

Virtuelle Räume

Ipke Wachsmuth / Wolfgang Krüger / Yong Cao

Manuskript-Version, Dezember 1993 (z.Tl. andere, ähnliche Bilder)

Durch neue Möglichkeiten der 3D-Computergrafik, insbesondere der Visualisierung und interaktiven Manipulation synthetischer Geometriemodelle, geraten neue Einsatzmöglichkeiten der KI ins Blickfeld, die weit über die Interaktion mit einfachen Blockwelten hinausgreifen. Sie bieten einerseits interessante Perspektiven für mit den menschlichen Sinnen erfahrbare und erschließbare synthetische Welten: fotorealistic reaktive Raumumgebungen, die entsprechend gegenwärtiger Forschungsvorhaben einmal mit physikalisch erwart- und erfahrbaren Eigenschaften ausgestattet sein sollen. Andererseits lassen sie neue Wege des interaktiven Konstruierens und Explorierens virtueller Formen und räumlicher Gegebenheiten zu, die Ansatzpunkte für eine technische Nutzung z.B. im Architektur- und Konstruktionsbereich bieten. Mit Hilfe von Echtzeit-Animationen sollen solche Umgebungen dynamisch handhab- und veränderbar gemacht werden. Dieser Artikel erläutert zunächst technische Grundlagen und Richtungen von Forschungs- und Entwicklungsarbeiten der 3D-Computergrafik und greift anschließend exemplarisch Projekte unserer Arbeitsgruppen im herausfordernden Schnittgebiet zwischen Virtueller Realität, situierter Kommunikation und raumorientierter KI-Forschung auf.

Computergrafik und Visualisierung

Mit der rapide gestiegenen Verarbeitungsleistung von Rechenanlagen für den wissenschaftlich-technischen Bereich eröffnen sich in den letzten Jahren bedeutende Perspektiven für die computergrafische Darstellung komplexer dreidimensionaler Objektszenen, die nach den Vorstellungen des Anwenders in Echtzeit auf dem Bildschirm bewegt werden können. Viele Anwendungsbereiche, von der Strömungsdynamik über das Molekulardesign bis hin zur Architektur, hängen wesentlich von der Darstellbarkeit 3-dimensionaler Objekte und ihrer Bewegungen ab. Eine dem menschlichen Wahrnehmungsvermögen angepaßte Technik kann das Verstehen komplexer 3-dimensionaler Strukturen wesentlich erleichtern und verbessern.

Beispielsweise bietet die computergrafische Darstellung komplexer Molekülverbindungen Chemikern die Möglichkeit, ein Molekülmodell in beliebiger Weise auf dem Bildschirm zu drehen, wodurch sich in kürzester Zeit ein genauer visueller Eindruck von den räumlichen Zusammenhängen gewinnen läßt. Von ähnlich großer Bedeutung ist der Einsatz von Computergrafik-Verfahren in allen Bereichen der Objekt- und Szenendarstellung, z.B. im industriellen Design, in der Architektur, im Film und im künstlerischen Bereich. So möchten z.B. Architekten ihre Entwürfe mit Hilfe der Computergrafik von allen Seiten visualisieren, betrachten und modifizieren können, bevor ihre Entwürfe in der physikalischen Welt realisiert werden. Grafikcomputer, für die besondere Hardware-Architekturen zur Ausführung von Pro-

zessen der Bilderzeugung und Animation entwickelt wurden, können solche Visualisierungen wesentlich effektiver als die mittlerweile klassische Universal-Workstation ausführen.

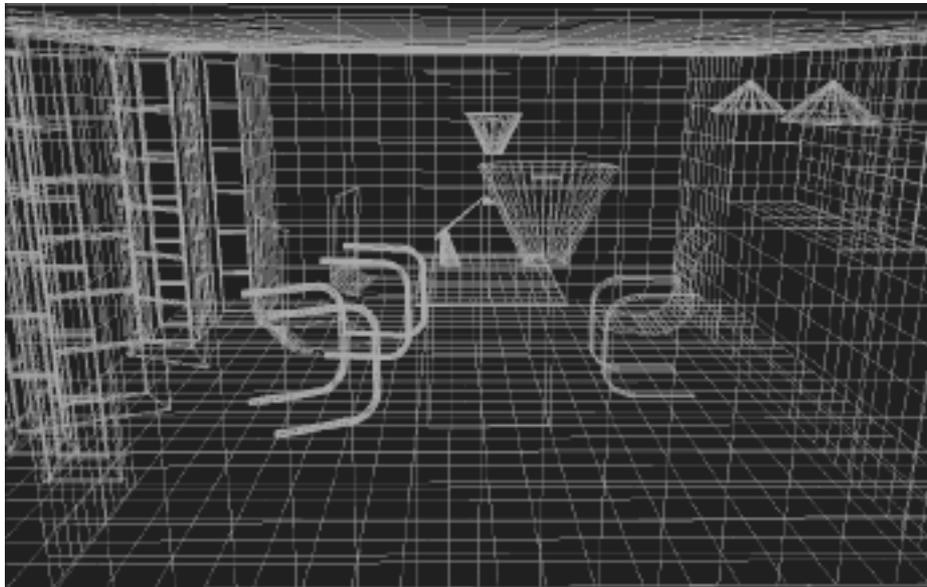


Abb. 1. Wireframe-Darstellung einer Objektszene aus dem Innenraumdesign¹

In den letzten Jahren wurden für unterschiedliche Arten von Daten leistungsstarke Visualisierungsverfahren entwickelt. Die Daten lassen sich in zwei große Klassen einteilen (Jackèl 1992): 1. Synthetische *Geometriedaten* (Punkte, Kurven, Flächen), denen Visualisierungsprimitive zugeordnet werden können (Punkte, Liniensegmente, Polygone); diese Primitive werden dann mit sog. Renderingverfahren visualisiert, d.h. in sichtbare Oberflächenstrukturen transformiert; 2. *Ergebnisdaten* aus Computersimulationen oder Messungen (skalare, vektorielle und tensorielle Daten); sie werden in der Regel (mittels Filtern und Abbildungen auf Visualisierungsprimitive) vorbearbeitet und dann in Bilder und Bildfolgen übersetzt, die u.U. noch nachbearbeitet werden, z.B. mit Falschfarben-Methoden oder Konturverstärkungen.

Bei den Visualisierungsverfahren werden grundsätzlich zwei Gruppen von Prozessen unterschieden: die Geometrieprozesse und die Renderingprozesse. Die *Geometrieprozesse* betreffen grob gesprochen das Layout von Objektszenen. Ausgangsdaten sind vielfach Eckpunktkoordinaten und Flächennormalen von Polygonen, die die Oberfläche eines Objektes oder eines Objekt-Ensembles netzartig einschließen. Die Geometrieprozesse umfassen Rotationen, Translationen, Skalierungen und Boolesche Operationen von 3D-Objekten wie auch perspektivische Transformationen und das Abschneiden von aus der Betrachterperspektive nicht sichtbaren Flächenanteilen (Polygonklippen). Damit bewegen sie ein Objekt in beliebiger Weise innerhalb eines scheinbaren Raumes (ein auf feste Grenzen skaliertes kartesisches Koordinatenraum). Davon ausgehend erfolgt die Abbildung auf die Bildschirmenebene als perspektivische Projektion, die zunächst zu einer Drahtmodell-(wireframe-)Darstellung führt (Abb. 1). Die

¹Abb. 1 mit freundlicher Genehmigung von Steve Drucker, MIT Media Lab, alle anderen Abbildungen GMD oder Uni Bielefeld.

Rendering-Prozesse dienen zur Erzeugung einer möglichst realitätsgetreuen Darstellung des Objektes: Es werden die Polygone oder Polygoneile entfernt, die – vom Betrachtungspunkt aus gesehen – von anderen Flächen überdeckt sind (hidden line/hidden surface removal). Hierdurch entfällt bereits in einem entsprechend bereinigten Drahtmodell der charakteristische "necker cube"-Umklappeffekt (siehe Abb. 2). Für jeden Bildpunkt (Pixel), der sich auf der Fläche eines mit den Eckpunkten definierten Polygons befindet, werden schließlich die 3D-Koordinaten und die Farbwerte berechnet.

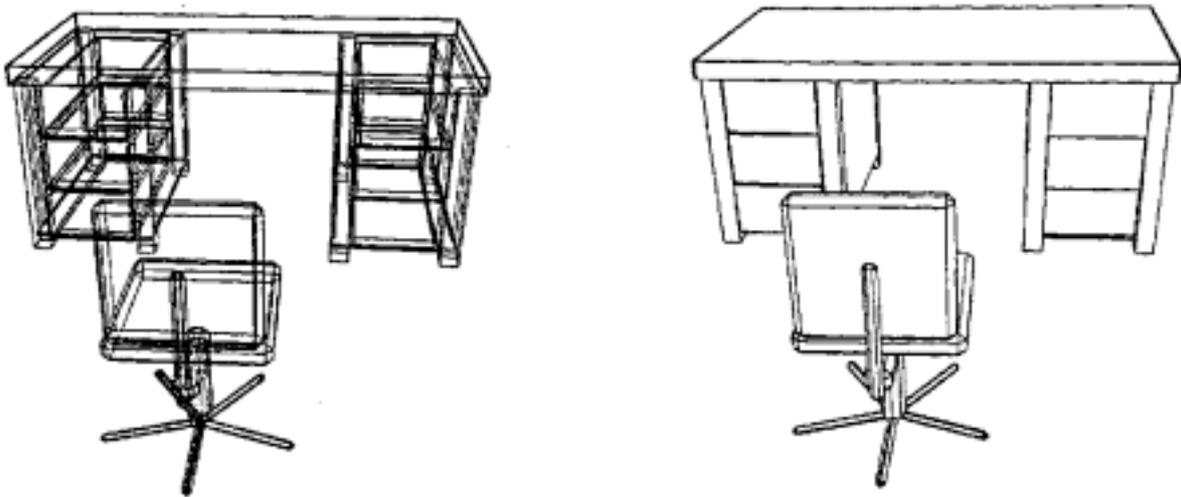


Abb. 2. Drahtmodell-Darstellung eines Schreibtischs mit Stuhl vor und nach hidden line removal

Die Modellierung und Darstellung komplexer Formen und Objektszenen erfordert zunächst das Erstellen und Verändern geeigneter Repräsentationsschemata, mit denen geometrische Forminformation festgelegt wird. Bei 3D-Körpern ist die Form durch eine definierende Punktmenge im Raum festgelegt; die Körperoberfläche ist Teil dieser Punktmenge. Je nach Einsatzzweck betrachtet man hier Oberflächenrepräsentationen, die allein das Äußere eines Körpers erfassen, und Volumenrepräsentationen, die auch das Innere eines Modells erfassen. Als Beispiel sei das vielverwandte Verfahren der *Grundkörper-Instanzen* genannt; hier wird von einer Reihe von Körperprimitiven (Ellipsoide, Zylinder, Quader, Kegel) ausgegangen, die bei Instanziierung transformiert und in der Größe reguliert werden können. Dieser Ansatz ist Ausgangsbasis für sog. CSG (Constructive Solid Geometry)-Repräsentationen.

Die Datenmengen, die durch Rendering-Systeme zur Erzeugung fotorealistischer, animierter 3D-Darstellungen in Bildfolgen zu komprimieren sind, können sehr groß sein. Beim gegenwärtigen technischen Stand läßt sich für 3D-Echtzeitgrafik dafür nur das Verfahren der Oberflächenschattierung (Shading) einsetzen, das bedeutet, daß zunächst Geometriemodelle von 3D-Körpern errechnet werden, die dann an der Oberfläche mit fotorealistischen Flächeneindrücken versehen werden. Hochleistungs-Renderer werden vielfach als selbständige Einheiten eingesetzt - z.B. für Anwendungen der "Virtuellen Realität" (siehe nächster Abschnitt); dort ist es notwendig, daß in Realzeit – d.h. mit mehr als 15 Bildern/sec, fotorealistische Darstellungen mit hoher Darstellungsgüte geliefert werden. Ein bezüglich des Rechenaufwands für die

Erzeugung der Bildpunkte einfaches und vielbenutztes Verfahren für ansatzweise realistische Objektdarstellungen ist das Gouraud-Schattierungsverfahren, das mit einer Interpolation der Farbintensitäten zwischen Stützstellen arbeitet. Im Ergebnis besser, aber aufwendiger ist das Phong-Verfahren; durch Berechnung der Farbwerte für jedes Pixel zwischen Stützstellen ist es in der Lage, die bei der Beleuchtung gekrümmter Oberflächen entstehenden Glanzlichter zu erzeugen, was zu einem realistischeren räumlichen Eindruck beiträgt. Mittlerweile läßt sich auch in ersten Installationen das Phong-Verfahren für Realzeit-Berechnungen einsetzen, da die im Rendering-Algorithmus verwendete Arithmetik die direkte Implementierung in spezieller Hardware erlaubt.

Grafikcomputer enthalten spezielle Hardware, um die Visualisierungsprozesse möglichst effektiv ausführen zu können. Dazu gehört in der Regel ein Rendering-Prozessor, ein hochspezialisiertes dediziertes Rechenwerk. Für die Geometrieprozesse ist ein spezielles Rechenwerk nicht unbedingt erforderlich, da der Rechenaufwand erheblich geringer als beim Rendering ist. Einen Kompromiß zwischen dedizierten Rechenwerken und universalen Prozessoren stellen die in IRIS-Workstations der Firma Silicon Graphics eingesetzten Geometry-Engines dar; dies sind Prozessoren mit einem leistungsfähigen Gleitpunkt-Rechenwerk, deren Hardware speziell an die Aufgabenstellung der Geometrieverarbeitung angepaßt ist. Mehrere solche Rechenwerke werden in einer Prozessor-Pipeline angeordnet, wobei jede Einheit Teilaufgaben der Datenkonvertierung, Geometrietransformation, Projektion und der Entfernung nicht sichtbarer Flächenanteile erledigt. Die Rendering-Prozesse werden durch spezielle Speichereinheiten (Frame-Buffer-System) unterstützt. Die Bildausgabe erfolgt nach dem Fernseh rasterprinzip, d.h. die als Matrix gespeicherte Bildinformation wird in schneller zyklischer Folge aus zwei Bildwiederholungspeichern zeilenweise ausgelesen; das Einschreiben der Bilder erfolgt im wahlfreien Zugriff. Die beiden Prozesse müssen untereinander synchronisiert werden, um beispielsweise ein drehendes Objekt störungsfrei darstellen zu können.

Neueste Gerätegenerationen erlauben das hardwaregestützte Texturieren von Objektoberflächen und den Einsatz von Volumentexturen sowie das Glätten von Polygonflächen (Anti-Aliasing) von unerwünschten Streifenmustern, die als Artefakt durch die Rasterung filigraner Bilddetails auftreten können. Die seit kurzem verfügbare "Reality Engine" von Silicon Graphics erlaubt es sogar, Spiegelungseffekte, z.B. auf räumlich modellierten Automobil-Karosserien, mehrmals pro Sekunde darzustellen, wofür Großrechner vor wenigen Jahren noch Stunden an Rechenzeit benötigten.

Die "Virtual Reality"-Technik

Die Ausgaben von herkömmlichen Computergrafik-Systemen waren zunächst ausschließlich für die Betrachtung durch einen menschlichen Benutzer gedacht; es gab wenige Möglichkeiten zur interaktiven Handhabung der dargestellten räumlichen Informationen. Eins der Hauptziele gegenwärtiger FuE-Arbeiten ist daher ein Brückenschlag zwischen den hauptsächlich generierungsorientierten Bilderzeugungssystemen, welche die errechneten Visualisierungen einem überwiegend passiven Benutzer zur Verfügung stellen, und interaktiven Systemen, die in der Lage sind, Benutzereingriffe in einer visualisierten Szene unmittelbar umzusetzen, also sich auch

in der Mensch-Maschine-Kommunikation besser handhabbar zu erweisen. Im Idealfall wird der "Betrachter" der mit dem Rechner generierten Szenen "direkt" mit allen Sinnen in das Geschehen einbezogen.

Seit Mitte der 80er Jahre ist – überschrieben mit dem Schlagwort "Virtual Reality" (VR) – eine neue Phase in der Entwicklung von interaktiven Schnittstellentechniken angebrochen. Diese neue Technik (auch "Artificial Reality" oder "Cyberspace") zielt auf eine möglichst unmittelbare Verbindung des Menschen mit seinen Aktivitäten und sensorischen Fähigkeiten mit der synthetischen Welt des Computers, generiert als 3-dimensionale Räume mit Hilfe der modernen Grafiktechnik und -software (interaktives "Walkthrough"), oder mit durch Stereo-Videokameras bzw. -Sensoren vermittelten Informationen aus entfernten Räumen ("Telepresence"). VR ist somit nicht eine Verbesserung von herkömmlichen Ausgabetechniken, sondern ein neues Kommunikationsmedium mit neuartigen Anforderungen an die Rechner- und Kommunikationstechnik. Nicht der Umgang des Menschen mit dem Computer steht im Vordergrund, sondern die möglichst direkte Kommunikation des Menschen mit seinen rechnergenerierten Modellen und Visionen, mit Simulationsergebnissen und mit Ereignissen und Personen an anderen Orten und zu anderen Zeiten.

Wurde die technische Entwicklung der VR zunächst vor allem durch die Militär- und Weltraumforschung ("War without Tears") vorangetrieben und ihre kommerzielle Auswertung durch die "Eskapismus-Industrie", so eröffnet sich gegenwärtig ein weiterer Bereich von möglichen Anwendungen in der Wissenschaft, Technik, Medizin, Architektur und Kunst. Beispiele für den Einsatz der VR-Technik in diesen Bereichen sind interaktive Explorationsmodelle für die Ergebnisse von Supercomputer-Simulationen von Strömungsfeldern (NASA Ames, Projekt "Virtual Wind Tunnel"; Bryson & Levit 1992) und das "Walkthrough Environment" der University of North Carolina mit Anwendungen in Architektur und Medizin (Brooks 1987). Neben der Erschließung von erweiterten Kommunikationsformen für räumlich verteilte Benutzer werden gegenwärtig Anwendungsszenarien im Bereich Konstruktion und Design, vor allem in der Stadtplanung und Architektur (siehe unten), aber auch in der Simulation und Visualisierung von Telepräsenz und Robotik diskutiert (Kirsch et al. 1993). Mit Projekten wie "Virtual Sho – Invisible Site" des amerikanischen Performance-Künstlers George Coates (Computerwoche 13/92) und "Home of the Brain" der Medienkünstlerin Monika Fleischmann und Wolfgang Strauss (Prix Ars Electronica 1992) haben Virtual Reality-Installationen auch Eingang in den künstlerischen Bereich gefunden.

Seit 1991 existieren Möglichkeiten, wesentliche Aspekte von VR-Interaktivität mit Hilfe moderner Grafik-Workstations zu realisieren. Damit steht diese neuartige Technik für ein breites Spektrum von Anwendungen in FuE-Bereichen von Industrie und wissenschaftlich-technischen Instituten zur Verfügung. Von den derzeitigen Installationen sind ungefähr die Hälfte im FuE-Bereich angesiedelt, so daß eine breite öffentliche Diskussion und realistischere Einschätzungen der Potenzen und Schwächen der VR-Technik möglich ist. Die wissenschaftlich-technischen Entwicklungen kommen hauptsächlich aus den USA, während Anwendungen mehr und mehr auch in Japan und Europa, vor allem in Großbritannien, getestet und zum Teil auch schon vermarktet werden. Sowohl die Computerindustrie (z.B. im "Virtual Worlds Consortium" der Firmen Alias, Boeing, Digital, Sun am HIT der University of Washington) als auch japanische Mechatronik-Hersteller wie NEC, Nintendo und Matsushita haben längerfristige Entwicklungsprojekte gestartet bzw. bringen erste kommerzielle Geräte auf den Markt.

Ein gegenwärtiges VR-Standardsystem besteht im wesentlichen aus folgenden Komponenten:

- Bildwiedergabesystem, z.B. einer Brille ("EyePhone") oder dem BOOM-System, in das zwei stereoskopisch generierte Bilder auf Farb-LCD's bzw. S/W-Bildschirme eingespielt und durch spezielle Weitwinkeloptiken betrachtet werden.
- Daten-Handschuh, bei dem die Fingerstellung entweder über Lichtdämpfung in aufgesetzten Glasfaserlichtleitern ("DataGlove" von VPL Research, Kalifornien), oder durch den Druck auf eingebettete Luftkissen berechnet wird. Dadurch können speziell definierte Gesten zur "Navigation" durch den virtuellen Raum oder zum Ergreifen und Manipulieren von virtuellen Objekten erkannt werden (Zimmermann et al. 1987).
- einem angeschlossenen Audio-Stereosystem (z.B. "AudioSphere" oder "Convotron"), das eine richtungs- und ortsabhängige Simulation von Tönen und Geräuschen gestattet (Wenzel 1992). Die sechs räumlichen Freiheitsgrade der Bewegung dieser drei VR-Komponenten werden gemessen durch mechanische, optische oder magnetische Positionssensoren, z.B. einem Polhemus-System (Raab et al. 1979), und durch Steuersoftware in Parameter für die Bild- und Tongenerierung umgesetzt.

Beispiele für gegenwärtige funktionstüchtige Highend-Standardsysteme zeigen die Abbildungen 3 und 4. Das "EyePhone" der Firma VPL Research, Kalifornien, besteht im wesentlichen aus zwei Farb-LCD's mit derzeit noch geringer Auflösung (s. Abb. 3). Das BOOM-System der Firma Fake Space Labs, Kalifornien, basiert auf zwei hochauflösenden S/W-Monitoren (s. Abb. 4). Beide Systeme benutzen den "DataGlove" der Firma VPL bzw. Nachfolgemodelle wie den "CyberGlove".



Abb. 3. EyePhone und DataGlove der Firma VPL Research, Kalifornien

Wesentliche Bedeutung für die Funktionalität und Qualität eines VR-Systems haben die angeschlossenen bildgebenden Systeme. Als Grundvoraussetzung für den Betrieb eines professionellen VR-Systems erweisen sich moderne Grafik-Workstations zur Echtzeitgenerierung komplexer realitätsnaher Szenen durchaus geeignet. Probleme stellen derzeit noch (siehe z.B. ACM 1991 und Davies 1991) die sensorischen und darstellenden Hardware-Komponenten (Datenhandschuh, Bewegungsmeßsystem, EyePhone); sie sind relativ primitiv konstruiert, im Gebrauch unkomfortabel und für viele Anwendungsbereiche zu teuer. Komponenten für das taktile Feedback und die räumliche Tonwahrnehmung befinden sich noch im Laborstadium (Furness 1990). Die Kommunikation mit entfernten Teilnehmern z.B. über Breitbandnetze ist noch völlig im Versuchsstadium.



Abb. 4. BOOM-System der Firma Fake Space Research, Kalifornien

Erwartet wird zunächst eine wesentliche Verbesserung der heutigen Basistechnologie, um die Echtzeit-Bestimmung von Position und Gestik zu erleichtern und vor allem wesentlich zu präzisieren, z.B. durch optische und akustische Meßmethoden. Die Bewegung im virtuellen Raum kann durch verbessertes Head- und Eyetracking erleichtert werden, z.B. durch Messung der Augenbewegung und Einbeziehung von Computer-Vision-Methoden. Die Darstellungsmittel sollen durch preiswertere hochauflösende LCD's oder 2-dimensionale Anordnungen von lichterzeugenden Dioden (LED's) für alle Farben und leichte, verzerrungsfreie Weitwinkeloptiken verbessert werden bis hin zur Einbeziehung von holografischen Techniken zur 3D-Darstellung von "virtuellen" Welten.

Allgemein ist zu beobachten, daß die "Technology of Immersion", d.h. die Einbeziehung des Benutzers in die synthetische 3-dimensionale Welt mit Hilfe von Stereobrille und Datenhandschuh, bei gegenwärtigen Anwendungen im Vordergrund steht. Virtual Reality umfaßt aber einen viel weiteren Kreis von Techniken, wobei die Entwürfe von Myron Krueger (1991) mit seinen Ansätzen zu "Artificial Reality" zukünftig immer mehr an Bedeutung gewinnen werden.

Virtual Reality und Künstliche Intelligenz

In den bisherigen VR-Systemen sind Methoden der Künstlichen Intelligenz teilweise bereits im Einsatz. Es wird z.B. eine Objekt-Wissensbasis für ein VR-Modell eingerichtet. In solchen Wissensbasen werden nicht nur die geometrischen und materiellen Informationen über die Szenen-Objekte festgehalten, sondern auch Informationen über Eigenschaften der Objekte wie etwa über ihre Funktionalität oder über Constraints zwischen den Objekten. Damit kann das System feststellen und entsprechend visualisieren, wie Objekte unter gegebenen Randbedingungen bewegt werden können. Solche Bewegungen werden gegenwärtig entweder durch interne vorprogrammierte Prozeduren oder durch externe Mittel (z.B. den VPL DataGlove oder die im Zusammenhang mit der Steuerung von Raumfahrt-Robotern entwickelte Space Mouse der Firma Space Control, Malching) gesteuert.

Die bislang realisierten VR-Systeme lassen allerdings noch viele Wünsche offen. Die dargestellten Welten sind schlicht, gehorchen nicht den grundlegenden physikalischen Gesetzen (zum Beispiel kann ein Tisch "in der Luft" stehen), wissen wenig über ihre eigene Raumstruktur, so daß bei der Arbeit mit und in diesen Welten eher technische Fertigkeiten gefordert sind, als daß imaginative Fähigkeiten gefördert werden. Hier wäre es wünschenswert, z.B. KI-Techniken des "physical modeling" für Effekte der simulierten Naturgesetze wie Schwerkraft, Widerstand von festen Körpern und Luftströmungen einzubeziehen. Die Möglichkeit der Echtzeit-Simulation und -Darstellung von dynamischen Prozessen wie die Bewegung von Objekten, die sich nicht durchdringen, den Bewegungsgesetzen genügen und Bewegungsbeschränkungen berücksichtigen, weisen allerdings heute noch in die Zukunft, da der notwendige Rechenaufwand die Ankopplung von Supercomputern erfordern würde. Die Berücksichtigung der menschlichen Wahrnehmungsgesetze, insbesondere die experimentellen Untersuchungen der Raumwahrnehmung, und die Einbeziehung von "natürlichen" Bewegungen gemäß den Naturgesetzen steht noch ganz am Anfang.

Eine Hauptaufgabe besteht in der Entwicklung von angepaßten Software-Werkzeugen für die schnelle und einfache Erstellung von komplexen Weltmodellen, die räumliche Gegebenheiten darstellen. Die Konstruktion von nichttrivialen Modellen ist gegenwärtig noch am zeit- und kostenaufwendigsten. Außerdem sollte ein interaktives Modellieren von Objekten, Formen, Farben, Texturen und Beleuchtungen angestrebt werden, so daß sich Änderungen des Modells unmittelbar beobachten und beurteilen lassen. Insbesondere ist die Einbeziehung von Kollisionserkennungsmodellen und von Beschreibungsmodellen für dynamische Verformungen notwendig. Besonders schwierig ist die Modellierung komplexer Formen, die sich aus vielen Teilen zusammensetzen, für die es keine prägnante Beschreibung gibt und deren Handhabung schwierig und zeitaufwendig ist. Aufgrund der Notwendigkeit, subjektive Vorstellungen von Form dem Computer mitteilen zu müssen, stellen sich beim Design Probleme in der Mensch-Maschine-Kommunikation, die die kreative Entwurfstätigkeit entscheidend behindern können.

Eine wichtige Voraussetzung für die komfortable Vermittlung von Interaktionen ist es, daß dem System die "Struktur" des Raumes aus der Sicht des Menschen bekannt ist. Die metrische Struktur wird nicht allein von geometrischen Gegebenheiten geprägt, sondern auch z.B. von der Reichweite, die man als Mensch von einer Position aus hat, ferner spielen Regionen um Objekte und sog. Objektschemata (Lang 1989), die intrinsische Merkmale einbringen, eine

Rolle ("vor dem Schreibtisch"), d.h. die Raumwahrnehmung wird auch modifiziert durch die anwesenden Objekte selbst (Levelt 1986; siehe Abb. 5).

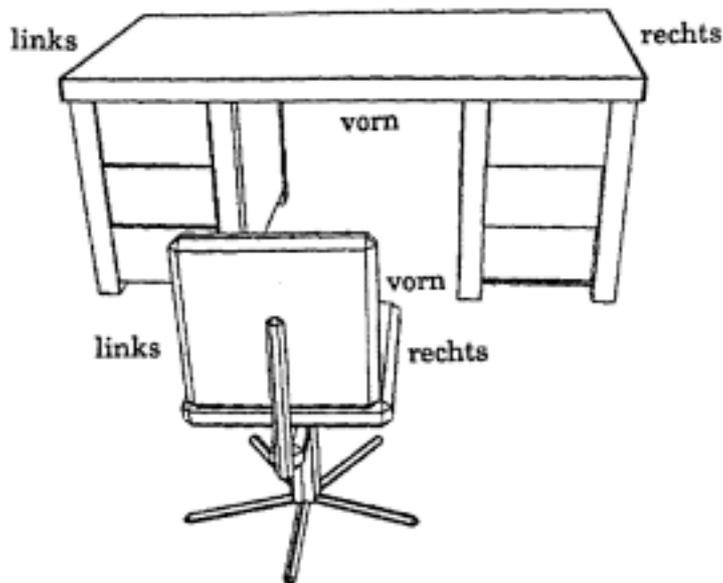


Abb. 5. Unterschiedlicher Gebrauch der Ausdrücke 'links', 'vorn' und 'rechts' bei einem Stuhl und einem Schreibtisch (nach Levelt 1986)

Neben einem Grundraum mit impliziter topologischer Struktur wie "... ist Teil von ..." oder "... in ..." wird in menschlichen Handlungszusammenhängen der Raum anthropomorphisiert durch die Anwesenheit des Menschen. Das visuell-perzeptuelle System erstellt räumliche Relationen zwischen Objekten und dem Körper des Beobachters (Bryant 1991, 1992). Hierfür sind verschiedene Referenzstrukturen vorgeschlagen worden: (1) die egozentrische Referenzstruktur, definiert durch die drei körperlichen Achsen: Kopf/Fuß, vorn/hinten, links/rechts, wobei nur die links/rechts-Achse biologisch symmetrisch ist; (2) die allozentrische Referenzstruktur, definiert durch orthogonale Achsen außerhalb des Beobachters. Solche Achsen können von einem prominentem "landmark" in der Umgebung ausgehen oder sich an globalen Himmelsrichtungen ausrichten (Cao 1993). Die Kopf/Fuß-Achse ist in einer Gravitationsumgebung mit der oben/unten-Achse identifiziert, sofern der Beobachter in einer "normalen" (aufrechten) Stellung steht oder sitzt; in anderen Umgebungen (Schwereelosigkeit) sind die beiden Achsen unterschiedlich abgebildet (Friederici 1989). Durch die Projektion der menschlichen Asymmetrien in den Grundraum könnten menschenbezogene Perspektiven eingebracht werden; z.B. würde die Verwendung situierter Referenzen wie "vorn", "hinten", "rechts", "links" etc. eine wichtige Hilfestellung im virtuellen Raum bieten.

Statt der Verwendung exakter Koordinatenangaben benutzt der Mensch ferner häufig Raumobjekte als Referenzobjekte (Habel 1988). So versteht man die Lokalisation eher durch eine aus einem Koordinaten-Bezugssystem abgeleitete qualitative Relation wie "Kiel liegt nördlich von Hamburg" als durch die genauen geografischen Koordinaten des Raumobjekts Kiel, die nur im Hinblick auf spezielle Anwendungen nützlich sind (Cao 1993). Jedoch sind solche qualitativen Angaben im Vergleich zu exakten Koordinatenangaben nicht nur vage, sondern auch von Situa-

tion zu Situation durch unterschiedliche Bezugssysteme bestimmt. Bei Aussagen wie "die Lampe auf dem Tisch" und "das Muster auf dem Tisch" wird die Relation "auf" als (3D-) Ortsangabe (Lampe) oder als Eigenschaft (Muster) in Bezug zum Tisch interpretiert. In vielen Fällen ist der in Äußerungen eingenommene Raumstandpunkt nicht der des entfernten Beobachters, sondern subjektiv beim Objekt selbst ("das Muster auf der Lampe").

Ein Haupthindernis stellt sich also in der technischen Umsetzung solcher subjektiven Beschreibungen in ein exakt beschriebenes Geometriemodell, sei es beim Modellaufbau oder beim Navigieren in einem virtuellen Raum. Hier werden wesentliche Impulse durch den Einsatz von KI-Methoden erwartet. In jüngsten Forschungsagenda für "Virtual Environments" wird u.a. die Realisierung wissensbasierter Agenten für die Interaktion mit Virtuellen Umgebungen vorgeschlagen (Knowledge-based agents for interactive guidance; s. Bishop et al. 1992). Ein weitergehendes Ziel ist es, in die Mensch-Maschine-Kommunikation grundlegende menschliche Fähigkeiten wie Sprache, Gestik und Mimik einzubeziehen. Fehlerhafte oder ungenaue Aktionen des Benutzers sollen vom Rechner toleriert und verarbeitet werden können. Hier bietet besonders die Möglichkeit einer symbolischen Kommunikation mit dem technischen System, z.B. über räumliche Gegebenheiten, Anknüpfungspunkte für übergreifende FuE-Arbeiten, die Virtual Reality und Künstliche Intelligenz gemeinsam betreffen.

Virtuelle Architektur und Innenraumgestaltung

In diesem Abschnitt sollen Projektarbeiten von Forschungsgruppen an der GMD und an der Universität Bielefeld exemplarisch angerissen werden, die sich mit der Gestaltung virtueller Räume befassen. Bei der Visualisierung virtueller, also (noch) nicht gebauter Räume oder Gebäude ist es einer der Gedanken, sich vor einer aufwendigen physikalischen Umsetzung bereits im kreativen Entwurfsprozeß Veranschaulichungen zu verschaffen und gleichzeitig der Vorstellungskraft freien Lauf zu lassen. Die Modellierung am Computer – gemeint ist hier immer die Erstellung und Veränderung von geometrischen Modellen – hat eine ganze Reihe von Vorteilen, die die Attraktivität dieses neuen technischen Mediums ausmachen. Einerseits ermöglicht die technische Umgebung die Übernahme bereits vorhandener numerischer Daten, die Verwendung von Modelldatenbanken und zugleich Unterstützung bei der Modellarchivierung, andererseits ermöglicht sie ein Probehandeln ohne Materialverbrauch und mit leichter Veränderbarkeit des (immateriellen) Modells, bevor es materialisiert, also gebaut wird.

Erste Forschungs- und Anwendungsprojekte der Forschungsgruppe "Scientific Visualization" in der GMD befassen sich deshalb neben der Visualisierung und interaktiven Datenanalyse in Wissenschaft und Medizin (Krüger 1993) mit der Nutzung von VR für die Darstellung und Exploration von Büro- und Gebäude-Layouts im Bereich Architektur und Design (siehe Abb. 6). Für diese Forschungsprojekte wird sowohl das "EyePhone" der Firma VPL Research als auch das BOOM-System der Firma Fake Space Labs eingesetzt. Der Schwerpunkt der Forschung liegt in der Ankopplung von Supercomputern (z.B. von massiv parallelen Systemen wie der Connection Machine), um z.B. interaktive Objektmodellierung, hochqualitative Bildgenerierungsmethoden ("incremental radiosity") einsetzen und Naturgesetze (Schwerkraft, Kollisionsberechnung) berücksichtigen zu können.

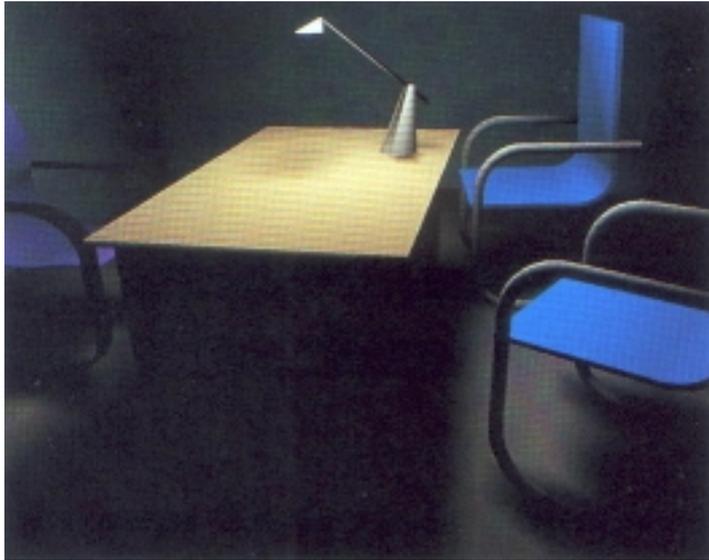


Abb 6. Beispiel für eine Radiosity-Darstellung im Bereich des Innenraumdesigns

Die VR-Technik könnte in diesem Bereich folgende Ziele unterstützen:

- 3-dimensionale Vorabexploration von Geografie, Bauplänen, Innenarchitekturen
- Interaktives Entwerfen von Gesamtmodellen, Einzelobjekten, Lichtverhältnissen, Oberflächeneigenschaften und von Wechselwirkungen mit vorgegebenen Umgebungen
- Test von Wahrnehmungsfaktoren wie Proportion, Farbgebung, Licht-Schatten-Verläufen, Oberflächenstrukturen, z.B. durch Simulation der 3-dimensionalen "Erfahrung" eines synthetischen Fahrzeuginnenraums im Hinblick auf gestalterische und psychologische Aspekte.

Die Verwendung der bekannten VR-Interaktionsmittel, z.B. des Datenhandschuhs, ist dabei nur eine der derzeit untersuchten Möglichkeiten, das Arrangement einer Raumobjektszene (z.B. eines virtuellen Arbeitsraumes) zu manipulieren. Ein Objekt wird (mit Hilfe sog. bounding-boxes) ergriffen, an eine andere Position bewegt und dort abgesetzt, wobei gegenwärtig noch durch Augenkontrolle sicherzustellen ist, daß das Objekt wirklich auf dem Boden zu stehen kommt. Die Vorteile der direkten Manipulation eines Objektes sind – zumindest bei einer räumlichen Bewegung – unmittelbar einsichtig, jedoch fehlt zur Zeit noch das unmittelbare Feedback für den gelungenen Zugriff, und Änderungen der Objektgröße oder seines Materials (Farbe etc.) ließen sich nur auf dem Umweg über "Space Menues" erzielen. Eine andere Möglichkeit bestünde in einer sprachlich kommunizierten Anweisung, die von einem geeigneten Mittersystem ausgeführt wird. Man will also entweder einen Tisch direkt bewegen (aufnehmen, verschieben, absetzen) können oder die Anweisung geben, daß dies geschieht. In beiden Fällen würde sich der technische Zugriff auf objektorientierte Geometriemodelle der komplexen Objektszenen beziehen lassen. Die Vorteile der Ergänzung bisheriger VR-Interaktionsmittel durch sprachliche und gestische Instruktionen lägen darin, daß sie die Interaktionsmöglichkeiten im virtuellen Raum durch den Gebrauch von Zeichen als einer für menschliches Agieren wesentlichen Dimension vervollständigen würden.

In dem Projekt VIENA an der Universität Bielefeld ist es daher das Ziel, Objekte in einer Virtuellen Entwurfsumgebung durch Agenten-vermittelte sprachliche und gestische Kommunikation interaktiv zu manipulieren² (Wachsmuth & Cao 1993; Cao & Wachsmuth 1993; Cao et al. 1993). Ein Hauptarbeitspunkt ist die Konstruktion situierter Agenten, die einerseits mit Menschen kommunizieren, um die Aufgabenstellung entgegenzunehmen, und andererseits in Kooperation untereinander z.B. die Rauminferenz und Bewegung der Objekte im virtuellen Raum durchführen. Dadurch soll die räumliche Anordnung der Objekte im virtuellen Raum nach Anweisung ("stelle die Lampe auf den Tisch") in Echtzeit entsprechend verändert werden. Abb. 7 zeigt eine schematische Darstellung der Beziehung zwischen Mensch (Instrukteur), Agenten und technischen Konstrukteur-Systemen zur Modellierung und Visualisierung computergrafischer 3D-Objektszenen.

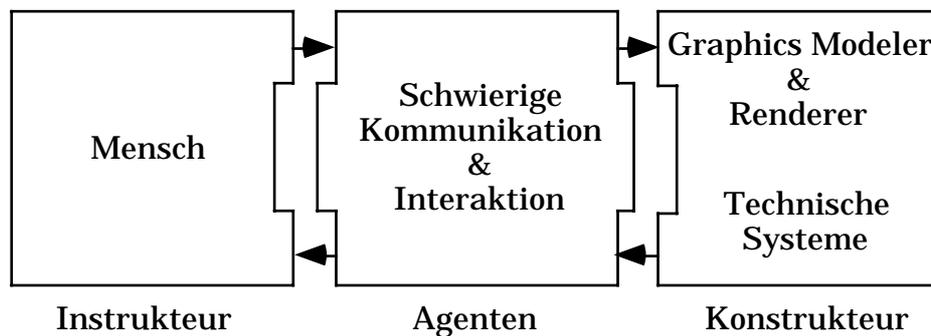


Abb. 7. Agenten als Bindeglied in der Interaktion zwischen Mensch und virtueller Umgebung

Bei den sprachlich kommunizierten Instruktionen sind wiederum eigene Schwierigkeiten zu meistern. Zum Beispiel beinhalten die drei Anweisungen "Bewege den Tisch mehr nach hier, mehr nach hinten, mehr zum Schrank" verschiedene räumliche Referenzsysteme, die in einem Fall beim Sprecher, im andern beim Objekt selbst und im dritten Fall bei einem entfernten Referenzobjekt verankert sind. Das System muß also zunächst – wie ein ausführender Mensch – das jeweils zutreffende Bezugssystem bestimmen, zweitens die Verschiebungsrichtung in bezug auf die Ausgangsposition des Verschiebeobjekts und drittens die Verschiebungsweite: ein (noch zu bestimmender) Wert zwischen der Ausgangsposition und einer maximalen Zielposition (etwa gegeben durch eine Begrenzung, z.B. der Wand eines virtuellen Raumes). Bei der Anweisung "Bewege den Tisch mehr nach da" ist schließlich eine gestisch angedeutete Verschiebungsrichtung auszuwerten.

Das engere Szenario hat folgenden Aufbau: Im Design-Prozeß kontrolliert der Mensch als Instrukteur den entstehenden Entwurf über Ausgabe-Sichtmedien. Seine Änderungswünsche werden durch einfache sprachliche Instruktionen dem System übermittelt (z.B. "Bringe den Tisch mehr nach vorn") und evtl. durch andere Eingabemedien wie DataGlove, SpaceMouse ergänzt (z.B. "den Tisch mehr nach da", wobei "da" durch eine Richtungsgeste grob spezifiziert wird). Das Szenario sieht vor, daß z.B. die Verschiebungsweite vom System aufgrund

²Die Forschungsarbeiten im VIENA-Projekt werden im Rahmen des Bielefelder KI-NRW-Schwerpunktbereichs "Künstliche Intelligenz und Computergrafik" vom Ministerium für Wissenschaft und Forschung NRW unter der Förder-Nr. IVA3-107 007 93 unterstützt.

von den Gradpartikeln wie "etwas mehr", "mehr", "viel mehr" zugeordneten relativen Defaultgrößen (z.B. 20%, 50%, 80%) als Reaktion angeboten wird. In einer erneuten Interaktion ("nicht so weit", "noch weiter") kann dies korrigiert werden; d.h. die Semantik der Instruktion wird jeweils in der Interaktion *verhandelt*, nicht absolut berechnet.

Die Agenten (Abb. 7) sind handlungsfähige Systeme mit begrenzten Teilfähigkeiten, die sie in Bezug auf die zu erbringende Aufgabe einsetzen. Bestimmte Agenten sollen beispielsweise die Rauminferenz im technischen System erwartungsgemäß umsetzen. Dabei soll die aktuelle Situation möglichst weitgehend als Informationsquelle herangezogen werden. Bestimmte Agenten verfügen über die aktuellen Geometrie- und Materialeigenschaften der Objekte im virtuellen Raum und über ihre geometrischen Lagebeziehungen, andere über Wissen des Verhaltens der Objekte im physikalischen Raum. Es soll erreicht werden, daß ein an den Tisch gerückter Stuhl nicht soweit vorgeschoben werden kann, daß er den Tisch durchdringt. Nach einer Instruktion "Stelle die Lampe unter den Tisch" soll die Lampe einerseits unter der Tischplatte und andererseits nicht in der Luft, sondern auf dem Boden plaziert sein.

Um die Kommunikation mit dem Instrukteur situationsgerecht zu gewährleisten, verfügen die Agenten über die Perspektive des Instrukteurs und die aktuellen Informationen der Szene, die der Instrukteur gerade sieht. Durch die Integration von rudimentärem Alltagswissen, Wissen über die quantitative Handhabung räumlicher Information (Habel 1991) und Ausnutzung situierter Informationen (z.B. über die zuletzt durchgeführten Manipulationen) sollen mögliche Mehrdeutigkeiten der Instruktionen verhindert und als Ziel-Szene eine auf die Erwartungen des Instrukteurs passende virtuelle Welt vermittelt werden. Je kompetenter – durch die Vermittlung der Agenten – der Konstrukteur ist, desto erfolgreicher können die Instruktionen interpretiert und ausgeführt werden oder, anders ausgedrückt, desto fragmentarischer oder komplexer können die Anweisungen des Instrukteurs sein.

Im Projekt VIENA wird eine Silicon Graphics Elan 4000 eingesetzt, die mit einer Grafik-Engine ausgerüstet ist und Hardware-Shading (Renderer) in Echtzeit unterstützt. Als Modeler wird das 3D-Animationssystem SOFTIMAGE verwendet, das virtuelle Objekte ansatzweise fotorealistisch darstellen kann. In dieser Software ist es nicht vorgesehen, modellierte virtuelle Objekte außerhalb der Menü-Umgebung durch ein anderes Programm direkt zu manipulieren. Es gibt allerdings 255 freie Channels, die mit speziellen Treibern belegt werden können, um die Parameter der Objekte zu verändern. Diese Channels sollen in VIENA verwendet werden, um das KI-System mit dem Grafik-System zu koppeln. Die Agenten, die für die Channels zuständig sind, sorgen dafür, daß die Informationen zwischen symbolischer Repräsentation und virtueller Welt umgesetzt werden.

Zusammenfassung und Ausblick

Die heute verfügbaren Mittel der hochqualitativen Computergrafik können durch eine dem menschlichen Wahrnehmungsvermögen angepaßte Technik das Verstehen komplexer 3-dimensionaler Strukturen wesentlich erleichtern und verbessern. Leistungsstarke Visualisierungsverfahren ermöglichen auch bei sehr großen Datenmengen zunehmend realitätsgetreue animierte 3D-Darstellungen in hoher Geschwindigkeit. Mit der Technik der "Virtual Reality" steht ein neuartiges Medium zur Verfügung, das eine möglichst direkte Kommunikation von Menschen mit ihren rechnergenerierten Modellen und Simulationsergebnissen zum Ziel hat. Mit Hilfe

moderner Hochleistungs-Grafikworkstations gelangen erste Schritte in Richtung zu interaktiven Systemen, die in der Lage sind, Benutzereingriffe in einer visualisierten Szene unmittelbar darzustellen. Mit den erwarteten Verbesserungen der heutigen Basistechnologie ergeben sich Perspektiven für interessante Anwendungsszenarien im Bereich Konstruktion und Design.

Die bislang realisierten VR-Systeme weisen jedoch noch Mängel – etwa hinsichtlich simulierter physikalischer Gesetze – auf, die den Einsatz von KI-Techniken herausfordern. Eine weitere Hauptaufgabe besteht in der Entwicklung von angepaßten Software-Werkzeugen für die schnelle und einfache Erstellung von komplexen Weltmodellen, die räumliche Gegebenheiten darstellen. Als wichtige Voraussetzung für die komfortable Vermittlung von Interaktionen muß dem System die Struktur des Raumes aus der Sicht des virtuell teilnehmenden Benutzers bekannt sein. Für die Umsetzung subjektiver Raumbeschreibungen in exakt beschriebene Geometriemodelle, sei es beim Modellaufbau oder beim Navigieren im virtuellen Raum, werden Erwartungen an den Einsatz von KI-Methoden gestellt, die sich auch in Forschungsagenda für "Virtual Environments" niederschlagen. Weitergehende Ziele sind der Einbezug grundlegender menschlicher Fähigkeiten wie Sprache und Gestik und die Tolerierung fehlerhafter oder ungenauer Interaktionen. Hier bieten sich Anknüpfungspunkte für übergreifende Forschungs- und Entwicklungsarbeiten, die Virtual Reality und Künstliche Intelligenz gemeinsam betreffen.

Erste Projektarbeiten unserer Forschungsgruppen an der GMD und der Universität Bielefeld, die sich mit der Nutzung von VR- und KI-Techniken befassen, liegen im Bereich Virtuelle Architektur und Innenraumgestaltung. Sie richten sich auf den interaktiven Entwurf und die Vorabexploration von 3-dimensionalen Büro- und Gebäude-Layouts sowie auf den Test von Wahrnehmungsfaktoren durch Simulation der 3-dimensionalen Raumerfahrung. Zu den bislang vorhandenen VR-Interaktionsmitteln sollen sprachliche und gestische Instruktionen hinzukommen, um die Interaktionsmöglichkeiten im virtuellen Raum durch den Gebrauch von Zeichen als einer für menschliches Agieren wesentlichen Dimension zu vervollständigen. Der gewählte Zugang über die Konstruktion von Agenten, die in Kooperation untereinander z.B. die Rauminferenz und Bewegung von Objekten im virtuellen Raum durchführen, scheint dabei nicht auf sprachliche Interaktionen begrenzt, sondern könnte ebenfalls direkte Manipulationen unterstützen, um eine auf die Erwartungen des Benutzers passende virtuelle Welt zu vermitteln.

Die angesprochenen Forschungsfragestellungen umreißen ein herausforderndes Schnittgebiet zwischen Virtueller Realität, situierter Kommunikation und raumorientierter KI-Forschung. Weitere Kontexte dafür bilden das bei der GMD für den neuen Forschungsschwerpunkt "Intelligente multimediale Systeme" erarbeitete Forschungsprogramm "Imagination at Work" und andererseits in Bielefeld der KI-NRW Forschungsbereich "Künstliche Intelligenz und Computergrafik" sowie der neu installierte DFG-Sonderforschungsbereich 360 "Situierete Künstliche Kommunikatoren".

Literatur

ACM (1991). *Virtual Interface Technology*. SIGGRAPH '91, Tutorial 3. Las Vegas.
Bishop, G., Fuchs, H. et al. (1992). Research Directions in Virtual Environments: Report of an NSF Invitational Workshop (March 23-24, 1992, University of North Carolina at Chapel Hill). *Computer Graphics* 26(3), 153-177.

- Brooks, F. (1991). Walkthrough – A Dynamic Graphics System for Simulating Virtual Buildings. *Proc. of ACM Workshop on 3D Graphics* (Chapel Hill, Oct. 1987), 9-21.
- Bryant, D.J. (1991). *Perceptual Characteristics of Mental Spatial Models* (Dissertation). Stanford University: Dept. of Psychology.
- Bryant, D.J. (1992). A Spatial Representation System in Humans. *PSYCOLOQUY* 3(16) space.1
- Bryson, S. & Levit, C. (1992). The Virtual Wind Tunnel. *IEEE Computer Graphics and Applications* 12(4), 25-34.
- Cao, Y. (1993). *Zur Darstellung und Verarbeitung von Wissen über Himmelsrichtungen – Geometrische und Kognitionswissenschaftliche Aspekte* (Dissertation am Fachbereich Informatik der Universität Hamburg). Sankt Augustin: Infix (DISKI-33).
- Cao, Y., Lenzmann, B., Siekmann, N. & Wachsmuth, I. (1993). Wissenbasierte Agenten zur Raumkonfiguration in einer virtuellen Entwurfsumgebung. *Proc. Workshop "Hybride und Integrierte Ansätze zur Raumrepräsentation und ihre Anwendung"*, KI-93, Berlin, Technischer Report der TU München (FKI-185-93), 50-54.
- Cao, Y. & Wachsmuth, I. (1993). Situated Space Agent for 3-D Graphics Design. Ersch. in: *Proc. Virtual Reality Vienna 1993 - The Global VR-Focus in Europe*. 1.-3. Dez. 1993, Wien/Österreich.
- Computerwoche* 13/92 (27. März 1992, S.33f). US-Multimedia-Regisseur setzt Computer als Theatermacher ein.
- Davies, D.B. (1991). Reality Check. *Computer Graphics World* (June 1991), 49-54.
- Friederici, A.D. (1989). Raumreferenz unter extremen perzeptuellen Bedingungen: Perzeption, Repräsentation und Sprachliche Abbildung. In Ch. Habel, M. Herweg & K. Rehkämper (Hrsg.): *Raumkonzepte in Verstehensprozessen*. Tübingen: Niemeyer.
- Furness, T.A. (1990). Experiences in Virtual Spaces. *Proc. of Human-Machine Interfaces for Teleoperations & Virtual Environments*, Santa Barbara.
- Habel, Chr. (1988). Prozedurale Aspekte der Wegplanung und Wegbeschreibung. In H. Schnelle & G. Rickheit (Hrsg.): *Sprache in Mensch und Computer* (S.107-133). Wiesbaden: Westdeutscher Verlag.
- Habel, Chr. (1991). Processing of Spatial Expressions in LILOG. In: O. Herzog & C.-R. Rollinger (eds.): *Text Understanding in LILOG*. LNAI, 546. Berlin: Springer-Verlag.
- Jackel, D. (1992). Grafik-Computer für Echtzeitanwendungen: Applikationen, Anforderungen und Architekturmerkmale. *GMD-Spiegel* 3/4'92, 20-23.
- Kirsch, B., Schnepf, U., Wachsmuth, I. (1993). RoboVis – a Scenario for Using Virtual Reality Techniques in Learning Robot Development. Ersch. in W. Strasser & F. Wahl (Hrsg.): *Proc. Int. Workshop "Graphics and Robotics"* (Schloß Dagstuhl, April 19-22).
- Krueger, M. (1991). *Artificial Reality II*. Reading (MA): Addison Wesley.
- Krüger, W. (1993). Virtual Reality – Anwendungen in Wissenschaft, Technik und Medizin. *it – Sonderheft "Multi Media"*, April 1993.
- Lang, E. (1989). Objektschemata und räumliche Konfiguration. In Ch. Habel, M. Herweg & K. Rehkämper (Hrsg.): *Raumkonzepte in Verstehensprozessen* (S.150-173). Tübingen: Niemeyer.
- Levelt, W. (1986). Zur sprachlichen Abbildung des Raumes: Deiktische und intrinsische Perspektive. In H.-G. Bosshardt (Hrsg.): *Perspektiven auf Sprache* (S. 187-211). Berlin: DeGruyter.
- Prix Ars Electronica (1992). Internationales Kompendium der Computerkünste. Linz: VERITAS Verlag.
- Raab, F.H. et al. (1979). Magnetic Position and Orientation Tracking System (Polhemus). *IEEE Trans. AES* 15(5), 709-718.
- Wachsmuth, I. & Cao, Y. (1993). Virtual Environments and Situated Agents. Ersch. in W. Strasser & F. Wahl (Hrsg.): *Proc. International Workshop "Graphics and Robotics"* (Schloß Dagstuhl, April 19-22).
- Wenzel, E.M. (1992). Localization in Virtual Displays. *Presence* 1(1), 80-87.
- Zimmermann, T. et al. (1987). A Hand Gesture Interface Device. *Proceedings of the 1987 CHI Conference*, 188-192.

Adressen und Kurzvitae der Autoren

Ipke Wachsmuth, Technische Fakultät, Universität Bielefeld, Postfach 100131, 33501 Bielefeld, ipke@techfak.uni-bielefeld.de

Wolfgang Krüger, HLRZ.VIS, GMD Schloß Birlinghoven, Postfach 1316, 53731 Sankt Augustin, krueger@viswiz.gmd.de

Yong Cao, Technische Fakultät, Universität Bielefeld, Postfach 100131, 33501 Bielefeld, yong@techfak.uni-bielefeld.de

Dr. Ipke Wachsmuth ist Professor für Wissensbasierte Systeme (Künstliche Intelligenz) an der Universität Bielefeld und befaßt sich dort mit Forschungsthemen zur Wissensstrukturierung und zur begrifflichen Kommunikation mit künstlichen Systemen, u.a. im SFB 360 "Situierete Künstliche Kommunikatoren". Von Oktober 1992 bis März 1993 war er Gastforscher in der "Scientific Visualization"-Gruppe um Wolfgang Krüger an der GMD, Bonn–Sankt Augustin.

Dr. Wolfgang Krüger studierte Physik in Berlin und arbeitete als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Elementarteilchentheorie der FU Berlin. Er befaßt sich mit Problemen der Computergrafik, mit Schwerpunkt Bildsynthese. Zur Zeit ist er Leiter der Forschungsgruppe "Scientific Visualization" am Höchstleistungsrechenzentrum der GMD, Bonn–Sankt Augustin, wo er Projekte über Grundlagen der Visualisierung wissenschaftlicher Daten und über Anwendungen der "Virtual Reality" durchführt.

Dr. Yong Cao studierte Mathematik (Bachelor) und Informatik/KI (Magister) in China. Seit 1988 beschäftigt er sich mit der analogischen Repräsentation räumlicher Sachverhalte und hat auf diesem Gebiet im Graduiertenkolleg Kognitionswissenschaft der Universität Hamburg promoviert. Zur Zeit arbeitet er im Projekt VIENA an der Universität Bielefeld.

=====

Zeichen insgesamt ca: 45000

Zeichen ohne Lit. pp. 39000