Systeme von Interface-Agenten als Mittler in der Mensch-Maschine-Kommunikation

Ipke Wachsmuth, Britta Lenzmann, Norbert Siekmann, Yong Cao

Technische Fakultät
Universität Bielefeld
D-33501 Bielefeld
{ipke,britta,norbert,yong}@techfak.uni-bielefeld.de

Papier zum eingeladenen Vortrag auf dem KI-94 Workshop 1: Integration multimodaler Mensch-Maschine-Kommunikation durch Interface-Agenten

September 1994

1 Menschengerechte Mensch-Maschine-Kommunikation

Ein wichtiger Schritt zur Entlastung des Menschen von der Überwachung und Steuerung komplexer Leistungserbringer besteht darin, daß intelligente Systeme in größerem Umfang Anteile von Lösungen selbständig erarbeiten. Der Bereich solcher *teilautonomen* Systeme beschränkt sich dabei nicht auf intelligente Roboter und Fahrzeuge, sondern umfaßt ebenso Systeme, die die Gestaltung und Abwicklung technischer Prozesse automatisch oder teilautomatisch übernehmen.

Ein kritischer Punkt bei diesen Vorhaben sind die Benutzer-Interfaces. Solche Mensch-Maschine-"Schnittstellen" stellen in der Tat oft einen Einschnitt in der Unmittelbarkeit des Umgangs mit an sich nützlichen technischen Systemen dar. Dies gilt nicht allein für Alltagsbeispiele wie die Bedienung von Fahrkartenautomaten oder die Programmierung von Videorekordern; auch die Steuerung von technischen Anlagen oder von Entwurfshilfsmitteln im Bereich des CAD erfordert häufig komplexe Kommandosequenzen. Eine grundsätzliche Aufgabe ist es daher, solche Systeme durch intelligente Funktionen besser an menschliche Bedürfnisse anzupassen, statt das Umgekehrte – die Anpassung des Menschen an das System – zu verlangen.

In Szenarien der Kooperation von Menschen mit einem teilautonomen System, das Anteile seiner Funktion unabhängig von der direkten Steuerung durch den Benutzer erbringen kann, verlagert sich das Thema der Benutzerschnittstelle auf die *Kommunikation* mit einem technischen System. Die dadurch erzielte Wirkung soll jedoch – nicht spürbar für die Nutzerin oder den Nutzer – durch systeminterne Funktionen bereitgestellt werden. Ein Ausgangspunkt für die Entwicklung menschengerechter Benutzerschnittstellen sind spezialisierte Software-Systeme, die als "intelligente Mittler" in der Kommunikation zwischen Menschen (als Benutzern) und technischen Systemen (als Leistungserbringern) auftreten.

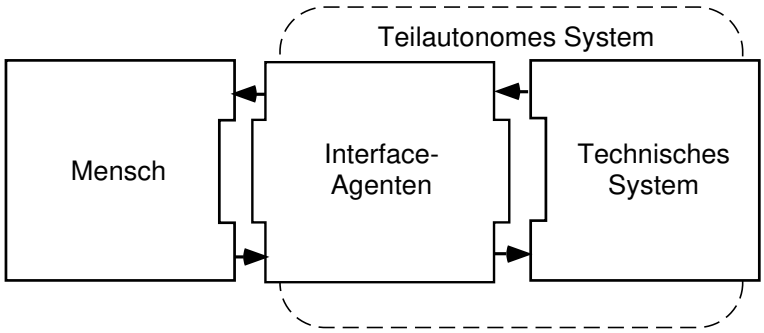


Abbildung 1: Agenten als Bindeglied in der Mensch-Maschine-Kommunikation – komplexe Bedienung des technischen Systems wird durch Mittlerleistungen von Agenten vereinfacht.

In diesem Beitrag geht es um spezialisierte (Agenten-)Systeme, die eine derartige Mittlerrolle in der Mensch-Maschine-Kommunikation übernehmen (siehe Abbildung 1). Hier läßt sich anknüpfen an Arbeiten über Interface-Agenten, die Wissen über die Tätigkeiten und Präferenzen ihrer Benutzer einbeziehen, um an deren Stelle Handlungen auszuführen [Laurel, 1990]. Solche Agenten verfolgen u.a. die automatische Erstellung von individuellen Benutzermodellen; sie "lernen" gleichsam ihre Benutzer in der Interaktion kennen und benutzen diese Kenntnisse, um bessere Leistungen anzubieten (vgl. [Maes & Kozierok, 1993]). Derartige Ideen sind in Visionen über zukünftige Benutzerschnittstellen aufgegriffen worden [Marcus, 1993], werden aber zum Teil aus Datenschutzgründen durchaus kritisch bewertet ([Norman, 1994], [Maes, 1994]). Komplementär dazu erscheinen deshalb Ansätze vielversprechend, bei denen Interface-Agenten Wissen über das System selbst benutzen und die Mensch-Maschine-Interaktion dadurch komfortabler machen, daß sie Benutzer von der expliziten Berücksichtigung technischer Details entlasten. Es geht hier also um die automatische Ausnutzung von Informationen, die systemintern verfügbar sind und die ohne weitere Beteiligung des Benutzers entsprechende Hilfsleistungen vermitteln können.

Während von außen betrachtet ein Interface-Agent eine Systemkomponente darstellt, welche Benutzerinteraktionen wahrnimmt und ihre systeminterne Umsetzung plant und ausführt, kann er sich von innen betrachtet in vielen einzelnen Funktionen, die auch miteinander wechselwirken, entfalten. Auf Basis der in der VKI diskutierten Mehragenten-Systeme ([Adler *et al.*, 1992], [Müller, 1993]) läßt sich die Entwicklung größerer "Mittleragenturen" in modularer Weise vornehmen, bei der einzelne Agenten mit spezifischen Teilzuständigkeiten kooperieren, um eine enge Kopplung von wahrnehmenden, planenden und ausführenden Komponenten zu erreichen. Dabei ist die Grundidee, daß jeder Agent gerade soviel Wissen hat, wie benötigt wird, um seine Spezialaufgabe im Rahmen der Gesamtaufgabe zu erbringen. Die Kommunikation mit Benutzern kann über verschiedene Kanäle stattfinden und innerhalb des Mehragenten-Systems auch unterschiedlich spezialisierte Agenten betreffen.

In den weiteren Abschnitten werden diese Vorstellungen am Beispiel der Kommunikation mit einer virtuellen Entwurfsumgebung konkretisiert. Die Realisierung des Mehragenten-Mittlersystems wird am Beispiel des VIENA-Systems detailliert vorgestellt (Abschnitt

3) und im Hinblick auf verallgemeinerbare Vorteile diskutiert (Abschnitt 4). Schließlich wird ein Ausblick auf denkbare Weiterentwicklungen gegeben.

2 Kommunikation mit einer virtuellen Umgebung

Aufgrund zahlreicher Einsatzperspektiven in Forschung und Industrie finden in jüngerer Zeit dreidimensional computergrafisch visualisierte "virtuelle Welten" zunehmendes Interesse. Durch steigende Rechenleistungen und andere Fortschritte in der Hardwaretechnologie ist der Einsatz von Computergrafik als Ausgabemedium immer vielfältiger geworden und reicht bis hin zur Darstellung von komplexen dreidimensionalen Objektszenen, die aus grundlegenden Geometriedaten, Beleuchtungsmodellen etc. in fotorealistischer Qualität erzeugt werden. Anwendungen findet dieser Bereich z.B. in der Konstruktion oder Architektur; so können Ergebnisse von Entwürfen bereits vor ihrer Realisierung betrachtet werden. Meist handelt es sich aber um einzeln erzeugte Bilder, bei denen die Interaktionsmöglichkeiten gering sind.

Als Weiterentwicklung der Computergrafik hat sich der Bereich der "Virtuellen Realität" (VR) hervorgetan. Durch Einsatz spezieller Grafikhardware ist es möglich, dreidimensionale Szenen in passabler Qualität mit genügend großer Bildaktualisierungsfrequenz zu produzieren, so daß Veränderungen der Daten in Echtzeit dargestellt werden können. Mit zusätzlichen Ausstattungen wie z.B. einer speziellen Brille (für die Bildwiedergabe) und einem Datenhandschuh (für die Interaktion in der Szene) können Benutzer in die Szene "eintauchen" und dort direkt Manipulationen vornehmen (z.B. Verschieben von Gegenständen durch "Anfassen"), die dann sofort visualisiert werden.

Ziel solcher Entwicklungen ist es, die Mensch-Maschine-Kommunikation zu verbessern, indem man von relativ abstrakten tastatur- oder mausgesteuerten Manipulationsmöglichkeiten zu eher intuitiven Handlungen übergeht. Dadurch soll der Benutzer von technischen Überlegungen freigehalten werden und sich auf seine kreative Entwurfstätigkeit konzentrieren können. Mit derartigen "virtuellen Welten" soll ein neuartiges Kommunikationsmedium erschlossen werden, das eine möglichst direkte Wechselwirkung des Menschen mit simulierten Modellen erlaubt [Wachsmuth, Krüger & Cao, 1994].

Die bislang realisierten Systeme erfordern allerdings noch recht komplizierte Hilfsmittel, um mit der Umgebung interagieren zu können. Auch beschränken sich die Modellierungen der Umgebung meist auf den rein visuellen Bereich. Andere grundlegende Eigenschaften, wie Schwerkraft, Reibung oder Undurchdringlichkeit (Festkörper) können hier noch eingebracht werden. Schließlich ist an eine Kombination von gestischen und verbalen Formen der Kommunikation zu denken, um größtmögliche Annäherung an Formen der situationseingebetteten Informationsverarbeitung des Menschen zu erreichen.

Eine Hauptaufgabe betrifft die Entwicklung von angepaßten Software-Werkzeugen, durch die die Manipulation solcher virtuellen Umgebungen vereinfacht wird. Hierfür ist u.a. der Einsatz wissensbasierter Agenten vorgeschlagen worden [Bishop *et al.*, 1992]. Eine erfolgreiche Kommunikation mit virtuellen Umgebungen bedingt, daß Interface-Agenten sich auf implizite Annahmen und Voraussetzungen des Menschen beziehen können. Dabei soll die aktuelle Situation möglichst weitgehend als Informationsquelle dienen, m.a.W. der Interface-Agent in der virtuellen Umgebung "situiert" sein [Lobin, 1993]. Bei der verbalen Interaktion sind u.a. kognitive Faktoren der Raumwahrnehmung einzubeziehen ([Levelt, 1986], [Lang, 1989], [Friederici, 1989]). Spezialisierte Agenten könnten die senso-

rische Erfassung virtueller Szeneneinzelheiten übernehmen; hierfür gibt es erste Ansätze im Kontext der Robotik ([Kirsch *et al.*, 1993], [Milde & Müller, 1994]).

Im Spannungsfeld der beiden Themen "Virtuelle Umgebungen" und "Agenten" ist das VIENA-Projekt angesiedelt. VIENA ("Virtual Environments and Agents") ist ein seit 1993 laufendes Projekt im KI-NRW Forschungsbereich "Künstliche Intelligenz und Computergrafik" an der Universität Bielefeld[1]. Das globale Ziel ist die Entwicklung einer agentenvermittelten intelligenten Kommunikation mit einer virtuellen Umgebung im Bereich des interaktiven Grafikdesigns [Wachsmuth & Cao, 1994]. Nach grundlegenden Aufbauarbeiten, wie fachliche Orientierung und Hardwareorganisation im Jahr 1993, sind jetzt erste Teilrealisierungen – zum Teil in Verbindung mit Diplom- und Magisterarbeiten – entstanden[2].

Abbildung 2: Beispielszene (virtueller Büroraum) aus der VIENA-Testumgebung in Drahtgitterdarstellung; auf dem Bildschirm werden zusätzlich Farb- und Lichteindrücke dargestellt.

Bei der Manipulation einer virtuellen Umgebung kommen unterschiedliche Eingabemodalitäten in Frage. Komplementär zu den gegenwärtigen Forschungsarbeiten einer ge-

[1]Das VIENA-Projekt wird vom Ministerium für Wissenschaft und Forschung in Nordrhein-Westfalen unter der Förder-Nr. IVA3-107 007 93 unterstützt.

[2]An dieser Stelle sei auf die Mitarbeit folgender Personen dankend hingewiesen: Majid Amanzadeh, Dirk Evers, Stefan Fischer Rivera, Tanja Jörding, Karsten Otto.

stischen Interaktion (vgl. etwa [Böhm *et al.*, 1992]) ist im VIENA-Projekt zunächst untersucht worden, wie sich diverse raumbezogene Manipulationen in einer virtuellen Umgebung durch verbale Instruktionen vermitteln lassen [Cao *et al.*, 1993]. Im Beispielszenario werden dabei Einrichtungsgegenstände in einem virtuellen Büroraum (Abbildung 2), der in fotonaher Qualität dargestellt ist, auf diverse Weise umkonfiguriert. Während dieses Prozesses wird dem Benutzer als Reaktion auf seine Eingaben die Szene als berechnetes 3D-Bild unter Berücksichtigung seines momentanen Sichtfeldes gezeigt. Bei den verbalen Interaktionen sind dabei vor allem situierte Raumreferenzen von Bedeutung [Cao & Wachsmuth, 1993]. Innerhalb der Interaktion kann der Benutzer vom System visualisierte Vorschläge durch Anweisungen wie "weiter" oder "nicht so weit" korrigieren. In weiteren Arbeiten sollen Eigenschaften wie Beleuchtung und Farbgestaltung manipuliert werden.

Im VIENA-Projekt ist die Weiterentwicklung von Grafiktechniken nicht das Forschungsziel. Deshalb wird bei der Visualisierungskomponente auf bereits Bestehendes zurückgegriffen. Grundlage ist ein Grafikrechner (Silicon Graphics Indigo), der mit Hardwareunterstützung in der Lage ist, dreidimensionale Szenen on-line zu berechnen. In Shading-Qualität, die durch ein vereinfachtes Beleuchtungsmodell die schnelle Berechnung realistischer 3D-Effekte ermöglicht, werden so Änderungen der Szene auf einem hochauflösenden Color-Bildschirm unmittelbar visualisiert. Diese Szenen werden mit Hilfe eines komplexen Softwarepaketes (SOFTIMAGE) erstellt und gegenwärtig auch dargestellt[3].

Die Eingabe von natürlichsprachlichen Anweisungen geschieht zunächst über Tastatur und soll später über Mikrofon erfolgen. Für die Zukunft ist auch die Berücksichtigung von gestischen Eingaben geplant. So kann die dargestellte Szene durch eine dem Menschen naheliegende Methode manipuliert werden. Für diese und noch andere im System zu erbringende Leistungen stehen weitere Workstations in einem Rechnerverbund zur Verfügung.

Das VIENA-Projekt bildet Einsatz- und Entwicklungsumgebung für die in den folgenden Kapiteln vorgestellte Ausarbeitung eines Systems von Interface-Agenten, welches als Mittler in der Mensch-Maschine-Kommunikation mit einer virtuellen Umgebung fungiert. Die Betrachtungen sind deshalb relativ stark an den Zielsetzungen des VIENA-Projekts orientiert, allerdings mit Blick auf die Einsatzmöglichkeit in anderen Szenarien im möglichen Umfang allgemein entwickelt worden. Das Multi-Agenten-System berücksichtigt weitgehende Anforderungen an die Robustheit und Flexibilität in dynamisch sich wandelnden Situationen und liefert angemessene Resultate unter zeitkritischen Bedingungen; aufgrund der Maxime der Interaktivität soll es dem Anspruch nach echtzeitfähig sein. Im Hinblick darauf wurde in vielen Fällen eine Integration klassischer und wissensbasierter Techniken vorgenommen. Wegen der diversen Anforderungen, vor allem an die Qualität der Visualisierung, ist im praktischen Betrieb bislang eine eher "schritthaltende Verarbeitung" möglich[4].

[3] In Erweiterung wird momentan auch an der Handhabung der computergrafischen Darstellung durch die breiter zugängliche Grafiksprache GL (Graphic Language/Libary) gearbeitet.

[4] Das in Abschnitt 3.3, Abbildung 6 gezeigte Benchmark aus 21 Sätzen erfordert auf einer Indigo Elan zur Zeit insgesamt 4 Minuten 34 Sekunden. Dieses Benchmark ist Bestandteil des VIENA-Demo-Videos.

3 Das Agenten-Mittlersystem im VIENA-Projekt

Im Projekt VIENA geht es um die Manipulation dreidimensionaler Grafikszenen mit einer durch ein Agentensystem erbrachten handlungsorientierten Bedeutungskonstruktion. Um die verbalen Eingaben des Benutzers in neu berechnete Bilder umsetzen zu können, ist eine Vielzahl verschiedener Aufgaben zu lösen. In VIENA werden diese Aufgaben an einzelne Agenten oder auch Systeme von Agenten (Agenturen) verteilt. So fungiert das System als ein "intelligenter Mittler" zwischen dem Menschen und der virtuellen Umgebung. Ein Agent muß dabei im wesentlichen drei Rollen erfüllen. Er muß zugeteilte Aufgaben zur Lösung eines Teilproblems ausführen, am Kooperationsprozeß zur Erstellung der Gesamtlösung teilnehmen und mit anderen Agenten Nachrichten austauschen können. Dabei wird die aktuelle Situation durch Inspektion der Grafik-Datenmodelle als Informationsquelle herangezogen; auf diese Weise sind Interface-Agenten in der virtuellen Umgebung "situiert". Die computergrafische Darstellung wird über ein lose gekoppeltes Modeler-Renderer-System vorgenommen.

Für VIENA wurde ein Agentenmodell in Anlehnung an [Steiner *et al.*, 1990] gewählt, das allgemein jeden Agenten im Hinblick auf seine Rolle im gesamten System definiert. Das bedeutet, hinsichtlich Kommunikation und Kooperation sind alle Agenten in ihrem Verhalten gleich. Die Vereinheitlichung der Kommunikation und Kooperation setzt sich bis auf die Implementierungsebene fort, so daß ein komplettes Agentengerüst vorhanden ist, in das nur noch die problemabhängige lokale Funktionalität eingesetzt werden muß. Die Erstellung der Basisfunktionalitäten einzelner Agenten ist dann Aufgabe der "Agentenprogrammierer". Durch diese Aufteilung ist die Erweiterung des Systems um neue Agenten wesentlich vereinfacht. Außerdem kann sich die Tätigkeit der Agentenprogrammierer auf die spezifische Problemlösungsfähigkeit konzentrieren, ohne jedesmal die Voraussetzungen für deren Einsatz erneut schaffen zu müssen.

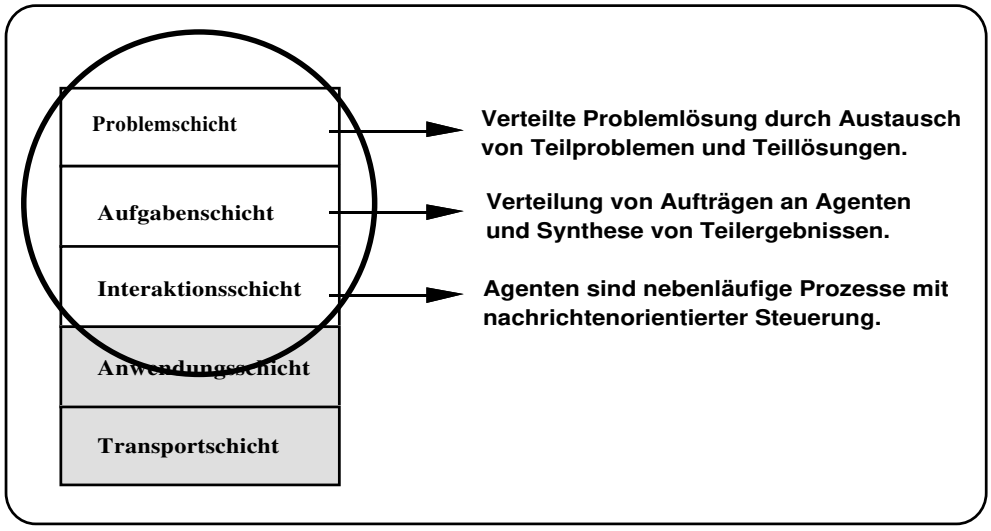


Abbildung 3: Funktionale Schichten eines Agentensystems im OSI-Modell: Auf der Anwendungsschicht setzen weitere Schichten zur Steuerung der Interaktion, Aufgabenverteilung und verteilter Problemlösung auf; nach [von Bechtolsheim, 1993].

Ausgangspunkt für die Realisierung ist es, auf der Anwenderschicht des OSI-Referenzmodells [Kerner, 1992] nach einem Vorschlag aus [von Bechtolsheim, 1993] drei neue Schichten aufzusetzen, die die funktionale Struktur eines Agenten wiederspiegeln und in das Agentenschema von [Steiner *et al.*, 1990] passen (Abbildung 3). Auf der untersten Schicht, der Interaktionsschicht, werden Agenten als nebenläufige Prozesse mit nachrichtenorientierter Steuerung betrachtet. In der darauf aufsetzenden Aufgabenschicht geht es um die Verteilung von Aufträgen an Agenten und die Synthese von Teilergebnissen. Auf der obersten Schicht, der Problemschicht, wird die Gesamtaufgabe des Agentensystems als verteilte Problemlösung betrachtet. Eine probleminduzierte Kommunikation (ein Teilproblem ist für einen Agenten nicht alleine lösbar) führt über die Verteilung von Aufträgen zur Interaktion von Partneragenten, deren Funktionalitäten wiederum zu Aufrufen auf der Anwenderschicht führen.

Der Kommunikationsrahmen für das Multi-Agenten-System ist in Abschnitt 3.1 und der Kooperationsrahmen in Abschnitt 3.2 näher beschrieben. In Abschnitt 3.3 folgen Erläuterungen über die Realisierung der Mittleraufgabe und die dabei verwendeten Heuristiken.

3.1 Kommunikation

In diesem Abschnitt wird das für VIENA entwickelte Kommunikations-Subsystem kurz erläutert. Die Agenten in VIENA sind eigenständige Prozesse, die auf Betriebssystemebene laufen und auf verschiedene Rechner in einem Netzwerk verteilt sein können. Eine Schwierigkeit besteht deshalb darin, die Agenten, die auf einem Multitasking-Betriebssystem mit schwer kalkulierbaren Ausführungs- und Nachrichtenübermittlungszeiten laufen, zu synchronisieren. Deshalb wurde die Kopplung der Agenten auf der Kommunikationsebene asynchron realisiert. Durch geeignete Kooperationsgesetze wird auf höherer Ebene (siehe Abschnitt 3.2) eine aufgabenspezifische Synchronisation erreicht.

Die Agenten können ausschließlich über die Interaktionsschicht miteinander in Verbindung treten. Hierzu wurde für das VIENA-System eine auf dem OSI-Strukturmodell aufsetzende (achte) Interaktions-Layer geschaffen. Dieses Vorgehen hat den Vorteil, daß die Agenten losgelöst sind von der technischen Realisierung der Kommunikation. Die Interaktions-Layer wird auf vernetzten Rechnern zur Verfügung gestellt, die unter dem Betriebssystem UNIX laufen. Nach einer prototypischen Implementierung der Kommunikation über Datenaustausch im NFS wird in der jetzigen Realisierung der von SUN Microsystems entwickelte "Remote-Procedure-Call"(RPC)-Mechanismus für die Interprozeßkommunikation von Agenten genutzt. Da nicht direkt Prozeßdaten verschickt werden müssen, ist die Verarbeitungsgeschwindigkeit für die Zwecke des VIENA-Systems ausreichend.

Allgemein gesagt wurde eine nachrichtenbezogene, nichtblockierende Kommunikation nach dem Briefkastensystem geschaffen. Mit Hilfe des RPC-Modells wurde ein Client-Server-Konzept realisiert, das auf einer formalen Trennung von Agenten als Benutzern (Clients) und einem die Nachrichten verwaltenden Kommunikations-Server beruht. Dabei werden RPC-Aufrufe in lokale Prozeduraufrufe der jeweiligen Zielprogrammiersprache für die Agenten eingebettet. Da schon aus Gründen der Einbindung der Grafik-Software und -Datenstrukturen im VIENA-Kernsystem grundsätzlich mit C gearbeitet wird, wurde das Kommunikations-Subsystem ebenfalls in C realisiert. Deshalb müssen die Agenten-Entwicklungsumgebungen in der Lage sein, C-Objektcode einzubinden und auf C-Datenstrukturen zu arbeiten.

Die lose gekoppelten VIENA-Agenten tauschen im Bedarfsfall komplexere Nachrichten aus, um ihre Aufträge zu erhalten und Ergebnisse abzuliefern. Aufgrund der nichtblockierenden Kommunikation (d.h. ein Prozeß wird nur für die Dauer des Kopierens der Nachricht beansprucht) können die Agenten entscheiden, wann sie auf eine eventuelle neue Nachricht reagieren. Die Basis für die Kommunikation ist eine einheitliche, allen Teilnehmern bekannte Sprache, die die Kommunikation eindeutig definiert. Sie umfaßt auf der einen Seite die Datenstrukturen, die den Aufbau des Nachrichtenprotokolls festlegen, und auf der anderen die notwendigen Kommunikations-Funktionen, die auf diese Datenstrukturen zugreifen.

Für den gesamten Nachrichtenaustausch gibt es nur einen Datentyp MELDUNG, der wie folgt strukturiert ist:

```
NACHRICHT == (KENNUNG,
              ABSENDER,
              EMPFÄNGER,
              TYP,
              BEZUG,
              ZEITSTEMPEL,
              LÖSUNGSZEIT,
              INHALT)
```

Die ersten sieben Felder beschreiben den Meldungskopf, das letzte Feld den Körper der Meldung. Die Bedeutung der einzelnen Felder ist nachstehend beschrieben.

- KENNUNG enthält eine eindeutige Nachrichtenkennzeichnung, bestehend aus einer Benutzerauftragsnummer, mit der die globale Zuordnung der Nachricht zurückverfolgt werden kann, und einer chronologischen Meldungsnummer.

- ABSENDER: Hier wird der Name des Agenten eingetragen, der die Meldung sendet. Im Zusammenhang mit einer Namenskonvention[5], die die Agenten in Gruppen aufteilt, erstellt der Kommunikations-Server diesen Namen als eindeutige Identifizierung.

- EMPFÄNGER: Hier werden die Agenten eingetragen, an die eine Meldung gesendet werden soll. Es können sowohl einzelne Agenten als auch Agenturen angesprochen werden. Wird z.B. "Viena Raum" eingetragen, so geht die Meldung an alle Agenten, die der Raum-Agentur angehören. Prinzipiell muß das Agenturnetz den Agenten im System bekannt sein, wenn sie gezielt Adressaten auswählen wollen, jedoch können sonst über den Broadcast "Viena" alle Agenten angesprochen werden.

- TYP: Aus dem Kooperationsschema (siehe Abschnitt 3.2) lassen sich unterschiedliche Typen von Meldungen ableiten. Um Meldungen schnell klassifizieren zu können, wird ihr Typ direkt im Meldungskopf an dieser Stelle eingetragen.

[5]Die Namenskonvention erlaubt, daß Agenten in Agenturen zusammengefaßt werden. Hiermit kann eine Baumstruktur von Agenturen geschaffen werden, deren Blätter die jeweiligen Agenten sind. Da die Kommunikation über diese Namen erfolgt, wird so von der physikalischen Verteilung (einer ungeordneten Menge von Agenten) zu einer logischen Verteilung abstrahiert.

- BEZUG: Jede Meldung, die ein Agent verschickt, resultiert aus einer Meldung, die er vorher bekommen hat. Um bei der Kooperation geeignete Rückschlüsse anstellen zu können, wird im Bezugsfeld die Kennung der zugrundeliegenden Meldung eingetragen.

- ZEITSTEMPEL: Hier wird die Entstehungszeit der Meldung vom Kommunikations-Server eingetragen.

- LÖSUNGSZEIT: Dieses Feld ist gedacht für die Vorgabe von Zeitspannen, in denen Aufgaben zu lösen sind (bislang außer einfachen Tests noch nicht eingesetzt); dies soll als Ansatzpunkt für Erweiterungen im Zeitverhalten von Agenten benutzt werden.

- INHALT: Dieses Feld ist der Körper der Meldung, in dem die eigentlichen Meldungsdaten eingetragen werden. Die Form und Anordnung der dort abgelegten Informationen ist im Gegensatz zu den Inhalten der Kopffelder nicht allen Agenten verständlich. Um eine Interpretation zu ermöglichen, ist der Aufbau des Inhaltes von den Beteiligten zur Entwicklungszeit zu definieren.

Zur Systemsteuerung sind zwei festgelegte Meldungen allen Agenten bekannt: Die erste Meldung, die jeder Agent empfängt, ist eine Startmeldung (Inhalt: "start"); sie wird vom Kommunikations-Server direkt nach dem Anmelden an den jeweiligen Agenten verschickt und kann zur Initialisierung genutzt werden. In Entsprechung führt eine Stopmeldung (Inhalt: "stop") dazu, daß beim Empfang sich der betreffende Agent beendet. Die für die Kommunikation benötigten Operationen umfassen die Funktionen zur An- und Abmeldung von Agenten und zum Senden und Empfangen von Nachrichten, mit denen die Agentenkooperation abgewickelt wird. Weitere Einzelheiten und Details der Implementierung sind [Siekmann, 1994] zu entnehmen.

3.2 Kooperation

In der Aufgabenschicht geht es um die Verteilung von Aufträgen an einzelne Agenten und die Synthese von Teilergebnissen durch die Kooperation von Agenten. Die dafür notwendigen Datenübertragungen werden durch die Funktionalität der im vorangegangenen Abschnitt erläuterten Interaktionsschicht realisiert.

Das in VIENA entwickelte Verfahren ist durch eine Kombination verschiedener in der Literatur behandelter Kooperationsmodelle (vgl. etwa [Steiner *et al.*, 1992]) gekennzeichnet. Im wesentlichen läßt es sich durch eine Vertragsverhandlung, ähnlich dem Contract-Net-Ansatz, charakterisieren, in der jeder Agent sowohl die Rolle eines Auftraggebers als auch eines Auftragnehmers einnehmen kann. Der Verarbeitungsablauf ergibt sich durch eine Folge von Nachrichtenübertragungen nach folgendem Schema:

- Ausschreibung einer Aufgabe: Anfallende Teilaufgaben werden durch einen Auftraggeber in Form einer als Ausschreibung klassifizierten Nachricht den potentiellen Auftragnehmern bekanntgegeben.

- Erstellung von Angeboten: Nach Eingang der Ausschreibungsmeldung wird diese anhand des Nachrichteninhalts (und ggfs. der in der Nachricht spezifizierten Lösungszeit) auf Bearbeitbarkeit geprüft und im positiven Fall mit der Erstellung eines Angebots beantwortet.

- Auftragsvergabe: Eingehende Angebote können zur Zuweisung des Auftrages führen und bedeuten eine Verpflichtung zur Aufgabenbearbeitung von Seiten der Angebotersteller. Die flexible Gestaltung dieser Aktion sieht die Auftragsvergabe mit oder ohne Rückgabe der Verarbeitungsergebnisse an einen oder alle hieran beteiligten Agenten vor. Die Handhabung der ermittelten Resultate wird über die Wahl von Kooperationsgesetzen gesteuert. Im einzelnen sind dies: Ausschreibung mit/ohne Rückgabe der Ausführungsergebnisse und Auftrag mit/ohne Rückgabe der Ausführungsergebnisse. Die Adressierung eines oder mehrerer Agenten erfolgt über den Spezifikation des Nachrichtenfeldes EMPFÄNGER.

- Angebotsablehnung: Soll die Aufgabe von genau einem Agenten bearbeitet werden, müssen alle sonstigen Angebotersteller durch eine Angebotsablehnung davon in Kenntnis gesetzt werden, um so für weitere Aktivitäten zur Verfügung zu stehen.

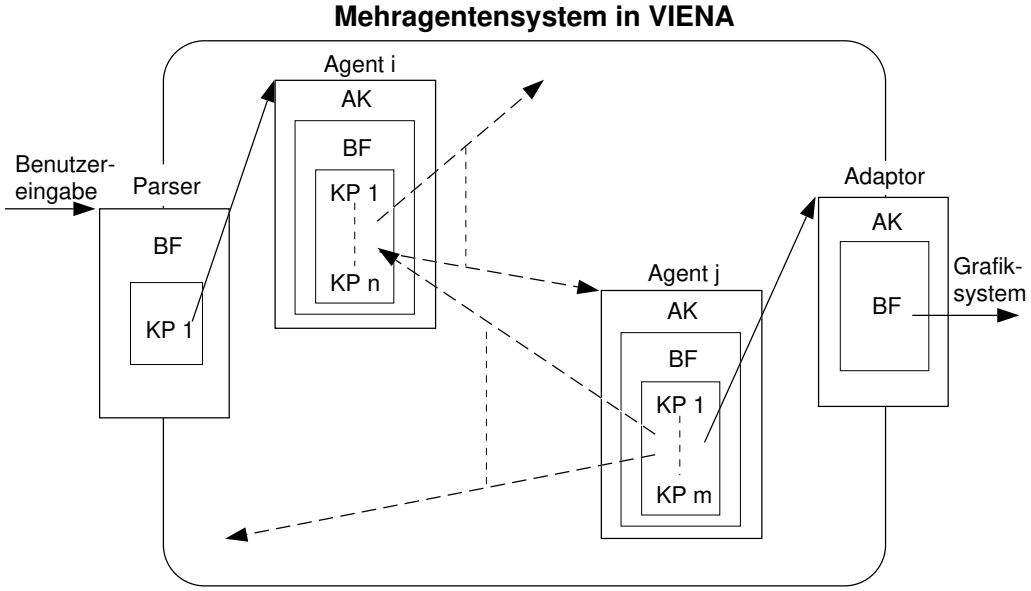
- Übergabe der Auftragsergebnisse: In Abhängigkeit von der Art der Auftragsvergabe werden die Verarbeitungsergebnisse ermittelt und verschickt. Bei Verpflichtung zur Ergebnisrückgabe entscheidet der Auftraggeber, welche Resultate verwendet und wie sie im weiteren eingesetzt werden. Anderenfalls bestimmt der Auftragnehmer das weitere Vorgehen.

Zusätzlich ist die Möglichkeit vorgesehen, Agenten Aufträge direkt zuzuweisen, wodurch ein Master-Slave-analoges Verhalten modelliert werden kann. In dieser Situation entfallen die oben geschilderten Schritte der Aufgabenausschreibung und der Angeboterstellung, das heißt, die Kooperation besteht allein aus der Auftragsvergabe und der Ergebnisübermittlung. Schließlich können Verhandlungsnachrichten an mehrere Agenten gleichzeitig adressiert sein, so daß gleiche Informationen einer Menge von Agenten zugänglich gemacht werden, was als Blackboard-orientiertes Vorgehen verstanden werden kann.

Insgesamt werden alle genannten Aspekte durch einen Kooperationsrahmen, der der Rolle des Agenten als Auftragnehmer Rechnung trägt, und vier Kooperationsprimitiven, die die Agenten als Auftraggeber verwenden können, realisiert. Da die Agenten der Mittleragentur zumeist sowohl die Rolle des Auftraggebers als auch die des Auftragnehmers einnehmen, mußte ein Ineinandergreifen beider Sichten geschaffen werden. Ferner muß der Anstoß der lokalen Funktionalitäten der Agenten aus dem Kooperationsmodell heraus erfolgen.

Im implementierten Kooperationsverfahren werden diese Forderungen in der Weise berücksichtigt, daß grundsätzlich jeder Agent mit dem auftragnehmerspezifischen Kooperationsrahmen ausgestattet ist, innerhalb dessen seine lokale Funktionalität mit drei Basisfunktionen angestoßen wird. Die beiden ersten Aktivierungen dienen der Leistung von Vorarbeiten; hierzu zählen die Bereitstellung notwendiger Informationen zur Anmeldung des Agenten im System und die Machbarkeitsprüfung der ausgeschriebenen Aufgabe. Die letzte Basisfunktion ist der eigentlichen Aufgabenlösung zugedacht, wofür die auftraggeberspezifischen Kooperationsprimitiven je nach Situationsanforderung und Aufgabenstellung eingesetzt werden. Einen Gesamtüberblick des realisierten Kooperationsverfahrens zeigt Abbildung 4. Eine detaillierte Darstellung der Realisierung findet sich in [Lenzmann, 1994].

Im VIENA-System sind somit sämtliche aus der Kommunikation und Kooperation resultierenden Aktivitäten für alle Agenten einheitlich definiert. Weitere Agenten können daher durch Einbinden des Kooperationsverfahrens und Definition ihrer Basisfunktionen einfach in das System integriert werden. Damit bieten sie größtmögliche Freiheit in der



BF	Basis_funktionalitaet
KP 1	Koop_auftrag_ohne
KP 2	Koop_auftrag_mit
KP 3	Koop_ausschreibung_ohne
KP 4	Koop_ausschreibung_mit
KP i	aus KP 1-4
AK	Auftragnehmerspezifischer Kooperationsrahmen

Abbildung 4: Kooperationsverfahren im VIENA-System; jeder Agent ist ausgestattet mit einem Auftragnehmerrahmen, in dem seine Basisfunktionalität angestoßen wird; aus dieser heraus werden wiederum die auftraggeberspezifischen Kooperationsprimitiven je nach Situationsanforderung und Aufgabenstellung eingesetzt.

Realisierung von Problemlösungen und bilden die Grundlage für ein robustes und flexibel reaktionsfähiges Gesamtsystem.

3.3 Mittlertätigkeit als verteilte Problemlösung

In diesem Abschnitt folgen Erläuterungen über die als verteilte Problemlösung realisierte Mittlertätigkeit des VIENA-Systems und die dabei verwendeten Heuristiken. Das Gesamtsystem setzt sich im Groben aus drei Komponenten zusammen: einer Kommunikationsschnittstelle mit dem Menschen, einem Kernsystem zur Vermittlung zwischen den sprachlichen Benutzereingaben und entsprechenden Änderungen in der Szenenbeschreibung und einer Bilderzeugungskomponente für die computergrafische Darstellung der dreidimensionalen Szene (siehe Abbildung 5).

Als Annäherung an eine menschengerechte Mensch-Maschine-Kommunikation erlaubt das VIENA-System dem Benutzer, Änderungswünsche durch eine verbale Instruierung mitzuteilen. Die Kommunikationsschittstelle enthält eine Parser-Komponente, die die Benutzeranweisungen analysiert und die maximal daraus ableitbaren Informationen an das Kernsystem weiterreicht. Im Vordergrund steht weniger die Verarbeitung komplexer Satz-

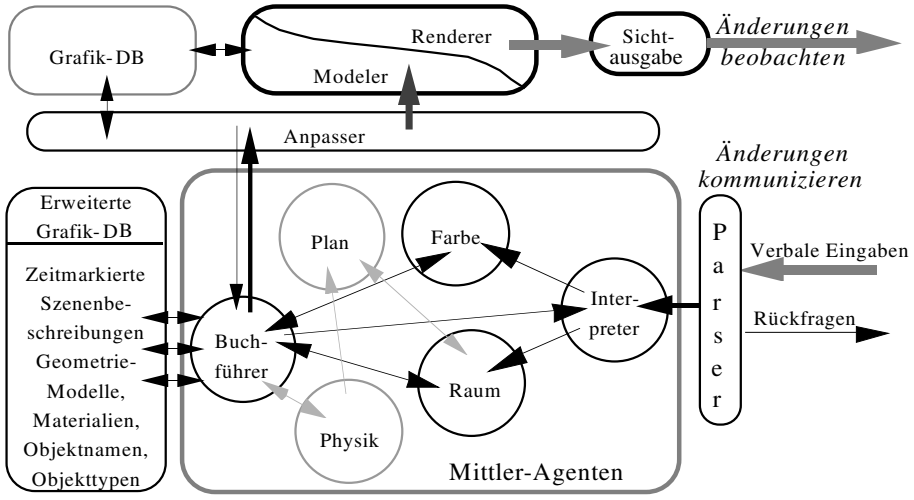


Abbildung 5: Gesamtschau des VIENA-Systems (blaß dargestellte Agenten in Vorbereitung bzw. einzelne Funktionen bislang in "Raum" integriert)

strukturen, als vielmehr die Unterstützung einfacher, qualitativer und im situativen Kontext gegebener Anweisungen. Beispielsweise kann eine zuvor gemachte Instruktion[6] der Form "move the table to the right" in einem Nachfolgeschritt mittels der Ellipse "a bit more" entsprechend der Erwartungen des Anwenders modifiziert werden, d.h. der Benutzer kann über die Semantik von Änderungswünschen mit dem System *verhandeln*.

Das Kernsystem realisiert die Umsetzung der qualitativen Benutzeranweisungen in numerische Werte zur Bilderzeugung und ermöglicht damit eine "intelligente" Kommunikation mit der virtuellen Umgebung. Es besteht aus einer erweiterten Grafikdatenbank, in der geometrische Objekt- und Szeneninformationen der gesamten Diskurssequenz gespeichert werden, und aus einem Mehragentensystem, das, durch Inspektion der Informationen aus der erweiterten Grafikdatenbank, die notwendigen Berechnungen zur Interpretation der Benutzeranweisung übernimmt. Ein Buchführungsagent verwaltet und aktualisiert die Datenbank und hat damit Wissen über alle Szenendetails sowie über vorhergehende Szenenbeschreibungen und Änderungen.

Der Einsatz des Agentensystems wird gegenwärtig an einer Testumgebung mit verschiedenen Einrichtungsgegenständen sowie Farb- und Lichteindrücken eines virtuellen Büroraums, die interaktiv verändert werden können, erprobt (vgl. Abbildung 2). Die dafür entwickelten Verfahren beziehen implizite Annahmen des Menschen bei der Manipulation der virtuellen Umgebung ein; sie rekonstruieren etwa im Effekt physikalische Gesetze, um die gegenseitige Durchdringung massiver Objekte im virtuellen Raum zu verhindern oder beziehen bei der Umsetzung verbaler Kommandos kognitive Faktoren der Raumwahrnehmung ein.

Beispielsweise hat ein Raumagent [Otto, 1994] Wissen darüber, wie er eine Objekttransformation im Raum (Translation, Rotation) berechnet, daß ein Objekt auf etwas

[6] Aus verschiedenen Gründen wird zunächst mit englisch-sprachigen Instruktionen gearbeitet; ein gegenwärtig vorangetriebener Agent für die Verarbeitung gesprochener Sprache berücksichtigt deutsche Eingaben.

stehen muß (nicht "in der Luft") und nur stehen kann, wo kein anderes steht. Der Raumagent erfährt augenblickliche Objektpositionen aus der erweiterten Grafikdatenbank und teilt neue dorthin mit. Der Raumagent kann darüber hinaus feststellen, ob ein zu bewegendes Objekt andere unterstützt und sie ggfs. mitbewegen. Schließlich kann der Raumagent anhand der Fragestellung eine deiktische oder intrinsische Perspektive (d.h. aus der Position des Beobachters oder des Objektes selbst) auswählen, um die Orientierungen im Raum zu interpretieren. Sollte die visualisierte Lösung nicht mit der Erwartung übereinstimmen, kann der Benutzer eine Korrekturanweisung geben. Das System versucht dann, die zuerst vorgeschlagene Lösung entsprechend zu modifizieren. Dabei werden die aktuellen Szenenmodelle inspiziert, um Interaktionen des Benutzers auf die für ihn sichtbare Szene zu beziehen.

Ein demnächst realisierter Farbagent enthält in analoger Weise Wissen darüber, woher er eine momentane Objektfarbe (r,g,b) erfährt, wohin er eine neue mitteilt, wie er eine Farbtransformation (blau, heller, wärmer) als Änderung eines rgb-Vektors berechnet und wie er ein Objekt anhand einer Farbbeschreibung ("der rote Stuhl") identifiziert.

Eine beispielhafte Sequenz von möglichen Interaktionen mit dem VIENA-System zeigt Abbildung 6. Die gezeigten Eingaben erlauben interaktive Veränderungen der sichtbaren

1. move the chair to the left .
2. a bit less .
3. turn the chair left .
4. put the desk behind the chair .
5. put the palmtree on the desk .
6. move the palmtree to the left .
7. put the bowl on the desk .
8. put the chair on the table .
9. move the chair to the window .
10. turn the desk right .
11. move the chair to the front of the desk .
12. put the bowl on the ground .
13. put the palmtree on the floor .
14. show the palmtree .
15. show the shelf .
16. move the chair to the right of the desk .
17. move the chair here .
18. put the plant between the desk and the chair .
19. display the plant .
20. point to the plant .
21. put the bowl there .

Abbildung 6: Beispielhafte Sequenz von einigen gegenwärtig möglichen Interaktionen mit dem VIENA-System

Szene wie auch Änderungen des Blickwinkels und schließlich einfache deiktische Anweisungen; diese können auf den Beobachterstandpunkt (Kamera) bzw. auf eine von dorther bedeutete Einzelheit bezogen werden (hierbei wird ein weggestreckter Zeigearm sichtbar, der in Zukunft auch durch ein gestisches Eingabemittel geführt werden könnte).

Mit dieser Testanwendung wird die interaktive planerische Gestaltung eines virtuellen

Raums denkbar, wobei möglicherweise Teilsequenzen von Aktionen durch weitere Agenten automatisch geplant werden können ("stelle die Schreibtische an die rechte Wand", "mache alle Tischplatten grau" etc.). Ferner könnten Modelle einzelner Objekte ausgetauscht werden; es ist beispielsweise gelungen, "echte" CAD-Modelle eines Küchenherstellers in die virtuelle Umgebung zu importieren und zu manipulieren, um die Anpaßbarkeit des Prototyp-Systems an realistische Einsatzbedingungen zu erproben.

4 Diskussion

Immer mehr Menschen mit immer weniger Programmierkenntnissen werden in der fortschreitenden informationstechnischen Gesellschaft Benutzer von Systemen mit immer grösseren und vielfältigeren Leistungen sein. Durch die Erschliessung neuer, EDV-unkundiger Benutzergruppen kommt der ergonomischen Gestaltung der Mensch-Maschine-Kommunikation wachsende Bedeutung zu [Hansen, 1987]. Deshalb wird momentan auf dem Gebiet der Mensch-Maschine-Kommunikation stark an der Verbesserung der Benutzerschnittstelle gearbeitet. Als Benutzerschnittstelle werden jene Teile eines Systems bezeichnet, mit denen der Mensch bei der Benutzung in Kontakt kommt. Hier ist zunächst die Frage zu klären, worin der Unterschied zu einem Interface-Agenten besteht.

Während Benutzerschnittstellen größeres Gewicht auf die bedienungstechnischen Aspekte und beispielsweise die Gestaltung des Bildschirms legen, steht im hier geschilderten Ansatz eher die Funktionalität des technischen Systems und deren Nutzung als teilautonomes, "selbständiges" System im Vordergrund. Interface-Agenten sind also Systeme, die eine ergonomische Kommunikation ermöglichen, da sie, ausgestattet mit Wissen, komplexe Aktionen verdeckt ausführen und nur die Informationen vom Benutzer verlangen, die für ihn relevant bzw. minimal notwendig für die Systemsteuerung sind. Interface-Agenten für die Mensch-Maschine-Kommunikation könnten unter diesen Gesichtspunkten eine neue Generation von Benutzerschnittstellen eröffnen.

Welche Vorteile hat der Ansatz eines *Systems* von Interface-Agenten? Grundsätzlich ist der Einsatz von Mehragenten-Systemen in solchen Bereichen gerechtfertigt, in denen eine Verteilung bezüglich Ressourcen, Raum, Zeit, Informationen oder Kompetenz vorliegt. Weiterhin finden sie eine Begründung bei der Analyse dynamischer oder komplexer Szenarien wie auch bei der Realisierung heterogener Komponenten. Schließlich ist ihre Anwendung grundsätzlich bei Systemen geeignet, bei denen eine besondere Flexibilität und Stabilität gefordert ist [Steiner *et al.*, 1992].

Die Verwendung eines Systems von Interface-Agenten ist im vorliegenden Ansatz durch mehrere Aspekte begründbar:

- Da die Problemstellung ein hohes Maß an Komplexität aufweist, ist eine *Modularisierung* in Teilprobleme erforderlich. Jedes dieser Teilprobleme wird von einer Komponente gelöst, deren Funktionalität auf die zu bewältigende Aufgabe zugeschnitten ist. Ein Mehragentensystem stellt einen Ansatzpunkt zur Modularisierung dar, der auch arbeitsorganisatorische Vorteile bei der Rollenverteilung im Team bietet.

- Eine komfortable Mensch-Maschine-Kommunikation beinhaltet, daß Benutzeranweisungen in nahezu jeder Situation *flexibel* umgesetzt werden können. Diese Anforderung kann durch eine "starre Verdrahtung" der Komponenten nur schwer verwirklicht werden. Vielmehr muß die Lösung der Gesamtaufgabe den Einsatz alternativer

Mittel erlauben. Hierfür bieten Agenten, ausgestattet mit einem Kommunikations- und Kooperationsmodell, einen geeigneten Lösungsansatz.

- Ein wichtiges Kriterium im Hinblick auf die interaktive Benutzung ist die *Robustheit* der Anwendung. Das Ziel sollte sein, die Handlungsfähigkeit des Systems bei Versagen einzelner Komponenten zu erhalten. Ein Mehragentensystem bietet diesbezüglich zwei wesentliche Vorteile: Zum einen können die Agenten Teilprobleme selbständig lösen und sind damit in dieser Hinsicht unabhängig voneinander. Zum anderen können sie untereinander kommunizieren, wodurch Ausfälle einzelner Agenten erkannt und durch Verlagerung der zu bearbeitenden Aufgabe auf einen nicht beschäftigten Teilnehmer der Agentur aufgefangen werden können.

- Hohe Antwortzeiten erschweren die sinnvolle Anwendbarkeit und die Akzeptanz des Systems. Die Nutzung eines Verbunds von Agenten kann in diesem Zusammenhang *Effizienzvorteile* bringen. Eine komplexe Anweisung kann beispielsweise – entsprechende Hardware vorausgesetzt – auf mehrere, parallel arbeitende Einheiten verteilt werden.

- In Zusammenhang damit ist die Fähigkeit eines Systems zu sehen, *anytime*-Lösungen zu realisieren. Hierunter ist eine Staffelung von Ergebnissen zu verstehen, bei der passable Lösungsvorschläge schnell generiert und je nach zur Verfügung stehender Zeit verfeinert werden. Eine System von Agenten kann eine solche Eigenschaft leichter als ein einkomponentiges System umsetzen, da sich nach Qualität und Zeitintensität unterscheidende Lösungen von verschiedenen Einheiten erbracht werden können.

- Im Hinblick auf *multimodale Eingabemöglichkeit* kann unterbestimmte Eingabeinformation einzelner Kanäle durch Agentenkooperation integriert werden (im VIENA-Projekt wird beispielsweise gegenwärtig mit der Kombination von verbalen Eingaben mit einfachen Richtungsgesten begonnen).

- Mehragentensysteme bieten schließlich Ausgangspunkte für die Realisierung *benutzeradaptiver* Interface-Systeme, die ohne Bevorratung benutzerspezifischen Wissens auskommen. So könnten leicht unterschiedliche, überwiegend ähnliche Agenten im Verlauf einer Session Prioritätswerte aufbauen, die davon abhängen, wie oft oder selten der Benutzer ein Angebot des Systems korrigiert hat. (Der in der Benutzerinteraktion erfolgreichere Agent wird bei späteren Ausschreibungen bevorzugt.)

5 Ausblick: Virtueller Interface-Agent

Bezog sich die Diskussion im vorangegangenen Abschnitt auf die allgemeinen Aspekte des Einsatzes von Interface-Agenten für die Mensch-Maschine-Kommunikation, so sollen abschließend einige Bemerkungen zu denkbaren zukünftigen Aufgaben in VIENA folgen.

In den bisherigen Arbeiten des Projektes ging es zunächst um die Gestaltung und Manipulation einer virtuellen Umgebung "von außen". Dabei ist der Gedanke eines (unsichtbar) in der Situation involvierten Mittler-Agenten gleichsam als Nebeneffekt entstanden, um eine komplexe Grafik-Software mit sprachlichen, auch unpräzisen Instruktionen bedienen zu

können. Die Metapher eines "situierten Mittler-Agenten" sollte für die Weiterentwicklung im interaktiven Grafik-Design gute Anknüpfungspunkte bieten.

Für mögliche Fortsetzungsarbeiten des VIENA-Projektes wird deshalb erwogen, mit Hilfe eines virtuellen Interface-Agenten (VIA), der in die künstliche Szene einbezogen ist, Explorationen und Manipulationen in der virtuellen Umgebung vorzunehmen, die auf antropomorphe Merkmale des Menschen bezugnehmen. Erste Schritte in einer solchen Richtung wurden in Forschungsarbeiten an der University of Pennsylvania mit computergrafischen Animationen humanoider Körper vorgenommen, die u.a. ergonomische Faktoren des Aufenthalts und der Bewegung von Menschen in engen Fahrerkabinen von Zweckfahrzeugen (Bulldozer und Hubschrauber) an CAD-Modellen dieser Fahrzeuge demonstrieren. Diese Arbeiten beschränken sich allerdings bislang auf die rein bildhafte Darstellung, ohne daß weitergehende Eingriffe des menschlichen Betrachters in der virtuellen Umgebung möglich sind. Der VIA soll im Explorationsraum aber auch dergestalt auftreten können, daß einerseits Benutzer von außen die Anwesenheit eines Menschen im Raum sehen und beurteilen können, andererseits gleichsam "durch die Augen" des Interface-Agenten die Szene vom augenblicklichen Standpunkt aus inspizieren und von dieser Position aus *handeln* können.

Mit dieser Idee soll die Nutzung computergrafischer Umgebungen von einem Guckkasten-Szenario des vor dem Bildschirm sitzenden Benutzers in eine stärker immersive "virtuelle Anwesenheit" verlagert werden, ohne daß deshalb gleich extreme Formen der Virtual Reality mit den damit verbundenen Anforderungen an technisches Equipment (Datenhelm und Tracking-Systeme) und das Gewöhnungsbedürfnis der Benutzer (Effekte der Seekrankheit) erforderlich werden (vgl. dazu [Bishop *et al.*, 1992]). So ließe sich durch verbal und gestisch dirigierbare Grafik-Agenten, mit deren Hilfe sich der Designer "in der Szene einbringen" und aus wechselnden Perspektiven heraus handeln kann, das Maß an "Situiertheit" in der Mensch-Maschine-Kommunikation erhöhen.

Literatur

[Adler *et al.*, 1992] Adler, M., Durfee, E., Huhns, M., Punch, W. & Simoudis, E. (1992). AAAI Workshop on Cooperation Among Heterogeneous Intelligent Agents. *AI Magazin, Vol 13(2)*, 39-42.

[Bishop *et al.*, 1992] Bishop, G., Bricken, W., Brooks, F., Brown, M., Burbeck, C., Durlach, N., Ellis, S., Fuchs, H., Green, M., Lackner, J., McNeill, M., Moshell, M., Pausch, R, Robinett, W., Srinivasan, M., Sutherland, I., Urban, D. & Wenzel, E. Research Directions in Virtual Environments. *Computer Graphics 26(3)*, 153-177.

[Böhm *et al.*, 1992] Böhm, K., Hübner, W. and Väänänen, K. (1992). GIVEN: Gesture driven interactions in virtual environments: A toolkit approach to 3D interactions. *Proc. Conf. Interface to Real and Virtual Worlds* (Montpellier, France, March 1992).

[Cao *et al.*, 1993] Cao, Y., Lenzmann, B., Siekmann, N. & Wachsmuth, I. (1993). Wissensbasierte Agenten zur Raumkonfiguration in einer virtuellen Umgebung. *Proc. KI-93 Workshop Hybride und Integrierte Ansätze zur Raumrepräsentation und ihre Anwendung (Berlin, Sept. 1993).* TU München 1993.

[Cao & Wachsmuth, 1993] Cao, Y. & Wachsmuth, I. (1993). Situated Space Agent for 3D Graphics Design. Extended abstract in *Virtual Reality Vienna 1993, the Global VR-Focus in Europe – Abstracts* (pp.8-9). Langfassung: KI-NRW Report 93-13.

[Friederici, 1989] Friederici, A.D. (1989). Raumreferenz unter extremen perzeptuellen Bedingungen: Perzeption, Repräsentation und sprachliche Abbildung. In Ch. Habel, M. Herweg & K. Rehkämper (Eds.): *Raumkonzepte in Verstehensprozessen.* Tübingen: Niemeyer.

[Hansen, 1987] Hansen, H.R. (1987). *Wirtschaftsinformatik I.* Stuttgart: Gustav Fischer Verlag.

[Kerner, 1992] Kerner, J. (1992). *Rechnernetze nach OSI.* Bonn: Addison-Wesley.

[Kirsch *et al.*, 1993] Kirsch, B., Wachsmuth, I. & Schnepf, U. (1993). Robots and simulated environments – first steps towards virtual robotics. *Proceedings IEEE 93 Symposium on Research Frontiers in Virtual Reality* (pp. 122-124). Los Alamos, CA: IEEE Computer Society Press.

[Lang, 1989] Lang, E. (1989). Objektschemata und räumliche Konfiguration. In Ch. Habel, M. Herweg & K. Rehkämper (Hrsg.): *Raumkonzepte in Verstehensprozessen (pp. 150-173).* Tübingen: Niemeyer.

[Laurel, 1990] Laurel, B. (1990). Interface agents: Metaphors with character. In B. Laurel (Ed.), *The art of human-computer interface design.* Addison-Wesley.

[Lenzmann, 1994] Lenzmann, B. (1994). Spezifikation und Implementierung eines Mehragentensystems zur Interaktion mit einer virtuellen Entwurfsumgebung (Diplomarbeit). Universität Bielefeld: Technische Fakultät.

[Levelt, 1986] Levelt, W. (1986). Zur sprachlichen Abbildung des Raumes: Deiktische und intrinsische Perspektive. In H.-G. Bosshardt (Hrsg.), *Perspektiven auf Sprache* (pp. 187-211). Berlin: DeGruyter.

[Lobin, 1993] Lobin, H. (1993). Situiertheit. *KI 1/93* (Rubrik "KI-Lexikon"), S. 61.

[Maes & Kozierok, 1993] Maes, P. & Kozierok, R. (1993). Learning interface agents. *Proceedings of the Eleventh National Conference on Artificial Intelligence (AAAI-93)* (pp. 459-465). Menlo Park: AAAI Press/The MIT Press.

[Maes, 1994] Maes, P. (1994). Agents that Reduce Work and Information Overload. *Communications of the ACM, July 1994 - Volume 37*, 31-40.

[Marcus, 1993] Marcus, A. (1993). Future directions in advanced user interface design. In N.M. Thalmann & D. Thalmann (Eds.), *Communicating with virtual worlds* (pp. 2-13). New York: Springer.

[Milde & Müller, 1994] Milde, J.T., Müller, G. (1994). Eine Architektur für die Simulation eines verhaltensbasierten Roboters (Arbeitsbericht Computerlinguistik). Universität Bilelefeld: Fakultät für Linguistik und Literaturwissenschaft.

[Müller, 1993] Müller, H.J. (Hrsg.) (1993). *Verteilte Künstliche Intelligenz – Methoden und Anwendungen.* Mannheim: BI Wissenschaftsverlag.

[Norman, 1994] Norman, D.A. (1994). How Might People Interact with Agents. *Communications of the ACM, July 1994 - Volume 37*, 68-71.

[Otto, 1994] Otto, K. (1994). Ein Raumagent für Objekttransformationen in einer virtuellen Entwurfsumgebung (Diplomarbeit). Universität Bielefeld: Technische Fakultät.

[Siekmann, 1994] Siekmann, N. (1994). Spezifikation und Implementierung eines Kommunikations-Subsystems für ein Mehragentensystem (Diplomarbeit). Universität Bielefeld: Technische Fakultät.

[Steiner *et al.*, 1990] Steiner, D., Mahling, D. Haugeneder, H. (1990). Human Computer Cooperative Work. In M. Huhns (eds.), *Proceedings of the 10th International Workshop on Distributed Artificial Intelligence.* MCC Technical Report No. ACT-AI-355-90.

[Steiner *et al.*, 1992] Steiner, D., Haugeneder, H., Kolb, M., Bomarius, F. & Burt, A. (1992). Mensch-Maschine-Kooperation. *KI 92/1*, 59-63.

[von Bechtolsheim, 1993] von Bechtolsheim, M. (1993). *Agentensysteme: Verteiltes Problemlösen mit Expertensystemen.* Braunschweig: Vieweg-Verlag.

[Wachsmuth, Krüger & Cao, 1994] Wachsmuth, I., Krüger, W. & Cao, Y. (1994). Virtuelle Räume. *KI 94/1*, 26-33.

[Wachsmuth & Cao, 1994] Wachsmuth, I., Cao, Y. (im Druck). *Interactive Graphics Design with Situated Agents.* Ersch. 1994 in W. Strasser, F. Wahl (eds.), Graphics and Robotics; Springer.