllen. Es gibt zwei Typen von Robotern für die kollektive Robotik, zelluläre Roboter und mobile Roboter.

##### **Zelluläre Roboter**

Ein zellulärer Roboter ist eigentlich ein einzelner Roboter, in der Regel in der Konstruktion eingesetzt, der als MAS aufgefasst wird. Seine einzelnen Komponenten werden als Agenten betrachtet. Eine Bewegung eines solchen Roboters entsteht durch die Koordination einiger der Komponentenagenten. Dadurch ist es möglich komplexe Bewegungen mit einem Minimum an Rechenaufwand durchzuführen.

##### **Mobile Roboter**

Mindestens zwei mobile Roboter arbeiten zusammen um eine bestimmte Aufgabe auszuführen. Zum Aufgabenspektrum gehören Dinge wie das Reinigen von Fußböden, die Überwachung von Gebäuden, Unterstützung eingeschränkt handlungsfähiger Personen, Reparaturen und Untersuchung entfernter oder gefährlicher Bereiche. In diesen Bereich fällt auch die Koordination der Bewegungen von Vehikeln (Flugzeuge, Autos, Schiffe). Das Ziel hierbei ist Kollisionen zu vermeiden.

#### **1.3.5. Agentenorientiertes Programmieren**

Das agentenorientierte Programmieren ist, wie das objektorientierte Programmieren, ein eigenständiges Programmierparadigma, d.h. es schließt eine Entwurfsmethodik ein. Das Ziel ist Computersysteme zu erstellen, die sich selbst (weiter-) entwickeln, und zwar dadurch, dass relativ autonome Agenten in physikalisch verteilten Domänen operieren, interagieren, sich adaptieren und sich reproduzieren.

Jede Programmeinheit wird als Agent betrachtet mit Autonomie und eigenen Zielen, die im Netz „lebt“ wie in einem eigenen Ökosystem und mit anderen Einheiten der selben Art kommuniziert, kooperiert und verhandelt. Der Nutzer verhält sich wie ein Schafhirte, der der Herde von Agenten Anweisungen erteilt und später die Ergebnisse ihrer Arbeit erntet.

Im engeren Sinn ist agentenorientiertes Programmieren die Fortsetzung des objektorientierten Programmierens zu einer noch modulareren Form des Programmentwurfs. Jede Programmkomponente wird als Agent mit bestimmten Fähigkeiten und Zielen betrachtet, die bestrebt ist die Anforderungen des Nutzers zu erfüllen und die in der Lage ist auf Veränderungen im Programm richtig zu reagieren.

## **1.4. Grundlegende Aspekte der Konstruktion von MAS**

### **1.4.1. Aktionen**

Die Fragestellung hier lautet: Wie können mehrere Agenten gleichzeitig handeln und welche Folgen haben ihre Aktionen für die Umgebung. Das zweite lässt sich direkt beantworten: Der Zustand der Umgebung ist eine direkte Folge der Kombination der Aktionen der Agenten. Der erste Punkt wirft weitere Fragen auf: Wie können die Aktionen kombiniert werden? Wie können zwei Agenten kollidieren bzw. eine Kollision vermeiden? Wie werden die Randbedingungen der Umgebung mit den Aktionen der Agenten kombiniert?

### **1.4.2. Das Individuum und seine Beziehung zur Welt**

Ein individueller Agent wird durch seine Architektur und seine interne Organisation definiert. Wesentlich ist ferner seine Überlebensfähigkeit und die Fähigkeit, seine Ziele zu erreichen. Außer bei einfachen reaktiven Agenten ist der mentale Zustand für einen Agenten wichtig. Er resultiert aus seiner Geschichte, aus seiner Wahrnehmung der Welt und seiner Interaktion mit der Welt und anderen Agenten. Der mentale Zustand bestimmt im Wesentlichen das Verhalten des Agenten. Er ist meist in sehr komplexer Weise aus einer großen Anzahl von Elementen zusammengesetzt. Diese Elemente sind elementare kognitive Einheiten und werden *Kognitons* genannt.

### **1.4.3. Interaktion**

Der Designer eines MAS muss die elementaren Mechanismen, die den Agenten die Interaktion ermöglichen, beschreiben können, ebenso verschiedene Formen der Interaktion. Die Kommunikation dient zur Übermittlung von Informationen, aber auch dazu bei anderen Agenten ein bestimmtes Verhalten hervorzurufen. Kommunikation ist somit eine besondere Form der Aktion, die nicht auf die Umgebung, sondern auf die mentalen Zustände anderer Agenten einwirkt.

Es gibt zwei Hauptformen der Interaktion: Kollaboration und Koordination. Bei der Ersten geht es um die Verteilung der Arbeit auf mehrere Agenten, entweder in zentralisierter oder verteilter Form. Bei der Zweiten geht es um die Organisation der Aktivitäten der einzelnen Agenten in Raum und Zeit. Auftretende Konflikte müssen gelöst werden, z.B. durch Verhandeln.

### **1.4.4. Adaption**

Strukturelle und verhaltensmäßige Adaption einer Gesellschaft von Agenten kann auf zwei Arten erfolgen: durch individuelles Lernen einzelner Agenten oder durch Evolution der ganzen Gesellschaft. Im ersten Fall werden symbolische Lernverfahren oder Neuronale Netze verwendet, im zweiten Fall genetische Algorithmen.

### **1.4.5. Definition und Implementierung von MAS**

Dazu gehören Implementierungssprachen, Rechenarchitekturen, Entwicklungsplattformen und Aspekte des Software Engineering.

## 2. Interaktionen und Kooperation

### 2.1. Interaktionssituationen

Interaktion findet statt, wenn mehrere Agenten durch eine Menge wechselseitiger Aktionen in eine dynamische Beziehung zueinander gebracht werden. Die Interaktionen entstehen aus einer Folge von Aktionen, deren Folgen Einfluss auf das weitere Verhalten der Agenten haben. Der Begriff *Interaktion* lässt sich durch die folgenden Punkte eingrenzen:

- (1) Es müssen Agenten vorhanden sein, die handeln und/oder kommunizieren können.
- (2) Es muss Situationen geben, die den Agenten die Gelegenheit zum Zusammentreffen bieten, z.B. explizite Zusammenarbeit, Bewegung von Fahrzeugen, die zu einer Kollision führen kann, gemeinsame Nutzung beschränkter Ressourcen oder Regulierung des Gruppenzusammenhalts.
- (3) Es muss dynamische Elemente zur Herstellung lokaler und zeitlich beschränkter Beziehungen zwischen den Agenten geben: Kommunikation, Einwirkung, Anziehung, Abstoßung usw.
- (4) Es muss einen gewissen Spielraum in den Beziehungen zwischen den Agenten geben, der es ihnen erlaubt, Beziehungen aufrecht zu erhalten oder abubrechen, d.h. die Agenten benötigen ein gewisses Maß an Autonomie.

Trotz der Unterschiede, die bei oberflächlicher Betrachtung zwischen verschiedenen Arten von Interaktionen bestehen, kann man auf einer tieferen Ebene der Betrachtung Gemeinsamkeiten erkennen und man kann die Differenzen und Übereinstimmungen detaillierter betrachten. Zur Beschreibung von Interaktionen wird der Begriff der *Interaktionssituation* definiert. Er beschreibt Interaktionen als aus Elementen zusammengesetzt. Dadurch ist es möglich Typen von Interaktionen präziser zu erfassen.

| Definition <i>Interaktionssituation</i>                                                                                                                                                                                                                                                                                     |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Eine <i>Interaktionssituation</i> ist eine Menge von Verhaltensweisen, die durch Gruppierung von Agenten entsteht, die bestimmte Aktionen ausführen müssen um ihre Ziele zu erreichen. Dabei sind die mehr oder weniger begrenzten Ressourcen, die ihnen zur Verfügung stehen, und ihre besonderen Fähigkeiten zu beachten. |

### 2.2. Komponenten von Interaktionen

#### 2.2.1. Kompatible und inkompatible Ziele

| Definition <i>Inkompatible Ziele</i>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                  |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Das Ziel eines Agenten <i>A</i> ist <i>inkompatibel</i> mit dem eines anderen Agenten <i>B</i> , wenn gilt:<br>Sind die Ziele von <i>A</i> bzw. <i>B</i> Zustände, die mit <i>p</i> bzw. <i>q</i> bezeichnet werden und ist $p \Rightarrow \neg q$ dann muss gelten: $\text{Erreicht}(A, p) \Rightarrow \neg \text{erfüllt}(\text{Erreicht}(B, q))$ . |

Agenten befinden sich in einer *Kooperationssituation*, wenn ihre Ziele kompatibel sind, im anderen Fall befinden sie sich in einer *antagonistischen Situation*.

Das Konzept der Kompatibilität von Zielen kann auf reaktive Agenten ausgedehnt werden, obwohl man meistens nur bei kognitiven Agenten von Zielen spricht. Im Fall von Trieb-basierten Agenten

ist es zulässig von kompatiblen und inkompatiblen Trieben zu sprechen, wenn man definiert, ob die Wünsche der Agenten gleichzeitig erfüllt werden können. Bei tropistischen Agenten, bei denen nur ihre Lebensfähigkeit betrachtet wird, sind die Ziele kompatibel, wenn das auf Überleben ausgerichtete Verhalten eines Agenten nicht den Tod eines anderen zur Folge hat.

### 2.2.2. Verhältnis zu den Ressourcen

Ressourcen sind alle materiellen Elemente der Umgebung, die zur Ausführung einer Aktion benutzt werden können. Jeder Agent benötigt Ressourcen zur Ausführung seiner Aktionen, die in Raum und Zeit stattfinden, Energie (und eventuell Geld) verbrauchen und Instrumente als Katalysatoren von Aktivität benötigen.

Der Bedarf von Ressourcen kann Anlass für *Konflikte* sein. Konflikte entstehen, wenn mehrere Agenten die selben Ressourcen zur selben Zeit und am selben Ort benötigen, d.h. wenn die Raum-Zeit-Bereiche, die den Ressourcen zugeordnet sind, sich überlappen. Beispiel sind zwei Handwerker, die das selbe Werkzeug benötigen, zwei Roboter, die Energie an der selben Energiequelle aufnehmen wollen, oder zwei Programme, die den selben Prozessor zur selben Zeit benutzen wollen.

Konflikte können durch Mechanismen der Koordination von Aktionen und der Konfliktlösung aufgelöst werden. Solche Mechanismen sind z.B. das Recht des Stärkeren, Verhandlungstechniken und Techniken zur Koordination von Aktionen.

Das Recht des Stärkeren ist im Tierreich eine verbreitete Art der Konfliktlösung. Dort geht es z.B. um Revierbehauptung oder um Rangordnungen im Rudel, die Konflikte bei Nahrungsressourcen oder auch sexuellen „Ressourcen“ lösen sollen. Verhandlungstechniken zielen darauf ab, Kompromisse zu schließen, bei denen die Bedürfnisse jedes Beteiligten so weit wie möglich befriedigt werden. Techniken zur Koordination von Aktionen werden benutzt um erwartete Konflikte zu antizipieren und Lösungen zu finden, die die Konflikte gar nicht ausbrechen lassen. Dazu gehören Vorrichtungen, Regulierungen und ergänzende Aktionen, die zusammen mit den Aktionen der Agenten implementiert werden müssen.

## 2.3. Interaktionstypen

Auf der Basis der Hauptkomponenten von Interaktionen, Zielen, Zugang zu Ressourcen und Fähigkeiten der Agenten, kann man die in Tabelle 2.1 dargestellte Typologie von Interaktionen definieren.

| Ziele        | Ressourcen        | Fähigkeiten       | Interaktionstypen                         | Kategorie                       |
|--------------|-------------------|-------------------|-------------------------------------------|---------------------------------|
| Kompatibel   | Ausreichend       | Ausreichend       | Unabhängigkeit                            | Gleichgültigkeit<br>Kooperation |
| Kompatibel   | Ausreichend       | Nicht ausreichend | Einfache<br>Kollaboration                 |                                 |
| Kompatibel   | Nicht ausreichend | Ausreichend       | Obstruktion                               |                                 |
| Kompatibel   | Nicht ausreichend | Nicht ausreichend | Koordinierte<br>Kollaboration             | Antagonismus                    |
| Inkompatibel | Ausreichend       | Ausreichend       | Reiner individueller<br>Wettbewerb        |                                 |
| Inkompatibel | Ausreichend       | Nicht ausreichend | Reiner kollektiver<br>Wettbewerb          |                                 |
| Inkompatibel | Nicht ausreichend | Ausreichend       | Individuelle Konflikte<br>über Ressourcen |                                 |

|              |                   |                   |                                         |
|--------------|-------------------|-------------------|-----------------------------------------|
| Inkompatibel | Nicht ausreichend | Nicht ausreichend | Kollektive Konflikte<br>über Ressourcen |
|--------------|-------------------|-------------------|-----------------------------------------|

Tabelle 2.1

### 2.3.1. Charakterisierung der Interaktionstypen

#### Unabhängigkeit

Mehrere Agenten führen unabhängig voneinander Aktionen aus, es findet keine Interaktion statt. Vom Standpunkt der MAS aus ist dieser Fall nicht relevant.

#### Einfache Kollaboration

Es ist eine Addition der Fähigkeiten erforderlich, aber keine koordinierenden Aktionen zwischen den Agenten. Diese Situation liegt bei Systemen vor, bei denen die Interaktion in der Zuteilung von Aufgaben und dem Teilen von Wissen besteht.

#### Obstruktion

Die Agenten brauchen einander zwar nicht zur Ausführung ihrer Aufgaben, aber sie bekommen miteinander zu tun wegen der Knappheit der Ressourcen. Typische Beispiele sind Straßenverkehr, Luftverkehrssteuerung, optimale Nutzung von Ressourcen wie Zeit, Speicher, Prozessorbelegung usw.

#### Koordinierte Kollaboration

Wegen nicht ausreichender Fähigkeiten der einzelnen Agenten müssen sie zusammenarbeiten um ihre Ziele zu erreichen. Koordinierte Kollaboration ist bei den meisten industriellen Anwendungen, die verteilt sind, erforderlich. Sie ist die komplexeste Kooperationssituation, weil in ihr Aufgabenverteilung und Koordination des Zugriffs auf begrenzte Ressourcen kombiniert sind.

#### Reiner individueller Wettbewerb

Reiner Wettbewerb liegt vor, wenn die Ressourcen nicht der Anlass für Konflikte sind (z.B. wenn sie nicht beschränkt sind). Inkompatible Ziele schließen sich gegenseitig aus, d.h. wenn einer der Agenten sein Ziel erreicht, können die anderen ihre nicht erreichen. Eine typische Situation dieser Art ist ein sportlicher Wettbewerb, bei dem alle Agenten ausreichende Ressourcen und im Prinzip die gleichen Fähigkeiten haben. Aber nur einer kann gewinnen und wer es schafft, hindert die anderen am Erreichen ihres Ziels. Interaktionsprobleme gibt es bei dieser Situation nicht.

#### Reiner kollektiver Wettbewerb

Wegen nicht ausreichender Fähigkeiten müssen die Agenten hier Gruppen bilden um ihre Ziele zu erreichen. Beim kollektiven Wettbewerb gibt es zwei Phasen: Zunächst werden durch koordinierte Kollaboration Gruppen gebildet, dann konkurrieren die Gruppen gegeneinander. Typische Beispiele sind Mannschaftssportkämpfe.

#### Individuelle Konflikte über Ressourcen

Gegenüber dem reinen Wettbewerb sind hier auch noch die Ressourcen beschränkt. Jeder Agent wird versuchen, die vorhandenen Ressourcen möglichst für sich allein zu nutzen. Es gibt viele Beispiele für diese Situation in menschlichen und tierischen Gesellschaften, etwa die Behauptung eines Territoriums oder das Erreichen einer beruflichen Position.

#### Kollektive Konflikte über Ressourcen

Analog zum Unterschied zwischen individuellem und kollektivem Wettbewerb müssen hier die Agenten Kollektive bilden und in solchen gegeneinander um knappe Ressourcen konkurrieren. Typische Beispiele sind Kriege oder wirtschaftlicher Wettbewerb.

### 2.3.2. Analyseebenen für Interaktionssituationen

Komplexe Interaktionssituationen bestehen aus elementareren Situationen, deshalb können Situationen auf verschiedenen Ebenen analysiert werden. Man kann zwischen *Interaktionsmakrosituationen* und *Interaktionsmikrosituationen* unterscheiden. Bei der ersten macht man eine globale Analyse der Situation, bei der zweiten werden stärker die Details betrachtet.

Aus der Makrosituation folgt eine Menge von Problemen, die dadurch gelöst werden, dass eine Anzahl von Mikrosituationen hergestellt werden, die ihrerseits wieder Probleme erzeugen. Umgekehrt besteht aber die Makrosituation aus den Mikrosituationen. Dieses Verhältnis ist in Abbildung 2.1 illustriert.

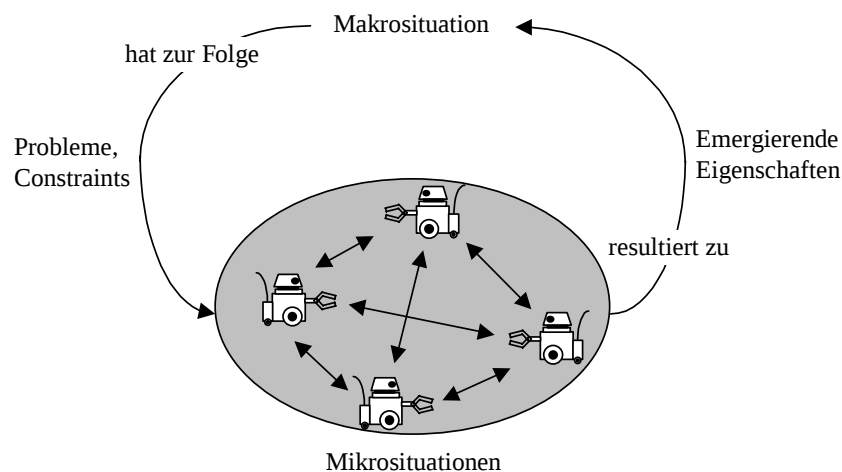


Abbildung 2.1

Im Folgenden wird angenommen

- (1) dass die Ziele der Agenten kompatibel sind,
- (2) dass die Agenten gutwillig sind und einander helfen oder versuchen, einen Kompromiss zu finden, wenn es um Interessen an Ressourcen geht.

## 2.4. Formen der Kooperation

### 2.4.1. Kooperation als intentionale Haltung

Ursprünglich wurde Kooperation als charakteristisch für eine *Haltung* von Agenten betrachtet. In diesem Sinne kooperieren Agenten wenn sie ein gemeinsames Ziel identifizieren und übernehmen und sich dann an einer gemeinsamen Aktion beteiligen. Ein typisches Beispiel ist die Herstellung einer Gemeinschaft zur Abwehr einer Bedrohung aus der Umgebung. Das gemeinsame Ziel ist die Bekämpfung der Ursachen der Bedrohung und die Agenten haben sich in der Gemeinschaft zur Beteiligung an diesem Kampf verpflichtet. Die Gemeinschaft entsteht durch das Bewusstwerden des gemeinsamen Ziels und durch die Verpflichtung.

Ein anderes Beispiel ist die Arbeit für eine Firma. Die Mitarbeiter verpflichten sich, sich an der gemeinsamen Aufgabe zu beteiligen. Sie gehen dabei davon aus, dass ihre Ziele mit denen der

Firma kompatibel sind und dass sie im Rahmen der Firma ihre Interessen verwirklichen können. Die Firma nutzt die Fähigkeiten der Mitarbeiter und diese erhalten eine Entlohnung.

Die übliche Sichtweise von Kooperation als Haltung von Agenten wirft zwei Probleme auf: Erstens wird behauptet, dass Kooperation auch dann vorliegt, wenn das Ergebnis der Kooperation schlechter ist als die individuelle Arbeit der Agenten. Zweitens schließt sie die Möglichkeit der Kooperation bei reaktiven Agenten aus. Diese haben nämlich keine expliziten Intentionen und keine Modelle von anderen Agenten. Trotzdem kann man bei vielen (natürlichen) reaktiven MAS kooperatives Verhalten beobachten.

Akzeptiert man kooperatives Verhalten bei reaktiven Agenten, dann lässt sich Kooperation nicht nur von einer Haltung herleiten, obwohl eine kooperative Haltung eine gute Voraussetzung für Kooperation ist, sondern sie muss auch in den Begriffen des *Verhaltens* und der *Ergebnisse* verstanden werden. So betrachtet ist Kooperation nicht mehr ein Ergebnis der Intention zum Kooperieren, sondern der positive Nutzen, der aus der Interaktion der Agenten entsteht.

### 2.4.2. Kooperation aus Sicht des Beobachters

Sogenannte *Kooperationsindikatoren* erlauben es, zur Beurteilung kooperativen Verhaltens nur das beobachtbare Verhalten heranzuziehen, und nicht auf die interne Charakteristik der Agenten zu rekurren. Folgende Phänomene kommen als Kooperationsindikatoren in Frage (müssen aber nicht unbedingt alle verwendet werden):

- (1) Die Koordination von Aktionen. Sie betrifft die Anpassung der Richtung der Aktionen des Agenten in Raum und Zeit.
- (2) Der Grad an Parallelisierung. Er hängt von der Verteilung der Aufgaben und ihrer gleichzeitigen Ausführung ab.
- (3) Die gemeinsame Nutzung von Ressourcen. Sie betrifft den Gebrauch von Ressourcen und Fähigkeiten.
- (4) Die Robustheit des Systems. Sie betrifft die Fähigkeit des Systems, mit Fehlern einzelner Agenten fertig zu werden.
- (5) Die Redundanzfreiheit von Aktionen. Sie besagt, dass es nur wenig redundante Aktionen gibt.
- (6) Die Nicht-Persistenz von Konflikten. Sie besagt, dass es nur wenige Deadlocks gibt.

| Definition <i>Kooperationssituation</i>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                          |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <p>Mehrere Agenten kooperieren oder befinden sich in einer Kooperationssituation, wenn eine der beiden folgenden Bedingungen erfüllt ist:</p> <p>(j) Durch das Hinzufügen eines neuen Agenten kann die Performanz der Gruppe merklich vergrößert werden.</p> <p>(k) Die Aktionen der Agenten tragen dazu bei potentielle oder aktuelle Konflikte zu vermeiden oder zu lösen.</p> |

Die erste Bedingung stellt ein Unterscheidungskriterium dar. Wird die Performanz der Gruppe durch einen neuen Agenten merklich, d.h. messbar vergrößert, dann ist dies ein Zeichen für die Kooperation in der Gruppe. In diesem Fall spricht man speziell davon, dass die Agenten *kollaborieren* oder sich in einer *Kollaborationssituation* befinden. Das Ziel bei der Vergrößerung der Performanz kann konkret die Erhöhung eines Leistungsparameters sein. Im Prinzip ist das Ziel aber

letztlich das Überleben, d.h. das Erhalten einer Art, eines Ökosystems, einer Gruppe oder einzelner Mitglieder einer Gruppe.

Das Hinzufügen neuer Agenten kann negative Folgen für das Funktionieren der Gruppe haben. Nach der zweiten Bedingung versucht dann die Gruppe die Verminderung der individuellen und kollektiven Performanz durch kooperative Aktionen zu begrenzen, z.B. durch Verhinderung, Einführung von Konfliktlösungsmechanismen, Aufbau von Organisationen für Produktion und Ressourcentransport oder einfach durch die Bildung von Schlangen. In diesem Fall liegt eine *Konfliktlösungssituation* vor.

Kollaborationssituationen und Konfliktlösungssituationen sind in der Realität oft eng miteinander verbunden. Wenn Probleme für das Überleben auftauchen macht es die Vergrößerung der Performanz, also eine Kollaborationssituation, möglich in einer schwierigen Umgebung besser zu überleben. In ähnlicher Weise macht es die Vermeidung von Konflikten, also eine Konfliktlösungssituation, den Mitgliedern einer Gruppe möglich zu überleben oder die Performanz zu verbessern im Vergleich zu einem System ohne Koordination.

Durch diese Definition der Kooperation vom Standpunkt des externen Beobachters aus ist es möglich eine Kooperationssituation objektiv durch die Verbesserung der Performanz zu charakterisieren ohne Bewußtseinsvorgänge in den Agenten zu betrachten. Damit lässt sich *intentionale Kooperation* als eine Kooperationssituation definieren, in der die Agenten die Intention zur Kooperation haben, dagegen *reaktive Kooperation* als eine Kooperationssituation, bei der die Agenten nicht die Intention haben, aber ihr kollektives Verhalten eines der beiden Kriterien der Definition erfüllt.

Reaktive Kooperation setzt keine Repräsentation der Welt oder anderer Agenten in den Agenten voraus, ebensowenig Wissen über die Folgen von Aktionen und auch nicht Wissen über die Anwesenheit anderer Agenten.

### **2.4.3. Steigerung der Überlebensfähigkeit**

Überlebensindikatoren spiegeln die Fähigkeit eines Individuums oder einer Gruppe zur Erhaltung ihrer funktionalen Einheit wider, wenn sie Kräften ausgesetzt sind, die auf die Zerstörung dieser Einheit abzielen. Zwei Arten des Überlebens können unterschieden werden: das individuelle Überleben und das kollektive Überleben. Das erste ist einfach festzustellen, das zweite lässt sich schwerer verifizieren und definieren. Es gibt zwei Möglichkeiten der Definition kollektiven Überlebens: Überleben aller Mitglieder einer Gruppe oder Überleben der Organisation, die durch die Ansammlung von Agenten entstanden ist.

Kooperationsmechanismen, auch einfacher Art, können die individuelle und kollektive Überlebensfähigkeit von Agenten steigern. Das klassische Beispiel dafür sind die Raubtiere, die in Rudeln leben und jagen, z.B. Wölfe oder Löwen. Indem das kollektive Überleben gesteigert wird, wird auch das individuelle Überleben der Gruppenmitglieder gesteigert.

### **2.4.4. Verbesserung der Performanz**

Performanzindikatoren drücken die Fähigkeit von Agenten oder Gruppen von Agenten zur Ausführung von Aufgaben aus, die ihnen von außen gestellt wurden. Der Beobachter, der die Performanz beurteilt, kann ein Mitglied der Gruppe sein oder ein Externer. Die Definition der Performanzindikatoren ist an der Aufgabenstellung orientiert.

Die Performanz kann durch Kooperation verbessert werden. Dies ist auch bei einfachen reaktiven Agenten der Fall, bei denen jedes einzelne Individuum die gestellte Aufgabe erfüllen kann. Ein

Beispiel dafür bildet eine Gruppe explorativer Roboter, bei denen eine Vergrößerung der Anzahl nur eine lineare Steigerung der Performanz bringt, während die Kooperation einen größeren Effekt hat.

Die Verstärkung der Fähigkeiten der einzelnen Agenten durch Kooperation kann sowohl *quantitativ* als auch *qualitativ* sein. Quantitative Verstärkung der Fähigkeiten bedeutet Vervielfachung wie im Beispiel der explorativen Roboter. Qualitative Verstärkung bedeutet, dass damit Aktionen möglich werden, die ein einzelner Agent nicht ausführen kann, weil für diese Aktionen die Fähigkeiten mehrerer Spezialisten erforderlich sind.

Quantitative Verstärkung kann auch qualitativ neue Ergebnisse bewirken. Dies ist der Fall, wenn durch die Kooperation von Agenten mit gleichen Fähigkeiten eine Aktion möglich wird, die ein einzelner Agent nicht ausführen kann. Man spricht dann von einem *Masseneffekt*. Es wird eine „kritische Masse“ an Agenten benötigt, um das gewünschte Ergebnis zu erzielen.

Umgekehrt kann sich auch eine qualitative Verstärkung quantitativ auswirken. Dies ist dann der Fall, wenn sich durch das Hinzufügen eines Agenten mit neuen Fähigkeiten zu einem System die Performanz des Systems verbessert ohne eine neue Qualität zu erhalten. Man spricht in diesem Fall von einem *Katalyse*-Phänomen.

Die Verstärkung durch Kooperation kann also quantitativ und qualitativ sein und die dadurch erzielte Wirkung kann ebenfalls beides sein. Die folgende Tabelle 2.2 fasst diese Beziehungen zusammen.

| Vorteile<br>Verstärkung | Qualitativ                | Quantitativ                |
|-------------------------|---------------------------|----------------------------|
|                         | Qualitative Kollaboration | Katalyse                   |
|                         | Masseneffekt              | Quantitative Kollaboration |

Tabelle 2.2

### 2.4.5. Konfliktlösung

Konflikte entstehen beim Zugang zu begrenzten Ressourcen, d.h. wenn mehrere Agenten gleichzeitig eine Ressource haben möchten, die nicht geteilt werden kann oder bei der die Teilung den Anteil der einzelnen Agenten gegenüber dem, was sie haben möchten, verringert.

Konfliktsituationen sind zugleich die Ursache und die Wirkung von Interaktionen. Sie entstehen aus Mangel an Ressourcen und sie erfordern zusätzliche Interaktionen um einen Ausweg aus dem Konflikt zu finden, sei es durch Verhandlungen, Schlichtung, Regulierung, Wettbewerb oder Gewaltanwendung.

Es gibt zwar reine Konfliktsituationen wie auch das Gegenteil, reine Synergie-Situationen, aber die meisten natürlichen Situationen haben Merkmale von beiden Typen. Komplexe Systeme basieren auf der Integration beider Situationstypen. Die Synergie-Situationen sorgen für die Verbesserung der Performanz und die Konfliktsituationen bewirken die Selektion der betroffenen Agenten.

*Konfliktindikatoren* drücken die Anzahl der an einem Konflikt beteiligten Agenten oder die Anzahl der Individuen, die gleichzeitig Zugang zur selben Ressource haben wollen, aus.

## 2.5. Methoden der Kooperation

### 2.5.1. Gruppierung und Vervielfältigung

Gruppierung entsteht durch das physische Zusammenrücken von Agenten, wodurch eine mehr oder weniger homogene Einheit im Raum entsteht, oder durch die Bildung eines Kommunikationsnetzes, das es mehreren Agenten ermöglicht sich so zu verhalten, als ob sie sich physisch nebeneinander befinden würden.

Ein Gruppe kann als etwas betrachtet werden, das wie ein verteilter Organismus handelt. Es gibt in der Gruppe Spezialisten für die Nahrungssuche, für die Verteidigung und für die Jagd. Es gibt Individuen, die für die Reproduktion sorgen, und solche, die Leitfunktion haben und Wohnplätze für die Gruppe ausfindig machen. Alle Gruppenmitglieder handeln für ihr eigenes Wohl und gleichzeitig für das der Gruppe.

Die *Vervielfältigung*, d.h. das einfache quantitative Anwachsen der Gruppe, hat beträchtliche Vorteile sowohl für die Performanz als auch für die Zuverlässigkeit der Gruppe.

### 2.5.2. Kommunikation

Kommunikation erweitert die perzeptiven Fähigkeiten der Agenten, denn es ermöglicht ihnen von dem Wissen und Know How anderer Agenten zu profitieren. Kommunikation ist unentbehrlich für Kooperation. Bei kognitiven Agenten findet Kommunikation durch das Verschicken von Nachrichten statt, bei reaktiven Agenten erfolgt sie durch Aussenden von Signalen in die Umgebung. Kommunikation ist ein wichtiges Hilfsmittel für die Verteilung von Aufgaben und die Koordination von Aktionen.

### 2.5.3. Spezialisierung

Durch Spezialisierung passt sich ein Agent immer mehr an seine Aufgaben an. Diese Anpassung hat in der Regel die Konsequenz, dass andere Aufgaben weniger gut ausgeführt werden können. Spezialisierung kann, aber muss nicht durch eine a priori-Entscheidung erfolgen, vielmehr können sich Agenten, die anfangs Alleskönner sind, an spezielle Aufgaben allmählich anpassen.

Spezialisierung dient der Gruppe zur Steigerung ihrer Performanz. Sie ist unter Umständen dadurch auch in der Lage qualitativ neue Aufgaben zu lösen, aber meistens geht es darum, Aufgaben, die schon bisher lösbar waren, besser zu lösen. Damit ist die Gruppe im Konkurrenzkampf mit anderen Gruppen begünstigt.

### 2.5.4. Kollaboration durch Teilung von Aufgaben und Ressourcen

Kollaboration besteht in der Zusammenarbeit mehrerer Agenten zur Lösung einer gemeinsamen Aufgabe. Kollaborationstechniken ermöglichen es Agenten Aufgaben, Informationen und Ressourcen untereinander aufzuteilen. Dafür gibt es verschiedene Möglichkeiten. In kognitiven MAS werden Aufgaben nach dem Prinzip von Angebot und Nachfrage verteilt. Dies kann auf zwei verschiedene Arten erfolgen, entweder durch zentralisierte Verteilung, bei der ein Koordinierungsagent (Broker) die Verteilung steuert, oder durch dezentralisierte Verteilung ohne eine zentrale Instanz (reiner Marktbetrieb). Für die technische Durchführung gibt es zwei Ansätze: das Bekanntschaftsnetzwerk, in dem die Agenten über die Fähigkeiten der anderen Bescheid wissen, und das Marktkonzept, bei dem Protokolle für Angebot und Nachfrage benutzt werden. Auch bei reaktiven Agenten ist eine Zuordnung von Aufgaben zu Agenten sowie eine Spezialisierung von Agenten für bestimmte Aufgaben möglich.

### **2.5.5. Koordination von Aktionen**

Koordinationsaufgaben fallen an, wenn mehrere autonome Agenten gemeinsam ein Problem lösen sollen. Sie sind nicht produktiv, aber sie sind notwendig um die rein produktiven Aufgaben bestmöglich zu organisieren.

### **2.5.6. Konfliktlösung durch Schlichtung und Verhandlung**

Durch Konfliktlösung sollen Konflikte begrenzt und Individuen und Gesellschaften geschützt werden. Dadurch soll verhindert werden, dass die Performanz eines Systems vermindert wird.

In MAS wirkt der Korpus der sozialen Regeln wie eine Menge von Verhaltensconstraints, die von den Agenten mehr oder weniger internalisiert wurden. Diese Regeln können nur auf hoch entwickelte kognitive Agenten angewendet werden, die eine Art „freien Willen“ haben und das Pro und Contra ihrer Handlungen abwägen können.

Ein Konflikt über Ziele oder Ressourcen kann bei kognitiven Agenten durch einen Schlichter beigelegt werden oder durch direkte bilaterale Verhandlungen zwischen den Agenten. Reaktive Agenten haben wegen ihrer einfachen Struktur nicht die Möglichkeit Verhandlungen zu führen. Soziales Verhalten ist bei ihnen gewissermaßen fest verdrahtet, was sie daran hindert die vom Entwerfer gesetzten Grenzen zu überschreiten.

## **2.6. Organisationen und Kooperation**

### **2.6.1. Das System der Kooperationsaktivitäten**

Kooperationsmethoden hängen eng mit Funktionen zusammen, d.h. für bestimmte Funktionen werden bestimmte Methoden benötigt. Die verschiedenen Kooperationsmethoden und ihr Zusammenhang sind in Abbildung 2.2 dargestellt.

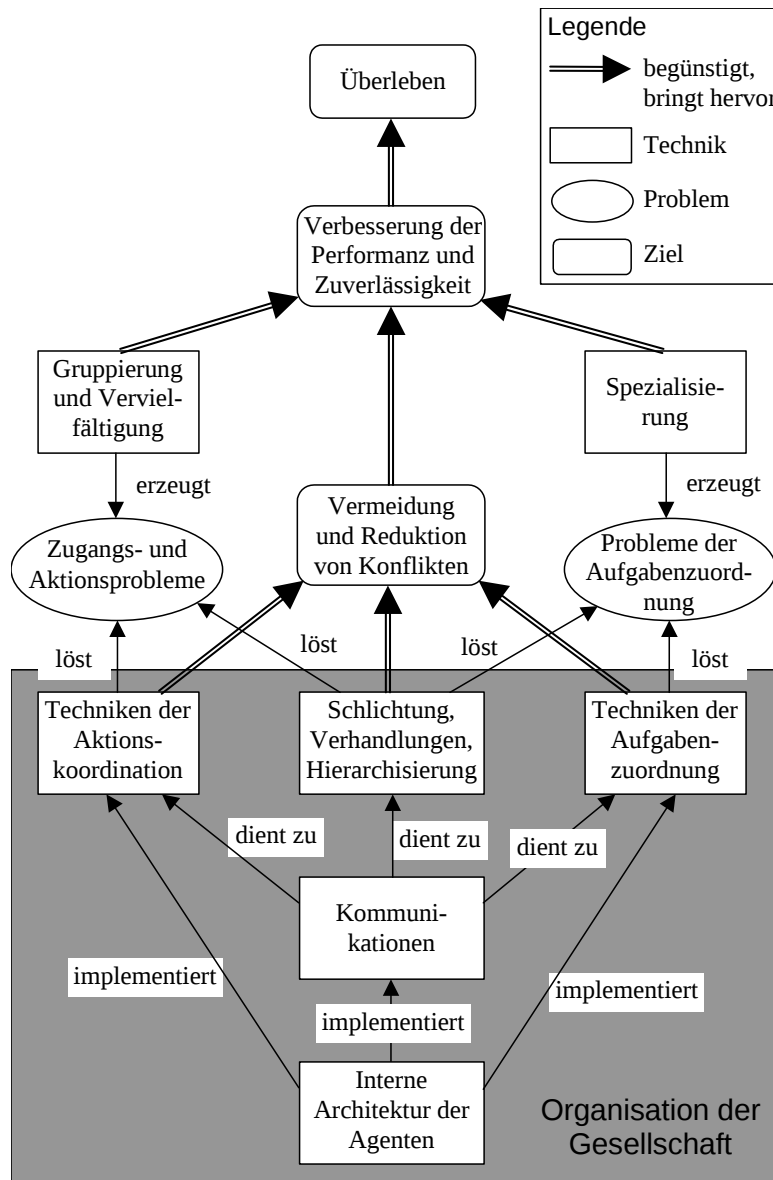


Abbildung 2.2

Die verschiedenen Techniken müssen innerhalb von Organisationen strukturiert werden. In ihnen ist beschrieben, wie die Agenten zueinander positioniert sind und wie sie zusammenarbeiten können. Die Organisationen werden vom Entwerfer vordefiniert oder entstehen durch die Interaktionen zwischen den Agenten. Sie haben sowohl positive als auch negative Konsequenzen für die Agenten.

### 2.6.2. Vorteile

Kooperation bietet den Agenten eine Reihe von Vorteilen, die teils individuell sind, etwa die Steigerung der individuellen Produktivität oder individuellen Überlebenswahrscheinlichkeit, und teils kollektiv, etwa das Lösen von Aufgaben, die nur durch Kooperation lösbar sind. Im Einzelnen können folgende Punkte als Vorteile betrachtet werden:

- (1) Ausführen von Aufgaben, die ein Einzelner nicht ausführen kann.
- (2) Verbesserung der Produktivität jedes Agenten.
- (3) Vermehrung der in einer bestimmten Zeit ausgeführten Aufgaben oder Verminderung der für eine Aufgabe benötigten Zeit.

#### (4) Verbesserung der Ressourcennutzung.

Es gibt eine Art Trade-off zwischen den individuellen und kollektiven Interessen. Die Aktionen der Agenten tragen zur kollektiven Performanz bei und diese garantiert umgekehrt, dass mehr Individuen überleben können. Dieser Vorteil wird aber damit bezahlt, dass der Handlungsspielraum der einzelnen Agenten eingeschränkt ist. Insbesondere wenn sich die Agenten spezialisieren, wird die Performanz der Gesellschaft gesteigert, zugleich aber werden die Möglichkeiten des einzelnen Agenten immer weiter eingeschränkt. Er wird von der Gesellschaft immer mehr abhängig. Dies ist typisch für eine arbeitsteilige Gesellschaft mit hochentwickeltem Spezialistentum.

### 3. Multiagenten-Organisationen

#### 3.1. Was ist eine Organisation?

##### Definition Organisation

Eine *Organisation* ist eine Anordnung von Beziehungen zwischen Komponenten oder Individuen, die eine Einheit oder ein System erzeugen, die bzw. das mit Eigenschaften ausgestattet ist, die auf der Ebene der Komponenten oder Individuen nicht vorliegen. Die Organisation verknüpft wechselseitig verschiedene Elemente, Ereignisse oder Individuen, die dadurch Komponenten eines Ganzen werden. Sie garantiert ein relativ hohes Maß an wechselseitiger Abhängigkeit und Zuverlässigkeit und gibt damit dem System die Möglichkeit eine gewisse Zeit lang Bestand zu haben, auch bei zufälligen Störungen (Morin, 1977).

Zwei Aspekte sind an Organisationen besonders wichtig. Der erste ist, dass sie die Beziehungen zwischen den Agenten unterstützen und zugleich diese Beziehungen manifestieren. Der zweite ist, dass der Begriff *Organisation* sowohl den Prozess des Aufbaus einer Struktur als auch das Ergebnis dieses Prozesses beschreibt. Der zweite Aspekt kennzeichnet Organisationen als dynamische Gebilde.

##### 3.1.1. Organisationale Strukturen und konkrete Organisationen

Trotz ihrer inhärenten Dynamik gibt es bei Organisationen auch etwas Persistentes, das unveränderlich ist. Dies wird *organisationale Struktur* oder kurz *Struktur* genannt. Die organisationale Struktur charakterisiert eine Klasse von Organisationen auf abstrakter Ebene. Im Gegensatz dazu bezeichnet der Begriff *konkrete Organisation* oder kurz *Organisation* eine mögliche Instanz einer organisationalen Struktur. Zur Beschreibung einer Organisation gehört die Gesellschaft von Entitäten, die an der Organisation beteiligt sind, und alle Verbindungen zwischen ihnen.

Organisationale Strukturen können durch zwei Angaben definiert werden:

- (1) Eine Menge von Klassen von Agenten, die durch die den Agenten zugeordneten Rollen charakterisiert sind.
- (2) Eine Menge von abstrakten Beziehungen zwischen diesen Rollen.

Zur Beschreibung einer konkreten Organisation muss für jede Agentenklasse eine Menge von Agenten angegeben werden zusammen mit den konkreten Beziehungen zwischen den Agenten, d.h. es ist eine Instanz der organisationalen Struktur zu definieren.

### 3.1.2. Organisationsebenen

Man kann MAS auf unterschiedliche Weise betrachten, nämlich entweder als eine Menge von interagierenden Einheiten oder als ein Ganzes mit bestimmten Eigenschaften. So erscheint ein MAS als zu verschiedenen Ebenen gehörend. Auf der höheren Ebene kann das MAS wiederum Teil eines größeren Ganzen sein usw. Diese Betrachtungsweise führt zu einer hierarchischen Anordnung von Ebenen.

Einheiten auf einer niederen Ebene, die als nicht weiter zerlegbar betrachtet werden, werden als *elementare Einheiten* bezeichnet und Organisationen, die nicht Komponenten noch höherer Organisationen sind, als *allgemeine MAS*. Man unterscheidet ferner zwischen *individuellen Organisationen* oder *individuellen Entitäten* und *kollektiven Organisationen* oder *kollektiven Entitäten*. Erstere können als Individuen betrachtet werden, d.h. als von ihrer Umgebung klar abgegrenzte und unterscheidbare Einheiten, Letztere dagegen nicht.

Agenten sind in erster Linie individuelle Entitäten, dagegen MAS in erster Linie kollektive Entitäten. Ein Agent, der seinerseits aus einer Menge einfacherer Agenten zusammengesetzt ist, kann aber auf der höheren Ebene als individuelle und auf der niedrigeren Ebene als kollektive Entität betrachtet werden.

## 3.2. Funktionale Analyse

### 3.2.1. Die Funktionen einer Organisation

Die Rollen beschreiben die Positionen der Agenten innerhalb einer Organisation zusammen mit den Aktivitäten, die von ihnen erwartet werden, damit die Organisation ihre Ziele erreicht. Damit charakterisieren sie die Funktionen, die die Agenten erfüllen, unabhängig von ihrer internen Struktur.

Die Rollen sind nicht notwendigerweise fest, sondern können sich mit der Dynamik der Gesellschaft entwickeln. Ein Agent kann verschiedene Rollen übernehmen, und diese charakterisieren die verschiedenen Dienste, die er innerhalb der Organisation ausführen kann, und bestimmen seine Position in Beziehung zu anderen Agenten. Die Rollen werden in Subsystemen zusammengefasst, d.h. in Unterorganisationen der Hauptorganisation, die durch ihre Funktionen charakterisiert sind. Die sechs Hauptfunktionen einer Organisation sind die Folgenden.

- (1) Die *Repräsentationsfunktion*. Hierzu gehört eine Klasse von Funktionen, mit denen die Umwelt und andere Organisationen modelliert werden und Ereignisse gespeichert werden, die die Organisation betreffen. Die Repräsentationsfunktion ist besonders gut in individuellen kognitiven Organisationen (d.h. in kognitiven Agenten) entwickelt, denn sie haben eine interne Repräsentation ihrer Umgebung, die sie manipulieren können und die ihnen das Planen von Aktionen erlaubt. In kollektiven Organisationen kann die Repräsentationsfunktion über die ganze Gruppe von Agenten verteilt sein. Mit der Repräsentationsfunktion ist die Rolle des *Archivars* verknüpft.
- (2) Die *Organisationsfunktion*. Hierzu gehört alles was das Management der Aktivitäten einer Organisation betrifft, im Besonderen Planung, Zuordnung und Überwachung von Aufgaben, Koordination von Aktionen und Verwaltung von Verpflichtungen. Mit der Organisationsfunktion sind zahlreiche Rollen verknüpft, insbesondere die des *Kunden*, *Vermittlers*, *Planers* und *Koordinators*.
- (3) Die *conative Funktion*. Sie bezieht sich auf die Quellen, Beschränkungen und die Auswahl von Aktivitäten von Organisationen. Die Funktion teilt sich in drei Unterfunktionen auf: die *Motiva-*

*tionsfunktion*, die beschreibt, wie Ziele und Tendenzen gebildet werden, ob in Verbindung mit internen oder externen Anforderungen, die *Constraintbildungsfunktion*, die Standards einer Organisation und Restriktionen bei der Ausführung von Aktionen beschreibt, und die *Entscheidungsfunktion*, die die Auswahl und Bewertung von Zielen und Aufgaben regelt. Zu jeder Unterfunktion gehören Rollen, die bekannteste ist die Rolle des *Entscheiders*, die mit der Entscheidungsfunktion verknüpft ist.

- (4) Die *Interaktionsfunktion*. Sie stellt die Verbindung zwischen einer Organisation und ihrer Umgebung her. Sie verwaltet die Interaktionen mit der Umgebung und die Kommunikation mit anderen Organisationen. Sie besteht aus zwei Unterfunktionen, der perzeptiven Funktion und der exekutiven Funktion. Mit der Interaktionsfunktion sind die Rollen der *Interface-Agenten* verknüpft (*Beobachter*, *Ausführer* und *Kommunikator*).
- (5) Die *produktive* oder *operative Funktion*. Sie umfasst die elementaren Aktivitäten, die zur Lösung eines Problems oder zur Ausführung einer Arbeit notwendig sind. Die Funktion ist anwendungsspezifisch, deshalb kann ihr keine eindeutig definierte Rolle zugeordnet werden.
- (6) Die *vegetative* oder *erhaltende Funktion*. Sie betrifft die Erhaltung der Struktur der Organisation und der Agenten, den Erwerb und die Pflege von Ressourcen und die Aufgaben, die zur Pflege und Reproduktion der Organisation notwendig sind.

Alle diese Funktionen sind miteinander verknüpft, alle sind notwendig für das Funktionieren einer Organisation. Der systematische Zusammenhang zwischen den Funktionen ist in Abbildung 3.1 dargestellt.

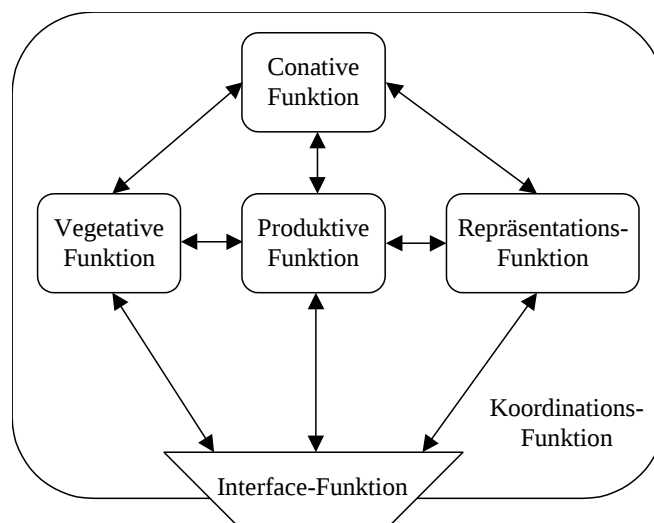


Abbildung 3.1

### 3.2.2. Dimensionen der Analyse

Die Funktionen einer Organisation können mit Bezug auf fünf verschiedene Dimensionen betrachtet werden.

- (1) Die *physikalische Dimension* ( $\phi$ ). Sie bezieht sich auf die Implementierung und Architektur der Organisation und ihre personelle Ressourcen. Sie gibt Antwort auf die Frage, wie eine Aufgabe explizit in einer Organisation ausgeführt wird.
- (2) Die *soziale Dimension* ( $\sigma$ ). Sie betrifft den Platz und damit die Rolle einer Organisation innerhalb einer Organisation auf höherer Ebene. Dazu gehört auch der soziale Aspekt der Aktivitäten

der Organisation, d.h. ihre Fähigkeit den Bedürfnissen der Organisation auf höherer Ebene, in die sie eingebettet ist, zu entsprechen und ihren Fortbestand zu fördern.

- (3) Die *relationale Dimension* ( $\rho$ ). Sie bezieht sich auf die Interaktionen und den Austausch, den eine Organisation mit anderen Organisationen auf der gleichen Ebene haben kann, mit ihren Kommunikationen und deren Koordination. Zu ihr gehören die Interaktionsprotokolle.
- (4) Die *Umgebungsdimension* ( $\chi$ ). Sie betrifft die Fähigkeiten einer Organisation zu handeln, wahrzunehmen und zu schlussfolgern in Bezug auf die umgebende Welt.
- (5) Die *personale Dimension* oder *Dimension des Selbst* ( $\pi$ ). Sie repräsentiert alles, was zum Wesen einer Organisation gehört, insbesondere zu ihren „Metaaspekten“: Repräsentation des Selbst, Wissenserwerb, Erhaltung der Struktur und autopoietische Aktivitäten.

Abbildung 3.2 stellt die fünf Dimensionen in einem Diagramm dar. Die relationale und die Umgebungsdimension liegen in der selben Ebene, weil die Beziehungen des Agenten zu anderen und zu seiner Umgebung als gleichrangig betrachtet werden. Die soziale und die physikalische Dimension sind einander entgegengesetzt und zugleich komplementär. Dies wird durch Abbildung 3.3 illustriert. Die physikalische Dimension von Organisationen einer Ebene überlappen sich mit der sozialen Dimension von Organisationen auf einer Ebene tiefer.

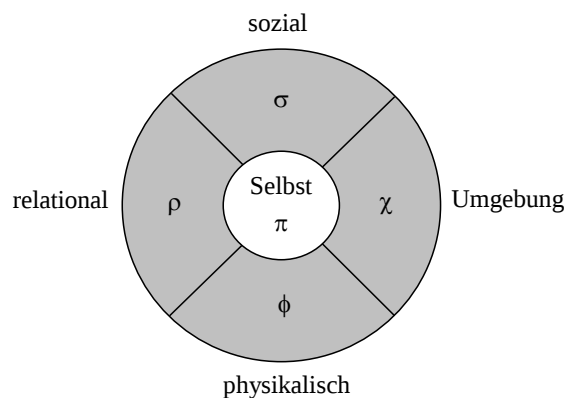


Abbildung 3.2

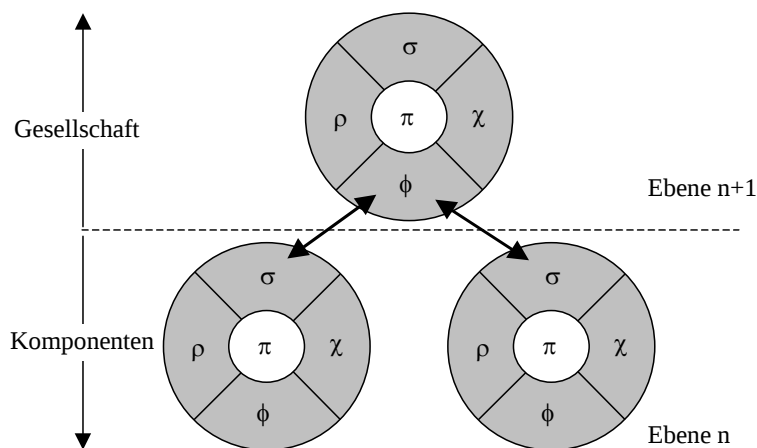


Abbildung 3.3

Die personale Dimension ist die Nabe des Ganzen, das reflexive Zentrum aus dem heraus sich der Agent selbst als ein Subjekt konstruieren kann, das unter anderen Agenten handelt.

### 3.2.3. Dimensionale Analyse einer Organisation

Die Dimensionen und Funktionen einer Organisation sind gewissermaßen orthogonal zueinander. Deshalb kann man mit beiden eine Matrix bilden, in der eine Organisation detailliert beschrieben werden kann. Sie ist in Tabelle 3.1 dargestellt. Nicht alle MAS haben alle Funktionen oder lassen sich in allen Dimensionen beschreiben, aber als Systematik der Untersuchung von MAS ist die Tabelle brauchbar.

Man kann verschiedene Arten von Organisationen danach klassifizieren, welche der Einträge in Tabelle 3.1 tatsächlich realisiert sind, welche optional sind und welche fehlen. Tabelle 3.2 zeigt ein Gitter für eine typische reaktive Organisation, bei der die soziale und relationale Dimension nicht existiert.

|                  | Physikalisch | Sozial | Relational | Umgebungs- | Personal |
|------------------|--------------|--------|------------|------------|----------|
| Repräsentations- | —            | —      | —          | —          | —        |
| Organisations-   | ●            | —      | —          | ●          | —        |
| Conativ          | ●            | —      | —          | ●          | ×        |
| Interaktions-    | ●            | —      | —          | ●          | —        |
| Produktiv        | ●            | —      | —          | ●          | —        |
| Vegetativ        | ●            | —      | —          | ●          | —        |

Legende: Vorhanden: ●      Optional: ×      Nicht vorhanden: —

*Tabelle 3.2*

Tabelle 3.3 zeigt ein Analysegrid für eine rein kommunikative Organisation, z.B. einen rein kommunikativen kognitiven Agenten.

|                  | Physikalisch | Sozial | Relational | Umgebungs- | Personal |
|------------------|--------------|--------|------------|------------|----------|
| Repräsentations- | ●            | ●      | —          | —          | ●        |
| Organisations-   | ●            | ×      | ●          | —          | ×        |
| Conativ          | ●            | ×      | ●          | —          | ×        |
| Interaktions-    | ●            | —      | ●          | —          | —        |
| Produktiv        | ●            | ×      | ×          | ×          | —        |
| Vegetativ        | —            | —      | —          | —          | —        |

Legende: Vorhanden: ●      Optional: ×      Nicht vorhanden: —

*Tabelle 3.3*

Tabelle 3.4 zeigt ein Analysegrid, das eine Organisation charakterisiert, die einem realen sozialen Lebewesen ähnlich ist.

Tabelle 3.5 zeigt eine vollausgeprägte Organisation. Nur die produktive Funktion kann in unterschiedlichem Umfang entwickelt sein, je nach Typ. Es handelt sich also um eine perfekte Organisation. Man kann sie als Repräsentation der menschlichen Gesellschaft betrachten.