

24.11.98

# Interaktive Montagesimulation in virtuellen Umgebungen

Bernhard Jung, Martin Hoffhenke, Britta Lenzmann & Ipke Wachsmuth

Universität Bielefeld, Technische Fakultät  
Postfach 100131, 33501 Bielefeld

jung|martinh|britta|ipke@techfak.uni-bielefeld.de

**Zusammenfassung** Der *CODY Virtuelle Konstrukteur* ist ein wissensbasiertes System für die interaktive Montagesimulation in virtuellen Umgebungen<sup>1</sup>. Der Benutzer interagiert mit dem System mittels verbaler Eingaben oder via direkter Manipulation. Aufgabe des Systems ist die teilautonome Umsetzung der Benutzereingaben, indem der jeweilige Montageschritt, etwa das Fügen oder Trennen der 3D-computergraphischen Bauteile, in der virtuellen Umgebung in Echtzeit simuliert wird. Um einer wirklichkeitsgetreuen Montagesimulation gerecht zu werden, wird Wissen über die Fügungsmöglichkeiten der Bauteile bereitgestellt. Zusätzliches Konstruktionswissen über das Montageziel wird einerseits durch strukturierte Konzeptmodellierungen in der Frame-basierten Beschreibungssprache COAR und andererseits durch parametrische 3D-Repräsentationen, sog. Formprototypen, bereitgestellt. Die in der Szene konstruierten Aggregate werden durch dynamische Konzeptualisierung als strukturierte Baugruppen des Zielaggregats erkannt. Dadurch wird dem System nicht nur ein verbessertes Verständnis sprachlicher Instruktionen ermöglicht, sondern – neben der physikalisch realistischen – auch die zielgerichtete Umsetzung von unterspezifizierten Benutzereingaben in der Montagesimulation.

## 1 Montagesimulation in virtuellen Umgebungen

Im Konstruktionsbereich finden dreidimensional computergraphisch visualisierte „virtuelle Szenen“ zunehmendes Interesse. Während Graphiksysteme zunächst darauf ausgelegt waren, die generierten Bilder dem eher passiven Betrachter zur Verfügung zu stellen, werden in jüngerer Zeit stärker interaktive Techniken entwickelt und erprobt, die ein unmittelbares Einbeziehen des Benutzers in den Entwurfsprozeß ermöglichen sollen. Die im folgenden dargestellten Techniken zielen darauf, eine intuitive und schnelle Erstellung virtueller Prototypen aus gegebenen CAD-basierten Grundbausteinen zu ermöglichen. Die Kernidee dazu liegt in der wissensbasierten Unterstützung von interaktiven Entwurfsprozessen. Dabei werden Montageprozesse vom Benutzer mittels natürlicher Sprache oder per direkter Manipulation der visualisierten Bauteile initiiert und vom System in der virtuellen Umgebung in Echtzeit simuliert.

<sup>1</sup> Der Virtuelle Konstrukteur wurde im Projekt „Konzeptdynamik“ (CODY) an der Universität Bielefeld entwickelt. Das CODY-Projekt wird von der Deutschen Forschungsgemeinschaft im SFB 360 seit 1993 unterstützt.

## Virtuelle Umgebungen

Mit *virtuellen Umgebungen* bezeichnet man computergenerierte, dreidimensional präsentierte Abbildungen von natürlichen oder fiktiven Umgebungen, die dem Menschen ein weitgehend realistisches Erfahren einer simulierten Welt ermöglichen. Die virtuelle Umgebung wird als neue Form der Mensch-Maschine-Kommunikation verstanden, die "dem intuitiven Verständnis des Menschen stärker als abstrakte, über Menüs und Windows erstellte 'Desktop'-Schnittstellen entspricht" [ABGM94]. Zu den Zielvorstellungen virtueller Umgebungen gehören (vgl. [ABGM94,Dai97,Wac98]):

- Realistische, multimodale Präsentation: Die dreidimensional repräsentierte Welt wird durch Auswertung von Geometrie- und Materialeigenschaften der Szenenobjekte (wie Position, Orientierung, Gittermodell, Farbe und Textur) sowie von Kamera- und Beleuchtungsmodellen fotonah visualisiert. Neben der visuellen Präsentation auf Head-Mounted Displays und Großbildprojektoren werden z.T. auch auditive und haptische Ausgaben erzeugt.
- Natürliche, multimodale Interaktion: Der Mensch soll auf intuitive Weise mittels Sprache und Gestik sowie durch direktes Eingreifen mit der virtuellen Umgebung interagieren können. Dazu werden Eingabegeräte wie Datenhandschuh, 3D-Positionsgeber (Tracker) oder 3D-Maus eingesetzt und mit Spracheingabe kombiniert.
- Dynamisches, physikalisch realistisches Objektverhalten: Die Objekte der virtuellen Umgebung ändern Eigenschaften wie Position, Form, oder Farbe. Die Dynamik der Szene wird im einfacheren Fall durch vorberechnete Animationen erreicht. Weitergehende Ansätze zielen auf eine physikalisch basierte Simulation von dynamischem Objektverhalten, welches durch die Interaktion der Szenenobjekte untereinander oder durch Benutzereingriffe angestoßen bzw. beeinflusst wird (z.B. [BB88,BW92]).
- Echtzeit: Um einen möglichst hohen Immersionsgrad des Benutzers in die virtuelle Umgebung zu erreichen, wird unmittelbares Feedback auf Benutzerinteraktionen angestrebt. Dazu müssen Präsentation der virtuellen Umgebung und Simulation der Objektdynamik in Echtzeit erzeugt werden.

Gemessen an den o.g. Zielvorstellungen sind derzeit aber insbesondere die möglichen Interaktionen und die physikalische Simulation von realistischem Objektverhalten noch recht beschränkt. Interaktionsmöglichkeiten (unabhängig von den verwendeten Ein-/Ausgabe-Medien) sind typischerweise beschränkt auf das freie Navigieren in der virtuellen Welt (walk-through bzw. fly-through) sowie das Greifen und Verschieben von Objekten, wobei teilweise auch Kollisionsvermeidung berücksichtigt wird. Diese Aktionen können durch die alleinige Auswertung von geometrischen Beschreibungen der virtuellen Welt erfolgen. Weitergehende Interaktion bedingen dagegen zusätzliches Wissen über die Welt, die in ihr enthaltenen Objekte und unter Umständen auch über den menschlichen Benutzer. In der Simulation einer Montage kann zum Beispiel das wirklichkeitsgetreue Fügen von Bauelementen nur gelingen, wenn mechanische Eigenschaften wie die Verbindungsmöglichkeiten der Bauteile in den virtuellen Modellen berücksichtigt werden. Ein Ansatzpunkt zur Lösung solcher Probleme ergibt sich durch Einbringen von Methoden der Künstlichen Intelligenz. So bildet etwa in dem im folgenden beschriebenen Ansatz die explizite Repräsentation und situationsgemäße Aktualisierung

von Wissen über Bauteile und deren Verbindungen die Grundlage zur realitätsnahen Simulation und zur situationsgerechten Mensch-Maschine-Kommunikation.

### **Der CODY Virtuelle Konstrukteur**

Die genannten Gesichtspunkte werden in diesem Beitrag an einem konkreten, vollständig implementierten Beispielsystem erläutert. Der im folgenden beschriebene *CODY Virtuelle Konstrukteur* ist ein im Rahmen des DFG-Sonderforschungsbereichs 360 "Situierete Künstliche Kommunikatoren" [RW96] entwickeltes System, das die "virtuelle Montage" von 3D-computergraphisch dargestellten Bauteilen zu komplexen Aggregaten ermöglicht. Dabei interagiert der Benutzer mit der virtuellen Montage-Umgebung mittels verbaler Instruktionen oder durch direkte Manipulation. Das System leistet die teilautonome Umsetzung der Benutzereingaben, indem der jeweilige Montageschritt, etwa das Fügen oder Trennen der 3D-computergraphischen Bauteile, in der virtuellen Umgebung *online* simuliert wird.

Um der wirklichkeitsgetreuen Montagesimulation gerecht zu werden, ist der Virtuelle Konstrukteur mit Wissen über die Fügemöglichkeiten der Bauteile versehen. Ferner werden Modelle sinnvoller Baugruppen sowohl als strukturelle Beschreibungen wie auch als parametrische 3D-Repräsentationen, sog. *Formprototypen*, vorgehalten (siehe Abschnitt 3.2). Die Szene mit den Bauteilen und Aggregaten wird semantisch repräsentiert („konzeptualisiert“). Diese Konzeptualisierung wird dynamisch angepaßt, um ein intern verarbeitbares logisches Modell der Szene mitzuführen. Durch *dynamische Konzeptualisierung* verfügt das System über Wissen über die in der virtuellen Umgebung entstehenden Aggregate. Dieses Wissen ermöglicht dem System nicht nur das Verständnis sprachlicher Benennungen von Baugruppen in Instruktionen, sondern kann in der Simulation auch zur zielgerichteten Herstellung von Objektverbindungen bei unterspezifizierten Benutzereingaben verwendet werden. Die interaktive Montagesimulation in der virtuellen Umgebung wird erst durch die kombinierte Auswertung von geometrischen und wissensbasierten Modellen ermöglicht.

In den folgenden Abschnitten werden zunächst die Interaktionsmöglichkeiten mit dem CODY Virtuellen Konstrukteur am Beispiel einfacher Montagen demonstriert (Abschnitt 2). Weiter werden die wissensbasierten Bauteil- und Baugruppenbeschreibungen und deren Aktualisierung entsprechend der fortschreitenden Montage dargestellt (Abschnitt 3). Anschließend wird anhand verschiedener Beispiele gezeigt (Abschnitt 4), wie die wissensbasierten Methoden in der Montagesimulation ausgenutzt werden.

## **2 Interaktion**

Zur Demonstration der Interaktionsmöglichkeiten mit dem CODY Virtuellen Konstrukteur wird die Konstruktion eines einfachen Zielaggregats (Flugzeugmodells) aus Teilen eines Holzbaukastens ("Baufix") herangezogen. Teile dieses Baukastens sind zum Beispiel Schrauben, Muttern und Lochleisten in verschiedenen Größen, die auf vielfältige Weise zusammengebaut werden können. Abbildung 1 zeigt ein teilmontiertes Flugzeugmodell. Alle sonstigen Aggregate, die sich aus den verwendeten Grundbausteinen herstellen lassen, können in der virtuellen Umgebung ebenfalls konstruiert werden.

Zur Manipulation der virtuellen Montageszene stehen dem Benutzer folgende Möglichkeiten zur Verfügung:

1. Verändern der Betrachterperspektive durch Bewegungen des Betrachterstandorts, Ändern der Blickrichtung und *zooming*.
2. Bewegen und Drehen von Bauteilen und Aggregaten.
3. Fügen von Bauteilen und Aggregaten.
4. Trennen von Bauteilen und Aggregaten.
5. Rotieren von Aggregatkomponenten relativ zu anderen Bauteilen eines Aggregats.

Während der Aspekt 1. als standardmäßige Leistung interaktiver Graphiksysteme angeboten wird, stellen Aspekte 2.– 5. Funktionserweiterungen für die wissensbasierte Montagesimulation dar<sup>2</sup>. Im Virtuellen Konstrukteur werden dabei 1. und 2. ausschließlich durch direkte (mausgesteuerte) Manipulation vorgenommen. Die Funktionalitäten 3.–5. können neben direkter Manipulation auch über verbale Anweisungen – derzeit über Tastatur – vermittelt werden. Beide, sprachliche und mausgesteuerte, Interaktionsformen greifen auf Modellwissen über die Verbindungsmöglichkeiten der Bauteile bei der Montagesimulation zurück.

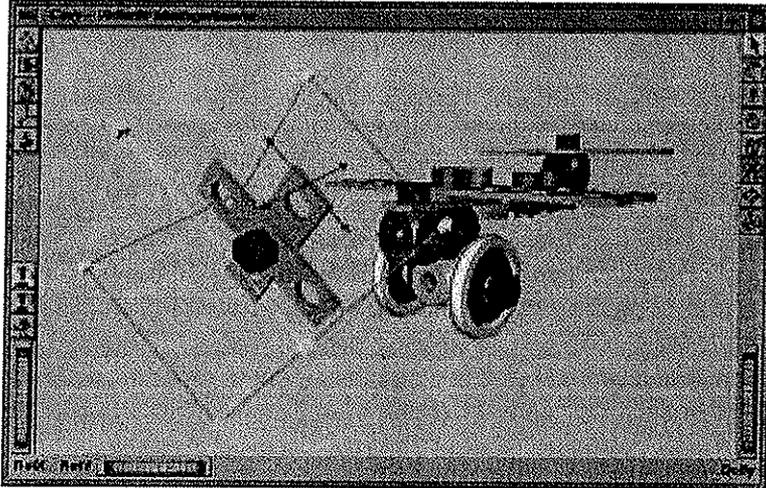
#### **Wissensgestützte direkte Manipulation**

Die Zielvorstellung bei der Interaktionsform der direkten Manipulation ist, daß der Benutzer durch einfaches Greifen und Bewegen der Bauteile in der virtuellen Umgebung Montagen durchführen kann. Eine Schwierigkeit bei der direkten Manipulation liegt darin, daß Mauseingaben für eine exakte Positionierung der Bauteile im allgemeinen nur unvollständige Eingabedaten liefern. Daher werden im Virtuellen Konstrukteur für die direkte Manipulation der virtuellen Bauteile spezielle Werkzeuge, sog. "Manipulatoren" bereitgestellt, die durch Ausnutzung von Montagewissen Benutzereingaben teilautonom vervollständigen. Bei Fügehandlungen zum Beispiel greift der Benutzer ein virtuelles Bauteil an einem speziellen Manipulator und bewegt es in Richtung eines anderen Bauteils; sind die Bauteile nah genug zusammen, dann löst der Manipulator das automatisierte Zusammenschnappen der Bauteile aus. Weitere Manipulatoren leisten das Trennen von Bauteilen, das Rotieren von Bauteilen innerhalb von bereits konstruierten Bauteilen sowie das Verschieben und Rotieren einzelner Bauteile oder Aggregate. Ein Beispiel für eine Fügehandlung mittels Mauseingabe ist in Abbildung 1 gezeigt.

#### **Sprachliche Instruktion**

In den verbalen Anweisungen kann Bezug genommen werden auf den Typ der Bauteile (Schraube, Leiste etc.), auf verschiedene Objekteigenschaften (zum Beispiel Farbe, Form und Größe) sowie auf die räumliche Lage und Anordnung der Konstruktionselemente (zum Beispiel *links*, *rechts* oder Kombinationen wie *links oben*). Neben einzelnen Bauteilen können auch bereits gebaute Aggregate angesprochen werden. Da die Objekte anhand ihrer wahrnehmbaren Eigenschaften benannt werden können, ist es nicht notwendig, daß dem Benutzer interne Objektbezeichner (z.B. rad-001) bekannt sein müssen. Anstelle exakter Typbezeichnungen können Bauteile und Aggregate auch allgemein als *Teil* angesprochen werden. Die folgende Auflistung enthält beispielhaft einige mögliche Anweisungen an den Virtuellen Konstrukteur:

<sup>2</sup> Bei Gesichtspunkt 2. handelt es sich insofern um eine Erweiterung gegenüber herkömmlichen Graphiksystemfunktionen, als etwa Gruppierungen gemäß physikalischer Gesetzmäßigkeiten automatisch unterstützt werden.



**Abbildung 1.** Beispiel für die Simulation einer Fügehandlung: Der Propeller wird mittels Mausinteraktion zum Rumpf des Flugzeugmodells geführt. Wird eine bestimmte Distanz unterschritten, dann vervollständigt ein modellbasiertes "Schnappen" den Montageschritt unter Ausnutzung von Wissen über die Verbindungsmöglichkeiten der Bauteile.

- > *Stecke die linke Schraube durch die rote Scheibe.*
- > *Stecke die Schraube in die Mitte der Fünferleiste*
- > *Stecke das linke, hintere Teil von unten in den Block*
- > *Verbinde das Rad mit der Achse*
- > *Setze die Schraube oben auf das Fahrwerk*
- > *Nimm den Reifen von der Felge*
- > *Drehe die Leiste quer zum Leitwerk*

Die Auswertung sprachlicher Instruktionen ist ein multimodaler Schlußfolgerungsprozeß, der sowohl auf geometrisch-analog repräsentiertes räumliches Wissen wie auch auf explizit modelliertes und dynamisch aktualisiertes Montagewissen zugreift [JW98]. Räumliches Wissen wird situativ, unter Berücksichtigung der aktuellen Betrachterperspektive aus der 3D-Geometrieszene abgeleitet und ermöglicht das Verständnis räumlicher Ausdrücke wie *oben* und *links*. Explizit repräsentiertes Montagewissen betrifft zum einen Wissen über die prinzipielle Verbindbarkeit der Bauteile, z.B. daß es möglich ist eine Schraube in eine Leiste zu stecken. Zum anderen stellt dynamisch aufgebautes Wissen über die in einer Montagesituation vorhandenen Baugruppen eine notwendige Voraussetzung für deren Benennungsmöglichkeit in sprachlichen Instruktionen dar, z.B. *Fahrwerk* oder *Leitwerk*. Gleiches gilt für die dynamische Inferenzierung der wechselnden funktionalen Rollen der Bauteile entsprechend ihrer Verwendung im Zielaggregat, wie z.B. *Achse* oder *Felge*. Die Repräsentation und dynamische Aktualisierung des Montagewissens sind Gegenstand des nächsten Abschnitts.

### 3 Modellwissen für die Montagesimulation

Die Montagesimulation im Virtuellen Konstrukteur ist ein wissensbasierter Prozeß, der einerseits Modellwissen über die mechanischen Eigenschaften der Bauteile wie ihre Verbindungsmöglichkeiten und andererseits Modellwissen über das Zielaggregat ausnutzt. Dieses Modellwissen wird im folgenden genauer beschrieben.

#### 3.1 Modellwissen über Bauteile und Verbindungen

Als Grundlage für die Montagesimulation in virtuellen Umgebungen muß zunächst Wissen über mechanische Eigenschaften der Bauteile, insbesondere ihrer Verbindungsmöglichkeiten bereitgestellt werden. Im Virtuellen Konstrukteur werden dazu die Bauteilbeschreibungen mit Wissen über ihre Verbindungsstellen oder *Ports* versehen. Dabei wird unterschieden zwischen *Geberports*, zum Beispiel der Schaft einer Schraube, und *Nehmerports* wie Bohrungen oder Löcher. Bauteilverbindungen beruhen auf der Fügung von jeweils einem Geberport in einen Nehmerport. Wissen über Bauteile, Ports und deren Verbindungsmöglichkeiten wird hybrid modelliert. Einerseits werden die Geometriemodelle der Bauteile mit den Lagen ihrer zugehörigen Ports angereichert. Andererseits wird strukturelles Wissen über die Bauteile, wie Typ, Spezialisierungsbeziehungen oder die prinzipielle Verbindbarkeit von Bauteilen in einem Frame-artigen Formalismus modelliert.

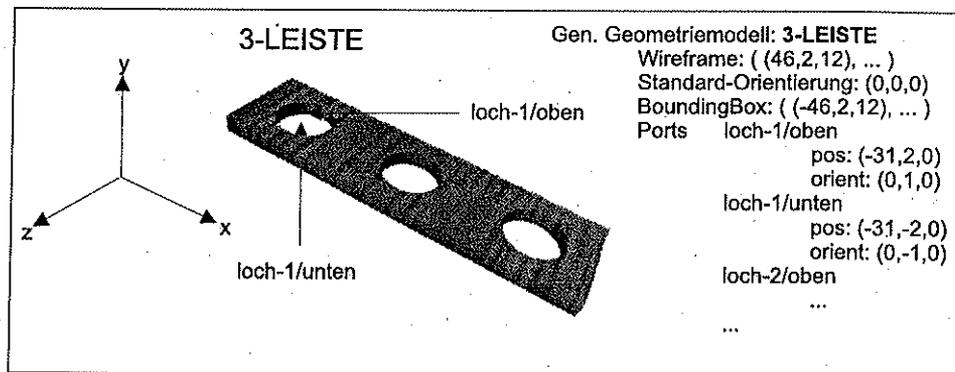


Abbildung 2. Angereichertes Geometriemodell einer Dreilochleiste

#### Anreicherung der Geometriemodelle

Standard-Objektmodelle der 3D-Computergraphik definieren Position, Orientierung, Gittermodelle und Aussehen der visualisierten Objekte. Um die Montagesimulation in der virtuellen Umgebung zu ermöglichen, werden im Virtuellen Konstrukteur die Geometriemodelle der Bauteile darüber hinaus um Beschreibungen der Position und Ausrichtung ihrer Verbindungsports angereichert. Abbildung 2 zeigt die angereicherte Geometriebeschreibung einer Dreilochleiste: Die Dreilochleiste enthält sechs Verbindungsports, und zwar je zwei Lochseiten für die drei Löcher. Durch die Modellierung

der Lochseiten kann unterschieden werden, von welcher Seite z.B. eine Schraube durch ein Loch gesteckt wird.

Über den Geometriemodellen sind des weiteren verschiedene qualitative räumliche Relationen definiert. Dazu gehören die räumlichen Relationen  $parallel_x$ ,  $parallel_y$ ,  $parallel_z$ ,  $orthogonal_x$ ,  $orthogonal_y$ ,  $orthogonal_z$ ,  $berührt$  und  $neben$ . Diese qualitativen Relationen werden im System nicht explizit gespeichert, sondern nur bei Bedarf abgeleitet, z.B. bei der Verarbeitung von sprachlichen Instruktionen oder bei der Überprüfung der räumlichen Anordnung von Baugruppenkomponenten bei der Aggregatkonzeptualisierung (s.u.). Außerdem wird eine Relation  $verbindung$  über den Portbeschreibungen definiert, welche die Bedingungen für realistische Bauteilverbindungen festlegt. Bei der Definition der  $verbindung$ -Relation wird einerseits auf geometrisches Wissen über die relative Anordnung zweier Ports zurückgegriffen, sowie andererseits auf strukturelles Wissen über die prinzipielle Verbindbarkeit von Ports.

|  |                  |
|--|------------------|
| Gedächtniskonzept: 3-LOCHLEISTE        | // ein Objekttyp |
| Spezialisierung-von: LEISTE            | // in statischer |
| Bestandteil hat-loch-1 #1: LEISTENLOCH | // Wissensbasis  |
| Bestandteil hat-loch-2 #1: LEISTENLOCH | // "Baufixwelt"  |
| Bestandteil hat-loch-3 #1: LEISTENLOCH |                  |
| Attribut farbe: holzfarben             |                  |
| Gedächtniskonzept: LEISTENLOCH         | // ein Objekttyp |
| Spezialisierung-von: LOCH              | // in statischer |
| Attribut durchmesser: 15               | // Wissensbasis  |
| Attribut gesamtkapazität: 4            | // "Baufixwelt"  |
| Attribut aktuellekapazität: 0..4       |                  |
| Attribut belegt: Boolean               |                  |
| Gedächtniskonzept: LOCHSEITE           | // ein Objekttyp |
| Spezialisierung-von: NEHMERPORT        | // in statischer |
| Verbindung #0..#1: SCHRAUBSCHAFT       | // Wissensbasis  |
| Attribut belegt: Boolean               | // "Baufixwelt"  |

**Abbildung 3.** Beispiel für Gedächtniskonzepte in COAR: Modellierung der Dreilochleiste und der Löcher. Eine Dreilochleiste ist eine Leiste mit drei Löchern. Ein Leistenloch hat 15 Millimeter Durchmesser, eine Tiefe (Gesamtkapazität) von 4 Millimetern; in konkreten Montagesituationen beträgt die jeweils unkonsumierte ("aktuelle") Kapazität zwischen 0 und 4 Millimetern. In jeder der beiden Lochseiten kann ein Schraubschaft gesteckt werden.

### Strukturelle Beschreibung der Bauteile

Montagerelevantes strukturelles Wissen über die Bauteile und deren Ports umfaßt u.a. deren Einordnung in eine Konzepttaxonomie sowie die prinzipiellen Verbindbarkeiten von Bauteilen. Derartiges strukturelles Wissen über die Bauelemente sowie weitere montagebezogene Eigenschaften der Bauteile und Ports, z.B. Bemaßungen wie Tiefe und Durchmesser, wird in dem Frame-basierten Wissensrepräsentationsforma-

lismus COAR (*"Concepts for Objects, Assemblies, and Roles"*) [Jun97] modelliert. Generisches Modellwissen über die Bauelementtypen wird in den *Gedächtniskonzepten* von COAR repräsentiert. Abbildung 3 zeigt die COAR-Definition einer Leiste mit drei Löchern aus dem Baufixszenario (vgl. auch geometrische Repräsentation in Abbildung 2). Aktuelles Wissen über die konkreten Bauelemente in der virtuellen Umgebung wird in den *Aktualkonzepten* von COAR repräsentiert. Das in Aktualkonzepten repräsentierte Wissen über einzelne Bauelemente wird entsprechend der fortschreitenden Montage angepaßt, indem zum Beispiel die verfügbaren Portkapazitäten angepaßt und eingegangene Verbindungen vermerkt werden. Abbildung 4 zeigt ein Aktualkonzept zur Repräsentation einer Dreilochleiste (sowie ein Aktualkonzept, das eines ihrer Löcher repräsentiert), welche in einer konkreten Montagesituation mit einer Schraube verbunden ist. Weitere Sprachmittel von COAR für die Modellierung strukturierter Baugruppen werden im Abschnitt 3.2 dargestellt.

|  |                      |
|--|----------------------|
| Aktualkonzept: leiste-1                        | // ein Aktualkonzept |
| Instanz-von: 3-LOCHLEISTE                      | // in dynamischer    |
| Bestandteil hat-loch-1: leiste-1/loch-1        | // Wissensbasis      |
| Bestandteil hat-loch-2: leiste-1/loch-2        | // "Baufixwelt"      |
| Bestandteil hat-loch-3: leiste-1/loch-3        |                      |
| Verbindung: schraube-1                         |                      |
| Attribut farbe: holzfarben                     |                      |
| Aktualkonzept: leiste-1/loch-2                 | // ein Aktualkonzept |
| Instanz-von: LEISTENLOCH                       | // in dynamischer    |
| Bestandteil hat-seite-1: leiste-1/loch-2/oben  | // Wissensbasis      |
| Bestandteil hat-seite-1: leiste-1/loch-2/unten | // "Baufixwelt"      |
| Verbindung: schraube-1/schaft                  |                      |
| Attribut durchmesser: 15                       |                      |
| Attribut gesamtkapazität: 4                    |                      |
| Attribut aktuellekapazität: 0                  |                      |
| Attribut belegt: true                          |                      |

**Abbildung 4.** Beispiel für Aktualkonzepte in COAR: Das Aktualkonzept *leiste-1* repräsentiert eine Dreilochleiste in der virtuellen Montageumgebung, welche mit einer Schraube *schraube-1* verbunden ist. Auch die Löcher von *leiste-1* sind durch Aktualkonzepte repräsentiert. Sie leisten u.a. eine genauere Beschreibung der Verbindung mit der Schraube: Der Schraubenschaft steckt im zweiten Loch der Leiste.

Die hybride Modellierung von geometrischen und strukturellen Eigenschaften der Bauteile und ihrer Verbindungsports stellt die Grundlage für die Montagesimulation in der virtuellen Umgebung dar: Verbindungen zwischen virtuellen Bauteilmodellen können erkannt bzw. zur Umsetzung von Benutzerinstruktionen hergestellt werden. Wissen über die Bauteile allein ermöglicht jedoch noch nicht den Bezug auf entstandene Baugruppen des Zielaggregats. Auch gewährleistet das Wissen über die Bauteile und deren Verbindungsmöglichkeiten zwar eine physikalisch korrekte Montage der

Bauteile, unterstützt jedoch nicht die zielgerichtete Auswertung von unterspezifizierten Benutzerinstruktionen in Hinblick auf ein zu erstellendes Zielaggregat. Hierfür wird der Virtuelle Konstrukteur um weiteres Modellwissen über das Montageziel sowie um den Mechanismus der dynamischen Konzeptualisierung angereichert.

### 3.2 Modellwissen über das Montageziel und dynamische Konzeptualisierung

Zur Ermöglichung einer natürlichen Mensch-Maschine-Interaktion ist der Virtuelle Konstrukteur mit Modellwissen über das Montageziel ausgestattet. Aggregate, die in der virtuellen Umgebung im Verlauf der Montagesimulation entstehen, werden *dynamisch konzeptualisiert*, indem sie schritthaltend mit dem Zielaggregat abgeglichen werden und konzeptuelle Repräsentationen der entstandenen Baugruppen erzeugt werden [WJ96]. Durch dynamische Konzeptualisierung hat das System zu jedem Zeitpunkt ein Verständnis von der aktuellen Situation und kann sprachliche Benennungen und unterspezifizierte Benutzerinstruktionen vervollständigen. Im folgenden werden zwei komplementäre Ansätze für die Baugruppenmodellierung vorgestellt: Einerseits werden die Baugruppen des Zielaggregats in dem schon oben eingeführten Formalismus COAR und andererseits durch sogenannte *Formprototypen* modelliert.

**Dynamische Konzeptualisierung mit COAR** Die Wissensrepräsentationssprache COAR wurde im Hinblick auf die Modellierung von mechanischen Objekten, daraus konstruierbaren Baugruppen sowie den Rollen von Objekten und Baugruppen entsprechend ihrer Verwendung als Komponenten größerer Baugruppen entwickelt [Jun97]. Eine Kernaufgabe der Wissensverarbeitung in COAR ist, ein schritthaltend aktualisiertes, konzeptuelles Modell der Situation in fortschreitenden Montageaufgaben bereitzustellen. Dazu reflektieren die von COAR bereitgestellten Sprachmittel speziell die folgenden Anforderungen an die Wissensverarbeitung in virtuellen (oder realen) Montageumgebungen:

1. Im Verlauf einer Montage entstehen in der Umgebung Aggregate, die als strukturierte Baugruppen eines Zielaggregats interpretiert werden können. Die Existenz entstandener Baugruppen wird systemseitig inferiert, wenn ein konstruiertes Aggregat die geforderten Komponenten, die auf die geforderte Weise angeordnet sind, enthält. Aufbauend auf dem Semantischen-Netzwerk-Formalismus ERNEST [Sag90, NSSK90] und der terminologischen Sprache für Teil-Ganzes-Beziehungen von Padgham und Lambrix [PL94] stellt COAR dazu Sprachmittel für die Modellierung strukturierter Baugruppen bereit, die einerseits deren Komponenten und andererseits notwendige bzw. ausgeschlossene Relationen zwischen den Komponenten beschreiben. Durch die Inferenz der *Aggregatkonzeptualisierung* werden unstrukturierte Aggregate als sinnvolle Teilbaugruppen des Zielaggregats erkannt und durch Erzeugung eines neuen Aktualkonzepts zu einem (strukturierten) Objekt zusammengefaßt.
2. Das zugrundeliegende Baukastensystem enthält multifunktionale Bauteile, die in verschiedenen Baugruppen unterschiedliche funktionale Rollen annehmen können. Aufbauend auf einer ähnlichen Unterscheidung in CONCEPTUAL GRAPHS [Sow88] werden dazu in COAR Gedächtniskonzepte nach *Objekttypen* (z.B.

SCHRAUBE, LEISTE, etc.) und *Rollentypen* (z.B. ACHSE, ROTORBLATT, etc.) unterschieden. Diese werden in getrennten Konzepthierarchien modelliert und über die strukturelle Relation *Rolle-von* in Bezug zueinander gesetzt. Durch die Inferenz der *Rollenzuschreibung* werden Aktualkonzepte entsprechend ihrer Verwendung als Komponenten bestimmter Baugruppen bezüglich ihres Rollentyps automatisch reklassifiziert und mit kontextabhängigen Merkmalsätzen ausgestattet.

3. Im Rahmen einer größeren Systemarchitektur ergänzen die konzeptuellen Repräsentationen von COAR die geometrische Szenenbeschreibung der virtuellen Umgebung. Die Zugriffsmöglichkeit auf die geometrische Szenenbeschreibung wird in COAR u.a. dafür ausgenutzt, daß geometrische Constraints wie *parallel<sub>x</sub>* oder *neben* in Baugruppenmodellierungen zur Beschreibung der räumlichen Anordnung ihrer Komponenten eingebunden werden können. Aktuell geltende geometrische Relationen werden nicht explizit in den Aktualkonzepten vermerkt, sondern bei Bedarf aus der geometrischen Szenenbeschreibung abgeleitet.

|  |  |
|--|--|
| Gedächtniskonzept: PROPELLER                       | // ein Objekttyp   |
| Spezialisierung-von: BAUGRUPPE                     | // in statischer   |
| Bestandteil hat-rotorblatt-1 #1: ROTORBLATT        | // Wissensbasis  |
| Bestandteil hat-rotorblatt-2 #1: ROTORBLATT        | // "Flugzeugwelt"  |
| Bestandteil hat-propschraube #1: PROPELLERSCHRAUBE |  |
| PP-Constraint verbindung                           | hat-rotorblatt-1 als-objekttyp hat-loch-2<br>hat-propschraube als-objekttyp hat-schaft |
| PP-Constraint verbindung                           | hat-rotorblatt-2 als-objekttyp hat-loch-2<br>hat-propschraube als-objekttyp hat-schaft |
| PP-Constraint not parallel <sub>x</sub>            | hat-rotorblatt-1 hat-rotorblatt-2  |
|  |  |
| Gedächtniskonzept: ROTORBLATT                      | // ein Rollentyp   |
| Spezialisierung-von: FLUGZEUGTEIL                  | // in statischer   |
| Rolle-von als-objekttyp: 3-LOCHLEISTE              | // Wissensbasis  |
|  | // "Flugzeugwelt"  |

**Abbildung 5.** Beispiel für Gedächtniskonzepte in COAR: Modellierung des Propellers des Baufixflugzeugs.

Abbildung 5 zeigt die COAR-Definition des Propellers des Baufix-Flugzeugmodells. Der Baufixpropeller besteht aus genau drei Bauteilen, nämlich zwei Dreilochleisten und einer Schraube, wobei die beiden Leisten als Komponenten des Propellers die Rolle von Rotorblättern und die Schraube die Rolle einer Propellerschraube annehmen. Es wird verlangt, daß die Schraube im jeweils zweiten Loch der beiden Leisten stecken muß und daß die beiden Leisten nicht parallel zueinander stehen dürfen.

Die Modellierung von Baugruppen in COAR beruht auf der Dekomposition von Baugruppen in ihre Teilbaugruppen bzw. einzelne Bauteile, so daß COAR-Modellierungen von Baugruppen immer auf einen spezifischen Bauteilsatz (wie z.B. Baufix)

zugeschnitten sind. Im folgenden wird ein bauteilunabhängiger Ansatz vorgestellt, in dem komplexe Zielaggregate ausschließlich über ihre Form beschrieben werden.

**Dynamische Konzeptualisierung mit Formprototypen** In gegenwärtigen Arbeiten im CODY-Projekt wird mit den sogenannten *Formprototypen* (auch *imaginale Prototypen*) [HW97] ein zu COAR komplementärer Ansatz für die dynamische Konzeptualisierung der in der virtuellen Umgebung entstehenden Aggregate entwickelt. Formprototypen repräsentieren die *ungefähre Form* von Objekten und abstrahieren dabei von konkreten Bauteilsätzen. Zum Beispiel kann ein sehr abstrakter Formprototyp eines Flugzeugs modelliert werden, der sowohl über das Baufix-Flugzeugmodell wie auch über "echte" Flugzeugtypen generalisiert (siehe auch Abbildung 6). Aufbauend auf Ansätzen aus der Bildverarbeitung [Bro84] und der Kognitionswissenschaft [MN78, Bie87] werden dazu Formprototypen als parametrische Geometriebeschreibungen realisiert.

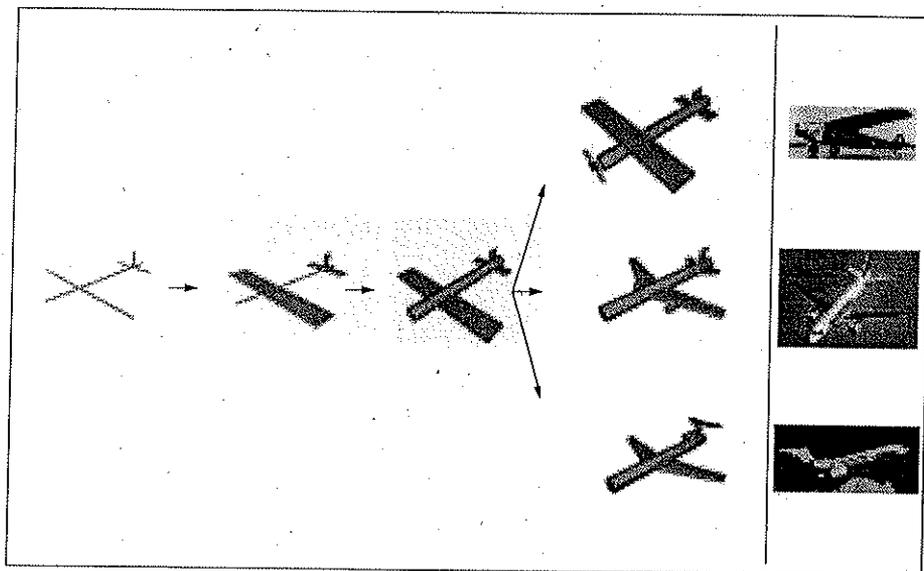


Abbildung 6. Formprototypen auf verschiedenen Abstraktionsebenen

Formprototypen modellieren die wesentlichen Formmerkmale von Objektkategorien und stellen somit notwendigerweise Abstraktionen von konkreten Objektformen dar. Wie stark diese Abstraktion ausfällt, ist einerseits eine Entscheidung des Modellierers, hängt andererseits aber auch wesentlich von der Komplexität des zu modellierenden Objekts ab. Der Mensch hat in der Regel ein sehr hohes Abstraktionsvermögen; so kann er beispielsweise das Baufix-Flugzeug in Abbildung 1 ohne weiteres als "Flugzeug" erkennen, obwohl es sehr viele flugzeuguntypische Merkmale aufweist, wie zum Beispiel die Löcher in den Tragflächen, das fehlende Profil der Trag-

flächen oder das überdimensional erscheinende Fahrwerk. Setzt man bei den Formprototypen auf einem entsprechend abstrakten Niveau an, so besteht die Gefahr der Übergeneralisierung, d.h. zu viele Objekte werden einer Kategorie zugeordnet. Aus diesem Grund verfolgt der hier vorgestellte Ansatz die Integration mehrerer Formprototypen graduell abgestufter Abstraktion. Ausgehend von einem sogenannten *Skelett-Modell*, das die natürliche Symmetrie [Blu73,BA84] des Objekts zum Vorbild hat, enthalten weitere Prototypen jeweils zusätzliche Forminformationen und besitzen damit einen geringeren Abstraktionsgrad. Schrittweise erhalten die Prototypen dabei Flächen- und Volumen-Eigenschaften [Bro84,Bie87] sowie weitere Details, die konkretere Ausprägungen des Modells charakterisieren. Abbildung 6 illustriert die Modellierung von zunehmend konkreteren Formprototypen am Beispiel eines Flugzeugs.

Ausgehend von einem hohen Abstraktionsgrad werden bei der Klassifikation zunehmend verfeinerte Prototypen gegen die entstehenden Aggregate in der virtuellen Umgebung abgeglichen. Nach jeder erfolgreichen Klassifikation auf einer Abstraktionsebene wird eine entsprechende Hypothese generiert, die anschließend auf der Ebene mit dem nächstgeringeren Abstraktionsgrad verifiziert wird. Falls nötig werden auch Unterhypothesen von identifizierten Komponenten (beispielsweise dem Propeller) gebildet und einem eigenen Klassifikationsprozeß über alle Ebenen hinweg unterzogen. Diese Architektur erlaubt es den Klassifikatoren, parallel auf den einzelnen Abstraktionsebenen zu arbeiten, so daß erste Hypothesen bereits vor Abschluß des vollständigen Klassifikationsprozesses vorliegen.

Bei der Montagesimulation in der virtuellen Umgebung leisten die Formprototypen eine frühzeitige, "holistische" Erkennung von sehr unterschiedlichen, aber auch unvollständigen Aggregaten als Instanzen eines (abstrakt modellierten) Zielaggregats. Formprototypen ergänzen damit die vergleichsweise detaillierte COAR-Modellierung des Zielaggregats, welche ihrerseits Wissen über die spezifische Verwendung einzelner Bauteile im Zielaggregat bereitstellt und damit z.B. auch Überprüfungen der Vollständigkeit von Montagen ermöglicht.

#### **4 Montagesimulation als wissensbasierter Prozeß**

Der Virtuelle Konstrukteur unterstützt die 3D-Simulation verschiedener montagebezogener Operationen wie Fügen, Trennen oder Rotieren von Teilaggregaten. Bei der Simulation wird einerseits das im vorigen Abschnitt beschriebene Modellwissen über die Bauteile und das Montageziel ausgenutzt. Andererseits ist aber auch der Zugriff auf exaktes geometrisches Wissen notwendig, um eine kollisionsfreie Montagesimulation zu ermöglichen. Im folgenden wird die Notwendigkeit dieser hybriden Wissensverarbeitung genauer am Beispiel der Simulation von Fügeoperationen verdeutlicht.

##### **Simulation von Fügungen**

Die Simulation von Fügehandlungen ist ein mehrstufiger Prozeß, der sowohl auf konzeptuelles Modellwissen wie auch auf geometrisches Wissen zurückgreift. Die vier Schritte bei der Simulation einer Fügehandlung sind im einzelnen:

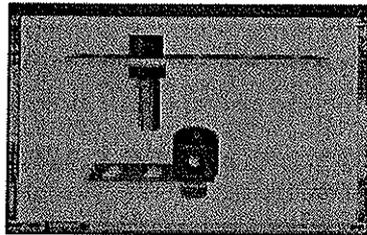
1. Auswahl der zu fügenden Bauteile und deren Verbindungsstellen: Beim Abgleich der sprachlichen Objektbenennungen mit den aktuellen Szenenobjekten fließt sowohl Modellwissen über die Objekte und Aggregate ein wie auch geometrisches Wissen bei der Auswertung räumlicher Objektbeschreibungen. Sprachliche Instruktionen sind i.a. in Bezug auf die Benennung der betroffenen Bauteile und die Verbindungsstellen unterspezifiziert, so daß bei der Objektauswahl gegebenenfalls zusätzliche Heuristiken wie Nähe zum Betrachter oder Zeitpunkt der letzten Verwendung eines Bauteils in einer Montagehandlung zum Tragen kommen. Bei der Fügésimulation mittels direkter Manipulation werden Bauteile und Verbindungsports aufgrund ihrer räumlichen Nähe zueinander ausgewählt. In jedem Fall wird in diesem Schritt Modellwissen über Objektverbindbarkeiten ausgewertet, so daß nur Bauteile (oder genauer: deren Verbindungsports) ausgewählt werden, die in der aktuellen Situation noch miteinander verbindbar sind.
2. Platzierung des ausgewählten Bauteils entsprechend Portkapazitäten: Die Bauteile werden vorläufig ineinander gefügt, wobei die Zielposition des transformierten Bauteils ausschließlich aus den Positionen der Bauteilports, die in den angereicherten Geometriemodellen modelliert sind, sowie aus den aktuellen Portkapazitäten, die in den Aktualkonzepten von COAR vermerkt sind, berechnet wird. Die Orientierung des transformierten Bauteils ist i.a. unterspezifiziert, so daß hier – u.U. unter Berücksichtigung von Wissen über die Anordnung der Bauteile im Zielaggregat – eine Defaultannahme getroffen wird<sup>3</sup>. Falls die zu verbindenden Bauteile schon Komponenten von Aggregaten sind, können als Seiteneffekt dieses Schritts physikalisch unmögliche Objektüberlagerungen zwischen anderen Aggregatkomponenten auftreten (siehe 3.).
3. Kollisionsvermeidung: Die vorläufige Fügung wird durch schrittweise Änderungen der Objektlagen solange korrigiert, bis keine Objektüberlagerung mehr auftritt. Die Kollisionsvermeidung greift auf exaktes geometrisches Wissen über die Objektform zurück.
4. Aktualisierung des Modellwissens und Visualisierung: Es wird überprüft, ob und welche Verbindungen entstanden sind. Belegungen von Ports und eingegangene Verbindungen werden in der Aktualkonzeptstruktur von COAR vermerkt. Das durch die Fügung entstandene Aggregat wird durch Abgleich mit den COAR-Beschreibungen und Formprototypen möglicher Zielaggregate dynamisch konzeptualisiert.

Ein Beispiel für die vier Einzelschritte bei der Simulation einer Fügehandlung ist in Abbildung 7 gezeigt.

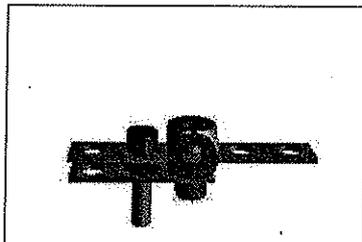
### **Rolle von Wissen über das Zielaggregat in der Montagesimulation**

Durch dynamische Konzeptualisierung werden die in der virtuellen Umgebung entstehenden Aggregate als Baugruppen eines Zielaggregats interpretiert. Dieses Wissen ist offensichtlich notwendig bei der Auswertung sprachlicher Instruktionen mit Bezug auf konstruierte Baugruppen. Neben der reinen Identifikation der Baugruppen kann Wissen

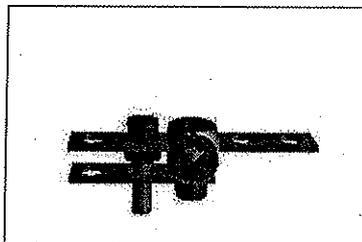
<sup>3</sup> In sprachlichen Instruktionen kann auch die Orientierung der Bauteile ausgedrückt werden, z.B. *Stecke die obere Leiste quer in die untere Leiste*. Die relative Orientierung der Bauteile ist jedoch auch in dieser Anweisung nicht vollständig spezifiziert (+90° oder 90°).



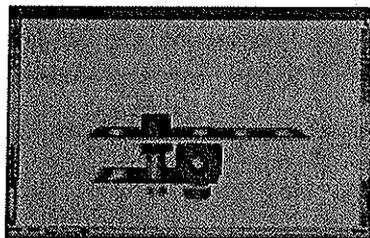
1. Schritt der Fügungssimulation: Bestimmung der Bauteile und Verbindungsports der Fügung. Das System legt fest, daß die obere Schraube von oben in das mittlere Loch der unteren Leiste gefügt werden soll.



2. Schritt der Fügungssimulation (nicht visualisiert zur Systemlaufzeit): Die Schraube wird entsprechend der aktuell vorhandenen Schafkapazität im Leistenloch plaziert. Als Seiteneffekt tritt eine Kollision zwischen der oberen Leiste und dem Schraubwürfel auf.



3. Schritt der Fügungssimulation (nicht visualisiert zur Systemlaufzeit): Kollisionsvermeidung durch Auswertung von exaktem geometrischem Wissen. Die Schraube wird in kleinen Inkrementen aus dem Loch gezogen, bis keine Objektüberlagerung mehr auftritt.



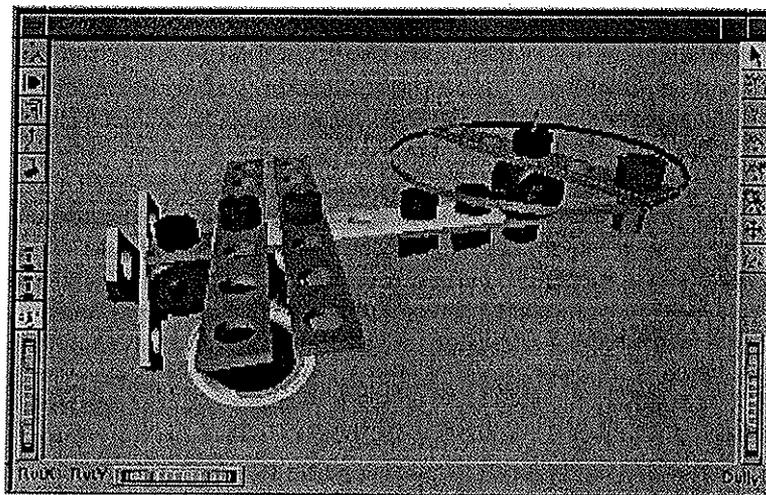
4. Schritt der Fügungssimulation: Visualisierung des neuen Szenenzustands und Aktualisierung des Modellwissens. U.a. wird das mittlere Loch der unteren Leiste als belegt markiert. Anstelle der ursprünglichen zwei Aggregatrepräsentationen wird jetzt nur noch eine Aggregatrepräsentation im Modell geführt.

**Abbildung 7.** Schrittweise Simulation der Fügehandlung: "Stecke das obere Aggregat in die Leiste."

über das Zielaggregat auch für die Vervollständigung von Benutzereingaben eingesetzt werden, die in Bezug auf Verbindungsstellen unterspezifiziert sind. Zum Beispiel kann bei einer Instruktion "stecke den Propeller an das Flugzeug" Wissen über das Zielaggregat derart ausgenutzt werden, daß der Propeller *vorne* am Flugzeugmodell angebracht wird. Darüber hinaus sind in sprachlichen Instruktionen auch oft die relativen Orientierungen von Bauteilen als Ergebnis von Fügungen unspezifiziert. Zum Beispiel kann bei einer Instruktion "montiere das Leitwerk an den Rumpf" Wissen über das Flugzeugmodell ausgenutzt werden, um das Leitwerk *quer* am Rumpf des entstehenden Flugzeugs anzubringen. Auch bei der Montagesimulation mittels direkter Manipulation, bei der ein Schnapp-Mechanismus Fügehandlungen vervollständigt, kann Wissen über das Zielaggregat bei der notwendigen Korrektur von Bauteilpositionen und -orientierungen ausgenutzt werden.

#### Simulation weiterer Montage-relevanter Operationen

Neben dem Fügen von Bauteilen unterstützt der Virtuelle Konstrukteur auch das Trennen von Bauteilen sowie die Rotation von Teilaggregaten relativ zu anderen Bauteilen eines Aggregats. Die Simulation dieser Operation beruht, wie das Fügen von Bauteilen, auf der kombinierten Auswertung von geometrischem und dynamisch aufgebautem konzeptuellen Wissen.



**Abbildung 8.** Beispiel für die Simulation einer Rotation: Die Leiste im Höhenleitwerk des Holzflugzeugs wird per Mauseingabe, vermittelt durch einen speziellen Manipulator, rotiert.

Ein Beispiel für die wissensbasierte Rotation eines Teilaggregats mittels direkter Manipulation ist in Abbildung 8 gezeigt. Der Rotationsmanipulator ermöglicht die Drehung der Fünflochleiste um eine dynamisch berechnete Achse, die in diesem Fall durch den Schaft der oberen Schraube gegeben ist. Durch Ausnutzung von dynamisch auf-

gebautem Wissen über die Verbindungsstruktur der Bauteile wird die in der Leiste steckende Schraube mitbewegt.

## 5 Diskussion

Mit dem CODY Virtuellen Konstrukteur wurde ein wissensbasiertes System beschrieben, das eine interaktive Simulation einfacher Montagen in einer virtuellen Umgebung ermöglicht. Durch die beschriebenen Möglichkeiten der Szenenmanipulation wie Fügen und Trennen von Bauteilen sowie Rotieren von Teilaggregaten erweitert der Virtuelle Konstrukteur die Funktionalität bestehender 3D-computergraphischer Systeme, die oft nur die Navigation in der Szene (*walk-throughs*) und einfache Transformationen einzelner Objekte erlauben. Als Interaktionsmöglichkeiten stehen im Virtuellen Konstrukteur einerseits die direkte Manipulation der virtuellen Szene mittels Maus oder ähnlicher Eingabegeräte zu Verfügung und andererseits die Instruierung des Systems in natürlicher Sprache. Damit werden im Virtuellen Konstrukteur verschiedene Aspekte wie natürliche Mensch-Maschine-Interaktion, dynamisches Objektverhalten und Echtzeit-Simulation aufgegriffen, die auf eine intuitivere Nutzbarkeit von virtuellen Umgebungen zielen.

Die physikalisch realistische Montagesimulation wird durch die Anreicherung der computergraphisch visualisierten Objektmodelle um qualitative Beschreibungen ihrer Verbindungsmöglichkeiten ermöglicht. Die Simulation von Montageoperationen greift sowohl auf dieses qualitative wie auch auf exaktes geometrisches Wissen zurück, um paßgenaue, kollisionsfreie Fügungen zu ermöglichen. Neben qualitativem Wissen über die Bauteile und ihre Verbindungsstellen ist im Virtuellen Konstrukteur auch konzeptuelles Wissen über das Zielaggregat der Montage modelliert. Die virtuelle Umgebung wird dynamisch konzeptualisiert, indem die entstehenden Aggregate schritthaltend mit dem Zielaggregat abgeglichen werden. Dynamisch aufgebautes Wissen über die entstehenden Baugruppen ermöglicht einerseits eine verbesserte Instruierbarkeit des Systems und kann andererseits bei unterspezifizierten Benutzereingaben für die Erzeugung zielgerichteter Montagesimulationen ausgenutzt werden. Im CODY-Projekt wurden dazu mit dem Frame-basierten Formalismus COAR sowie den parametrischen, geometrisch basierten Formprototypen zwei komplementäre Ansätze der Wissensrepräsentation und -verarbeitung entwickelt, die eine situationsangepaßte Konzeptualisierung dynamischer dreidimensionaler Umgebungen leisten. In der Kombination der Ansätze kann die eher holistische Aggregatklassifikation mit Formprototypen zur frühzeitigen Suchraumbeschränkung bei der detailorientierten Aggregatklassifikation mit COAR ausgenutzt werden.

Ein Anwendungsfeld der virtuellen Montagesimulation liegt in der Erstellung sog. "virtueller Prototypen", die auf die Überprüfung von Design-, Ergonomie- und Montierbarkeitseigenschaften in frühen Phasen des Entwicklungszyklus zielen [Ada93,DG94]. In derzeitigen Arbeiten im SFB 360 "Situierete Künstliche Kommunikatoren" werden die weiteren Möglichkeiten zur Einbindung des Virtuellen Konstrukteurs in ein natürlich-sprachlich instruierbares robotisches System verwertet [ZKJ<sup>+</sup>97]. Anwendungsmöglichkeiten der virtuellen Montagesimulation in der Robotik beinhalten einerseits die direkte

Kontrolle von ferngesteuerten robotischen Systemen (Telerobotik) und andererseits die Einbindung in die Handlungsplanung von autonomen robotischen Systemen.

## Literatur

- [ABGM94] P. Astheimer, K. Böhm, M. Göbel, and S. Müller. Die Virtuelle Umgebung – Eine neue Epoche der Mensch-Maschine-Kommunikation, Teil I: Einordnung, Begriffe und Geräte. *Informatik Spektrum*, 17(5), 1994.
- [Ada93] J.A. Adam. Virtual reality is for real. *IEEE Spectrum*, 30(10):22–29, October 1993.
- [BA84] M. Brady and H. Asada. Smoothed local symmetries and their implementation. *The International Journal of Robotics Research*, 3(3):36–61, 1984.
- [BB88] R. Barzel and A.H. Barr. A modelling system based on dynamic constraints. *Computer Graphics*, 22(4):179–188, 1988.
- [Bie87] I. Biederman. Recognition-by-components: A theory of human image understanding. *Psychological Review*, 94(2):115–147, 1987.
- [Blu73] H. Blum. Biological shape and visual science. *Journal of Theoretical Biology*, 38:205–287, 1973.
- [Bro84] R. A. Brooks. *Model-Based Computer Vision*. UMI Research Press, Ann Arbor, Michigan, 1984.
- [BW92] D. Baraff and A. Witkin. Dynamic simulation of non-penetrating flexible bodies. *Computer Graphics*, 25(4):199–208, 1992.
- [Dai97] F. Dai. *Lebendige Virtuelle Welten*. Springer, 1997.
- [DG94] F. Dai and M. Göbel. Virtual prototyping – an approach using VR-techniques. In *Proc. of the 14 ASME International Computers in Engineering Conference*, 1994.
- [HW97] M. Hoffhenke and I. Wachsmuth. Dynamische Konzeptualisierung mit imaginalen Prototypen. SFB 360 Report 97/9, Universität Bielefeld, 1997.
- [Jun97] B. Jung. *Wissensverarbeitung für Montageaufgaben in virtuellen und realen Umgebungen*, volume 157 of *Dissertationen zur Künstlichen Intelligenz*. infix, Sankt Augustin, Germany, 1997.
- [JW98] B. Jung and I. Wachsmuth. Integration of geometric and conceptual reasoning for interacting with virtual environments. In *Proc. 98'AAAI Spring Symposium on Multimodal Reasoning*, 1998.
- [MN78] D. Marr and H. K. Nishihara. Representation and recognition of the spatial organization of three-dimensional shapes. *Proceedings of the Royal Society of London B 200*, pages 269–294, 1978.
- [NSSK90] H. Niemann, G. Sagerer, S. Schröder, and F. Kummert. ERNEST: A semantic network for pattern understanding. *IEEE Transactions on Pattern Analysis*, 12(9):883–903, 1990.
- [PL94] L. Padgham and P. Lambrix. A framework for part-of hierarchies in terminological logics. In *Principles of Knowledge Representation and Reasoning*, pages 485–496. Morgan Kaufmann, San Francisco, CA, 1994.
- [RW96] G. Rickheit and I. Wachsmuth. Collaborative Research Centre “Situational Artificial Communicators” at the University of Bielefeld. *Artificial Intelligence Review*, 10(3-4):165–170, 1996.
- [Sag90] G. Sagerer. *Automatisches Verstehen gesprochener Sprache*. Bibliographisches Institut, Mannheim, 1990.
- [Sow88] J. Sowa. Using a lexicon of canonical graphs in a semantic interpreter. In M.W. Evens, editor, *Relational Models of the Lexicon*, pages 112–137. Cambridge University Press, Cambridge, UK, 1988.

- [Wac98] I. Wachsmuth. Virtuelle Realität. *KI*, 1/1998, "Aktuelles Schlagwort":34, 1998.
- [WJ96] I. Wachsmuth and B. Jung. Dynamic conceptualization in a mechanical-object assembly environment. *Artificial Intelligence Review*, 10(3-4):345-368, 1996.
- [ZKJ+97] J. Zhang, A. Knoll, B. Jung, I. Wachsmuth, and G. Rickheit. Experiments of robotic assembly instructed by situated natural language. In *Video Proceedings of the 1997 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA'97)*, 1997.