

Im engeren betrachten wir hier nur die syntaktische und semantische Analyse, also das Problem, für kommunizierte Sätze eine Bedeutungsrepräsentation (in symbolischer Form) zu erzeugen. *Wissen über die Sprache* betrifft dann den syntaktischen Aufbau kommunizierter Nachrichten wie auch die Bedeutung der einzelnen Wörter und daraus aufgebauter größerer Einheiten (Satzteile und Sätze).

Eine erste Frage ist: Was ist die funktionale Struktur der Satzkonstituenten? Dazu braucht man als Kompetenz die Kenntnis von Syntax-Regeln, formalisiert mit Hilfe von Ersetzungsregeln einer Grammatik, und als Performanz die Fähigkeit, die Regeln anzuwenden; dazu dient ein Parser. Sog. Parse-Trees (Syntaxbäume) setzen die Satzkonstituenten zueinander in Beziehung: an den nichtterminalen Knoten weisen sie die syntaktischen Kategorien (Artikel, Nomen, Verb etc.) aus und ordnen an den terminalen Knoten (Blättern) die kommunizierten Wörter ein; damit wird die syntaktische Struktur explizit. Dieser Prozess kann in eine (z.B. aufgrund funktionaler Mehrdeutigkeiten) exponentielle Suche resultieren, die mit Techniken der heuristischen Suche eingedämmt werden muss. Die syntaktischen Kategorien wie später auch der Zugriff auf Wortbedeutungen sind über ein Lexikon (Dictionary) erhältlich.

Eine zweite Frage ist, wie sich Mehrdeutigkeiten in sprachlich kommunizierten Nachrichten ausräumen lassen. Dazu gehören wie in Teil 1 erwähnt Mehrdeutigkeiten der funktionalen Struktur ("Die Keule fing Petra"), der Referenz ("Müllers sahen die Alpen, während sie nach Italien flogen") und des Wortsinns ("Hans bringt sein Geld auf die Bank"). Wie leicht erkennbar ist, ist dazu bereits *Wissen über die Welt* heranzuziehen, das geeignet in der Wissensbasis vorzuhalten ist. Die Auflösung zum Beispiel der referentiellen Mehrdeutigkeit bei dem Satz "Müllers sahen die Alpen, während sie nach Italien flogen" (worauf bezieht sich nämlich das "sie"?) basiert auf Weltwissen: Zwar kann Familie Müller (in einem Flugzeug) nach Italien fliegen, aber nicht die Alpen.

Die dritte Frage betrifft die Konvertierung disambigierter (eindeutig gemachter) Syntaxrepräsentation in Symbole, die mit den Mitteln der Logik und Inferenz verarbeitbar sind. So erfordert – beim Ansatz der kompositionellen Semantik – der Aufbau einer semantischen Repräsentation für die Phrase 'der rote Klotz', dass eine Zuordnung von Bedeutungen zu den einzelnen Wörtern (zu finden über das Lexikon) vorgenommen wird, die die Phrase in eine symbolische Darstellung überführt, etwa wie:

```
(retrieve-val '?x '(and (inst ?x block) (color ?x red)))
```

Mit `retrieve-val` wäre dann in einer Beschreibung der Umgebungssituation oder durch Abgleich mit Situationsperzepten (per Kamera-Auge) ein entsprechendes Bezugsobjekt aufzufinden (Referenzsemantik) usw., bevor schließlich die Repräsentation eines ganzen Satzes assertiert werden kann.

Wissen über die Situation wäre zwingend erforderlich, um einen Satz wie "nimm die linke Scheibe und schraube sie dort an" zu repräsentieren: Hier wäre das Wort "linke" nur durch Einblick der beiden kommunizierenden Agenten in eine gemeinsame Umgebungssituation und das Wort "dort" nur durch weitere situative Information – etwa eine perzipierte Zeigegeste – auswertbar, um die Bedeutung zu verstehen. Als Herausforderung stellt sich dabei die Koordination multimodaler Eingaben, insbesondere die zeitliche Kopplung der beiden Modalitäten natürlicher Sprache und Gestik, die technisch als nebenläufige Sprach- und Gestenperzepte auf getrennten Kanälen registriert und für die Steuerung von Anwendungen integriert und interpretiert werden müssen.

Von Agenten zu Multiagentensystemen

In diesem Abschnitt wird die Konzeption des Agenten noch einmal detailliert betrachtet und erweitert, bis hin zu kooperierenden Kollektiven künstlicher Agenten in sog. Multiagentensystemen, die möglicherweise perspektivreichste neuere Richtung der KI. Als Modell dient wieder die Vorstellung, dass Agenten über irgendeine Form der Sensorik in ihre Umgebung gekoppelt sind, sie also wahrnehmen (PERCEIVE), z.B. um ihren in einer Wissensbasis gespeicherten Wissensstand zu aktualisieren oder Nachrichten zu empfangen oder die Ausführungen von Handlungen zu beobachten, und dass sie über eine Aktorik auf ihre Umgebung Einfluss nehmen können, z.B. Nachrichten aussenden oder Aktionen ausführen (ACT). Hinzukommen kann die Möglichkeit, dass Agenten durch irgendeine Form der kognitiven Verarbeitung (REASON) Entscheidungen über die Auswahl von Aktionen treffen, z.B. durch Bewertung der Situation oder durch planvolle Zielverfolgung.

Je nachdem, ob eine ausgeführte Aktion in direkter Reaktion auf sensorische Eingaben erfolgt (PERCEIVE–ACT) oder erst nach einer weitergehenden internen Verarbeitung (PERCEIVE–REASON–ACT), spricht man auch von *reaktiven* bzw. *deliberativen* Agenten. Reaktive Agenten arbeiten also nach einem Stimulus-Response-Prinzip der unmittelbaren Zuordnung zwischen den eingehenden Daten und den Aktionen (zum Beispiel anhand von Regeln oder Tabellen), während deliberative Agenten *planen*, also zuerst Handlungen im Hinblick auf bestmögliche Zielerreichung evaluieren. Mischformen – also Agenten mit reaktiven wie auch deliberativen Fähigkeiten – sind möglich. Der Abarbeitungszyklus wird zuweilen auch in den drei Phasen SENSE–COMPUTE–ACT oder ähnlich beschrieben, wobei COMPUTE sich sowohl auf das unmittelbare Zuordnen ("look-up") von Aktionen als auch auf die Entscheidung für eine Handlungsauswahl (REASON) beziehen kann. Prinzipiell können die drei Phasen nebeneinander arbeiten.

Die Modellvorstellungen von Agenten sind mittlerweile in vieler Hinsicht umfassender als das Modell des "general intelligent agent" von Newell/Simon, das mit den Stichworten interne Repräsentation, Wissensebene und Rationalitätsprinzip früher angesprochen wurde. Unter "Agenten" werden heute vielfach hardware- oder auch software-basierte Systeme verstanden, die als mehr oder weniger unabhängige Einheiten – autonom – innerhalb größerer Systeme agieren. Solche Systeme werden bereits in vielen Disziplinen betrachtet, nicht nur in der KI, sondern als Modellierungsmittel z.B. auch in der Biologie, den Wirtschafts- und den Sozialwissenschaften. Der Einsatz von Agenten-Techniken interessiert uns in der KI besonders im Hinblick auf Systeme, die in einer dynamischen, sich verändernden Umgebung eingesetzt werden und in größerem Umfang Anteile von Lösungen eigenständig erarbeiten können.

In solchen Zusammenhängen zeichnen sich unterschiedlich stark gefasste Agentenbegriffe ab. In einem schwachen Sinn ist ein Agent ein System mit Eigenschaften der

- Autonomie (selbstgesteuertes Handeln ohne direkte Außenkontrolle)
- sozialen Fähigkeiten (Kommunikation und Kooperation mit anderen Agenten)
- Reaktivität (Verhalten in Erwiderung äußerer Stimuli)
- Proaktivität (zielorientiertes Verhalten und Initiative-Übernahme)

In der KI wird der Agentenbegriff oft stärker gefasst; hier werden einem Agenten zusätzlich "mentalistiche" Eigenschaften zugeschrieben, die mit Begriffen wie Wissen, Überzeugung, Motivation/Wunsch, Intention, Verpflichtung charakterisiert werden. Ein Beispiel ist die "Belief–Desire–Intention" (BDI)-Architektur für Agentensysteme. Die Auflistung solcher Begriffe bedeutet aber nicht, dass alle diese Eigenschaften grundsätzlich einbezogen werden.

Verteilung und Situiertheit

Einer der Ausgangspunkte für eine von dem Modell des "general intelligent agent" abweichende Perspektive ist Minsky's 1986 publizierte Theorie der "Society of Mind". Dieses Paradigma, das intelligentes Verhalten in der verteilten Tätigkeit vieler kleiner und noch kleinerer Systeme (genannt: Agenten) begründet sieht, führt offensichtlich zu einer andersartigen Vorstellung von Intelligenz. Auf der technischen Seite haben zudem die Versuche, immer komplexere wissensbasierte Systeme zu entwickeln, Nachteile zentralisierter "single-agent"-Architekturen enthüllt und die Konzipierung einer "Verteilten Künstlichen Intelligenz" (VKI) beflügelt. Bei Multiagentensystemen steht der Aspekt der aufgabenbezogenen Kooperation und des Wettbewerbs im Team unabhängiger (autonomer) Agenten im Vordergrund, bei welchen kein Agent eine globale Sicht des gesamten Problemlöseprozesses innehat, also keine zentrale Systemsteuerung vorliegt. Des Weiteren werden Lernfähigkeiten betrachtet, die im einzelnen Agenten oder in Multiagentensystemen verteilt zum Tragen kommen können, um eine bessere Anpassung an die Einsatzumwelt zu erzielen.

Eines der kritischsten Probleme in bisherigen Intelligenzmodellen der KI wie auch in vielen technischen Anwendungen liegt allerdings darin, dass das benötigte Weltwissen kaum jemals vollständig verfügbar bzw. modellierbar ist. Dies beruht auf der kontextuellen Variabilität und der Vielzahl von Situationen, mit denen ein intelligenter Agent konfrontiert sein kann. Komplexes Verhalten kann jedoch auch bei einfachen Agenten in Wechselwirkung mit einer komplexen Umwelt entstehen. Deshalb geht die Forschungsrichtung der "situierter KI" von der Erkenntnis aus, dass die Handlungsfähigkeit eines intelligenten Agenten entscheidend von seiner Verankerung in der aktuellen Situation abhängt.

Situiertheit bezieht sich auf die Fähigkeit eines intelligenten Systems, die aktuelle Situation in weitestgehendem Maße als Informationsquelle auszunutzen, um auch Aufgaben bewältigen zu können, für die kein komplettes Weltmodell vorliegt. Die Umwelt ist sozusagen ein äußerer Speicher, auf den bei Bedarf zugegriffen werden kann. Die Agenten sind sensorisch/aktorisch mit der Umwelt verkoppelt. Die Wechselwirkung von Agent und Umwelt geschieht damit in konkreten und nicht in abstrakten (modellierten) Situationen. Wichtig für den Agenten ist das Beherrschen situationsbezogener Reaktionen auf die Umwelt und nicht maximales (gespeichertes) Wissen über die Umwelt. Der Agent ist seiner Umwelt eingebettet ("situierter"), und sein Verhalten, seine Funktionalität erwächst ("emergiert") aus der Interaktion mit dieser Umwelt. Wenn solche Voraussetzungen gegeben sind, spricht man auch von einem *situierter Agenten*. Wie ein Agent eine Aufgabe ausführt, hängt sowohl von den Fähigkeiten ab, mit denen er ausgestattet ist, wie auch von Merkmalen der Umgebung, in denen er seine Aufgabe erbringt.

In der Robotik waren solche Überlegungen u.a. Ausgangspunkt für die sog. Schichten- oder *Subsumtionsarchitektur* des MIT-Robotikforschers Brooks, in der einfache reaktive Verhaltensweisen hierarchisch kombiniert werden. Grundlage dafür ist die Dekomposition des Gesamtverhaltens in einzelne, aufeinander aufbauende sog. Agenten-"Behaviors". Jede Schicht interagiert nur mit Teilaspekten der Umwelt, und jede Schicht kann die darunterliegende Schicht beeinflussen. Zum Beispiel dient die unterste Schicht dem Erkennen und Vermeiden von Hindernissen, die nächste der Bewegung in Richtung auf ein Zielobjekt und die darüberliegende Schicht dem Ergreifen des Objekts. Für die strategische Planung von Handlungen sind solche einfachen Architekturen aber nicht ausreichend; deshalb sind wie schon erwähnt hybride Architekturen entwickelt worden, die reaktive mit deliberativen Fähigkeiten kombinieren.

Softwareagenten

Diese oben skizzierten Ansätze haben nicht nur entscheidenden Einfluss auf die Entwicklung einer "kognitiven" Robotik gehabt, sondern auch auf Techniken für Software-Agenten, die zur Erfüllung ihrer Aufgaben durch Situierung in der digitalen Umwelt zusätzliche Informationen beschaffen können. Ein "Agent" bezeichnet hier in der Regel ein Programm, dessen Arbeit als das eigenständige Erledigen von Aufträgen oder Verfolgen von Zielen in Interaktion mit einer Umwelt beschrieben werden kann. Dazu müssen Agenten Fähigkeiten der Wahrnehmung, des Handelns und der Kommunikation miteinander verbinden und, bezogen auf eine zu erfüllende Aufgabe, situationsangemessen ein- und umsetzen können.

Anwendungsfelder für Softwareagenten sind heute in zahlreichen Bereichen zu finden, u.a. bei verteilten Systemen, dem Internet (Stichworte: Informations- und Internet-Agenten) und bei Mensch-Maschine-Schnittstellen (Stichwort: Interface-Agenten). Von einem Informationsagenten wird verlangt, dass er Informationen selbstständig beschafft und aufbereitet, zum Beispiel aus dem Internet. So gibt es migrierende Agenten, die nach relevanten Informationen suchen und entfernt Aufträge ausführen (z.B. Hotelbuchungen) und Fähigkeiten für den Dialog mit einem Nutzer haben. Das Zusammentreffen mehrerer Agenten im Netz kann die Notwendigkeit zur Kooperation und Verhandlung nach sich ziehen.

In der Mensch-Maschine-Kommunikation werden sog. Interface-Agenten vielfach diskutiert. Schnittstellen werden als Agenten realisiert, denen Aufträge wie menschlichen Bearbeitern übertragen werden. Die Simulation von Schreibtisch-Oberflächen wird durch animierte Umgebungen abgelöst, in denen Agenten in virtuellen Räumen agieren und delegierte Aufträge ausführen; sie können als menschenähnliche virtuelle Figuren ("anthropomorphe Agenten") realisiert sein. Das Erscheinungsbild solcher Agenten reicht von einfachen cartoonartigen 2D-Figuren bis hin zu animierten Agenten, die auf komplexen 3D-Modellen basieren und in der Darstellung realen Personen (oder anderen realen Lebewesen) ähneln. In der Anwendung dienen solche Agenten z.B. als Führer durch virtuelle Welten, oder sie demonstrieren zum Beispiel Handlungsabläufe einer Gerätereparatur. Im Bereich der Lernsoftware übernehmen sie die Rolle virtueller Tutoren, erklären Sachverhalte, erteilen auf Nachfragen Auskunft oder stellen selbst Fragen an den Lernenden.

Die Realisierung animierter Figuren ist nicht nur eine Herausforderung für die Computergraphik und -animation, sondern auch was die glaubwürdige Verhaltensausrüstung betrifft. Hier werden u.a. folgende Anforderungen diskutiert: Modellierung von Persönlichkeit, Integration von Emotionsmodellen, Koordinierung unterschiedlicher Ausdrucksmittel wie Gesichtsausdrücke, Körpergesten und gesprochene Sprache. Erfahrungen haben gezeigt, dass z.B. mangelnde Übereinstimmungen zwischen Mimik, Gestik und Sprache vor allem bei foto-realistischen Figuren auf Ablehnung bei den Benutzer/innen stoßen.

Konstruktion kooperativer Agentensysteme

Kollektive kooperierender Agenten werden im Rahmen von Verteiltem Problemlösen oder von Multiagentensystemen in der Verteilten KI (VKI) betrachtet. Ausgangspunkt ist hier der Gedanke, dass die Interaktion zwischen mehreren Agenten mit vergleichsweise einfachem Verhalten genutzt werden kann, um komplexe Aufgaben zu lösen. Die einzelnen Agenten können als autonome Problemlöser in Form spezialisierter Expertensysteme oder auch viel einfacher konzipiert sein. Bei den Szenarien der VKI hat in der Regel kein Agent Überblick über das gesamte zu lösende Problem, d.h. es gibt keine zentrale Kontrolle, jedoch können

"höhere" Agenten Wissen über andere Agenten und ihre Fähigkeiten haben oder erlangen. Bei der Konstruktion agentenbasierter Systeme sind zwei Aspekte zu betrachten:

- *Mikro-Aspekt*: Wie entwirft und baut man einen Agenten, der die Fähigkeit zum autonomen Handeln hat?

Für den einzelnen Agenten ('Mikro-Aspekt') wird hier z.B. angenommen, dass er über folgende Dinge verfügt: eine *Basisfunktionalität*, d.h. er kann bestimmte zugeteilte Aufgaben eigenständig lösen; einen *kooperativen Überbau*, der ihm die Teilnahme an einem Kooperationsverfahren (Aufgabenverteilung) mit anderen Agenten gestattet; und schließlich die Fähigkeit zur *Kommunikation* mit anderen Agenten (z.B. durch Zugriff auf Kommunikationskanäle/Netz).

- *Makro-Aspekt*: Wie erzielt man effektiv eine Kooperation in einer so gegebenen Agentengemeinschaft?

Beim Entwurf von Multiagentensystemen ('Makro-Aspekt') ist also neben der Realisierung von Fähigkeiten der einzelnen Agenten die Art ihrer Teilnahme an einem Kooperationsverfahren zur Aufgabenverteilung mit anderen Agenten (und ggfs. dem beteiligten Benutzer) zu gestalten. Zur Durchführung von Kooperation erfolgt in der Regel ein Nachrichtenaustausch zwischen den Agenten in einer technischen Kommunikationssprache; dazu wird zum Beispiel die "Knowledge Query and Manipulation Language" (KQML) eingesetzt. In Anlehnung an die Sprechakttheorie spezifiziert KQML verschiedene sog. Performative, mit denen Nachrichtentypen (wie Aussage, Frage, Antwort) übermittelt werden können. Damit bietet KQML bietet eine Grundlage zur Konzipierung von Kooperationsverfahren.

Kooperationsverfahren/-protokolle, die in der VKI häufig betrachtet werden, sind *master-slave* oder *contract-net* (Vertragsverhandlung). Im Ablauf des Protokolls einer Vertragsverhandlung füllen Agenten spezielle Rollen aus, z.B. als Auftraggeber oder Auftragnehmer. Das Vorbild für solche Verfahren sind soziale Strukturen der Menschen. Die Abwicklung der Agentenkooperationen kann über unilateralen, bilateralen oder multilateralen Nachrichtenaustausch zwischen Agenten oder auch global (über ein "blackboard") erfolgen.

Für die technische Realisierung kann es hilfreich sein, funktionale Schichten eines Agentensystems zu unterscheiden. Auf der Interaktionsschicht werden Agenten dabei als nebenläufige Prozesse mit nachrichtenorientierter Steuerung betrachtet; die Aufgabenschicht behandelt die Abwicklung von Aufträgen zwischen ihnen, die auf der Problemschicht als verteilte Problemlösung durch Austausch von Teilproblemen und Teillösungen betrachtet werden.

Bei der Entwicklung und Implementierung agentenbasierter Systeme spielen gegenwärtig vor allem Objekt-orientierte Techniken eine Rolle. Es hat sich aber auch gezeigt, dass das Bild des "Agenten" als selbstständig handelnde Einheit vorteilhaft für die Strukturierung großer heterogener Systeme eingesetzt werden kann. Agenten bieten eine Form der Abstraktion, die über andere Formen hinaus gehen: Den einzelnen Komponenten können aktive Rollen zugewiesen werden, und Interaktionen sind intuitiv modellierbar. Anstelle der Konstruktion monolithischer Systeme ist eine modulare Architektur als Kollektiv kooperierender Agenten wesentlich übersichtlicher und deswegen unter softwaretechnischen Gesichtspunkten leichter zu beherrschen. Der Nutzen agentenorientierter Techniken ist hier eine größere Transparenz der Programme. Schon die Strukturierung komplexer Systeme in der Begriffswelt von Multiagentensystemen kann eine wesentliche Hilfe sein.