

# Interaktive Zusammensetzung von 3D-Modellen zur Unterstützung des räumlichen Verständnisses

Bernhard Preim\*, Oliver Deussen\*\*, Felix Ritter\*\*

\*MeVis gGmbH an der Universität Bremen<sup>1</sup>  
Universitätsallee 29, 28359 Bremen

\*\*Otto-von-Guericke Universität Magdeburg, Fakultät für Informatik  
{bernhard, deussen@isg.uni-magdeburg.de, fritter@cs.Uni-Magdeburg.DE}



**Zusammenfassung:** Wir präsentieren ein System, mit dem 3D-Modelle aus Einzelteilen zusammengesetzt werden können, damit Benutzer räumliche Zusammenhänge erlernen. Das System folgt der Metapher eines 3D-Puzzles: Benutzer setzen ein 3D-Modell aus einer gegebenen Menge von individuellen Teilen zusammen. Sie können beliebig viele Ablagen nutzen, um Teile zu sortieren und zusammenzusetzen. Dabei kommen fortschrittliche Techniken der Visualisierung von und Interaktion mit 3D-Daten zum Einsatz. So werden Schatten projiziert, semi-transparente Cursor für die Selektion genutzt und eine 3D-Ein- und -Ausgabe angeboten. Außerdem ist eine beidhändige 3D-Interaktion möglich. Das System arbeitet in verschiedenen Schwierigkeitsgraden, wobei das Zusammensetzen auf eine Teilmenge beschränkt wird und die Freiheitsgrade der 3D-Interaktion eingeschränkt werden.

**Schlüsselwörter:** Benutzerinteraktion zur Visualisierung, 3D-Interaktion, medizinische Visualisierung, beidhändige Interaktion, Transparenz in Benutzungsschnittstellen

## 1 Einleitung

In vielen Bereichen ist es wichtig, komplizierte räumliche Verhältnisse zu verstehen. So müssen Medizinstudenten in der Anatomie entsprechende Kenntnisse als Vorbereitung für operative Fächer erwerben. In technischen Bereichen ist das räumliche Verständnis, z.B. eines Motors, für die Montage und Wartung von Bedeutung. Während Lehrvideos nicht genügend Interaktivität für das Lernen bieten, können Bücher das räumliche Verständnis nur unzureichend unterstützen. Interaktive Lehrsysteme auf der Basis von 3D-Modellen haben ein größeres Potential. Dabei können 3D-Modelle beliebig transformiert und zugleich die zugehörigen textuellen Informationen erkundet werden. Der VOXELMAN (HÖHNE *et al.* [1996]) und der ZOOM ILLUSTRATOR (PREIM *et al.* [1996]) sind Beispiele dafür für den Bereich Anatomie. Dabei werden im wesentlichen bestehende 3D-Modelle durch Manipulation einer virtuellen Kamera erkundet, wobei evtl. Teile eines Modells entfernt oder abgeschnitten werden können. Eine kürzlich durchgeführte Evaluierung des ZOOM ILLUSTRATORS (PITT *et al.* [1999]) zeigt, daß Studenten gern mehr Einfluß auf das 3D-Modell haben wollen und beliebige Teile

---

<sup>1</sup> Dieser Beitrag basiert auf der Arbeit aller Autoren an der Universität Magdeburg.

entfernen und zusammensetzen wollen. Daher haben wir ein neues System entwickelt, das der Metapher eines 3D-Puzzles folgt: Um räumliche Zusammenhänge zu erlernen, setzen Benutzer ein 3D-Modell aus seinen Bestandteilen zusammen. Die Metapher eines 3D-Puzzles, das spielerische Erlernen räumlicher Zusammenhänge, erweist sich dabei als vorteilhaft. Allerdings wird nicht versucht, alle realen Interaktionsmöglichkeiten zu imitieren, sondern teilweise davon abgewichen, z.B. damit das Puzzle in verschiedenen Schwierigkeitsgraden durchgeführt werden kann. Dabei streben wir eine Anwendung in der Anatomie an, orientieren uns aber auch an anderen Bereichen, in denen 3D-Modelle zusammengesetzt werden, z.B. bei der virtuellen Montage eines Autos.

Dieser Beitrag ist wie folgt aufgebaut. Grundlegende Aspekte der interaktiven Zusammensetzung von 3D-Modellen werden anhand von typischen Anwendungen in Abschnitt 2 erläutert. In Abschnitt 3 wird argumentiert, daß für die beschriebene Anwendung eine überzeugende Metapher notwendig ist und erklärt, inwiefern das 3D-Puzzle eine derartige Metapher darstellt. In Abschnitt 4 wird diskutiert, welche Gruppen von Benutzern es gibt und welche Interaktionsaufgaben für diese wichtig sind. Da die Platzierung und Orientierung von 3D-Objekten in der virtuellen Welt – aufgrund der vergleichsweise geringen Rückkopplung – schwierig ist, werden in Abschnitt 5 Techniken zur Visualisierung von und der Interaktion mit 3D-Daten erläutert. Die Beschreibung des mit OPEN INVENTOR realisierten Prototypen besteht aus zwei Teilen: In Abschnitt 6 wird beschrieben, wie 3D-Modelle für die Nutzung als 3D-Puzzle vorbereitet werden (Autormodus). In Abschnitt 7 wird erklärt, wie ein Puzzle abläuft (Lernermodus). Der zusammenfassende Abschnitt 8 diskutiert, wie der Prototyp evaluiert werden kann.

## 2 Zusammensetzung von 3D-Modellen

Die Aufgabe, 3D-Modelle aus Teilen zusammensetzen, ist Bestandteil verschiedener Anwendungen. In der Autoindustrie geht man verstärkt dazu über, CAD-Modelle der Zulieferer zu virtuellen Prototypen zusammensetzen, um Probleme beim Zusammenbau frühzeitig zu erkennen. Dabei kommen fortgeschrittene Techniken der 3D-Interaktion (LIANG und GREEN [1993], LIANG [1995]) bis hin zu VR-Techniken zum Einsatz. So wird im Projekt VLEGO (*virtual environment for generating objects*, KIYOKAWA *et al.* [1997]) ein CAD-System präsentiert, das der Bauskastenmetapher folgt. Der Benutzer kann – wie bei LEGO-Bausteinen – vorgegebene Bauklötze an diskreten Stellen miteinander verbinden. Diese keil- bzw. quaderförmigen Bausteine können nur an bestimmten dafür vorgesehenen Stellen miteinander verbunden werden und sind jeweils um ein Vielfaches von 90 Grad gegeneinander verdreht. Für die anfallenden Interaktionsaufgaben (Zusammensetzen, Trennen, Löschen, Kopieren, Picken) werden 3D-Widgets zur Verfügung gestellt, die teilweise mit einer Hand und teilweise beidhändig bedient werden. So wird zur Trennung von zwei Bausteinen ein Baustein festgehalten (selektiert) und der andere davon wegbewegt – die mit einer Hand notwendige Sequentialisierung dieser Handlungen entfällt.

In der chemischen Forschung werden Moleküle entworfen, wobei die Interaktion anhand einer 3D-Darstellung der Strukturen erfolgt. Im Gegensatz zur

Konstruktion von technischen Modellen werden Moleküle zumeist als Kugeln dargestellt, so daß es nur ein Primitiv gibt. Interessant ist die Anordnung und Verteilung der Moleküle in großen Makromolekülen, wobei die direkt-manipulative Zusammensetzung als Andocken bezeichnet wird. Diese Interaktion basiert auf der Schlüssel-Schloß-Metapher – ein Molekül kann nur an ein anderes andockt werden, wenn es nach bestimmten Kriterien dorthin paßt (LAPPE [1997]).

### 3 Die Metapher des 3D-Puzzles

Neue und für die Anwender unvertraute Benutzungsschnittstellen sollten sich an vertrauten Konzepten aus der Denkweise der Anwender oder dem täglichen Leben orientieren (PREECE *et al.* [1994]). Diese Konzepte sollten als Metapher genutzt werden, die dazu beitragen, die Entscheidungen der Entwickler zu strukturieren und die Benutzungsschnittstelle besser zugänglich zu machen. Für die hier beschriebene Anwendung – gekennzeichnet durch reichhaltige, nicht-standardisierte 3D-Interaktion – trifft dies in besonderer Weise zu. Es wird eine Metapher gesucht, mit denen die Komposition eines 3D-Modells aus vorgegebenen Teilen assoziiert wird. Eine Metapher für die Komposition von 3D-Modellen ist in Abschnitt 2 verwendet worden: Das Modellierwerkzeug VLEGO orientiert sich an einem Baukasten. Diese Metapher ist hier allerdings nicht geeignet: Die Bestandteile des Puzzles sind vorgegeben und können nicht dupliziert oder gelöscht werden. Alle verfügbaren Teile müssen miteinander verbunden werden. Zudem sind die Teile einzigartig: an einer Andockstelle kann nur ein Teil plaziert werden.

Puzzle, bei denen Einzelteile an bestimmten Stellen zusammengesetzt werden, sind ein derart vertrautes Konzept. Die Lösung eines Puzzles, das oft aus 1000 und mehr Teilen besteht, macht eine Strukturierung der Teile erforderlich. Man sucht sich verschiedene Ablagen, in denen die Teile sortiert und bestimmte Teile zusammengesetzt werden, ehe das gesamte Bild aus diesen Teilmengen entsteht. Der Benutzer wird durch die Form der Teile darin unterstützt, zu erkennen, ob Teile zusammenpassen oder nicht. Zu bestimmten Ausbuchtungen passen nur ganz bestimmte Formen: so wie das Zusammenpassen von Schlüsseln und Schlössern oft an der äußeren Form erkennbar ist.

Ein wichtiger Aspekt bei der Orientierung an einem Puzzle besteht darin, daß als Ziel eine Ansicht des fertigen Bildes, z.B. auf der Verpackung, zur Verfügung steht. Bei 3D-Puzzeln sind oft mehrere Ansichten aus den orthogonalen Richtungen verfügbar, damit alle Teile zumindestens in einer Ansicht zu erkennen sind. Im 3D-Fall müssen die Teile nicht nur richtig plaziert werden, sondern evtl. in allen drei Dimensionen rotiert werden – eine komplizierte 3D-Interaktion. Dabei werden beide Hände gleichzeitig genutzt, nicht nur um ein Teil in ein anderes hineinzudrücken, sondern auch damit die nichtdominierende Hand (NDH, die linke bei Rechtshändern) Orientierung für die Feinpositionierung mit der dominierenden (rechten) Hand (DH) bietet. Während in der realen Welt die 3D-Interaktion vertraut und natürlich ist, sind ausgefeilte Visualisierungs- und Interaktionstechniken erforderlich, damit Benutzer in der virtuellen Welt – dargestellt auf einem 2D-Bildschirm – 3D-Interaktionsaufgaben lösen können.

## 4 Entwurf der Interaktionstechniken

Die hier beschriebene Anwendung ist insofern spezifisch, als daß es nicht um die Konstruktion geht, sondern darum, daß der Benutzer die *einzig*e korrekte Variante der Zusammensetzung ermittelt. Da das System die korrekte Zusammensetzung „kennt“, kann der Benutzer auf vielfältige Weise unterstützt werden. Die zu realisierenden Interaktionsaufgaben sind ähnlich zu den anderen Anwendungsfeldern der 3D-Komposition (vgl. Abschnitt 2).

Bei der hier beschriebenen Anwendung müssen zwei Klassen von Benutzern unterschieden werden: *Autoren*, die die Modelle aufbereiten und *Lernende*, die spielerisch mit dem Modell umgehen und es zusammensetzen. Für die Autoren sind folgende Interaktionsaufgaben wesentlich:

- *Strukturierung der 3D-Modelle*  
Der Autor muß vorgeben, aus wieviel Teilen bzw. aus welchen Teilen das Puzzle besteht. Er muß eine ggf. vorhandene Strukturierung modifizieren können, u.a. durch das Zusammenfassen von Polygonen und Objekten und durch das Zertrennen von bestehenden Objekten. Da für den Schwierigkeitsgrad des Puzzles die Zahl der Teile wesentlich ist, muß er zu jedem Zeitpunkt „sehen“ können, wieviel Teile das Puzzle hat.
- *Benennung von Teilen sowie Zuordnung anderer textueller Informationen*  
Im Unterschied zu einem 3D-Puzzle, das der Unterhaltung dient, zielt diese Anwendung auf das Erlernen komplizierter räumlicher Zusammenhänge. Dies erfordert auch textuelle Beschreibungen räumlicher Verhältnisse, die die Besonderheiten der Form oder wichtige Aspekte der Lage und des Verlaufs von Objekten deutlich machen, die leicht übersehen werden (PREIM [1998]). Daher muß der Autor Objekte und die Region, zu der sie gehören, benennen sowie Beschreibung von Position und Verlauf eingeben können.
- *Plazieren und Einfärben der Andockstellen*  
Der Autor muß vorsehen, wo die Objekte miteinander verbunden werden. Zudem muß – entsprechend dem Schlüssel-Schloß-Prinzip – festgelegt werden, wie diese Andockstellen kenntlich gemacht und unterschieden werden. Im einfachsten Fall unterscheiden sich die Andockstellen farblich, wobei jeweils farblich gleiche Andockstellen zusammenpassen.

Der Autor sollte das Puzzle ausprobieren können, um ggf. etwas zu korrigieren (z.B. Position und Farbe von Andockstellen). Daher sind für ihn auch die für den Lernenden gedachten Interaktionsaufgaben wesentlich. Dazu gehören:

- *Sortieren von Teilen*  
Der Benutzer muß – ausgehend von der unsortierten Darstellung aller Teile – beliebige Teilmengen bilden und in separaten Ablagen plazieren können.
- *Erkennen von 3D-Objekten*  
Der Benutzer muß einzelne Objekte identifizieren können, erkennen können, um was für ein Objekt es sich handelt. Für die Identifikation sind zwei Aspekte nützlich: die detaillierte Betrachtung des Objektes von allen Seiten und textuelle Informationen, wie der Name und verbale Beschreibungen des Verlaufes und der Position. Während textuelle Informationen bei einem realen

3D-Puzzle mit seinen namenlosen Teilen nicht verfügbar sind, ist eine detaillierte Betrachtung der einzelnen Teile in der Realität möglich.

- *Selektieren von 3D-Objekten*  
Nachdem ein Objekt erkannt wurde, kann es selektiert werden. Dazu kann auf das Objekt gezeigt werden (Picken), das Objekt kann benannt (Texteingabe) oder aus einer Liste ausgewählt werden.
- *Verschieben und Rotieren von 3D-Objekten*  
Das selektierte Objekt wird zu einer Andockstelle bewegt. Da die 3D-Objekte starr sind, finden keine Skalierungen und keine Scherungen statt; die Transformation beschränkt sich auf Translation und Rotation
- *Manipulieren der virtuellen Kamera*  
So wie bei einem 3D-Puzzle die durch Zusammensetzen entstandenen Haufen von allen Seiten betrachtet werden, muß es möglich sein, in allen Ablagen beliebige Ansichten zu erzeugen (rotieren und zoomen der Kamera).
- *Zusammensetzen (Andocken) und Trennen von Teilen*  
Daß bei einem 3D-Puzzle Teile zusammengesetzt werden müssen, ist offensichtlich. Weniger offensichtlich ist, daß diese wieder getrennt werden müssen, falls sich das Zusammensetzen als falsch oder ungünstig erwiesen hat. Da das Zusammensetzen nicht in einer beliebigen Reihenfolge möglich ist, kann es erforderlich sein, Verbindungen zu lösen, um Teile im Innern zu verbinden.

Die Beschreibung eines Prototypen in den Abschnitten 6 (Autorenmodus) und 7 (Lernermodus) ist entsprechend diesen Interaktionsaufgaben strukturiert.

## 5 Visualisierung von und Interaktion mit 3D-Daten

Ein 3D-Puzzle erfordert eine präzise Interaktion in 3D. Zu diesem Zweck müssen wichtige Aspekte der räumlichen Wahrnehmung – die depth cues – und der Interaktion in (realen) dreidimensionalen Räumen nachgebildet werden.

### 5.1 Visualisierung von räumlichen Daten

Wichtige depth cues, aus denen Menschen die Tiefe von Objekten wahrnehmen, sind vor allem die folgenden (vgl. ZHAI *et al.* [1996] und ZHAI [1998]):

- *Schatten*  
Der Schatten, den Objekte auf eine Grundfläche und evtl. zusätzlich auf weitere Flächen werfen, liefert wichtige Hinweise über die Form räumlicher Gebilde. In einer empirischen Untersuchung konnten WANGER *et al.* [1992] zeigen, daß Schatten der wichtigste Indikator für räumliche Verhältnisse ist.
- *Verdeckung von Objekten*  
Objekte, die vom Standpunkt des Betrachters hinter anderen Objekten liegen, werden von diesen – zumindestens teilweise – verdeckt. Sie erscheinen abgeschnitten, so daß erkennbar wird, daß sie weiter entfernt sind als die verdeckenden Objekte.  
Durchsichtige Objekte, wie Glas, ermöglichen es, verdeckte Objekte zu erkennen. Durch transparente Objekte wird also zusätzliche Information über

die Tiefenverhältnisse vermittelt. Allerdings hat dieser Effekt Grenzen: höchstens vier hintereinanderliegende Objekte können wahrgenommen werden.

- *Perspektivische Verkürzung*  
Durch die Perspektive erscheinen entfernt liegende Objekte kleiner als nähere, so daß auch ohne Verdeckung die Entfernung grob abgeschätzt werden kann.
- *stereoskopisches Sehen*  
Die beiden Augen des Menschen nehmen zwei leicht verschobene Bilder auf, wobei die Wahrnehmung dazu führt, daß aus den Unterschieden zwischen beiden Bildern Informationen über die Tiefe extrahiert werden.
- *Bewegungsparallaxe*  
Räumliche Verhältnisse werden klarer, wenn man die Augen bewegt und die Veränderungen des Bildes registrieren kann.

Nicht alle diese depth cues können durch eine Visualisierung auf einem Bildschirm nachgebildet werden. Zudem ist die Simulation dieser Effekte oft zeitaufwendig, so daß eine Beschränkung auf diejenigen Aspekte nötig ist, die in einem interaktiven System anwendbar sind (mindestens 10 Bilder pro Sekunde von Modellen mit etwa 10-50 K Polygonen müssen berechnet werden).

Die Verdeckung von Objekten und die perspektivische Verkürzung bei der Zentralprojektion werden durch klassische Rendering-Verfahren, wie das Gouraud-Shading oder das Z-Buffer-Verfahren realisiert und sind durch die verbreitete Hardwareunterstützung hinreichend schnell. Die Darstellung von transparenten Objekten ist aufwendiger, da an den entsprechenden Stellen mehrere Objekte zur Farbe des Bildes beitragen. Allerdings ist auch dafür mittlerweile eine Hardwareunterstützung verfügbar. Die Berechnung von Schatten ist etwas aufwendiger; kann aber auf einer Hardware mit Graphikunterstützung ebenfalls annähernd in Echtzeit realisiert werden. Stereokopisches Sehen erfordert eine Shutterbrille, bei der auf beide Augen jeweils leicht verschobene Bilder projiziert werden. Dazu müssen zwei Bilder mit der erforderlichen Framerate generiert werden. Kleinere Modelle (etwa 10 K Polygone) können auf einer mittleren Graphik-Workstation (Silicon Graphics O2, R 10000 Prozessor mit 250 MHz) mit allen depth cues transformiert werden, ohne daß die Interaktivität leidet. Bei Modellen mit etwa 40 K Polygonen sind leistungsfähigere Rechner (z.B. SGI Octane MXI) für ein zügiges Arbeiten mit allen depth cues nötig.

Um die Bewegungsparallaxe zu unterstützen, müssen die Kopfbewegungen eines Benutzers aufgenommen und die Darstellung an die Veränderung angepaßt werden (Head Tracking). Derart aufwendige Verfahren sind für den angestrebten Zweck unrealistisch. Allerdings ist dies unproblematisch, da Rotationen des 3D-Modelles und einzelner Objekte möglich sind.

## 5.2 Interaktion mit 3D-Daten

Ausgehend von einer informativen Visualisierung der 3D-Objekte kann mit diesen interagiert werden. So wie sich die Visualisierung daran orientieren muß, wie Menschen räumliche Phänomene wahrnehmen, muß sich die Interaktion daran orientieren, wie Menschen reale Objekte plazieren, positionieren. Wiederum ist zu erwarten, daß nicht alle Techniken in einem interaktiven System nachgebildet werden können – entweder weil dies zu aufwendig ist oder weil die Manipulation

von virtuellen Daten spezifische Eigenschaften hat, die die Übertragung von Interaktionstechniken in die virtuelle Welt unangebracht erscheinen lassen. Bei der Interaktion mit 3D-Daten sind die folgenden Aspekte wesentlich.

- *Kollisionserkennung*  
Wenn ein Objekt mit einem anderen kollidiert, verformen sich die Objekte oder das Objekt, das sich nicht bewegt hat, wird weggestoßen. Zusätzlich entsteht ein Geräusch. In keinem Fall durchdringt ein Objekt das andere.
- *taktile Rückkopplung*  
Wenn ein Objekt erfaßt wird, spürt man die Berührung und kann das Material ertasten. Beim Greifen und Anheben wird zudem das Gewicht spürbar.
- *Interaktion unter Nutzung beider Hände*  
Menschen erledigen Positionierungsaufgaben in der Regel mit zwei Händen (GUIARD [1987] und HINCKLEY [1997]). Die NDH dient der Groborientierung und die dominierende Hand (DH, meist die rechte Hand) erledigt die Feinarbeit relativ zu der anderen Hand. Menschen sind extrem gut darin geübt, eine Hand relativ zur anderen zu bewegen. GUIARD zeigt dies an Tätigkeiten wie dem Einfädeln eines Fadens in eine Nadel, das sehr viel besser erledigt wird, wenn die NDH die Nadel hält, als wenn diese fixiert ist. Auch beim Schreiben wird die NDH benötigt, um das Papier auszurichten.

Ob sich regelmäßige konvexe Körper, wie Quader und Kugeln, berühren, kann leicht ermittelt werden. Bei den komplizierten verzweigenden Formen anatomischer Objekte ist eine Kollisionserkennung schwer zu realisieren und erfordert aufwendige Berechnungen. Daher wird hier darauf verzichtet. Da Kollisionen nicht erkannt werden, ist auch die beschriebene Rückkopplung nicht möglich.

Eine taktile Rückkopplung beim Greifen (wenn der Cursor ein Objekt erreicht), ist z.B. mit Datenhandschuhen möglich, in denen kleine Luftpölsterchen aufgepusht werden und so einen Gegendruck erzeugen. Allerdings erscheint die notwendige Hardware als zu anspruchsvoll für ein Lehrsystem.

Die Vorteile der beidhändigen Interaktion sind auch bei interaktiven Systemen – vor allem bei der 3D-Interaktion – nutzbar. KIYOKAWA *et al.* [1997] beschreiben am Beispiel von VLEGO, welche Interaktionen mit einer Hand durchgeführt werden sollten und wo die parallele Nutzung beider Hände Vorteile mit sich bringt. Das Zusammensetzen und Auseinandernehmen von Klötzern sowie das Skalieren sind Aktionen, bei denen die beidhändige Manipulation vorteilhaft ist, wohingegen das Löschen und Picken mit einer Hand erfolgen können. HINCKLEY [1997] erklärt die Vorteile der beidhändigen Interaktion am Beispiel der Simulation von neurochirurgischen Eingriffen und hat formale Experimente durchgeführt, die die Vorteile hinsichtlich der Ausführungszeit und Fehlerrate bestätigen.

Da die Kollisionserkennung und die taktile Rückkopplung nicht realisiert werden, werden andere Strategien für eine präzise 3D-Interaktion genutzt.

## 6 Interaktion im Autormodus

Die Strukturierung und Aufbereitung von 3D-Modellen findet im Autormodus statt. Dabei werden die Aufgaben (vgl. Abschnitt 4) folgendermaßen gelöst.

- *Strukturierung der 3D-Modelle*

Während ein 3D-Puzzle aus vielen etwa gleich großen Teilen besteht, ist es für Lehrzwecke sinnvoll, wenn die Teile des Modells realen Objekten entsprechen. Eine Orientierung dafür liefern Lehrbücher oder Wartungsanleitungen – die Objekte, die in diesen Dokumenten beschrieben sind, sollten Teile eines solchen Puzzles sein. Die Zahl der Teile des Puzzles kann auch ein Parameter sein; so daß bei einem komplizierten Puzzle, die Objekte (z.B. in Abhängigkeit von ihrer Größe und Struktur) weiter unterteilt werden. Dazu wird ein Struktureditor genutzt, in dem die (hierarchische) Struktur des 3D-Modells angezeigt und durch Umhängen bzw. Einfügen und Löschen von Knoten modifiziert wird.

- *Anreicherung der Modelle mit textuellen Informationen*

Neben der Anpassung der Objektstruktur müssen die Namen der Objekte und ihre Zugehörigkeit zu einer Region erfaßt werden, damit Benutzer diese erfragen können. PREIM und HOPPE [1998] beschreiben eine derartige Anreicherung von geometrischen Modellen. Dabei wird je eine Ansicht für das 3D-Modell, die Struktur des Modells und die einzugebenden textuellen Informationen präsentiert, so daß die Informationen für das aktuell (im Modell und der Struktur) selektierte Objekt eingegeben werden.

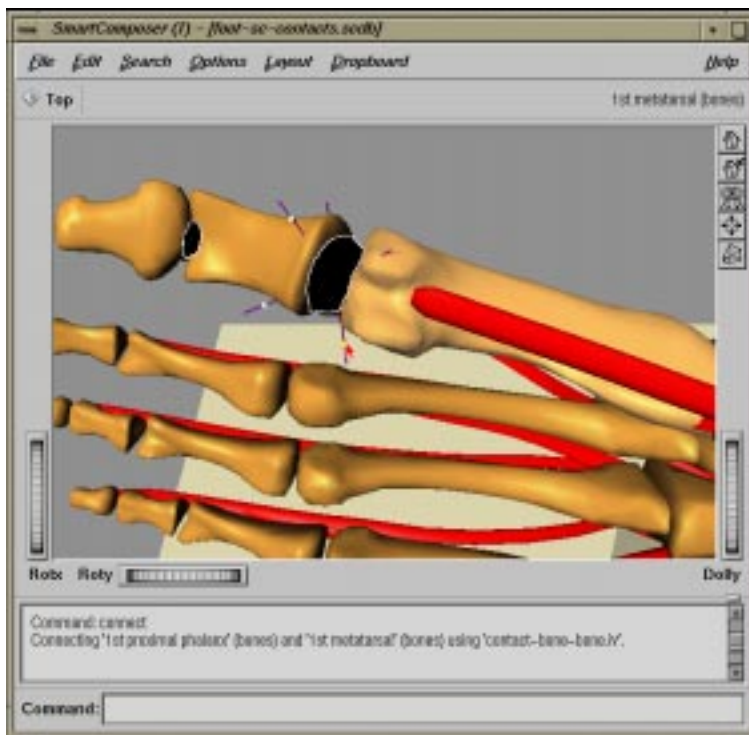


Abbildung 1: Definition der Andockstellen im Autorenmodus. Die (dunkle, weiß umrandete) Andockstelle im oberen Bildteil wird skaliert. Sie ist von den umgebenden Knochen teilweise verdeckt.



- *Plazieren und Einfärben der Andockstellen*

Für diese Aufgabe gibt es eine halbautomatische Lösung: Der Autor selektiert zwei Objekte, in dem er mit der Maus einen umschließenden Quader aufspannt und verlangt, daß diese Objekte miteinander verbunden werden. Daraufhin wird ein passender Andockpunkt errechnet, an dem die beiden Objekte möglichst nahe beieinander liegen (siehe Abbildung 1). Falls der Abstand zwischen den beiden Objekten mehrere Minima hat, wird an mehreren Stellen ein Andockpunkt errechnet. Die Andockstellen werden durch kleine Würfel markiert, wobei die Größe der Markierungen an die Größe der Teile angepaßt ist, damit kleine Teile nicht verdeckt werden. Diese automatisch generierten Andockpunkte sind Vorschläge, die der Autor modifizieren kann, in dem er die Punkte verschiebt bzw. die Markierungen skaliert (Abbildung 1).

Problematisch ist, daß im zusammengesetzten Modell die Andockpunkte schwer zu erkennen sind, wenn die Objekte nahe beieinander sind. Daher kann der Autor Explosionsdarstellungen generieren lassen, die die Objekte separieren (Abbildung 2). Dazu werden die Objekte an ihren bisherigen Positionen verkleinert, so daß Zwischenräume entstehen. Der Autor kann das Ausmaß der Explosion (die Größe der entstehenden Abstände) einstellen.

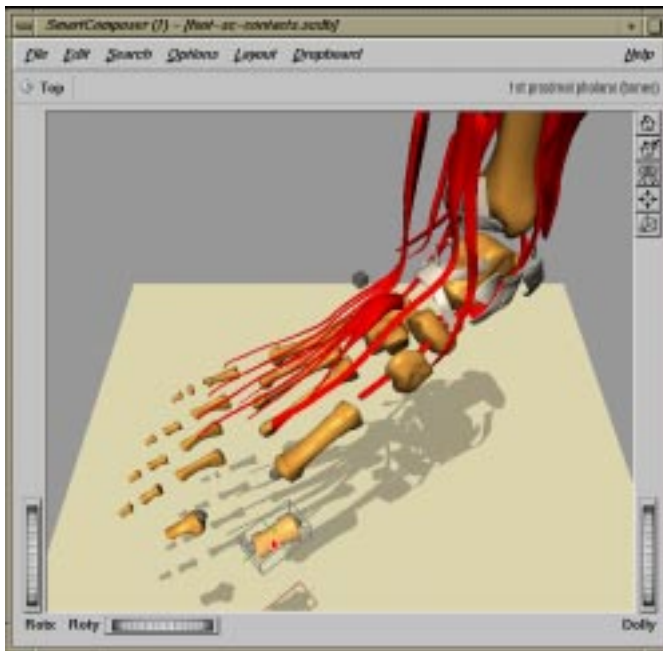


Abbildung 2: Die Explosionsdarstellung erleichtert die Modifikation der Andockstellen. Die Orientierung wird durch die Projektion von Schatten auf eine Grundfläche unterstützt.

- *Definition der zusammenzusetzenden Objekte*

Um das Puzzle zu erleichtern, kann es auf eine Teilmenge der Teile eingeschränkt werden, so daß initial die Differenzmenge dieser Teile bereits zusammgebaut ist. Im anatomischen Beispiel ist es z.B. sinnvoll, daß der

Autor das Skelett vorgibt. Bei technischen Modellen kann die Karosserie oder das Gehäuse bereits zusammengesetzt sein, so daß die anderen Teile in Relation zu einem derartigen Bezugssystem gesetzt werden können.

## 7 Interaktion im Lernermodus

Das eigentliche 3D-Puzzle – basierend auf der Vorarbeit eines Autors – findet im Lernermodus statt. In Abschnitt 5.2 wurden wichtige Aspekte des Umgangs mit räumlichen Daten beschrieben und erläutert, daß einige der natürlichen Mechanismen kaum in einem interaktiven System realisiert werden können. Daher sind weitere Interaktionstechniken erforderlich, um die 3D-Interaktion so effizient und präzise zu machen, wie dies bei einem 3D-Puzzle erforderlich ist.

Ausgangspunkt des Puzzles ist eine initiale (3D-)Ansicht, in der die zusammensetzenden Teile (evtl. nicht alle, vgl. Abschnitt 6) zufällig verteilt sind (siehe Abbildung 3, rechts). Es ist günstig, die Anordnung der Teile so zu beeinflussen, daß sich die Objekte nicht überlappen oder gar enthalten. Dafür wird für jedes zufällig plazierte Objekt der Platz „reserviert“, der dem umschließenden Quader entspricht. Auf diese Weise wird die Selektion durch Picken erleichtert.

Wie beim realen Puzzle gibt es eine Ansicht des fertigen Modells. Da das Modell beliebig rotiert werden kann, reicht eine einzige Ansicht dafür aus. Diese Ansicht kann in eine Explosionsdarstellung (vgl. Abbildung 2) umgeschaltet werden, damit die Lage von möglichst vielen Objekten auf einmal sichtbar ist.

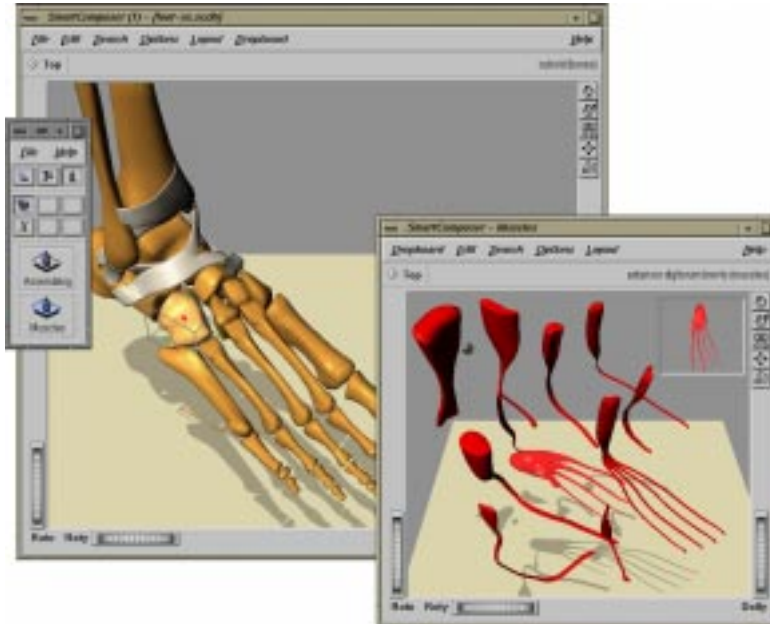


Abbildung 3: Links sind die Bänder und Knochen zusammengesetzt; rechts sind die Muskeln zufällig verteilt.

## 7.1 Realisierung der Interaktionsaufgaben

- *Sortieren von Objekten*

Für die Verwaltung der Objekte (in unseren Beispielen zwischen 30 und 50) ist es wichtig, daß Teilmengen der Objekte zusammengefaßt und in separaten Fenstern abgelegt werden können. Dafür ist eine Mehrfachselektion möglich. Ein folgender Befehl „Kreiere Stapel“ erzeugt ein neues Fenster, in dem diese Objekte angeordnet werden (wobei die relative Lage der Objekte zueinander erhalten bleibt). Diese Ablagen können benannt werden (z.B. Zehenknochen). Jede Ablage enthält eine Liste der Namen aller Ablagen für ein schnelles Umschalten.

- *Erkennen von Objekten*

Damit Benutzer Objekte gut erkennen, wird in jeder Ablage Schatten auf eine Grundfläche projiziert (siehe Abbildung 3). Die Ausdehnung und Position der Grundfläche wird aus den Koordinaten der Teile berechnet, so daß sich die Fläche unter dem untersten Teil befindet und so groß ist, daß alle Schatten darauf sichtbar sind. Die Schattenberechnung erfolgt nach dem schnellen Algorithmus von BLINN [1988] (siehe RITTER [1999] für eine Beschreibung der Implementierung). Diese Schatten werden bei jeder Bewegung der Kamera aktualisiert und unterstützen die räumliche Wahrnehmung sehr effektiv. Dabei bleibt die Grundfläche starr.

Zwei weitere Visualisierungstechniken dienen dazu, das Erkennen zu erleichtern: In einer Detailansicht eines Fensters, in dem Objekte zusammengebaut werden, wird das aktuell selektierte Objekt isoliert gezeigt (somit im Ganzen sichtbar (während innerhalb des Modells die meisten Objekte teilweise verdeckt sind)). In der Detailansicht ist das Objekt jeweils so orientiert, wie in der Gesamtansicht, so daß die Integration beider Ansichten erleichtert wird. Außerdem kann innerhalb des (teilweise) zusammengesetzten Modells verlangt werden, daß alle Objekte mit Ausnahme des selektierten transparent dargestellt werden, so daß es im Kontext erkennbar wird (Abbildung 4).

- *Selektion von Objekten*

Objekte können durch Benennen und durch Picken selektiert werden (Abschnitt 4). Das Picken setzt voraus, daß das gewünschte Objekt sichtbar und hinreichend groß ist. Daher ist eine Ergänzung dieser Interaktionstechnik durch die Benennung und die Auswahl aus einer Liste erforderlich. Als Reaktion darauf wird das selektierte Objekt nach vorn bewegt und mit den Handles zur Translation versehen.

Die Selektion durch Picken – anschaulich und der Metapher des 3D-Puzzles entsprechend – wird besonders unterstützt. Der Benutzer kann die Einzelteile in den Fenstern beliebig rotieren. Dazu wird ein Viewer der Graphikbibliothek OPEN INVENTOR modifiziert (Spezialisierung eines vorhandenen Viewers). Außerdem wird ein semitransparenter Cursor eingesetzt, wobei jeweils das Objekt selektiert wird, das den größten Teil des quaderfö-

migen Cursors einnimmt.<sup>2</sup> Wenn der Cursor in das Modell hineinbewegt wird, wird das vorderste Objekt transparent dargestellt, so daß der Cursor zumindestens noch direkt hinter diesem Objekt erkannt wird.

Der semitransparente Cursor unterstützt die Tiefenwahrnehmung auf wirk-same Weise (ZHAI *et al.* [1996] und ZHAI [1998]), da sich die Objekte die im Bereich des Cursors liegen, unterscheiden lassen, in die davorliegenden Objekte, die (hinter einer transparenten Fläche liegenden) Objekte innerhalb des Cursors und die hinter zwei transparenten Flächen liegenden Objekte hinter dem Cursor (Abbildung 5). Der Cursor ist skalierbar und wirft ebenfalls einen Schatten auf die Grundfläche, der für die Orientierung sehr wichtig ist.

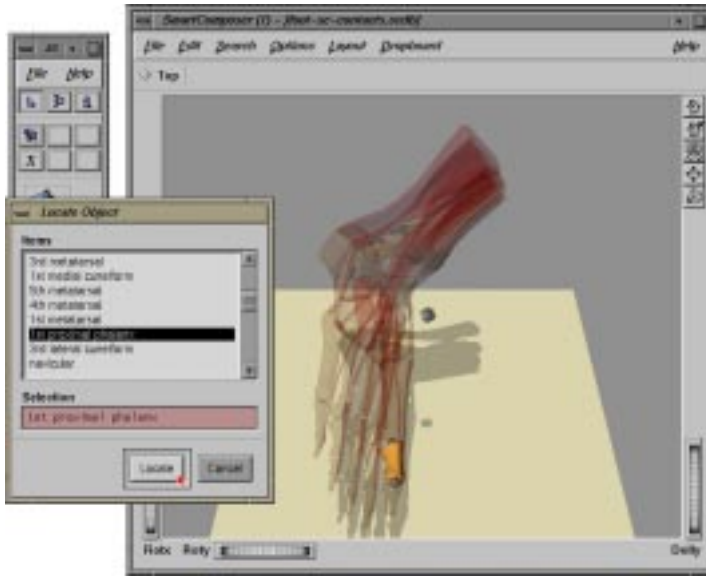


Abbildung 4: Alle Objekte – mit Ausnahme des in der Liste selektierten Zehenknochens – erscheinen transparent.

- *Verschieben und Rotieren von 3D-Objekten*

Bei der 3D-Transformation kommen die Manipulatoren von OPEN INVENTOR zum Einsatz (virtuelle Kugel für die Rotation und virtuelle Handlebox für die Translation). Beim Einsatz von indirekten Zeigegegeräten, wie der Maus, wird die Bewegung des Zeigegegerätes entsprechend der Control/Display-Ratio in eine resultierende Bewegung in der virtuellen Welt umgerechnet. Für eine effiziente (3D-)Interaktion ist es wichtig, daß einerseits lange Strecken schnell zurückgelegt werden können und andererseits eine präzise Bewegung in der Nähe des Zieles möglich ist. In Anlehnung an MACKINLAY *et al.* [1990] verringern wir daher die C/D-Ratio, wenn sich ein Andockpunkt einem anderen nähert. Bei der Rotation mit einer 3D-Maus ist dies prinzipiell auch möglich –

<sup>2</sup> Diese Berechnung wird dadurch approximiert, das die Zahl der innerhalb des Cursors liegenden Eckpunkte gezählt wird, was bei etwa gleicher Triangulierung ein gutes Maß dafür darstellt, wie groß das Volumen des Objektes ist.

allerdings hat sich gezeigt, daß ein C/D-Wert von 1:1 (eine Rotation um einen Winkel führt zu einer Rotation um genau diesen Winkel) in den meisten Fällen optimal ist und eine andere Umrechnung verwirrend ist.

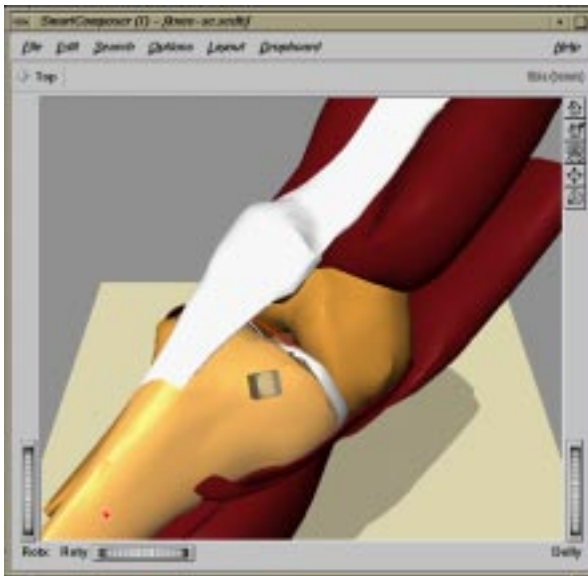


Abbildung 5: Ein semitransparenter Cursor wird durch das Modell eines Kniegelenkes bewegt.

- *Manipulieren der virtuellen Kamera*

Die Manipulation der Kamera erfolgt mit den bei OPEN INVENTOR vorhandenen Widgets für diese Interaktion. Die Kamera kann mit entsprechenden Wheel-Widgets in x- und y-Richtung rotiert sowie beliebig gezoomt werden.

- *Zusammensetzen (Andocken) und Trennen von Teilen*

Die 3D-Objekte müssen an den vorbereiteten Andockstellen zusammengesetzt werden. Die Objekte gelten als zusammengesetzt, wenn die kugelförmigen Markierungen kollidieren, was leicht berechnet werden kann. Um diese Aufgabe zu erleichtern, ist eine Snap-Funktion realisiert. Sie führt dazu, daß ein Objekt „einrastet“, wenn sich eine Kontaktstelle eines Objektes in unmittelbarer Nähe des „richtigen“ Andockpunktes eines anderen befindet (siehe Abbildung 6). Zugleich werden die Manipulatoren entfernt, mit denen das Objekt kontrolliert wurde und der Benutzer über den Erfolg informiert. Wenn der Benutzer einen Andockpunkt in die Nähe eines falschen anderen bewegt und dort eine gewisse Zeit verharrt, ist offenbar ein Fehler aufgetreten. Ein akustisches Signal und eine textuelle Meldung in der Statuszeile informieren darüber, daß das Zusammensetzen fehlgeschlagen ist.

Das Zusammensetzen kann in zwei Schwierigkeitsgraden erfolgen. Die leichtere Variante besteht darin, daß alle Objekte, die in das Fenster zum Zusammensetzen bewegt werden, automatisch in die richtige Richtung in bezug auf das Gesamtmodell gedreht werden und der Benutzer das Objekt lediglich verschiebt. Bei der schwierigeren Variante werden die Objekte mit Manipulatoren versehen, die auch für die Rotation geeignet sind, so daß das Objekt auch korrekt orientiert werden muß.

Das Trennen von korrekt zusammengesetzten Objekten wird normalerweise erschwert, damit die plazierten Objekte nicht versehentlich getrennt werden (*reverse snapping*). Um den Widerstand beim Wegbewegen eines Objektes auszuschalten, kann in einen anderen Modus an einer 3D-Maus umgeschaltet werden. Diese besitzt 10 Knöpfe, so daß ein derartiges Umschalten möglich ist, ohne daß die Hand von der Maus entfernt werden muß.

## 7.2 Beidhändige Interaktion

Die Vorteile einer beidhändigen 3D-Interaktion wurden bereits diskutiert. Unser System arbeitet mit einer 3D-Maus, die mit der NDH benutzt werden sollte und mit einer normalen Maus für die DH, so daß Benutzer die (vertraute) Maus in der bevorzugten, vertrauten Hand halten. Eine derartige „Arbeitsteilung“ wurde erstmals von *LEBLANC et al.* [1991] zur Modellierung vorgeschlagen. Dabei sollte die 2D-Maus für die herkömmliche Interaktion mit der Menüleiste und einigen Dialogen sowie für das Picken genutzt werden und die 3D-Maus für die 3D-Transformation. Eigene informelle Tests und Untersuchungen in der Literatur (z.B. *HINCKLEY* [1997]) bestätigen, daß die sichere Nutzung einer 3D-Maus von Benutzern ohne Erfahrung mit 3D-Interaktion relativ schnell (in etwa 20 Minuten) erlernt wird und dann effizienter ist als die 3D-Orientierung mit der Maus und einer virtuellen Kugel. Während die 3D-Orientierung mit der 2D-Maus zumeist in eine Folge von Rotationen um eine Achse zerlegt wird (was dem Menschen unvertraut ist), kann diese Aufgabe mit einer 3D-Maus natürlicher und in gleicher Präzision erledigt werden.

Die gleichzeitige Nutzung beider Geräte zur 3D-Interaktion ist auch möglich. So kann eine Hand das 3D-Modell rotieren (um eine Andockstelle sichtbar zu machen) und die andere ein Objekt relativ dazu bewegen, um es anzudocken.

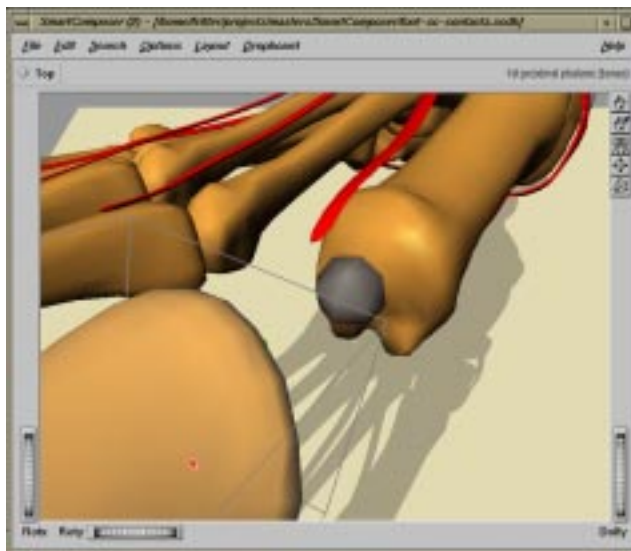


Abbildung 6: Ein Knochen in der Nähe einer Andockstelle unmittelbar vor dem Einrasten.

### 7.3 Variation des Schwierigkeitsgrades

Mehrfach wurde diskutiert, wie der Schwierigkeitsgrad verändert und das System an die Motivation und Vorkenntnisse des Benutzers angepaßt werden kann. Es geht dabei nicht darum, dem Benutzer die Arbeit so leicht wie möglich zu machen; das System „darf“ durchaus eine Herausforderung darstellen. Es darf erwartet werden, daß die konzentrierte 3D-Interaktion über einen längeren Zeitraum einen erheblichen Lerneffekt hat, während das pure Beobachten der Zusammensetzung durch das System eher wenig nützt. Zwischen den Extremen müssen sinnvolle Zwischenstufen gefunden werden. Die Einschränkung des Puzzles auf bestimmte Teile ist ein wichtiges Beispiel und ermöglicht es auch, die Aufgabe auf realistische Szenarien zuzuschneiden. So kann das Puzzle auf die Teile eingeschränkt werden, die bei einer Operation (an einem anatomischen Modell) oder eine Reparatur (bei einem technischen Modell) freigelegt werden müssen.

Die Einschränkung der Freiheitsgrade bei der 3D-Interaktion spielt eine wichtige Rolle. Zusätzlich kann das Andocken so realisiert werden, daß der Benutzer (mit einer Hand) ein Objekt bewegt und (mit der anderen Hand) ein Objekt pickt, an das das Objekt andockt werden soll. Das Andocken an sich wird dann vom System in einer kleinen Animation vorgenommen. Auf diese Weise zeigt der Benutzer, daß er weiß, wo das Objekt hingehört (was in der Prüfung relevant ist), erspart sich aber die Feinarbeit bei der Platzierung.

Eine weitere Unterstützung bietet ein Animationsmodus, in dem sich der Benutzer „vormachen“ lassen kann, wie ein Objekt in das Modell eingefügt wird. Zusätzlich kann der Benutzer durch die Anzeige von textuellen Informationen unterstützt werden: So wird in einem Informationsmodus beim Überfahren eines Teils der Name und die Region eingeblendet (z.B. *Musculus Procerus*, *Augenmuskel*). Dadurch wird die Suche eingeschränkt, so daß nur in einem Teil des Modells nach einer Andockstelle gesucht werden muß; zugleich werden die Namen wiederholt, deren Beherrschung ebenfalls ein Lernziel ist.

### 7.4 Interaktionshardware

Unser System kann mit der normalen Interaktionshardware (Eingabe mit der Maus und Ausgabe auf einem gängigen Bildschirm) benutzt werden, wobei zwei Mäuse für die beidhändige Interaktion empfehlenswert sind. Allerdings ist das System auf die Nutzung eines 3D-Eingabegerätes und auf die Stereoausgabe auf dem Bildschirm ausgelegt. OPEN INVENTOR unterstützt die Ansteuerung einer SpaceMouse, die die sechs Freiheitsgrade einer 3D-Transformation bietet und hervorragend für das Andocken geeignet ist (ZHAI *et al.* [1996]). Dazu ist die Klasse SOXtSPACEBALL vorgesehen. Bei Betätigung der SpaceMouse werden Ereignisse erzeugt, die Informationen über die 3D-Transformation liefern und analog zu anderen Ereignissen verarbeitet werden können.

Die Ausgabe eines Stereobildes erfordert bei den Viewern von OPEN INVENTOR nur das Setzen eines Flags, wobei eine Erweiterung des SGI XServers den Stereobetrieb ermöglicht. Mit Shutterbrillen kann diese Ausgabe dreidimensional wahrgenommen werden, was bei den beschriebenen Aufgaben sehr nützlich ist.

## 8 Zusammenfassung und Ausblick

Das beschriebene System ermöglicht das interaktive Zusammensetzen von komplizierten 3D-Modellen, so wie sie in der Anatomie häufig auftreten, wobei Benutzer in verschiedenen Schwierigkeitsgraden arbeiten können. Auf diese Weise ist spielerisch eine intensive Auseinandersetzung mit einem solchen Modell möglich. Dies bereitet direkt auf Prüfungen und Testate in der Anatomie vor, in denen detailliert nach Lage, Verlauf und Form von anatomischen Strukturen gefragt wird. Depth cues, insbesondere Schatten und Transparenz in der Visualisierung, sowie transparente Cursor, beidhändige Eingabe einschließlich einer 3D-Eingabe erlauben es, die räumlichen Verhältnisse zu erfahren.

Die beschriebenen Interaktionstechniken müssen in bezug auf das Erlernen räumlicher Zusammenhänge evaluiert werden, wobei auch die Effizienz verschiedener Varianten verglichen werden muß. Dies betrifft insbesondere:

- die Techniken zur Visualisierung (Schattenwurf, Einsatz von Transparenz),
- die Rotation und Platzierung von 3D-Objekten (Nutzen eines transparenten Cursors, beidhändige Interaktion, Realisierung des Snap-Mechanismus) und
- die Vorteile der Integration von textuellen Informationen der räumlichen Zusammenhänge.

Diese Aspekte können in kontrollierten Experimenten überprüft werden, wobei die Aufgabe darin besteht, ein bestimmtes Puzzle zu realisieren. Dabei kann jeweils eine Gruppe gewisse Interaktionstechniken (z.B. Snapping) nutzen und die andere nicht. Abhängige Variablen solcher Experimente sind die Zeit, die zum Puzzeln benötigt wird und die Zahl der Fehler, die dabei gemacht worden sind, aber auch die subjektive Zufriedenheit der Benutzer. Für die Evaluierung von 3D-Interaktionstechniken kann der standardisierte Plan von GRIMSON und PERLMAN [1995] mit einem vorgefertigten Fragebogen benutzt werden.

Ein wichtiger Aspekt der Evaluierung wird die Verwaltung der Fenster sein. Es gibt eine Ansicht für das fertige Modell; mindestens eine Ansicht zum Zusammensetzen und mehrere Fenster als Ablagen. Es ist zu erwarten, daß bei Modellen mit mehr als 50 Teilen die Übersichtlichkeit ein Problem wird. Wenn die Benutzer häufig zwischen den Fenstern wechseln, macht dies die Arbeit schwierig, so daß dann fortgeschrittene Fensterverwaltungsstrategien eingesetzt werden müssen.

Zu den wichtigsten Aufgaben gehört es, das 3D-Puzzle in ein pädagogisch abgestimmtes Konzept zu integrieren. Dabei ist die Frage, ob der Benutzer, der Autor oder das System selbst den Schwierigkeitsgrad einstellt. Die selbständige Anpassung des Systems ausgehend von einer Protokollierung der Benutzerinteraktionen (z.B. Zahl der erfolgreichen und fehlerhaften Andockversuche) ist bei Computerspielen üblich und kann die Motivation erhöhen.

## Literatur

- Blinn, J. (1988): „Me and My (Fake) Shadow“, *IEEE Computer Graphics and Applications*, Band 8 (1), S. 82-86
- Grimson, S. B. und G. Perlman (1995): „A Standardized Evaluation Plan for Three-Dimensional Interaction Techniques“, *International Journal of Man-Computer Studies*, Band 43 (1), S. 15-41



- Guiard, Y. (1987): „Asymmetric Division of Labor in Human Skilled Bimanual Action: The Kinematic Chain as a Model“, *The Journal of Motor Behavior*, Band 19 (4), S. 486-517
- Hinckley, K. (1997): *Haptic Issues for Virtual Manipulation*, Dissertation, University of Virginia
- Höhne, K.-H., B. Pflesser, A. Pommert *et al.* (1996): „A Virtual Body Model for Surgical Education and Rehearsal“, *Computer – Innovative Technology for Professionals*, Januar, S. 25-31
- Kiyokawa, K., H. Takemura, Y. Katayama, H. Iwasa, N. Yokoya (1997): „VLEGO: A Simple Two-handed Modeling Environment Based On Toy Block“, In *Proc. of VRST '97*, S. 27-34, ACM, New York
- Lappe, M. (1997): *3D Visualization for Molecular Docking*, Diplomarbeit an der Universität-Gesamthochschule Paderborn, Fachbereich Mathematik und Informatik
- Leblanc, A., P. Kalra, N. Magnenat-Thalmann und D. Thalmann (1991): „Sculpting with the ‘Ball and Mouse’ Metaphor“, *Proc. of Graphics Interface*, S. 152-159
- Liang, J. und M. Green (1993): „JDCAD: A Highly Interactive 3D Modeling System“, *Proc. of 3<sup>rd</sup> International Conference on CAD and Computer Graphics* (Beijing, China, August), S. 217-222
- Liang, J. (1995): *Interaction Techniques for Solid Modeling with a 3D Input Device*, Dissertation, University of Alberta, Department of Computing Science
- Mackinlay, J. D., S. K. Card und G. G. Robertson (1990): „Rapid Controlled Movement Through a Virtual 3D Workspace“, *Proc. of SIGGRAPH*, Computer Graphics, Band 24 (4), S. 171-176
- Pitt, I., B. Preim und S. Schlechtweg (1999): „Evaluation of Interaction Techniques for the Exploration of Complex Spatial Phenomena“, *Softwareergonomie '99* (Walldorf, März), erscheint
- Preece, J., Y. Rogers, H. Sharp, D. Benyon, S. Holland und T. Carey (1994): *Human-Computer Interaction*, Addison Wesley Verlag
- Preim, B. (1998): *Interaktive Illustrationen und Animationen zur Erklärung komplexer räumlicher Zusammenhänge*, Dissertation, Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg, Fakultät für Informatik
- Preim, B., A. Ritter und Th. Strothotte (1996): „Illustrating Anatomic Models – A Semi-Interactive Approach“, *Proc. of Visualization in Biomedical Computing* (Hamburg, 22.-25. September 1996), Springer Verlag, Lecture Notes in Computer Science, Band 1131, S. 23-32
- Preim, B. und A. Hoppe (1998): „Enrichment and Reuse of Geometric Models“, In: Th. Strothotte *Computational Visualization: Graphics, Abstraction, and Interactivity*, S. 45-62, Springer-Verlag
- Ritter, F. (1999): *Interaktive Zusammensetzung von 3D-Modellen zur Unterstützung des räumlichen Verständnisses*, Diplomarbeit, Fakultät für Informatik (in Vorbereitung)
- Wanger, L., J. Ferwerda und D. Greenberg (1992): „Perceiving Spatial Relationships in Computer-Generated Images“, *IEEE Computer Graphics and Applications*, Band 12 (3), S. 44-58
- Zhai, S., W. Buxton und P. Milgram (1996): „The partial occlusion effect: utilizing semi-transparency in 3D human computer interaction“, *ACM Transactions on HCI*, Band 3(3), S. 254-284
- Zhai, S. (1996): *Human Performance in Six Degrees of Input Control*, Dissertation, University of Toronto