

Dynamische Konzeptualisierung

Bernhard Jung Ipke Wachsmuth

Technische Fakultät
Universität Bielefeld

Einleitung und Übersicht

Im Basis-Szenario des SFB 360 werden aufgabenorientierte Diskurse betrachtet, in denen ein Kommunikationspartner die Rolle eines Instruktors einnimmt und ein anderer die Rolle eines Konstrukteurs. Als Beispielaufgabe dient die kooperative Montage eines einfachen Flugzeugmodells aus Teilen eines Holzbaukastens. Langfristig soll die Rolle des Konstrukteurs von einem künstlichen Kommunikator (im Fernziel ein Montageroboter) übernommen werden. Damit der künstliche Kommunikator die jeweils beabsichtigten Konstruktionsschritte vollziehen kann, muß er zur Verarbeitung der erhaltenen Instruktionen neben sensomotorischen und kommunikativen Fähigkeiten über geeignetes Wissen und Inferenzmöglichkeiten verfügen.

Im SFB-Teilprojekt C1 – im Projektbereich "Wissen und Inferenz" – wird das dynamische Wissen betrachtet, das in einem prototypischen künstlichen Kommunikator aufgebaut wird, um dem jeweils erreichten Montagestand Rechnung zu tragen. Insbesondere geht es um die maschinelle Modellierung kognitiver Konzepte in einer dynamischen Wissensbasis und darauf bezogener Prozesse der "Konzeptdynamik", in welcher sich die dynamische Konzeptualisierung von Konstruktionsobjekten in der fortschreitenden Situation manifestiert.¹ Für diese laufend aktualisierten *situierten Repräsentationen* der Konstruktionsobjekte wurde die Bezeichnung "Aktualkonzepte" gewählt. In Aktualkonzepten soll das interne "Bild", das sich der künstliche Kommunikator von der aktuellen externen Situation macht, mitgeführt werden. Entsprechend der aktuellen Situation modellieren die Aktualkonzepte dynamisches Wissen über die an der Konstruktion beteiligten Objekte, in dem sich u.a. deren Rolle in den entstehenden Aggregaten ausdrücken läßt. Es ist beispielsweise möglich, daß ein zunächst als "Schraube" eingeführtes Objekt in einem Aggregat die Rolle einer "Achse" einnimmt; dieser Rollenwandel muß in einer dynamischen Konzeptualisierung des Objektes Ausdruck finden.

Der wesentliche Zweck der Aktualkonzepte und Kernziel des CODY-Projekts ist die Bereitstellung eines Kommunikationshilfsmittels, welches das Konstruktionssystem "verständlich" macht gegenüber Eingaben des menschlichen Instruktors, die sich teils auf die Perzeption der aktuellen Szene, teils auf das wissensgesteuerte Verständnis der Bauteilgruppen in der entstehenden Konstruktion beziehen können. Aktualkonzepte müssen folglich Informationen akkumulieren, die nicht nur dem *Erscheinungsbild* der involvierten Objekte, sondern auch Aspekten der *Funktion* von Objekten in entstandenen Aggregaten Rechnung tragen. Einerseits ist zu erwarten, daß in dem Maße, wie im Verlauf einer Montage die Funktionsaspekte deutlich werden, entsprechende

¹Im weiteren wird das Projekt mit dem Kürzel CODY für "Concept Dynamics" bezeichnet.

funktionsbezogene Benennungen in den Anweisungen des Instruktors auftauchen werden. Andererseits muß es zu jedem Zeitpunkt möglich sein, daß sich der Instrukteur nach wie vor auf Erscheinungsbildattribute der beteiligten Bauteile beziehen kann, um eine Konstruktionshandlung zu kommunizieren.

In diesem Report wird die Aufgabenstellung des CODY-Projekts und der verfolgte Lösungsansatz vorgestellt. In Teil 1 wird das SFB-Basis-Szenario des aufgabenorientierten Diskurses anhand des Kommunikationsmodells der KI-Forschung sowie die Problematik dynamischer Konzeptualisierung im Kontext der aktuellen Forschung erläutert. In Teil 2 wird die grundsätzliche Herangehensweise und in Teil 3 das entstehende CODY-System beschrieben.

1 Aufgabenstellung

1.1 Basis-Szenario: Aufgabenorientierter Diskurs

Im Basis-Szenario des SFB kooperieren zwei Kommunikatoren (ein "Instrukteur" und ein "Konstrukteur") in der Durchführung einer Montageaufgabe. Die gemeinsam zu lösende Aufgabe ist die Konstruktion eines einfachen Flugzeugmodells aus einem gegebenen Vorrat an Bauteilen (eines Baufix-Holzbaukastens). Die beiden Kommunikatoren nehmen Bezug auf eine gemeinsame Weltsituation, die beiden sensorisch zugänglich ist. Die Kommunikatoren haben unterschiedliche Kompetenz und nehmen im Konstruktionsvorgang verschiedene Rollen ein. Ein Mensch übernimmt die Rolle des Instruktors, ein technisches System die Rolle des Konstrukteurs. Dem Instrukteur steht ein Bauplan als Bildvorlage zur Verfügung, so daß nur er die notwendigen Montageschritte kennt. Der Konstrukteur verfügt über einen Vorrat an Bauteilen und ist in der Lage, die Bauteile zu Aggregaten zu fügen.

Um die Montageaufgabe erfolgreich zu lösen, müssen Instrukteur und Konstrukteur miteinander kooperieren. Dabei kommuniziert der Instrukteur mit dem Konstrukteur anhand der Bildvorlage mit Hilfe verbaler Anweisungen, die möglicherweise unpräzise oder unvollständig sind. Teile der Anleitung sind für den Konstrukteur deshalb nur verständlich, wenn die visuell gegebenen Bauteile und der bereits erreichte Montagezustand die Anweisungen ergänzen. Maßgeblich für eine erfolgreiche Kooperation von Instrukteur und Konstrukteur ist daher, daß die in einem aufgabenorientierten Diskurs verbal kommunizierten Anweisungen des Instruktors vom Konstrukteur kognitiv verarbeitet und in angemessene Montageschritte umgesetzt werden können. Je kompetenter der Konstrukteur sich in der Kommunikation erweist, desto erfolgreicher können die Anweisungen des Instruktors interpretiert und ausgeführt werden.

Entsprechend dem Kommunikationsmodell der KI-Forschung (Abb. 1) muß dafür – neben *sprachlichem Wissen* zur syntaktischen und lexikalischen Verarbeitung der Instruktionen – bei beiden Kommunikationspartnern bestimmtes *Weltwissen* vorausgesetzt (Instrukteur) bzw. vorgesehen (Konstrukteur) werden. Im Montageszenario ist Vorwissen über die Baufixteile und die Baugruppen des Flugzeugmodells relevant. Zentral für die Ausgangspunkte und Ziele des Vorhabens ist das aktuelle *Wissen über die Situation*, das teils intern als Vorwissen aus dem bisherigen Diskurs der kooperierenden Kommunikationspartner, vor allem aber extern bezogen

wird, und zwar dadurch, daß sowohl Instrukteur als auch Konstrukteur "situier", d.h. in die externe Realität gekoppelt sind und das entstehende Aggregat zu jeder Zeit bei der Enkodierung bzw. Dekodierung von Kommunikationen betrachten und einbeziehen können.

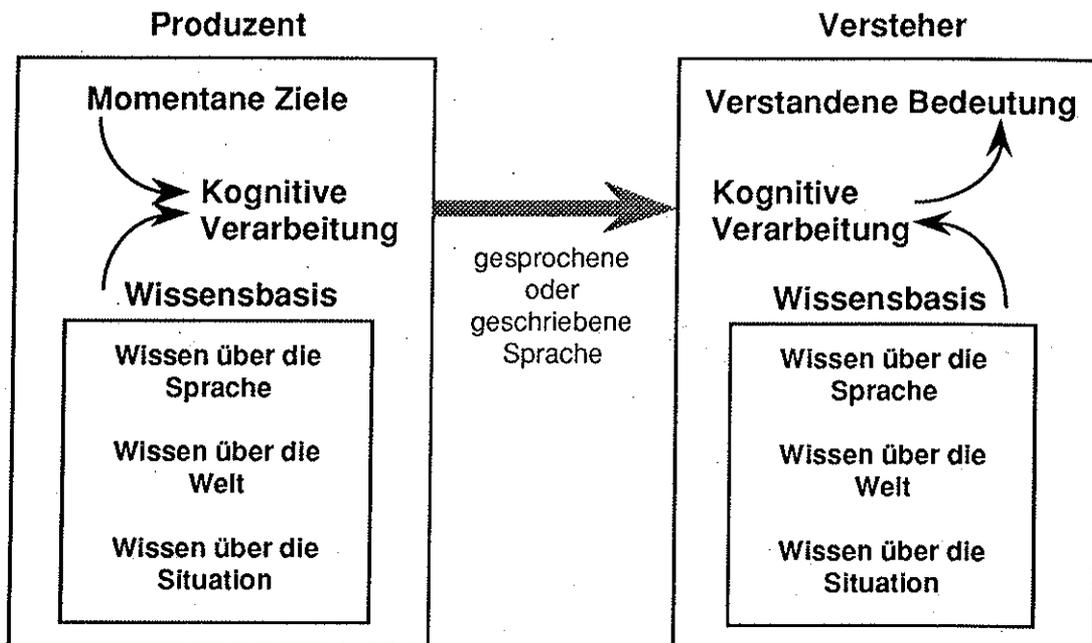


Abb. 1. Kommunikationsmodell der KI-Forschung (nach Winograd 1983, p.14); "Produzent" ist im gegebenen Kontext der menschliche Instrukteur und "Versteher" der künstliche Kommunikator. Dem Wissen über die aktuelle Situation kommt im CODY-Projekt zentrale Aufmerksamkeit zu.

1.2 Dynamische Konzeptualisierung im Montageszenario

Das CODY-Projekt befaßt sich damit, wie vor dem Hintergrund eines langfristig gespeicherten Systems von statischem Vorwissen begriffliche Objektrepräsentationen ("Aktualkonzepte") gemäß den Anforderungen der aktuellen Situation dynamisch erzeugt, modifiziert und gelöscht werden. In Aktualkonzepten soll das interne "Bild", das sich der künstliche Kommunikator in wechselnden Handlungs-, Sprach- und Aggregatkontexten von der aktuellen externen Situation macht, mitgeführt werden. Im Montageszenario werden zum Beispiel Bauteile zu komplexen Aggregaten zusammengesetzt, zu deren Repräsentation dynamisch neue Aktualkonzepte in das Arbeitsgedächtnis des künstlichen Kommunikators eingeführt werden müssen. Darüber hinaus nehmen die einzelnen Bauteile spezifische funktionale Rollen in bestimmten Aggregatzuständen ein. Wird zum Beispiel eine Schraube bei der Montage des Fahrwerks des Flugzeugmodells verwendet, dann fungiert diese als Achse. Dieser Rollenwandel muß in einer dynamischen Konzeptualisierung des Objektes Ausdruck finden.

Zu den Zielstellungen situierter künstlicher Kommunikatoren gehört mithin der Aufbau von dynamischen internen Repräsentationen der Konstruktionsobjekte, die mit der Entwicklung einer Situation gekoppelt sind und variablen Bedingungen in der Konzeptualisierung Rechnung tragen.

Unter Konzeptualisierung ist hier die Art und Weise zu verstehen, wie ein physisches Objekt (Bauteil oder Aggregat) in einer gegebenen Situation vom künstlichen Kommunikator "mental" repräsentiert wird. Ausgangshypothese ist, daß solche Aktualkonzepte komplexe, symbolische Strukturen sind, die aber nicht als statische Instantiierungen eines langfristig gespeicherten Systems von Gedächtniskonzepten aufgefaßt werden können, sondern im Verlauf einer Situation wechselnden Klassifizierungen und damit verbundenen Benennungen und Merkmalszuschreibungen unterliegen. M.a.W. wird ein *dynamischer Lebenszyklus* postuliert, der über das Einführen und Löschen von Konzeptinstanzen hinausgeht und erlaubt, daß ein Objekt zu verschiedenen Zeitpunkten in einer Repräsentation unterschiedlich begriffen werden kann, was sich in entsprechenden Zustandsänderungen seiner Beschreibung äußert.

Für die Konzeptualisierung der Bauteile und Aggregate im Montageszenario ist Vorwissen aus zwei begrifflichen Kontexten relevant, die im folgenden als *Baufixwelt* und *Flugzeugwelt* bezeichnet werden. Das Konzeptwissen der Baufixwelt beschreibt die multifunktionalen Bauteile mit ihren für die Referenz in Kommunikationsakten wichtigen Erscheinungsmerkmalen, wie Farbe und Form. Andererseits enthalten die Konzepte der Flugzeugwelt – im Hinblick auf das Konstruktionsziel – Wissen über den strukturierten Aufbau von Baugruppen des Flugzeugmodells, in denen die Baufixteile unter Funktionsaspekten betrachtet werden. Im Verlauf ihres Lebenszyklus unterliegen Aktualkonzepte wechselnden Klassifizierungen bezüglich den langfristig gespeicherten Konzepten der Baufixwelt und Flugzeugwelt.

Aktualkonzepte sind *situierte Objektrepräsentationen*, deren Zustandsänderungen durch die Interaktion des Kommunikators mit der sich ändernden Umgebung hervorgerufen werden. Daraus ergibt sich einerseits die Anforderung, daß die Aktualisierungen der Objektbeschreibungen derart ausgeführt werden müssen, daß die internen Repräsentationen nach jedem Montageschritt den externen Gegebenheiten entsprechen. Andererseits ergibt sich daraus aber auch die Möglichkeit, die Situation laufend als Informationsquelle heranzuziehen. Zum Beispiel liegt Information über die räumliche Lage und Orientierung der Bauteile in der externen Situation vor, so daß diese Merkmale nicht zusätzlich in den Aktualkonzepten gespeichert werden müssen.

1.3 Dynamische Konzeptualisierung im Kontext aktueller Forschung

Modellierungen kognitiver Konzepte werden bislang im Gebiet der semantischen Netze (ausgehend von Quillian, 1968) und in jüngerer Zeit vor allem im Zusammenhang mit den Termsubsumtionssprachen untersucht (Nebel, 1990). In den vornehmlich für die Objektklassifikation entwickelten KL-ONE-artigen Sprachen können Objektbeschreibungen durch zusätzlich aufgenommene Merkmale zwar bezüglich taxonomischer Konzepthierarchien spezialisiert werden, es können dabei aber keine neuen Merkmale zugeschrieben werden. Erweiterungsansätze zielen daher darauf, die Zuschreibung von Merkmalen durch die Integration von einfachen Regeln in die Konzeptdefinitionen zu ermöglichen (Brachman et al., 1991). Eine Erweiterung der Termsubsumtionssprachen für Teil-von-Beziehungen wird in (Padgham & Lambrix, 1994) vorgeschlagen.

Als Alternative zu diesen klassischen Konzeptmodellierungen sind Ansätze entwickelt worden, die Konzepte prozedural mit Hilfe des Konstrukts *mentaler Modelle* zu erklären versuchen (z.B. Lakoff, 1989). Mentale Modelle basieren zwar teilweise auf statischem Vorwissen, sind aber

selbst dynamische Repräsentationen, die für jede Situation neu konstruiert werden. Eine symbolische, Frame-artige Modellierung von mentalen Modellen wurde zum Beispiel im System PI realisiert (Holland et al., 1986). Objekte werden in PI durch Cluster von ständig wechselnden Merkmalen repräsentiert, so daß hier schon ein gewisses Maß an "Konzeptdynamik" vorhanden ist. Der Ansatz von PI reicht jedoch nicht weit genug, um auf das Konstruktionsszenario übertragen werden zu können, zum Beispiel gibt es in PI keine Möglichkeit, neue Objekte in die Wissensbasis einzuführen.

Auch im Bereich der neuronalen Netze gibt es verschiedentlich Ansätze, eine kontextabhängige, zeitlich variable Repräsentation der Attributausstattung von Konzepten zu modellieren (Waltz & Pollack, 1985; Shastri, 1988; Yao & Freeman, 1990; Mangold-Allwinn, 1993). Im Hinblick auf die im Montageszenario zentralen Aggregatbeziehungen sowie die zu betrachtenden Inferenzen, in denen zum Beispiel die Existenz von entstandenen Aggregaten erschlossen werden muß, ist der symbolverarbeitende Ansatz jedoch gegenwärtig der geeignetere Ausgangspunkt für eine computerverarbeitbare Modellierung von Aktualkonzepten (vgl. Rickheit & Wachsmuth, 1992).

Im Anschluß an Überlegungen bei (Brachman et al., 1991), (Doyle & Patil, 1991) und (Padgham & Lambrix, 1994) sollen deshalb im vorliegenden Projekt Erweiterungen bislang diskutierter symbolischer Modellierungen kognitiver Konzepte vorgenommen werden, die sich aus den Anforderungen der betrachteten Anwendungsdomäne "Manipulationen an mechanischen Objekten" ergeben. Hierbei sollen Konzepte intensional durch attribuierte Namen und Beschreibungen (descriptions) modelliert werden und eine Rekonzeptualisierung externer Objekte im Verlauf einer sich wandelnden Situation möglich sein.

2 Wissensmodell eines Künstlichen Kommunikators

Im Konstruktionsszenario wird – gesteuert durch verbale Anweisungen des Instruktors – aus einer gegebenen Menge von multifunktionalen Baufixteilen ein Flugzeug zusammengesetzt. Um dem Künstlichen Kommunikator ein inhaltliches Verständnis der Objektszene zu ermöglichen, wird Wissen über die Bauteile und entstandene Baugruppen durch Aktualkonzepte im Arbeitsspeicher repräsentiert. Mit Aktualkonzepten soll es möglich sein, situierte Information objektbezogen in einem zeitlich modifizierbaren Komplex zu bündeln. Es wird davon ausgegangen, daß eine situationsangepaßte interne Repräsentation zu einem Zeitpunkt mehrere Aktualkonzepte umfaßt, die miteinander durch Informationsaustausch interagieren. Schließlich wird davon ausgegangen, daß die Dynamik von Aktualkonzepten durch begriffliches Vorwissen im Langzeitgedächtnis, der Aufnahme perzeptueller Information sowie von anderen Aktualkonzepten im Arbeitsspeicher beeinflußt wird.

In Abbildung 2 ist ein grobes Modell eines kognitiven Systems des künstlichen Kommunikators veranschaulicht, das als Referenzmodell für das CODY-Projekt dient. Entsprechend dem Kommunikationsmodell der KI-Forschung (s.o.) berücksichtigt es Wissen über die Welt in sog. *Gedächtniskonzepten*, die sowohl das Wissen über die Baufixwelt wie Wissen über den strukturierten Aufbau von Baugruppen in der Flugzeugwelt enthalten. Wissen über die Situation

schlägt sich in den *Aktualkonzepten* nieder, die die Integration von aufgenommener Information über die externe Situation und dem vorhandenem Weltwissen leisten müssen.

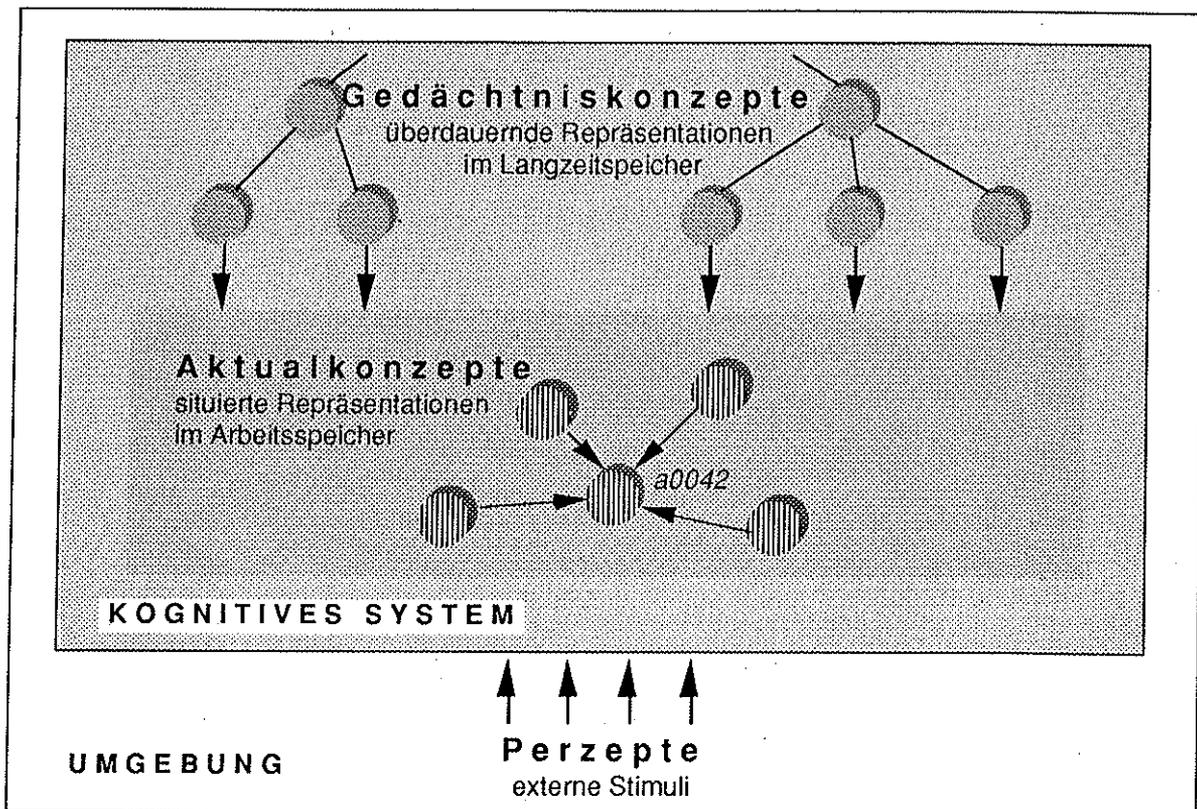


Abb. 2. Grobes Modell des kognitiven Systems eines künstlichen Kommunikators. Zur Repräsentation des aktuellen Situationswissens dienen die im CODY-Projekt thematisierten Aktualkonzepte. Ein Aktualkonzept a0042 wird beeinflusst (->) durch Perzepte, Gedächtniskonzepte der Baufix- und der Flugzeugwelt und weitere beteiligte Aktualkonzepte.

2.1 Perzepte

Information über die externe Situation findet beim Menschen zentral durch die Perception sensorischen Inputs Eingang in das kognitive Verarbeitungssystem. Dies soll auch für den künstlichen Kommunikator auf seiten des Konstrukteurs möglich sein, und zwar im Hinblick auf die möglichst erfolgreiche Vermittlung einer auf die Ausführung eines Montageschritts bezogenen Kommunikationshandlung. Unter *Perzepten* werden im folgenden alle Informationen verstanden, die den künstlichen Kommunikator "von außen" erreichen. Dazu gehören einerseits die "visuellen" Perzepte über den aktuellen Stand der Montage, aber andererseits auch "sprachliche" Perzepte in Form von Objektbenennungen in den Montageanweisungen des Instruktors.

Aus der Umgebung erhält der Kommunikator Informationen darüber, welche Bauteile zu einem bestimmten Zeitpunkt auf der Montagefläche vorhanden bzw. sichtbar sind, wie diese aussehen und wie sie räumlich angeordnet bzw. orientiert sind. Dabei ist in Betracht zu ziehen, daß das Blickfeld des künstlichen Kommunikators für die Dauer einer Konstruktionssitzung nicht fixiert

ist, sondern auf wechselnde Ausschnitte der Montagefläche fokussiert werden kann, wodurch andere Ausschnitte nicht mehr wahrgenommen werden. Darüber hinaus kann sich der künstliche Kommunikator auch in der Umgebung bewegen, wodurch sich für ihn auch die relative räumliche Anordnung der Bauteile ändert. Es wird im folgenden davon ausgegangen, daß die visuelle perzeptuelle Information ständig zur Verfügung steht, so daß die perzipierbaren Merkmale nicht zusätzlich im Arbeitsgedächtnis gespeichert werden müssen. Zum Beispiel können veränderliche metrische Merkmale (d.h. Position und Orientierung) der Bauteile und konstruierten Aggregate durch "Nachschauen" in der Situation zu jedem Zeitpunkt ermittelt werden.

Die vom Instrukteur gewählte Objektbenennung oder -beschreibung kann wichtige Informationen über dessen Konzeptualisierung der wahrgenommenen Objektszene enthalten. Sprachliche Objektbeschreibungen in Instruktionen dienen somit nicht nur der Objektidentifikation, sondern vermitteln auch die vom Wissen über das Konstruktionsziel gesteuerte Konzeptualisierung des benannten Objekts auf seiten des Instrukteurs. In einer bestimmten Situation könnte zum Beispiel dasselbe Objekt vom Instrukteur entweder als "Schraube" oder als "Achse" bezeichnet werden. Obwohl beide Benennungen den gleichen Referenten besitzen, kann im letzteren Fall auf die beabsichtigte Verwendung (funktionale Rolle) der Schraube im Flugzeug geschlossen werden.

2.2 Gedächtniskonzepte

Die Gedächtniskonzepte im Langzeitspeicher stellen das statische Weltwissen des Kommunikators dar. Das Vorwissen des künstlichen Kommunikators über die Baufixwelt und die Flugzeugwelt wird in getrennten Wissensbasen modelliert, wobei sowohl taxonomische als auch aggregative Beziehungen zwischen den Konzepten beschrieben werden.

Die Konzepte aus der Baufixwelt beschreiben die generischen Baufixteile anhand ihres Erscheinungsbildes und ihrer Verbindungsmöglichkeiten. Konkret wird in CODY von den Konzepten BAUFIXTEIL, PORT und AGGREGAT als grundlegende ontologische Kategorien ausgegangen. Das Konzept BAUFIXTEIL ist ein Oberbegriff für die verschiedenen multifunktionalen Baufixteile (Schraube, Scheibe, Leiste etc.). Das Konzept PORT beschreibt die Verbindungsstellen der Baufixteile. Es wird unterschieden zwischen *Geberports*, zum Beispiel dem Schraubschaft, und *Nehmerports*, zum Beispiel den Lochseiten der Leistenlöcher. Das Konzept AGGREGAT beschreibt eine unstrukturierte, "flache" Aggregation von verbundenen Baufixteilen. Alle aus Baufixteilen baubaren Aggregate, nicht nur die Baugruppen des Flugzeugmodells, können als Instanz dieses Konzepts beschrieben werden.

Die Konzepte der Flugzeugwelt beschreiben die Baugruppen des Flugzeugmodells sowie die funktionalen Rollen, die die Baufixteile in diesen Baugruppen einnehmen. Konkret werden die Konzepte FLUGZEUGTEIL und BAUGRUPPE als grundlegende ontologische Kategorien angenommen. Das Konzept FLUGZEUGTEIL umfaßt einzelne Funktionsteile des Flugzeugmodells (Achse, Felge, Tragfläche etc.). Das Konzept BAUGRUPPE ist ein Oberbegriff der Baugruppen des Flugzeugmodells (Räder, Fahrwerk, Leitwerk etc.). Im Gegensatz zu der unstrukturierten Aggregierungsmöglichkeit in der Baufixwelt, können die Baugruppen in der Flugzeugwelt aus weiteren Unterbaugruppen bestehen.

Die Gedächtniskonzepte definieren die primitiven Bauteile (als Baufixteil / als Flugzeugteil) und die Agglomerate von Bauteilen (als Aggregat / als Flugzeugbaugruppe) des Montageszenarios. Dabei enthalten die konzeptuellen Darstellungen der Baugruppen einerseits Beschreibungen aller Bestandteile, andererseits aber auch strukturelle Beschreibungen, die die Anordnung der Bestandteile in diesen Baugruppen festlegen. Ohne strukturelle Beschreibungen als zusätzliche Bedingungen könnte zum Beispiel die Existenz eines Rades auch aus der Existenz einer Felge und eines Reifen abgeleitet werden, die nicht miteinander verbunden sind. Neben der Klassifizierung entstandener Aggregate als Baugruppen ist eine weitere Funktion der Gedächtniskonzepte, die sprachliche Referenzierung der Bauteile und Baugruppen zu ermöglichen. Dazu werden den Konzeptbeschreibungen die zugehörigen Lexikalisierungen hinzugefügt.

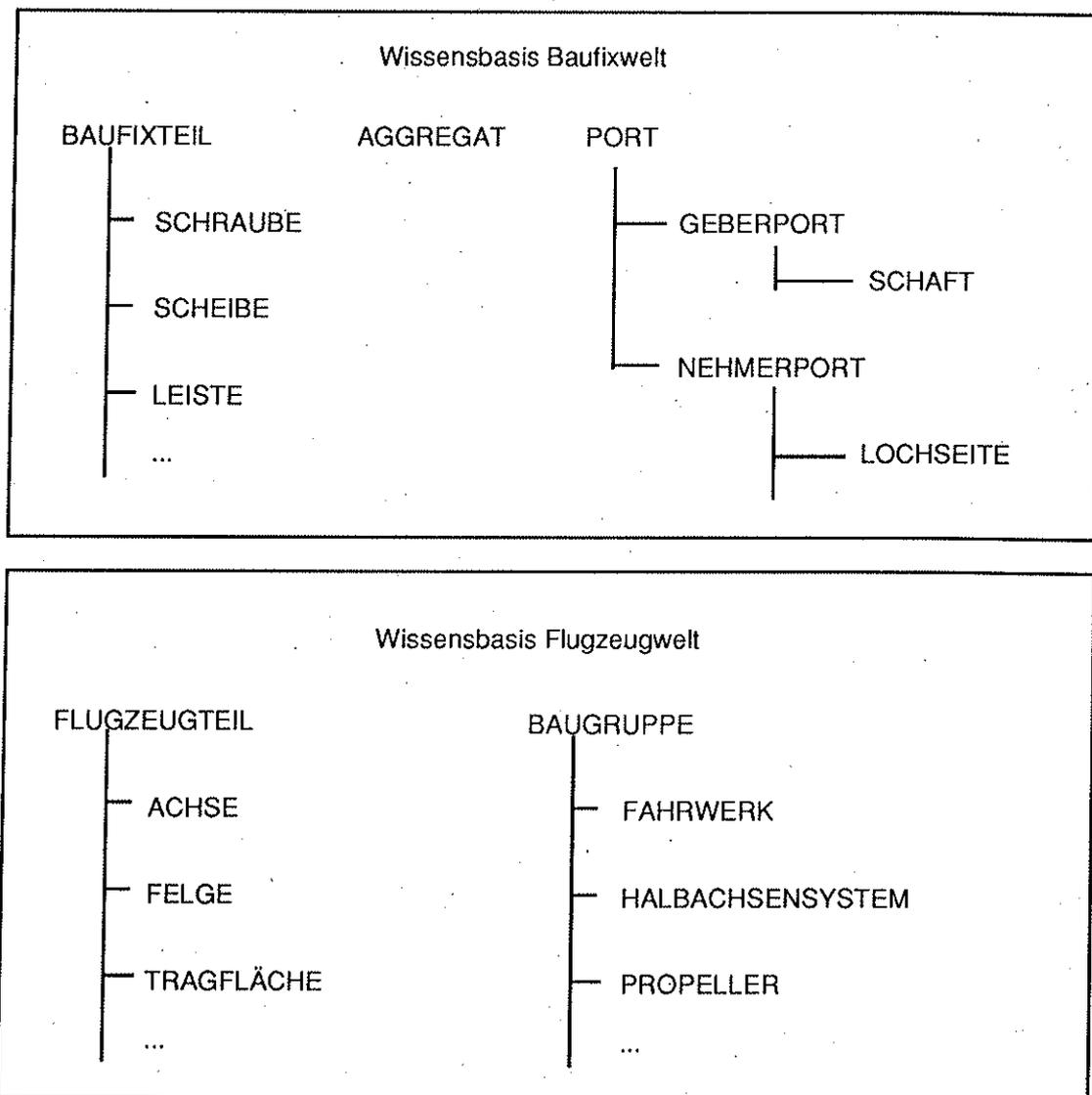


Abb. 3: Grundlegende Kategorien und Beispiele für Subkategorien in den Wissensbasen Baufixwelt und Flugzeugwelt.

2.3 Aktualkonzepte

Aktualkonzepte sind Repräsentationsmittel, mit denen die dynamische Konzeptualisierung der fortschreitenden Montagesituation geleistet wird. Die Aktualkonzepte werden im Arbeitsgedächtnis des künstlichen Kommunikators als Referenzobjekte für die externen Bauteile aufgebaut. Im Verlauf der Situation sind dies persistente strukturierte Objekte, deren interne Struktur in Abhängigkeit vom jeweiligen Aggregat- und Sprachkontext schrittweise aktualisiert wird. Diese Zustandsänderungen der Aktualkonzepte sind gesteuert durch die Interaktion mit der Umgebung, mit dem Langzeitgedächtnis und mit anderen Aktualkonzepten.

Das Arbeitsgedächtnis ist organisiert als semantisches Netz von Aktualkonzepten, die über Relationen wie "Teil-von" und "physikalische-Verbindung" zueinander in Beziehung gesetzt sind. Die interne Darstellung der Aktualkonzepte wird als Frame-Struktur modelliert und entsprechend ihrer aktuellen Klassifizierung bezüglich der Gedächtniskonzepte durch Merkmalszuschreibung definiert. Der Zustandsraum von Aktualkonzepten ist festgelegt durch die möglichen Konzeptualisierungen der Konstruktionselemente bezüglich der Bauteil- und der Flugzeugwelt. Im Verlauf der Montage ändert sich die Konzeptualisierung einerseits dadurch, daß Aktualkonzepte für entstandene Aggregate eingeführt bzw. Aktualkonzepte für nicht mehr existierende Aggregate aus dem Arbeitsgedächtnis entfernt werden. Andererseits ändern sich auch die internen Zustände der einzelnen Aktualkonzepte, indem Merkmalsausprägungen angepaßt werden oder die Aktualkonzepte bezüglich der Gedächtniskonzepte reklassifiziert werden, wobei auch neue Merkmalsätze zugeschrieben werden können.

Die dynamischen Aktualisierungen des Arbeitsgedächtnisses werden durch wechselnde Aggregat- und Sprachkontexte hervorgerufen, die über visuelle und sprachliche Perzepte dem Arbeitsgedächtnis vermittelt werden. Die Perzepte erreichen dabei zunächst nur bestimmte Aktualkonzepte, in denen sie Zustandsänderungen bewirken. Indem Zustandsänderungen von Aktualkonzepten entlang der Netzstruktur zu anderen, "benachbarten" Aktualkonzepten propagiert werden, kann sich perzipierte Information im ganzen Netz auswirken.

Die Konzeptualisierung von Bauteilen bezüglich der Flugzeugwelt ändert sich, sobald deren funktionale Rolle im Flugzeugmodell bekannt ist. Die funktionale Rolle von Bauteilen kann unter anderem ermittelt werden, wenn aufgrund der räumlichen Konfiguration der Bauteile, die durch visuelle Perzepte vermittelt wird, erkannt wird, daß ein Bauteil als Bestandteil einer Flugzeugbaugruppe verwendet wird. Zum Beispiel kann eine Schraube als Teil des Fahrwerks in der Flugzeugwelt als "Achse" konzeptualisiert werden. Andererseits haben auch die sprachlichen Perzepte Einfluß auf die Konzeptualisierung: wird eine Schraube vom Instrukteur als "Achse" bezeichnet, so ist dadurch ebenfalls die Funktion der Schraube im Flugzeug bekannt. Schließlich kann auch aus der Konzeptualisierung von benachbarten Bauteilen, die den Aktualkonzepten durch die Propagierung von Zustandsänderungen mitgeteilt wird, auf die funktionale Rolle von Bauteilen geschlossen werden. Wird zum Beispiel eine Scheibe, durch die eine Schraube gesteckt ist, als "Felge" reklassifiziert, kann durch Propagierung dieser neuen Klassifizierung die Schraube als "Achse" konzeptualisiert werden.

3 Eine Testumgebung für CODY: Der Virtuelle Konstrukteur

3.1 Engeres Szenario: Virtuelle Montagefläche und Virtueller Konstrukteur

Zentral für das Konstruktionsszenario des SFB ist die Betrachtung einer Dialogsituation zwischen zwei Partnern, in der Bezug auf eine sensorisch gemeinsam zugängliche Weltsituation genommen wird. Im Fernziel ist die Kopplung eines künstlichen Kommunikators mit Komponenten zur Perzeption (Kameras) und Aktion (Montagegreifarm) vorgesehen. Um bereits jetzt eine provisorische Einbindung in eine der Perzeption und Aktion zugängliche Weltumgebung zu schaffen, wird im CODY-Projekt mit einer computergrafischen Umgebung gearbeitet, mit der die externe Weltsituation als virtuelle Montagefläche dargestellt wird, in welcher Montage- und Demontageschritte virtuell als zeitdiskrete Simulation (d.h. es werden ausgewählte Werte zu unterscheidbaren Zeitpunkten berechnet) durchgeführt werden können. Die in CODY entwickelten Repräsentationsmittel sollen dabei im Hinblick auf ihre Tragfähigkeit für situierte Kommunikationen an einem einfachen Modell eines Künstlichen Kommunikators erprobt werden.

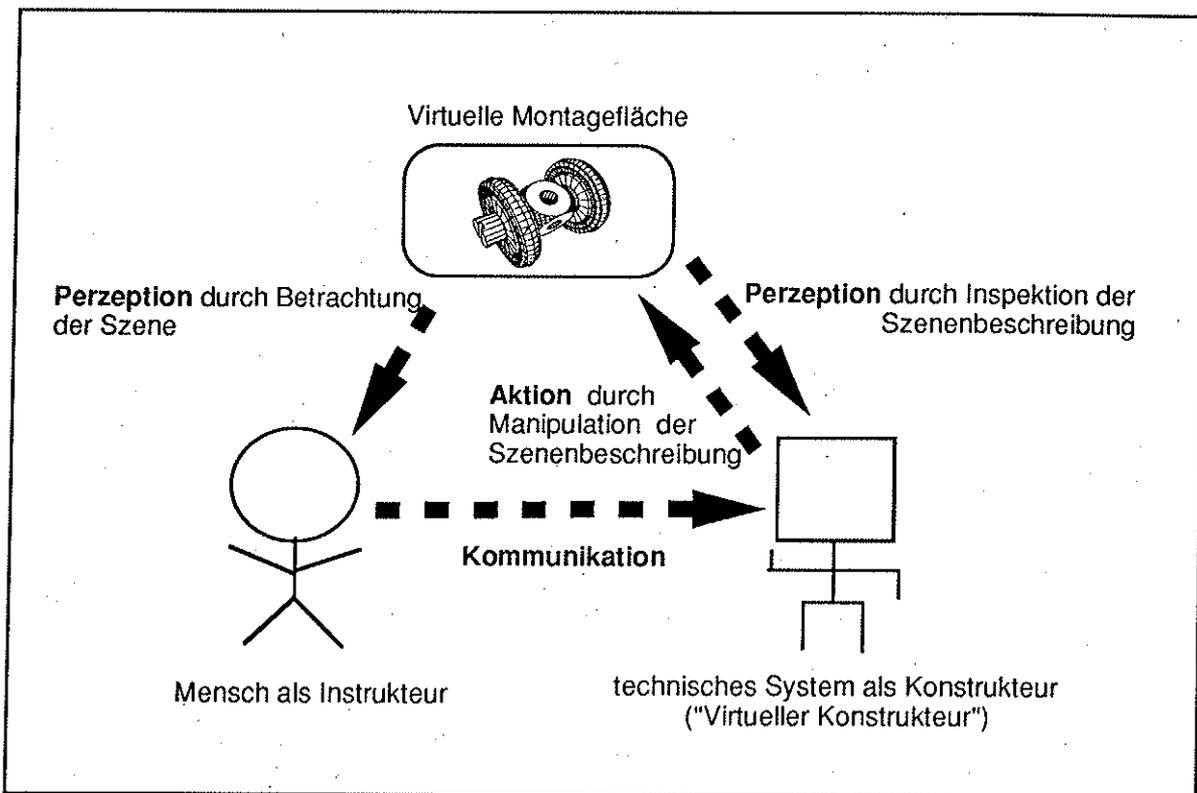


Abb. 4. Instrukteur und Virtueller Konstrukteur kooperieren in überlappender Wahrnehmung; die kommunizierten Anweisungen des Instrukteurs werden durch perzipiertes Wissen über die aktuelle Situation auf der Montagefläche ergänzt.

Die computergrafische Objektszene wird von einem Simulationssystem, dem *Virtuellen Konstrukteur* manipuliert. Er ist in eine virtuelle Umgebung gekoppelt und nach dem in Abschnitt 2 beschriebenen Wissensmodell aufgebaut. Wichtige Eigenschaften des Basis-Szenarios bleiben dabei erhalten. Die 3D-Darstellung der Bauteile kann von beiden Kommunikatoren

wahrgenommen werden, ist also eine sensorisch gemeinsam zugängliche "virtuelle" Weltsituation. Der menschliche Benutzer nimmt die Szene durch Betrachtung wahr, der virtuelle Konstrukteur durch Zugriff auf die geometrischen Modelle der Szenenbeschreibung. Der Instrukteur erteilt dem Konstrukteur Anweisungen in (geschriebener) natürlicher Sprache. Der Konstrukteur kann die Weltsituation (durch Manipulation der Szenenbeschreibung) verändern. Änderungen der Weltsituation sind für den Instrukteur (durch Betrachtung) und den Konstrukteur (durch Inspektion der Szenen-beschreibung) sofort sichtbar; vgl. Abb. 4.

Der Instrukteur hat auch die Möglichkeit, sein Blickfeld auf die virtuelle Montagefläche zu verändern. Durch Zooming kann er näher herangehen und bestimmte Regionen fokussieren. Er kann auch den Standort wechseln und die Szene auch aus unterschiedlichen Perspektiven betrachten. Dem Virtuellen Konstrukteur ist dabei immer das Blickfeld des Instrukteurs bekannt.

Auf der virtuellen Montagefläche können die Baufixteile zu beliebigen Aggregaten zusammengesetzt werden, auch solchen, die nicht im Flugzeugkontext vorkommen. Folgende Instruktionstypen stehen dem Benutzer zur Verfügung: (1) Fügen von Bauteilen, (2) Trennen von Bauteilen und (3) Drehen von Bauteilen in Aggregaten. Mit Hilfe des Virtuellen Konstrukteurs können verbal spezifizierte Montageschritte simuliert und dabei die Aktualkonzepte als Kommunikations-hilfsmittel erprobt werden.

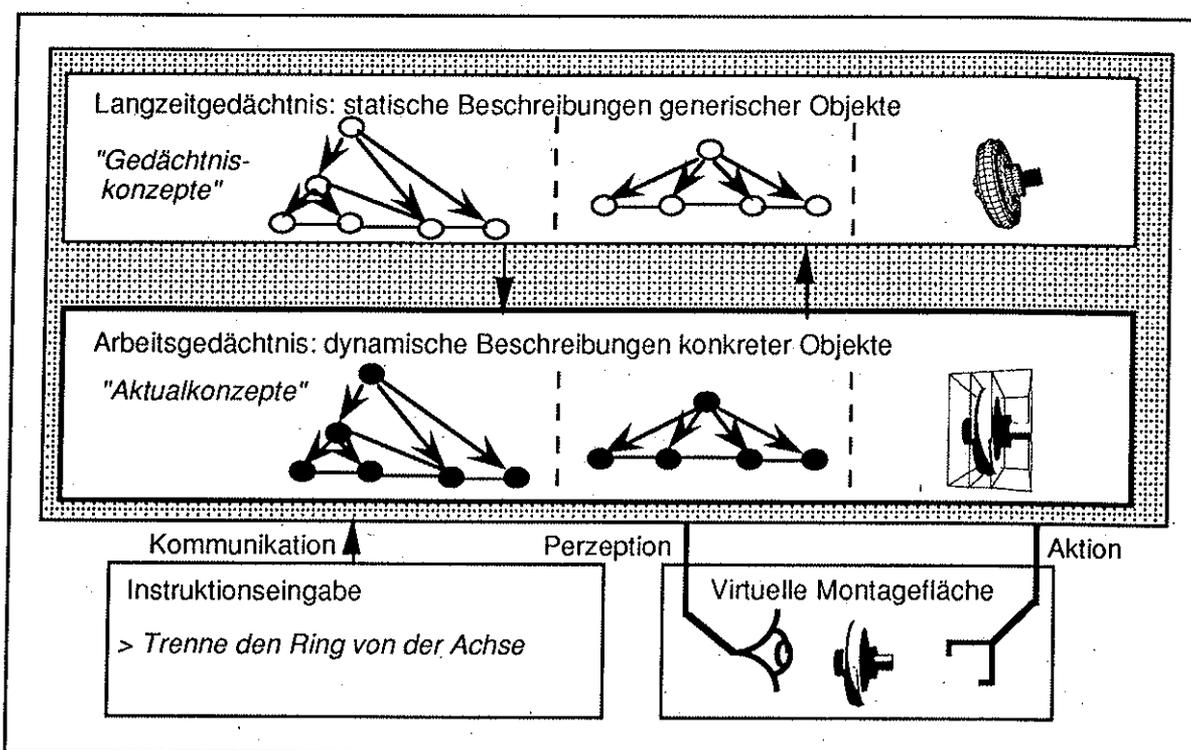


Abb. 5. Architektur des Virtuellen Konstrukteurs

3.2 Architektur des Virtuellen Konstrukteurs

Der Virtuelle Konstrukteur ist in einer computergrafischen Montagefläche "situiert" und kann verbal instruiert werden. Das Wissensmodell umfaßt ein Langzeitgedächtnis, das die (statischen) Gedächtniskonzepte enthält, sowie ein Arbeitsgedächtnis, das die (dynamischen) Aktualkonzepte enthält (Abb. 5).

Das Langzeitgedächtnis besteht aus zwei getrennten Modulen für die generischen Konzeptbeschreibungen aus der Baufixwelt einerseits und der Flugzeugwelt andererseits, die jeweils in einem frame-artigen Repräsentationsformalismus beschrieben werden. Darüber hinaus enthält das Langzeitgedächtnis in einem dritten Modul geometrische Repräsentationen, die in erster Linie die prototypische Orientierung der Bauteile definieren. Vorwissen über die Orientierung von Bauteilen wird in den strukturellen Beschreibungen von Flugzeugbaugruppen benötigt, die die räumliche Anordnung deren Bestandteile festlegen, zum Beispiel daß die Rotorblätter des Propellers orthogonal zueinander stehen müssen.

Das Arbeitsgedächtnis umfaßt ebenso wie das Langzeitgedächtnis getrennte Module für die Konzeptualisierung der Objektszene bezüglich der Baufixwelt und der Flugzeugwelt. Diese Module enthalten die Aktualkonzepte, die über semantische Relationen in einer Netzstruktur angeordnet sind. Darüber hinaus ist eine 3D-Rekonstruktion der externen Szene als direkte, geometrische Repräsentation vorgesehen, was unter anderem als Maßnahme für eine zukünftige Integration in einen SFB-Prototypen zu verstehen ist. Da bei den dynamischen Konzeptualisierungen auf situierte, nicht in den Aktualkonzepten gespeicherte, Informationen zurückgegriffen wird, ist ein direkter Zugriff auf die geometrischen Szenendaten erforderlich.

3.3 Beschreibungsmittel für Konzepte

Die deklarativen Anteile der Gedächtniskonzepte werden in einem Frame-artigen, auf ERNEST (Sagerer, 1990) aufbauenden Repräsentationsformalismus beschrieben, in dem Konzepte durch Attribute, Relationen und Constraints charakterisiert werden. Um das Verhalten der Konzeptinstanzen in der Interaktion mit der Umgebung und anderen Konzeptinstanzen festzulegen, werden die Konzeptbeschreibungen um angebundene Regeln erweitert.

Attribute beschreiben intrinsische Konzeptmerkmale, zum Beispiel Farbe und Form der Bauteile. Über ein Attribut `lexikon` werden die möglichen sprachlichen Benennungen von Instanzen dieses Konzepts festgelegt (z.B. "Block", "Würfel" für das Konzept SCHRAUBWÜRFEL). Die Gedächtniskonzepte sind durch vier Relationen in Beziehung gesetzt: Spezialisierung, Bestandteil, Konkretisierung und Verbindung. Die Spezialisierungsrelation drückt die Beziehung zwischen Oberbegriff und Unterbegriff aus. Merkmale werden von allgemeineren zu spezielleren Konzepten vererbt. Teil-Ganzes-Beziehungen zwischen Konzepten werden durch die Bestandteilsrelation definiert. Zur Beschreibung der möglichen funktionalen Rollen der Bauteile im Flugzeugmodell wird die Konkretisierungskante von ERNEST verwendet, die von Konzepten in der Flugzeugwelt zu Konzepten in der Baufixwelt gerichtet ist. Eine Verbindungsrelation beschreibt, an welchen Ports die Baufixteile (physikalisch) gefügt werden können. Diese Relation ist im Gegensatz zu den bisher vorgestellten nicht im Sprachumfang von ERNEST enthalten.

Constraints² dienen der strukturellen Beschreibung der Bestandteile von Baugruppen. Im Gegensatz zu ERNEST werden Constraints nicht prozedural, sondern, dem Formalismus von (Padgham & Lambrix, 1994) folgend, deklarativ ausgedrückt, indem ein fester Satz von vordefinierten Constraints verwendet wird. Es sind zwei Arten von Constraints vorgesehen: *Logische* Constraints verlangen die Existenz qualitativer Verbindungsrelationen zwischen den Bestandteilen; *geometrische* Constraints, z.B. *orthogonal*, legen die relative Orientierung von Bestandteilen zueinander fest (z.B. muß im Flugzeug die Tragfläche *orthogonal* zum Rumpf sein). Es können nicht nur Constraints zwischen direkten Bestandteilen beschrieben werden, sondern auch zwischen Bestandteilen von Bestandteilen usw.

Als Interaktionsform der Aktualkonzepte mit der Umgebung und untereinander wird einheitlich der Austausch von Nachrichten vorgesehen. Ausgangspunkte hierfür sind die *conceptual descriptors* (Skuce, 1991) und das *Actormodell* (z.B. Hewitt & deJong, 1983). Um das Verhalten der Aktualkonzepte bei der Verarbeitung von eintreffenden Nachrichten zu beschreiben, werden die Konzeptbeschreibungen um *Condition-Action*-Regeln erweitert. Im Bedingungsteil dieser Regeln kann auf den Nachrichtentyp, den internen Zustand des nachrichtenempfangenden Aktualkonzepts und die internen Zustände von in den Nachrichten enthaltenen Aktualkonzepten zugegriffen werden. In Anlehnung an das Actormodell sind nur bestimmte Aktionen als Konsequenzen dieser Regeln spezifizierbar: (1) die Aktualisierung des internen Zustands, (2) das Senden neuer Nachrichten an andere Aktualkonzepte, wobei die Einschränkung gemacht wird, daß Nachrichten nur an in der Netzstruktur benachbarte Aktualkonzepte verschickt werden können; und (3) das Erzeugen neuer Aktualkonzepte.

Konzept: <Konzeptname>
 (Spezialisierung-von: <Konzeptname> *)
 (Bestandteil <Rollenname> <min> <max>: <Konzeptname>⁺) *
 (Konkretisierung: <Konzeptname>) *
 (Verbindung <Rollenname> <min> <max>: <Konzeptname>⁺) *
 (Attribut <Attributname>: <Wertebereich>) *
 (Constraint: <Verbindung | parallel_x | ... | orthogonal_z> <Rollenname>⁺ <Rollenname>⁺) *
 (Regel: if <Zustandsbedingung | Nachrichtenbedingung>⁺ then <Aktion>⁺) *

Abb. 6. Format der Gedächtniskonzepte (abstrakte Syntax)

²In ERNEST: Strukturrelationen

3.4 Dynamische Konzeptualisierung im Virtuellen Konstrukteur

Die Konzeptualisierung der Bauteile durch den Virtuellen Konstrukteur beinhaltet die Erzeugung von neuen Aktualkonzepten für entstandene Baugruppen und die Reklassifizierung der Bauteile entsprechend ihren funktionalen Rollen im Flugzeugmodell. Die Zustandsänderungen der Aktualkonzepte werden durch wechselnde Aggregatkontexte hervorgerufen.

Zu Beginn einer Sitzung mit dem Virtuellen Konstrukteur werden dem Benutzer die vorhandenen Baufixteile in unaggregiertem Zustand präsentiert. Im Arbeitsgedächtnis des Virtuellen Konstrukteurs werden bei der Initialisierung für jedes Baufixteil zwei Aktualkonzepte angelegt, die der Konzeptualisierung in der Baufixwelt bzw. Flugzeugwelt entsprechen. Die Konzeptualisierung in der Baufixwelt enthält den Typ des Bauteils, z.B. SCHLITZSCHRAUBE, sowie Erscheinungsbildattribute, z.B. Form und Farbe. Darüber hinaus werden für die Ports der Bauteile weitere Aktualkonzepte angelegt, die über Bestandteilsrelationen mit den Bauteilen in Beziehung gesetzt sind. Die Konzeptualisierung eines Bauteils in der Baufixwelt ist über eine Konkretisierungsrelation mit einem Aktualkonzept verbunden, das dieses Bauteil in der Flugzeugwelt konzeptualisiert. Dieses Aktualkonzept ist zunächst allgemein als FLUGZEUGTEIL klassifiziert, solange die funktionale Rolle des Bauteils im Flugzeugmodell noch nicht bekannt ist.

Der Aggregatzustand der Bauteile auf der Montagefläche kann durch drei Handlungstypen verändert werden: (1) durch das Fügen von Bauteilen können komplexe Aggregate entstehen, (2) durch das Trennen von Bauteilen werden Aggregate aufgelöst, und (3) durch das Drehen von Bauteilen können sinnvolle Baugruppen entstehen oder aufgelöst werden (z.B. Stellung der Rotorblätter des Propellers). Zur Aktualisierung des Arbeitsgedächtnisses nach solchen Handlungen sind entsprechende Regeln modelliert, die für jeden Handlungstyp die unmittelbar betroffenen Aktualkonzepte - in (1) und (2) Repräsentationen von Ports, in (3) Repräsentationen von Baufixteilen - der neuen Situation anpassen und relevante Information in der Bestandteils-hierarchie propagieren.

Die Zustandsänderungen der Aktualkonzepte betreffen unter anderem die Anpassung von Attributwerten, zum Beispiel ändert sich im Verlauf der Montage bei Repräsentationen von Ports das Merkmal *belegt*. Darüber hinaus werden Verbindungsrelationen zwischen Konzepten aufgebaut bzw. gelöscht. Schließlich werden Aktualkonzepte, die als allgemeines FLUGZEUGTEIL klassifiziert sind, spezialisiert, wenn sie als Bestandteil von Flugzeugbaugruppen verwendet werden und ihre funktionale Rolle im Flugzeug somit bekannt ist. Zum Beispiel kann eine "Schraube", die in der Flugzeugwelt zunächst als FLUGZEUGTEIL konzeptualisiert ist, als Teil des Fahrwerks als "Achse" reklassifiziert werden. Zustandsänderungen von Aktualkonzepten werden an benachbarte Aktualkonzepte propagiert, indem diesen Nachrichten gesendet werden. Entstandene Aggregate werden durch *Compositional Inferencing* erkannt (Padgham & Lambrix, 1994) und durch dynamisch erzeugte Aktualkonzepte repräsentiert.

Abbildung 7 zeigt ein Beispiel für die dynamischen Konzeptualisierungen im Arbeitsgedächtnis. In der Baufixwelt werden gefügte Baufixteile zu unstrukturierten Aggregaten zusammengefaßt. In der Flugzeugwelt werden gefügte Bauteile als strukturierte Flugzeugbaugruppen konzeptualisiert.

Aktualkonzepte vom Typ FLUGZEUGTEIL werden als Bestandteil von sinnvollen Flugzeugbaugruppen entsprechend der angenommenen funktionalen Rolle spezialisiert. Zum Beispiel wird eine Schraube, die in einem Halbachsensystem verwendet wird, als ACHSE konzeptualisiert. Nach einer eventuellen Demontage des Halbachsensystems wird die Konzeptualisierung als ACHSE in der gegenwärtigen Implementierung wieder rückgängig gemacht.

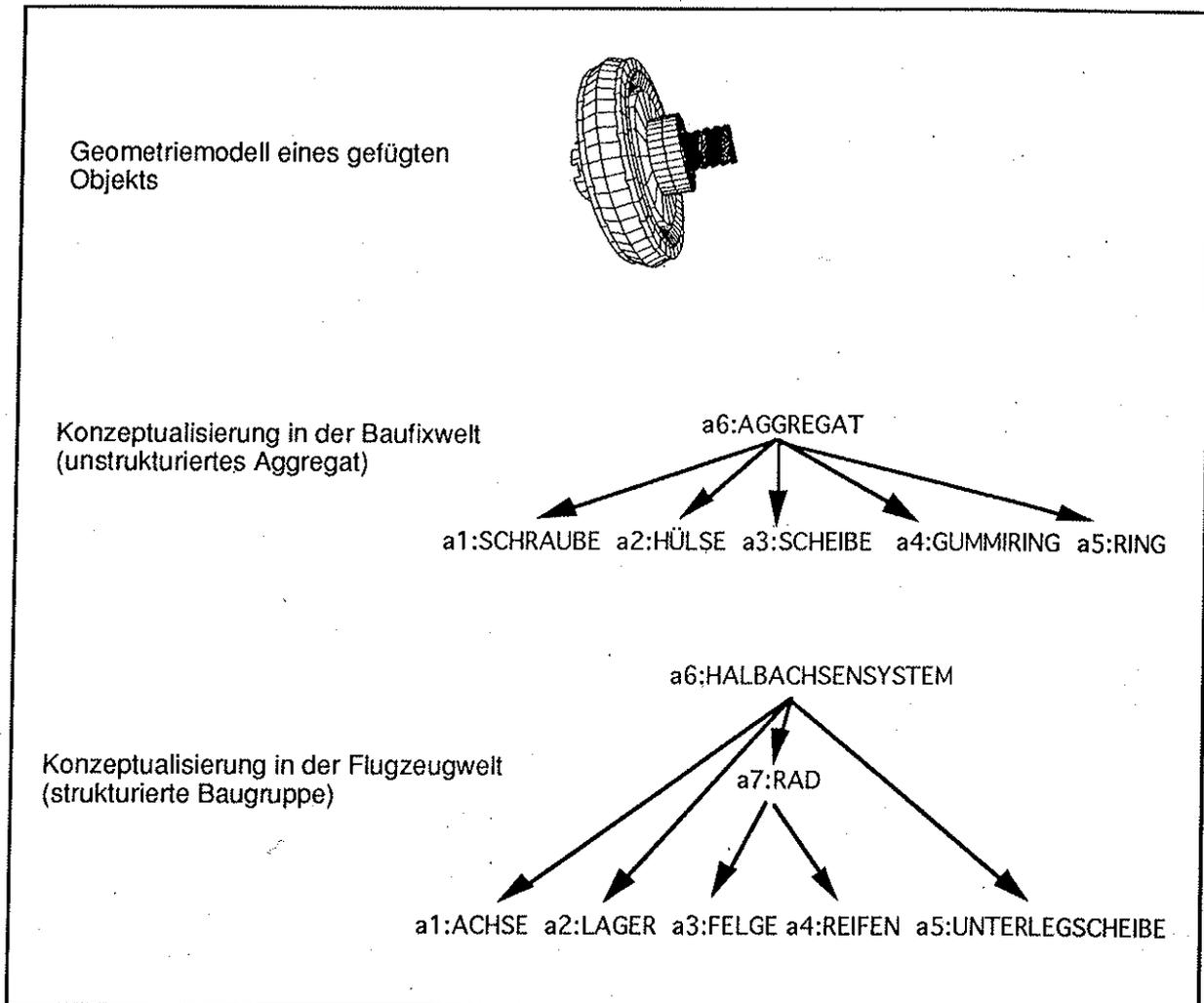


Abb. 7: Beispiel für Konzeptualisierung von Aggregaten. In der Baufixwelt werden gefügte Bauteile als unstrukturierte Aggregate konzeptualisiert, in der Flugzeugwelt als strukturierte Baugruppen des Flugzeugmodells. Über den Aktualkonzept-Identifizier a6 sind beide Konzeptualisierungen im Arbeitsgedächtnis zugreifbar.

4 Zusammenfassung und Ausblick

Im Projekt CODY werden maschinell verarbeitbare Konzeptbeschreibungen (Aktualkonzepte) entwickelt, die dem künstlichen Kommunikator zur internen Repräsentation von Montageobjekten dienen. Im Verlauf eines Montageprozesses werden diese Beschreibungen dynamisch angepaßt, um den aktuellen Zustand der Montage mitzuführen. Aktualkonzepte sind strukturierte dynamische Beschreibungen, die auf klassischen semantischen Netzwerken zur Darstellung

taxonomischer und aggregativer Merkmale aufbauen. Sie nehmen darüber hinaus Information aus der aktuellen Situation auf und gleichen ihre internen Zustände durch Informationsaustausch miteinander ab.

Auf dem gegenwärtigen Stand der Implementierung³ haben die Objektbenennungen durch den Instrukteur, die einen Teil des sprachlichen Kontexts darstellen, keinen Einfluß auf die Konzeptualisierung der Bauteile durch den künstlichen Kommunikator. Außerdem ist es noch nicht möglich, daß fast vollständig konstruierte Baugruppen ("90%-Flugzeug"), als solche erkannt werden, wodurch für entsprechende Benennungen des Instruktors beim gegenwärtigen Stand des Systems keine Referenten im Arbeitsgedächtnis gefunden werden können. Diese Thematik wird im Folgejahr aufgegriffen werden.

Literatur

- Brachman, R. J., McGuinness, D. L., Patel-Schneider, P. F., Resnick, L. A., Borgida, A. (1991). Living with CLASSIC: when and how to use a KL-ONE-like language. In J. Sowa (ed.): *Principles of semantic networks* (pp. 401-456). San Mateo: Morgan Kaufmann.
- Doyle, J. & Patil, R.S. (1991). Two theses of knowledge representation: language restrictions, taxonomic classification, and the utility of representation services. *Artificial Intelligence* 48, 261-279.
- Hewitt, C. & deJong, P. (1983). Analyzing the roles of descriptions and actions in open systems. In *Proc. AAAI-83* (pp. 162-167).
- Holland, J., K. Holyoak, R. Nisbett, and P. Thagard (1986). *Induction: Processes of inference, learning, and discovery*. Cambridge(MA): MIT Press/Bradford Books.
- Lakoff, G. (1989). Some empirical results about the nature of concepts. *Mind and Language*, 4 (pp. 103-129).
- Mangold-Allwinn, R. (1993). *Flexible Konzepte: Experimente, Modelle, Simulationen*. Frankfurt: Verlag Peter Lang.
- Minsky, M. (1975). A Framework for representing knowledge. In P.H. Winston (ed.): *The psychology of computer vision* (pp. 211-277). New York: McGraw-Hill.
- Nebel, B. (1990). *Reasoning and revision in hybrid representation systems*. Berlin: Springer.
- Padgham, L. & Lambrix, P. (1994). A framework for part-of hierarchies in terminological logics. In J. Doyle, E. Sandewall & P. Torasso (eds): *Principles of knowledge representation and reasoning. Proc. KR'94* (pp. 485-496). San Francisco: Morgan Kaufmann.
- Quillian, M. R. (1968). Semantic memory. In M. Minsky (ed.): *Semantic information processing*. Cambridge, MA: MIT Press.

³Beispiele der dem Projektstand Ende 1994 entsprechenden Montagemöglichkeiten und -abläufe sind in einem CODY-Demo-Video verfügbar.

- Rickheit, G. & Wachsmuth, I. (1992). Konzeptdynamik: Formale und empirische Rekonstruktion dynamischer Konzeptualisierung. Antrag Teilprojekt C1 im SFB "Situierete Künstliche Kommunikatoren", Universität Bielefeld.
- Sagerer, G. (1990). *Automatisches Verstehen gesprochener Sprache*. Mannheim: Bibliographisches Institut.
- Shastri, L. (1988). *Semantic networks: An evidential formalization and its connectionist realization*. London: Pitman/San Mateo: Morgan Kaufmann.
- Skuce, D. (1991). A frame-like knowledge representation. In J. Sowa (ed): *Principles of semantic networks* (pp. 543-563). San Mateo: Morgan Kaufmann.
- Sowa, J. (ed.) (1991). *Principles of semantic networks*. San Mateo: Morgan Kaufmann.
- Waltz, D. L. & Pollack, J.B. (1985). Massively parallel parsing: A strongly interactive model of natural language interpretation. *Cognitive Science* 9, 51-74.
- Winograd, T. (1983). *Language as a cognitive process*, Vol. 1: Syntax. Addison Wesley.
- Woods, W.A. (1991). Understanding subsumption and taxonomy: A framework for progress. In Sowa, J (ed.): *Principles of semantic networks* (pp. 45-94). San Mateo: Morgan Kaufmann.
- Yao, Y. & Freeman, W.J. (1990). Model of biological pattern recognition with spatially chaotic dynamics. *Neural Networks* 3(2), 153-170.