

Günther Schäfer

*Integrierte Informationsverarbeitung  
bei der Montageplanung*



Günther Schäfer

*Integrierte Informations-  
verarbeitung  
bei der Montageplanung*

Herausgegeben von  
Professor Dr.-Ing. Klaus Feldmann,  
Lehrstuhl für  
Fertigungsautomatisierung und Produktionssystematik

**FAPS**



Carl Hanser Verlag München Wien

Als Dissertation genehmigt von der Technischen Fakultät  
der Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg

Tag der Einreichung:	01. 02. 1991
Tag der Promotion:	22. 03. 1991
Vorsitzender:	Prof. Dr.-Ing. K. Meier-Wegener
Berichterstatter:	Prof. Dr.-Ing. K. Feldmann Prof. Dr.-Ing. H. Meerkamm Prof. Dr.-Ing. J. Gausemeier

Die Deutsche Bibliothek - CIP-Einheitsaufnahme

**Schäfer, Günther:**

Integrierte Informationsverarbeitung bei der Montageplanung /  
Günther Schäfer. Hrsg. von Klaus Feldmann. - München;  
Wien: Hanser, 1992  
(Fertigungstechnik - Erlangen; 27)  
Zugl.: Erlangen, Nürnberg, Univ., Diss., 1991  
ISBN 3-446-17117-7

Dieses Werk ist urheberrechtlich geschützt.

Alle Rechte, auch die der Übersetzung, des Nachdrucks  
und der Vervielfältigung des Buches oder Teilen daraus,  
vorbehalten.

Kein Teil des Werkes darf ohne schriftliche Genehmigung des  
Verlages in irgendeiner Form (Fotokopie, Mikrofilm oder ein  
anderes Verfahren), auch nicht für Zwecke der Unterrichts-  
gestaltung - mit Ausnahme der in den §§ 53, 54 URG ausdrücklich  
genannten Sonderfälle - reproduziert oder unter Verwendung  
elektronischer Systeme verarbeitet, vervielfältigt oder  
verbreitet werden.

© Carl Hanser Verlag München, Wien 1992  
Herstellung: Copy Center 2000, Erlangen-Eltersdorf  
Printed in Germany

## **Vorwort**

Die vorliegende Dissertation entstand während meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Lehrstuhl für Fertigungsautomatisierung und Produktionssystematik der Universität Erlangen-Nürnberg.

Herrn Prof.Dr.-Ing. K. Feldmann, dem Leiter dieses Lehrstuhls am Institut für Fertigungstechnik, danke ich für die wohlwollende Förderung bei der Durchführung dieser Arbeit.

Herrn Prof.Dr.-Ing. J. Gausemeier, Leiter des Lehrstuhls für rechnerintegrierte Produktion am Heinz Nixdorf Institut der Universität Paderborn sowie Herrn Prof.Dr.-Ing. H.Meerkamm, Leiter der selbstständigen Abteilung für Maschinenelemente und fertigungsgerechtes Konstruieren am Institut für Fertigungstechnik, danke ich für ihre Bereitschaft, das Korreferat zu übernehmen.

Ferner gilt mein Dank allen Kolleginnen und Kollegen sowie den Diplomanden und wissenschaftlichen Hilfskräften, die durch ihre Unterstützung zum Gelingen dieser Arbeit beigetragen haben.

Dies gilt insbesondere für Herrn Dipl.-Inf. Peter Steinwasser, der durch seinen unermüdlichen Einsatz das erstellte Konzept in die Tat umsetzte sowie Herrn cand.-Inf. Joachim Plack, der maßgeblichen Anteil an der optischen Gestaltung dieser Arbeit hat.

Günther Schäfer



# ***Integrierte Informationsverarbeitung bei der Montageplanung***

## **Inhaltsverzeichnis:**

<b>1.</b>	<b>Einleitung</b> .....	<b>1</b>
<b>1.1</b>	<b>Problemstellung</b> .....	<b>2</b>
<b>1.2</b>	<b>Zielsetzung und Vorgehensweise</b> .....	<b>3</b>
<b>2.</b>	<b>Montage und Montageplanung</b> .....	<b>5</b>
<b>2.1</b>	<b>Beschreibungsformen der Montage</b> .....	<b>5</b>
<b>2.2</b>	<b>Aufgaben und Ablauf der Montageplanung</b> .....	<b>9</b>
<b>3.</b>	<b>Stand der Technik rechnergestützter Hilfsmittel zur Montageplanung</b> .....	<b>24</b>
<b>3.1</b>	<b>Basiskomponenten</b> .....	<b>24</b>
<b>3.1.1</b>	<b>CAD-Systeme</b> .....	<b>24</b>
<b>3.1.2</b>	<b>Datenbanksysteme</b> .....	<b>28</b>
<b>3.1.3</b>	<b>Wissensbasierte Systeme</b> .....	<b>31</b>
<b>3.2</b>	<b>Spezifische Softwarewerkzeuge zur Unterstützung der Montageplanung</b> .....	<b>36</b>
<b>4.</b>	<b>Anforderungen an ein integriertes Informations- und Planungssystem</b> .....	<b>40</b>
<b>4.1</b>	<b>Grundlegende Anforderungen an das Systemkonzept</b> .....	<b>40</b>
<b>4.2</b>	<b>Formale und funktionale Anforderungen</b> .....	<b>43</b>
<b>4.3</b>	<b>Inhaltliche Anforderungen</b> .....	<b>47</b>

5.	<b>Integriertes Modellkonzept zur Informationsabbildung und -verarbeitung</b>	54
5.1	Grundlagen der Modellbildung	54
5.2	Generierung des Informationsmodells	59
5.2.1	Abbildung von Informationsstrukturen	59
5.2.2	Abbildung von Integritätsbedingungen	61
5.3	Generierung des Datenmodells	67
5.3.1	Formale Aspekte	67
5.3.2	Umsetzung der Informationsstrukturen auf ein Datenmodell	68
5.3.3	Integration geometriebeschreibender Informationen	71
5.4	Einsatz von Triggermechanismen	75
5.4.1	Konzept und Wirkungsweise	75
5.4.2	Global gültige Trigger	78
5.4.3	Flexible Trigger	81
5.5	Geschachtelte Integritätstransaktionen	86
5.6	Zugriffskontrolle	89
6.	<b>Abbildung planungsrelevanter Basisinformationen</b>	96
6.1	Produkt und Montageaufgabe	96
6.1.1	Abbildung von Informationen auf Einzelteilebene	96
6.1.2	Abbildung logischer Produktstrukturen	101
6.1.3	Abbildung der topologischen Makrostruktur	104
6.1.4	Abbildung der technologischen Makrostruktur	110
6.2	Ressourcen der Montage	116
6.2.1	Montagemittelinformationen	116
6.2.2	Raum- und Flächeninformationen	122

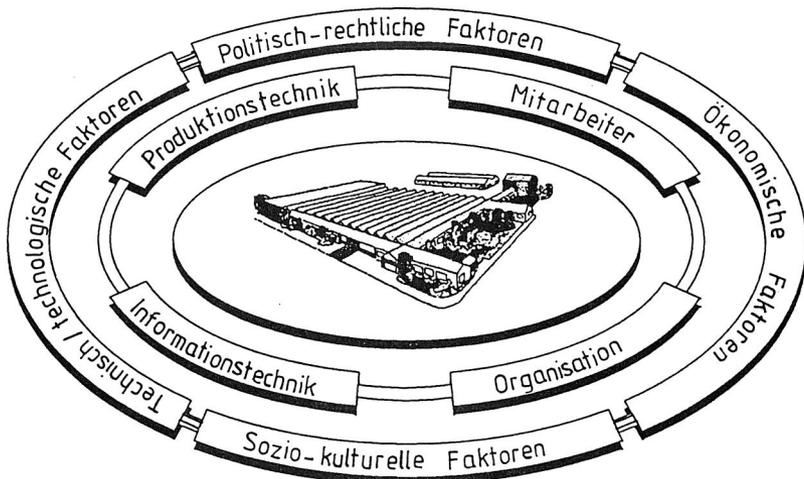
<b>7.</b>	<b>Durchgängige Verfahrenskette zur Montageplanung</b> .....	125
7.1	Grundsätzliche Überlegungen .....	125
7.2	Analyse der Montageaufgabe .....	128
7.2.1	Bestimmung der Montageoperationen .....	128
7.2.2	Ermittlung der Montagereihenfolgerestriktionen .....	132
7.2.3	Ermittlung potentieller Basisteile .....	136
7.2.4	Strukturierung der Montageoperationen .....	138
7.3	Montageprinzip- und strukturplanung .....	143
7.3.1	Bildung von Montageabschnitten .....	143
7.3.2	Erstellung der Montagesystemstruktur .....	145
7.4	Auswahl der Funktionsträger .....	149
7.4.1	Grundkomponenten .....	149
7.4.2	Konstruktive Anpassungen und Erweiterungen .....	156
7.5	Layoutplanung .....	158
7.5.1	Überführung der Systemstruktur in ein Strukturlayout .....	158
7.5.2	Zellenlayout .....	162
7.5.3	Detaillayout .....	163
7.6	Planung detaillierter Ablaufstrukturen .....	169
7.7	Bewertung und Lösungsbestimmung .....	176
7.8	Ergebnisdistribution .....	178
<b>8.</b>	<b>Nutzen des Modells für die operative Montageplanung</b> .....	179
<b>9.</b>	<b>Zusammenfassung</b> .....	184
<b>10.</b>	<b>Literatur</b> .....	186



## 1. Einleitung

Der dynamische Wandel äußerer und innerer Einflußfaktoren konfrontiert Produktionsunternehmen mit ständig neuen Bedingungskonstellationen, die Chance und Risiko zugleich bedeuten (Bild 1-1).

Der Trend zu kürzeren Produktlebenszyklen, eine höhere Variantenvielfalt und verschärfte Wettbewerbsbedingungen sind nur einige der oftgenannten Schlagworte zur Beschreibung der derzeitigen Entwicklungstendenzen [1]. Gleichzeitig bieten neue Fertigungs- und Informationstechnologien aber auch die Chance, den Risiken wirksam entgegenzutreten [2],[3]. Neue Technologien erfordern jedoch permanent strategische, operative und strukturelle Anpassungen der Produktion an die sich ändernden Rahmenbedingungen. Je effizienter diese Anpassung gelingt, desto eher sind Wettbewerbsvorteile zu erzielen [4].



**Bild 1-1:** Äußere und innere Einflußfaktoren der Produktion

## 1.1 Problemstellung

Bisherige Anpassungsmaßnahmen im Bereich der Produktion konzentrierten sich fast ausschließlich auf die Rationalisierung einzelner Teilaufgaben. Beachtliche Erfolge wurden durch die Einführung rechnergesteuerter Werkzeugmaschinen bei der Teilefertigung erzielt [5]. Daneben ist in den letzten Jahren das Umfeld der Montage zu einem Schwerpunkt automatisierungstechnischer Bemühungen geworden [6]. Insbesondere erhoffte man sich durch die Einführung von flexiblen Industrierobotern weitere Rationalisierungspotentiale zu erschließen [7]. Doch nicht nur die Fertigungstechnologie alleine, sondern auch die effiziente Verarbeitung von Informationen wurde als wichtiger Faktor zur Steigerung der Produktivität erkannt [8].

Während im Aufgabenumfeld der Teilefertigung die Durchgängigkeit des Informationsflusses von der Konstruktion über die Arbeitsvorbereitung zum Fertigungsprozeß schon häufig zu beobachten ist, gibt es im Bereich der Montage bislang keine standardisierten Verfahrensketten. Die Automatisierungsansätze in diesem Teilbereich erfolgen weitgehend abgegrenzt von anderen Funktionsbereichen und ohne Berücksichtigung von Wechselwirkungen zu vor- oder nachgelagerten Produktionsschritten. Im Gegensatz zu manueller Montage bedeuten mechanisierte Lösungen fast immer eine höhere Kapitalbindung bei vergleichsweise niedriger Flexibilität. Aufgrund der gegenüber der Teilefertigung ungleich höheren technischen Komplexität von automatisierten Montageprozessen ist das technische und wirtschaftliche Risiko einer Fehlentscheidung entsprechend groß.

Mit erhöhter Komplexität steigt auch der Aufwand für Planung und Inbetriebnahme automatisierter Montageanlagen, da solche Systeme immer aufgabenspezifisch konfiguriert werden müssen. Das Angebot an Standardsystemen bleibt auf einzelne Detaillösungen beschränkt.

Eine wirksame Maßnahme zur Begrenzung des Risikos ist der Einsatz geeigneter rechnergestützter Planungswerkzeuge. Ihre Anwendung ermöglicht bereits im Vorfeld der Automatisierungsmaßnahmen detaillierte Aussagen über die Funktionalität und die

zu erwartenden Kosten. Gleichzeitig läßt sich durch geeignete Rechnerunterstützung auch der Zeit- und Kostenaufwand für die Planung reduzieren [9].

Die Entwicklung und Anwendung heute bekannter Planungsverfahren konzentriert sich jedoch zumeist auf die Lösung spezieller Detailprobleme der Montageplanung. Dabei bleiben die Wechselwirkungen einzelner Planungsschritte vielfach verdeckt. Das Resultat ist eine mehrfache Speicherung sowie eine wiederholte Aufbereitung von Grunddaten, die fehlerträchtige Redundanzen schafft und zusätzliche Kosten verursacht. Die Überwindung dieser Inkompatibilitäten im Informationsfluß erfordert vielfach mehr Aufwand, als die Summe einzelner Hilfsmittel Nutzen versprechen.

## 1.2 Zielsetzung und Vorgehensweise

Die Lösung dieses Problems kann nur durch eine umfassende Betrachtung des gesamten Informationsbedarfs und der Informationsabläufe vor dem Hintergrund neuer Möglichkeiten der Informationsverarbeitung erfolgen. Das bedeutet, daß die aufgrund der Taylor'schen Arbeitsteilung bis heute gültige funktionale Trennung der Unternehmensbereiche und das daraus folgende ausgeprägte *Bereichsdenken* überwunden werden muß, um potentielle Vorteile neuer Informationstechnologien nutzbringend umzusetzen.

Die schwerpunktmäßige Herausforderung der Zukunft wird damit die informationstechnische Integration aller funktionalen Teilaspekte der Produktion zu einem ganzheitlich optimierten Informationsfluß sowie die Anpassung von Aufbau und Ablaufstrukturen an die neuen Informationstechnologien sein.

Dazu wird, speziell für die Anforderungen der Montage, ein Modell entwickelt, auf das sich alle planungsrelevanten Informationen in konsistenter und redundanzfreier Form abbilden lassen.

Ausgangspunkt der Entwicklung ist eine Analyse der Aufgaben bei der Planung flexibel automatisierter Montagesysteme. Ein Überblick über derzeit verfügbare und eingesetzte rechnergestützte Werkzeuge zeigt den Stand der Entwicklung und vorhandene Schwachstellen im Hinblick auf das erklärte Ziel. Aus diesen Überlegungen heraus erfolgt die Formulierung von Anforderungen an ein zu erstellendes Modellsystem nach formalen, funktionalen und inhaltlichen Kriterien.

Kernpunkt der Arbeit ist die Entwicklung eines integrierten Modellkonzeptes, das eine Möglichkeit aufzeigt, die o.g. Kritikpunkte zu überwinden. Dazu werden formale Aspekte und inhaltliche Grundlagen der Modellbildung erarbeitet, auf denen das vorgestellte Informationsmodell basiert. Darauf aufbauend wird anhand von Beispielen eine Verfahrenskette für die durchgängige Informationsverarbeitung bei der Montageplanung vorgestellt.

Eine abschließende Betrachtung zeigt Ansätze zur informationstechnischen Nutzung der generierten Informationen in der operativen Montageplanung.

## 2. Montage und Montageplanung

Für den systematischen Aufbau eines Informationsmodells erscheint es zunächst sinnvoll, einige begriffliche und inhaltliche Definitionen sowie den prinzipiellen Ablauf der Montageplanung im Hinblick auf automatisierte Montagesysteme voranzustellen.

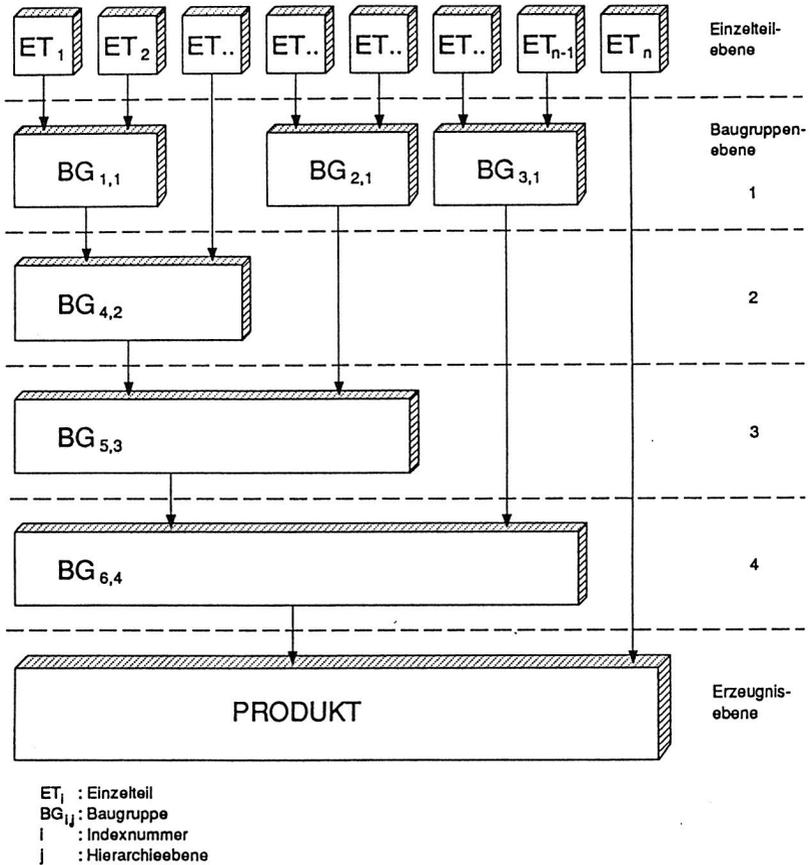
### 2.1 Beschreibungsformen der Montage

Die Begriffe *Fügen*, *Handhaben* und *Montieren* werden sowohl im Sprachgebrauch der Praxis als auch in Normen und Richtlinien uneinheitlich verwendet [10].

Eine begriffliche Differenzierung findet sich erstmals bei *Richter*, *Schilling* und *Weise*, die Montieren "...als Gesamtheit aller Tätigkeiten..." sehen, "...mit dem Ziel aus Bauelementen ein zusammengesetztes technisches Gebilde zu schaffen" [11]. In diesem Sinne wird die Montage als das Aufbauen von Systemen höherer Komplexität aus Systemen niederer Komplexität verstanden, bei der man gegebenenfalls in mehreren Stufen, beginnend mit Einzelteilen über Systeme wachsender Komplexität, zum Endprodukt gelangt [12],[13] (Bild 2-1). Eine solche Beschreibungsform spiegelt den strukturellen Aufbau des Produktes unter montagetechnischen Gesichtspunkten wider, ohne jedoch eine Aussage darüber zu treffen, wie man zu den einzelnen Zuständen gelangt.

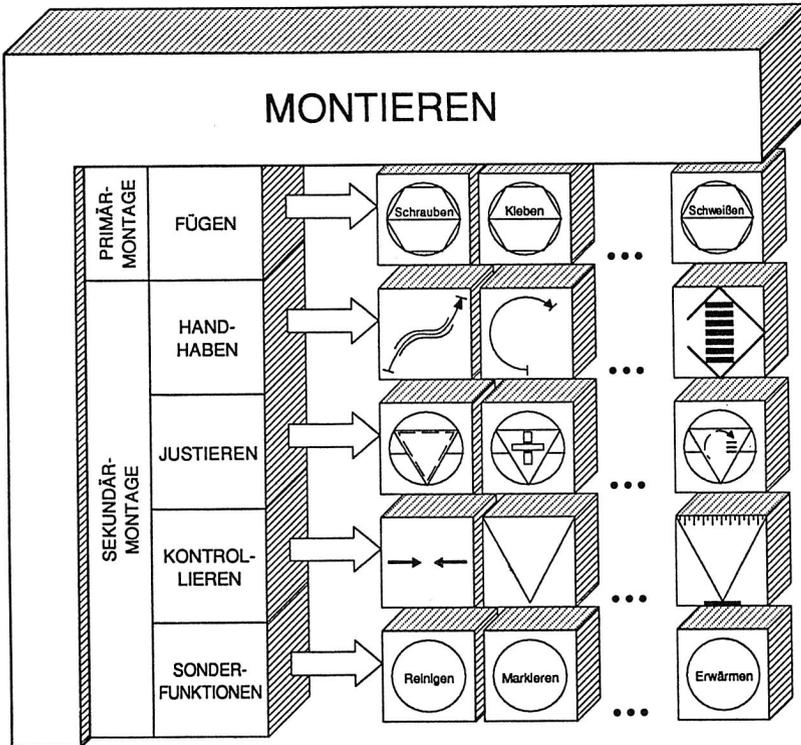
Demgegenüber wird durch eine *funktionale* Beschreibung (vgl. Bild 2-2) spezifiziert, durch welche Operationen man von einem Ausgangszustand zu einem Folgezustand gelangt. Die dabei durchzuführenden Tätigkeiten umfassen nach *Richter et. al.* die Operationskomplexe *Fügen*, *Handhaben*, *Kontrollieren* und *Justieren* sowie in Ergänzung von *Warnecke*, *Löhr* und *Kiener* [14] eventuell notwendige *Sonderoperationen*.

Im Normenwerk (vgl. VDI-Richtlinie 2860 [15]) wird *Montieren* als eine Variante des *Fertigens* neben *Formgeben*, *Formändern* und *Behandeln* gesehen, die die Teilfunktio-



**Bild 2-1:** Strukturelle, produktorientierte Beschreibung der Montage

nen *Fügen*, *Handhaben* und *Kontrollieren* umfasst. Der Begriff *Fügen* bleibt so ausschließlich der Beschreibung von Wirkvorgängen vorbehalten, die unmittelbar für das Zustandekommen einer dauerhaften Verbindung erforderlich sind [10].



**Bild 2-2:** Funktionale Beschreibung der Montage

Die einzelnen Wirkvorgänge beziehungsweise Fügeverfahren sind in *DIN 8580* [16] und *DIN 8593* [17] erfaßt.

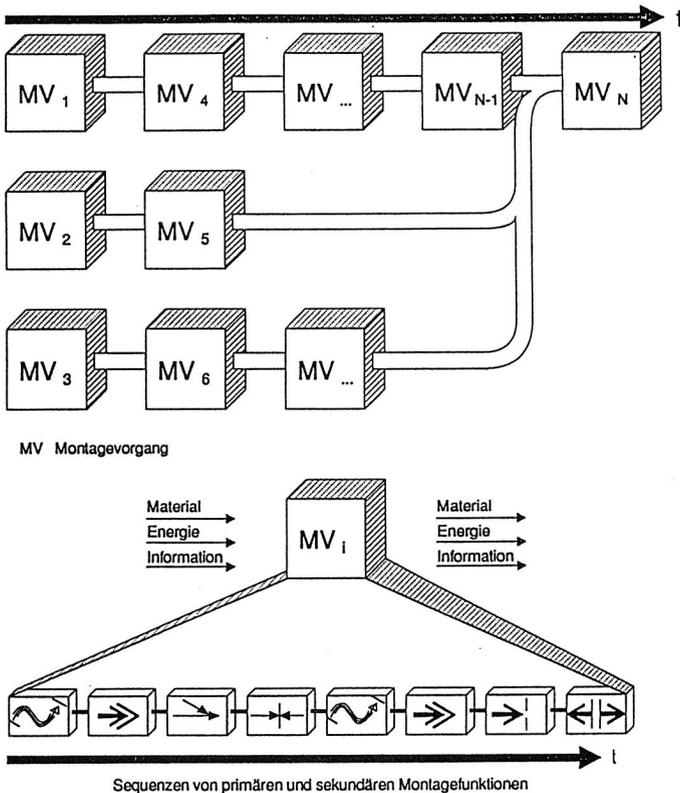
Während *Fügen* somit stets verfahrensorientiert und produktunabhängig ist, kann das *Montieren* aufgrund des weiter gefaßten Begriffsinhalts immer nur in Zusammenhang mit dem herzustellenden Gut gesehen werden und ist damit produktorientiert.

Eine Unterscheidung in *Primärmontage* und *Sekundärmontage* [18] trennt zwischen Vorgängen, die der unmittelbaren Erhöhung der Wertschöpfung eines Produktes während des Montageprozesses dienen, so zum Beispiel Aufwendungen von Energie, Information und Teilen zur Vervollständigung des Produktes, sowie sekundären Aufwendungen, die den Wertschöpfungsgrad nicht unmittelbar erhöhen, jedoch für den Montageprozeß unabdingbar sind [19].

Beispiele hierfür sind *Transportvorgänge, Spannen, Messen, Prüfen* und *Reinigen*. Bezogen auf eine konkrete Produktstruktur und in Verbindung mit den zum Aufbau notwendigen elementaren Funktionen läßt sich letztlich eine *ablauforientierte* Sicht der Montage definieren, in der die durch die Struktur teilweise implizit determinierten Aufgaben und Funktionen in einen kausalen und zeitlichen Zusammenhang gesetzt werden (Bild 2-3).

Die angeführten Beispiele machen deutlich, daß je nach Problemstellung unterschiedliche Blickwinkel und somit Beschreibungsformen der Montage existieren, die jeweils einen wichtigen Teilaspekt der Montage berücksichtigen.

Bei einem integrierten Informationsmodell sollen die zugrunde liegenden Informationen in einem einheitlichen Basismodell zusammengeführt werden, das je nach Informationsbedarf die unterschiedlichen Sichten zuläßt.



**Bild 2-3:** Ablauforientierte Beschreibung der Montage

## 2.2 Aufgaben und Ablauf der Montageplanung

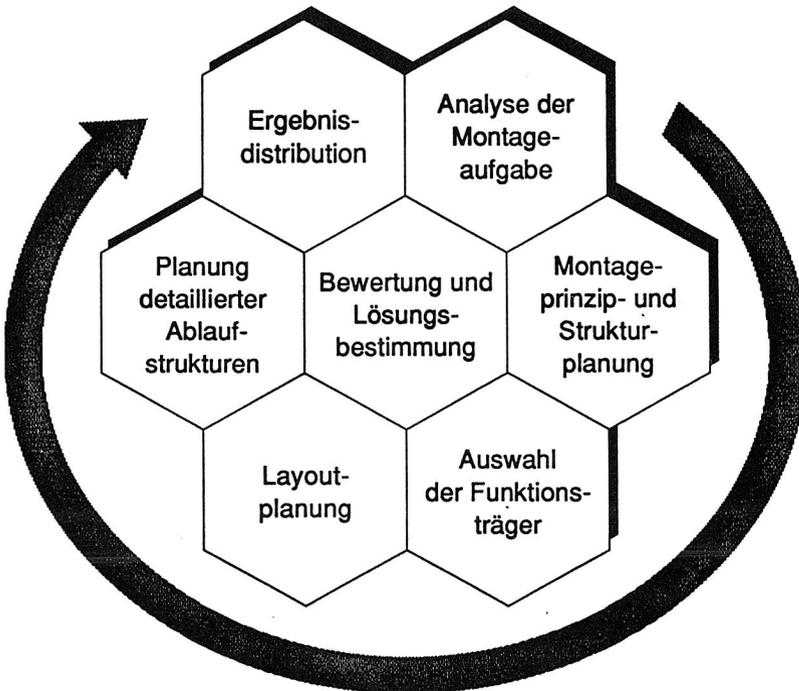
Die Montageplanung als Teilgebiet der Arbeitsplanung ist als mehrstufiger, komplexer Prozeß zu betrachten, dessen Input- und Outputgrößen eng mit den Entwicklungen des gesamten betrieblichen Umfeldes verzahnt sind.

Die globale Aufgabe der Montageplanung ist es, ausgehend von dem gestellten Montageproblem, ein sozio-technisches System zu entwickeln, mit dem es unter Beachtung der gegebenen Randbedingungen möglich ist, Einzelteile oder Baugruppen niedriger Ordnung zu Gebilden höherer Ordnung zusammensetzen. Um dieses übergeordnete Ziel zu erreichen, ist es erforderlich, die Planungsaufgabe inhaltlich in handhabbare Teilbereiche zu strukturieren.

In der Literatur sind dazu mehrere Beiträge zu finden, die sich mit der Systematisierung der Planung befassen (vgl. dazu u.a. [20],[21],[22]). Bezüglich der generellen Vorgehensweise sind diese Planungssystematiken eng mit den bestehenden Normen [23],[24] verknüpft, die sich primär auf den Konstruktionsprozeß beziehen. Nach dieser Sicht ist das Vorgehen durch die zu durchlaufenden Detaillierungsstufen von *grob* zu *fein* geprägt.

Im Hinblick auf eine rechnerunterstützte Informationsverarbeitung ist es erforderlich, den Planungsprozeß stärker nach inhaltlichen und aufgabenbezogenen Kriterien zu strukturieren, die einzelnen Elemente in eine kausale Beziehung zu setzen und die Beziehungszusammenhänge zu spezifizieren. Die Methoden der rechnergestützten Planung sind hauptsächlich aufgabenbezogen und nicht auf unterschiedliche Detaillierungsgrade ausgerichtet. Ergebnisse zwischen Grob- und Feinplanung unterscheiden sich primär durch die Güte der Eingabeparameter und nicht durch Qualität der Berechnung. Dies stellt einen wesentlichen Gegensatz zur konventionellen Planung dar, wo in Grobphasen relativ intuitiv und mit weniger Aufwand geplant wird. Eine weitergehende Berücksichtigung aller Einflußparameter würde an dieser Stelle ein unverhältnismäßiges Ansteigen des Planungsaufwandes im Verhältnis zum Nutzen erfordern. Mit dem Rechnereinsatz sinkt jedoch der Aufwand erheblich, so daß eine rechnergestützte Planungssystematik aufgabenorientiert gestaltet werden kann.

Den Ansatzpunkt einer solchen aufgabenorientierten Strukturierung der Montageplanung zeigt Bild 2-4. Nach dieser Sicht wird das Aufgabenspektrum insgesamt in sieben Bereiche zerlegt, unter denen sich wiederum mehrere Teilaufgaben subsumieren lassen.



**Bild 2-4:** Aufgaben und Ablauf der Montageplanung

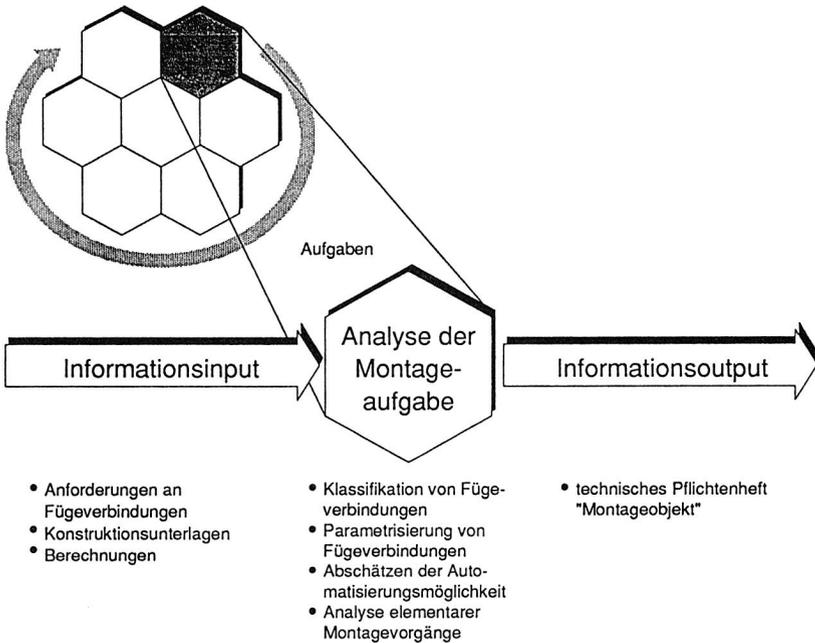
Der chronologische Ablauf der Planung entspricht dabei im wesentlichen der Anordnung der Elemente. Es ist jedoch zu beachten, daß eine streng sukzessive Vorgehensweise immer dann nicht eingehalten werden kann, wenn zwingende Detaillösungen maßgeblich für das Gesamtkonzept sind. Iterationsschritte werden notwendig, falls sich in nachfolgenden Planungsschritten die Unzulänglichkeit der zuvor erarbeiteten Eingangsgrößen herausstellt oder die gegenseitigen Abhängigkeiten der Planungsschritte dies bedingen. Die Gefahr der streng sukzessiven Vorgehensweise liegt im Zerschneiden von Systembeziehungen bei der Systembildung, die den einzelnen

Teilplanungen zugrunde liegen. Diese Systembeziehungen können durch die sequentielle Verknüpfung der Teilplanungen nur einseitig, nicht aber in ihren Interdependenzwirkungen erkannt werden. Aufgrund dieses hohen Abhängigkeitsgrades von Planungsobjekten und der hohen Komplexität kommt der Koordination von Teilplänen eine immer bedeutendere Stellung zu, so daß die Planungsaufgabe nur durch ein quasi-simultanes Vorgehen gelöst werden kann. Bei einem solchen Ansatz soll der Anwender möglichst flexibel zwischen den einzelnen Aufgaben und Betrachtungswinkeln wechseln können, um vor einer Entscheidung möglichst alle Auswirkungen seines Handelns zu erkennen. Im folgenden sollen zunächst die inhaltlichen Schwerpunkte der Montageplanung entsprechend Bild 2-4 übersichtlich aufgezeigt werden.

### ***Analyse der Montageaufgabe***

Ausgangspunkt der Montageplanung ist das zu montierende Produkt sowie die qualitativen, quantitativen und zeitabhängigen Produktionsvorgaben. Bereits während der Konstruktionsphase eines Produktes werden die primären Funktionen der Montage implizit weitgehend festgelegt. So entscheidet der Konstrukteur aufgrund der funktionalen Anforderungen an das Produkt über die Gestalt und die erforderliche Verbindungstechnik. Diese montagerelevanten Daten müssen im ersten Schritt der Montageplanung problemspezifisch analysiert und aufbereitet werden (Bild 2-5).

Die Schnittstelle zwischen Konstruktion und Arbeitsplanung ist eine der kritischsten Schnittstellen bezüglich des Informationsübergangs. Einerseits sind die benötigten montagerelevanten Informationen selten explizit vorhanden, sondern müssen erneut aus den Konstruktionsunterlagen und anderen Quellen aufbereitet werden, zum anderen erschwert der häufig zu beobachtende streng sequentielle Durchlauf dieser Produktionsphasen die Beachtung fertigungs- und montagetechnischer Aspekte. Nachträgliche Änderungen erfordern einen hohen zeitlichen und finanziellen Aufwand. Eine Simultanplanung von Konstruktions- und Produktionsprozessen ermöglicht dagegen eine bessere Abstimmung der teilweise divergenten Zielforderungen [25].



**Bild 2-5: Analyse der Montageaufgabe**

Ausgehend von der vorgegebenen Produktstruktur sind zunächst alle zum Aufbau des Produktes erforderlichen primären Montagefunktionen zu erfassen, hinsichtlich der anwendbaren Füge-technik zu klassifizieren und entsprechend den konstruktiven Anforderungen zu parametrisieren. Zu diesem Zeitpunkt können erstmals auch Aussagen über Automatisierungsmöglichkeiten verschiedener Fügeverfahren in Bezug zu konkreten Fügepartnern getroffen werden.

Der Erfassung elementarer Montageschritte folgt in der Regel die Erarbeitung möglicher Alternativen bezüglich der Montagereihenfolge. Sie sind durch den topologischen Produktaufbau und den sich daraus ergebenden Restriktionen weitgehend festgelegt, jedoch meist noch nicht explizit angegeben.

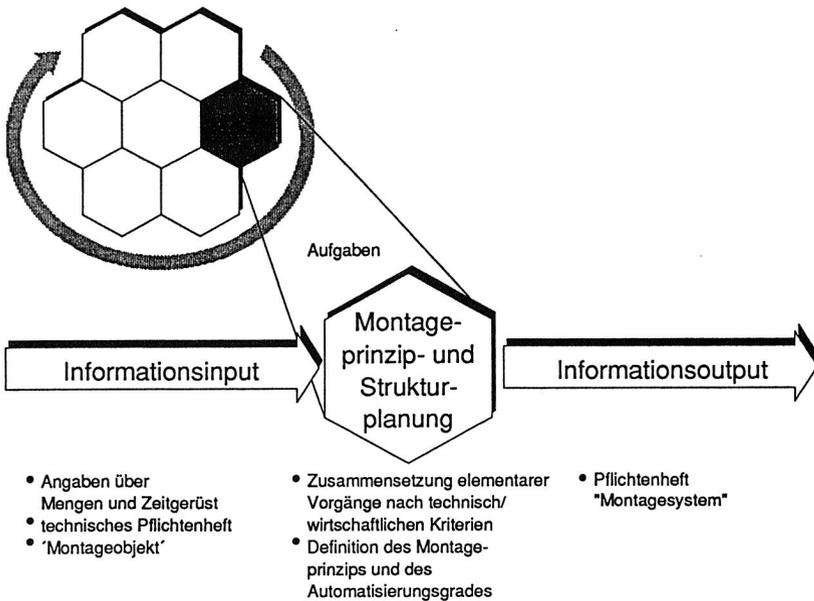
Das Ergebnis der Aufgabenanalyse ist idealerweise ein vollständiges Pflichtenheft, das aufgabenimmanent und damit lösungsneutral alle für die weiteren Planungsschritte notwendigen Informationen beinhaltet

### ***Montageprinzip- und strukturplanung***

Bei der im nächsten Teilschritt folgenden Montagestrukturplanung fließen neben den produktimmanenten Restriktionen die organisatorischen, technischen und wirtschaftlichen Randbedingungen der Montage mit in den Planungsprozeß ein. Die zuvor ermittelten, prinzipiell möglichen Montageabläufe müssen an dieser Stelle nach bestimmten Kriterien strukturiert werden. Maßgeblich für diese Struktur ist der Produktaufbau, das beabsichtigte Montageprinzip, der angestrebte Automatisierungsgrad sowie die geplante räumliche und zeitliche Verkettung der zu errichtenden Montagestationen (Bild 2-6).

Elementare Fügevorgänge werden unter Beachtung der Reihenfolgerestriktionen nach Zeit- oder Technologiekriterien zu einzelnen Montageabschnitten zusammengefaßt. Dabei können Abgrenzungen zu verschiedenen Montagebaugruppen ermittelt werden, die sich wiederum in verschiedene Ebenen gliedern lassen. Jeder Operationskomplex kann somit zunächst gedanklich einer organisatorischen Funktionseinheit zugewiesen werden; diese Funktionseinheiten selbst können ähnlich wie die Operationskomplexe hierarchisch geschachtelt sein.

Für die Gliederung einzelner Funktionseinheiten muß darüber hinaus der Teile- und Informationsbedarf zur Durchführung der Funktionsschritte berücksichtigt werden, da Arbeitsumfang und angestrebte Taktzeiten maßgeblich sind für die kapazitive Auslegung einzelner Montagestationen sowie für die Wahl von Fördersystemen. Je nach Komplexität und Lösungsvielfalt können auf dieser Ebene mehrere Alternativen bezüglich der Arbeitsinhalte, des Arbeitsumfanges und der Taktzeiten gegenübergestellt, beurteilt und bewertet werden.



**Bild 2-6: Montageprinzip- und strukturplanung**

Das Ziel dieser Planungsstufe ist es also, ohne Bezug zu konkreten Systemlösungen, die gestellte Montageaufgabe unter Berücksichtigung der Randbedingungen sinnvoll zu strukturieren und geeignete Prinziplösungen für die geplante Montage festzulegen. Auf diese Weise kann für jeden organisatorischen Teilabschnitt mit den zugeordneten Operationen eine vollständige Strukturbeschreibung mit allen Input- und Outputgrößen und dem Anforderungsprofil an auszuwählende Funktionsträger erstellt werden.

### **Auswahl der Funktionsträger**

Als Voraussetzung für eine wirtschaftliche Durchführung der Montage ist eine systematische Bedarfsermittlung der Funktionsträger notwendig [26]. Hierunter sollen

im folgenden die eigentlichen Montagemittel wie auch Förder-, Lager- und Prüfeinrichtungen der Montage verstanden werden.

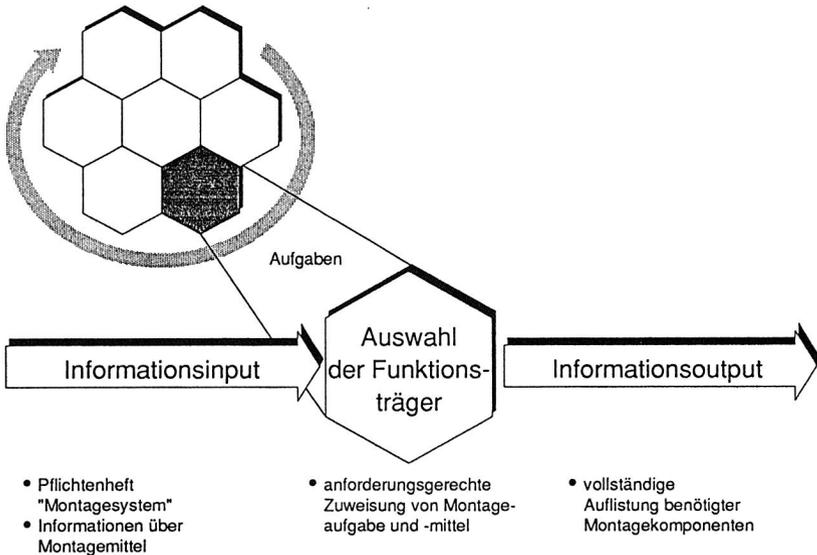
Die Ausstattung von Montagestationen mit Funktionsträgern hängt dabei unmittelbar von den den einzelnen Montagestationen zugedachten Funktionen ab.

Traditionelle Planungssystematiken stellen das Ermitteln des Montagemittelbedarfs und die Montagemittelauswahl meist an das Ende des Planungsprozesses [20]. Je höher aber der Automatisierungsgrad von Montageanlagen ist, desto mehr Einfluß haben die Montagemittel sowohl als Eingangsgrößen für die folgenden Planungsschritte als auch für die Funktionalität der gesamten Anlage. Daher erscheint es insbesondere für die Planung automatisierter Montageprozesse sinnvoll, modular zu den einzelnen Aufgaben, geeignete Funktionsträger zu ermitteln und schon in diesem frühen Stadium der Planung auf ihre prinzipielle Eignung zu untersuchen.

Die Auswahl standardisierter Montagemittel erfolgt durch einen gezielten Abgleich von Anforderungs- und Leistungsprofil. Notwendige Voraussetzung für ein optimale Zuordnung ist es daher, daß aus den vorangestellten Planungsphasen *Aufgabenanalyse* und *Prinzipplanung* das Anforderungsprofil zu den einzelnen Aufgaben hinreichend genau spezifiziert und dokumentiert ist.

Eingangsinformationen für diese Phase sind neben den produktspezifischen Daten auch alle relevanten Informationen über verfügbare Montagemittel. Zudem besteht an dieser Stelle eine informationstechnische Verknüpfung zum Bereich der Betriebsmittelkonstruktion, wo aufbauend auf der Montageaufgabe entsprechende Montagemittel konstruiert werden müssen. Idealerweise sollten Restriktivinformationen aus diesem Bereich bereits während der Konstruktionsphase berücksichtigt werden [27].

Das Ergebnis dieses Teilschrittes ist die organisatorische und funktionale Zuordnung von Funktionsträgern zu den geplanten Aufgabenkomplexen, die sich hierarchisch über mehrere Ebenen erstrecken kann (Bild 2-7).



**Bild 2-7:** Auswahl der Funktionsträger

### Layoutplanung

Das Ziel der Layoutplanung ist es, die logische Funktionsstruktur in Zusammenhang mit den ausgewählten Funktionsträgern unter Beachtung funktionaler und technisch/wirtschaftlicher Randbedingungen in einen definierten räumlichen Zusammenhang zu bringen.

In der Literatur wird vielfach zwischen verschiedenen Arten und Phasen der Layoutplanung im Rahmen der Fabrikplanung differenziert [28],[29]. Diese Sicht kann teilweise auch auf den speziellen Bereich der Montage bezogen werden.

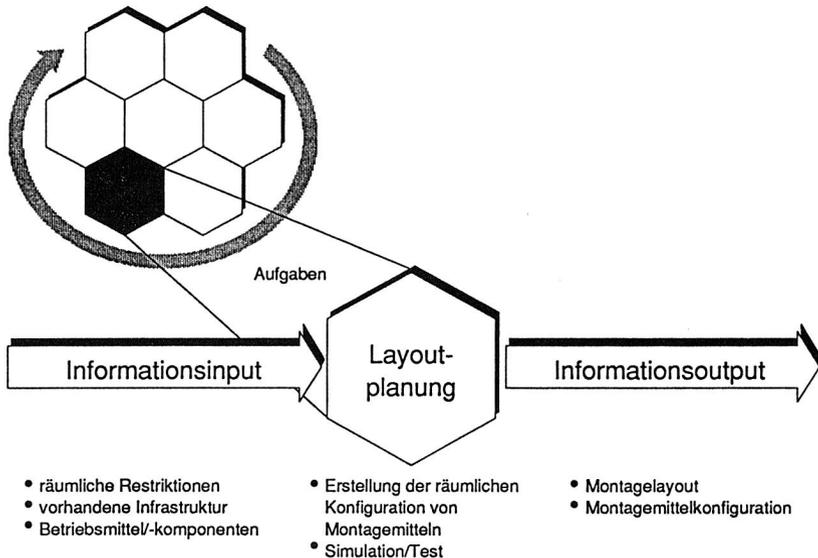
Grundsätzlich unterscheidet man zwischen *Neu-* und *Umbau-* beziehungsweise *Erweiterungsplanungen*, die durch Art und Umfang der planungsrelevanten Restriktionen und den verbleibenden Freiheitsgraden gekennzeichnet sind.

Bei *Neuplanungen* ist der Handlungsfreiraum entsprechend hoch, womit auch der Umfang der festzulegenden Determinanten wächst. *Umbau-* und *Erweiterungsplanungen* sind in der Regel durch eine Vielzahl schon bestehender restriktiver Randbedingungen gekennzeichnet, die den Lösungsraum der Planung a priori begrenzen. Gleichzeitig reduziert sich damit auch die Vielfalt festzulegender Größen.

Bezüglich des Detaillierungsgrades wird zwischen *Groblayout* und *Detaillayout* unterschieden, wobei die tatsächlichen Inhalte und Abgrenzungen vom konkreten Objektbezug abhängen. Im Bereich der automatisierten Montage wird eine immer detailliertere Layoutplanung gefordert, da der Mensch als flexibelster Akteur nicht mehr in den Prozeß eingreifen soll und somit kleinste räumliche Planungsfehler weitreichende Auswirkungen haben.

Als Eingangsgrößen der Layoutplanung dienen die abstrakte Systemstruktur sowie die zu den Operationskomplexen zugehörigen layoutbestimmenden Montagemittel. Unter zusätzlicher Berücksichtigung von *Lager-, Arbeits-* und *Transportflächen* kann zunächst der Flächenbedarf für die durchzuführenden Montageaufgaben berechnet werden. Ausgehend vom notwendigen Flächenbedarf einzelner Teileinheiten wird die geometrische Anordnung der Elemente zueinander festgelegt. Sofern bei der Anordnungsplanung zunächst Randbedingungen unberücksichtigt bleiben, spricht man von *Idealplanung* im Gegensatz zur *Realplanung*, wo bestehende Restriktionen als Einflußgrößen beachtet werden müssen [28].

Die Anordnung der einzelnen Elemente untereinander erfolgt in beiden Fällen nach bestimmten Zielkriterien. Oberste Präferenz hat vielfach die Optimierung des Anlagenlayouts unter Materialflußgesichtspunkten. Nach der Festlegung des groben Anordnungsplanes werden in der Regel erst einzelnen Flächen näher betrachtet, um zum Beispiel einzelne Montagemittel in den Teilflächen zu platzieren (Bild 2-8). Die



**Bild 2-8:** Layoutplanung

Planung automatisierter Montageanlagen erfordert jedoch oftmals auch die umgekehrte Vorgehensweise. Häufig bestimmt nämlich das Produkt und die geforderte Fügetechnik bereits eine spezielle Auswahl und Konfiguration von Montagemittelkomponenten, so daß das Anlagenlayout bis zu einer bestimmten Stufe in einem *bottom up*-Verfahren entwickelt werden muß. Die zu erfüllende Funktion mit den dazu erforderlichen Montagemitteln sind in diesem Falle bestimmend für die Konfiguration beziehungsweise das Layout. Insbesondere bei einem modularen Aufbau der Montage in Zellenstruktur kann damit die endgültige Anordnung einzelner Zellen untereinander erst zu einer späteren Planungsphase erfolgen

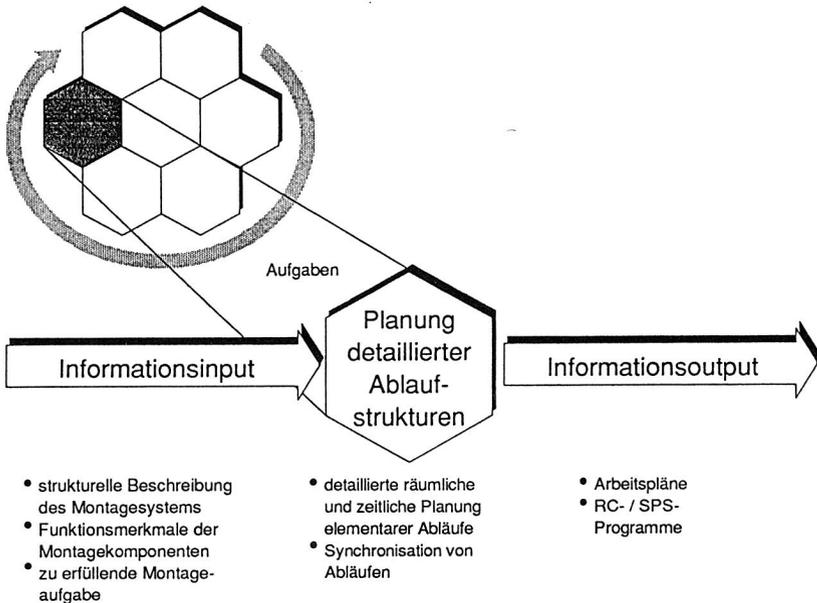
### ***Planung detaillierter Ablaufstrukturen***

Die Aufgabe dieses Planungsschrittes ist es, ausgehend vom festgelegten Montageprinzip, den realen Montageablauf räumlich und zeitlich festzulegen.

Konventionelle Planungssystematiken, die sich zumeist auf manuelle Montagesysteme beziehen (vgl. z.B. [30]), sehen diesen Schritt noch ohne Bezug zu den Montagemitteln oder der konkreten Montageumgebung und stellen ihn dementsprechend an den Anfang der Planung. Bei automatisierten Montagesystemen, bei denen sowohl primäre als auch sekundäre Montageoperationen maschinell ausgeführt werden, rückt die spezifische Subjekt-Objekt-Beziehung zwischen Produkt und Produktionsmittel stärker in den Vordergrund. Anstelle der Arbeitspläne für manuelle Montagevorgänge, deren Empfänger der einzelne Werker ist, treten maschinell zu verarbeitende Arbeitspläne. Dies hat zur Folge, daß sich auch die Planung der Abläufe ändert, da bestimmte Operationen sich nur im speziellen Zusammenhang zwischen Montagemittel und zu montierendem Produkt festlegen lassen.

Aufgrund der systembedingten, größeren Fehlerintoleranz beziehungsweise -kompensationsfähigkeit automatisierter Montageanlagen gegenüber manuellen Arbeitssystemen ist es erforderlich, die Ablaufplanung wesentlich detaillierter zu gestalten und explizit alle elementaren Funktionen, kausalen Abhängigkeiten und zeitliche Bezüge exakt zu definieren und zu synchronisieren.

Während bei der Bestimmung der Montagestruktur und des Montageprinzips der kausale Ablauf lösungsneutral ermittelt wird, muß an dieser Stelle darüber hinaus konkret der Bezug zu den ausgewählten Produktionsmitteln berücksichtigt und in den Planungsprozeß eingebunden werden (Bild 2-9).



**Bild 2-9:** Planung detaillierter Ablaufstrukturen

### **Bewertung von Alternativen und Bestimmung der Lösung**

Planungsprobleme sind in der Regel nicht nur auf eine einzige Art und Weise lösbar, sondern beinhalten eine gewisse Kontingenz. Zu allen genannten Teilbereichen der Montageplanung lassen sich meist mehrere zulässige und realisierbare Lösungen generieren. Je nach Problemstellung können dabei endlich viele Alternativen, so zum Beispiel bei der Erstellung von Montagereihenfolgealternativen, oder aber auch unendlich viele Lösungsmöglichkeiten, beispielsweise bei der Layouterstellung, gefunden werden.

Die Erzeugung von Alternativen ist dabei teilweise algorithmierbar, in hohem Maße jedoch auf das Fachwissen und die Kreativität des Anwenders angewiesen. Da verschiedene Planungsergebnisse aus einzelnen Teilschritten Eingangsgößen für nachfolgende Planungsschritte sind, vervielfacht sich der Lösungsraum möglicher Gesamtlösungen mit der Anzahl der Alternativen in den einzelnen Teilbereichen. Um den Planungsprozeß dennoch handhabbar zu gestalten, wird es erforderlich, das Spektrum möglicher Problemlösungen bereits auf der Ebene der genannten Teilfunktionen auf ein überschaubares Maß zu begrenzen. Dies bedeutet, daß nach jedem Teilplanungsschritt die Ergebnisse hinsichtlich ihrer Zielwirksamkeit bewertet werden und im günstigsten Fall nur noch eine Alternative in den anschließenden Phasen als Ausgangsbasis verwendet wird.

Die Gefahr bei der frühzeitigen Begrenzung des Lösungsraumes ist jedoch, daß jeweils nur suboptimale Ergebnisse entstehen, deren Kombination unter Berücksichtigung ihrer Interdependenzwirkungen nicht notwendigerweise auch zu einem globalen Optimum führen müssen. Eine umfassende Bewertung ist oft erst unter Kenntnis aller Fakten sowie deren gegenseitige Beeinflussung möglich.

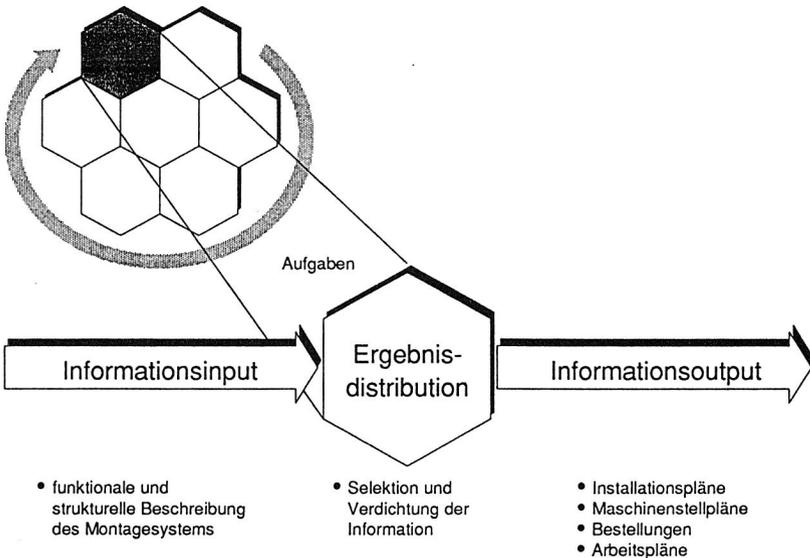
Im konkreten Anwendungsfall ist daher immer ein tragbarer Kompromiß zu treffen zwischen der frühzeitigen Eingrenzung des Lösungsraums, mit dem Ziel, den Planungsaufwand zu reduzieren oder aber einer möglichst vollständigen Berücksichtigung aller Variationsmöglichkeiten, mit der höheren Wahrscheinlichkeit, direkt eine ganzheitlich optimale Lösung zu finden.

Die Teilfunktion *Bewertung* und *Auswahl* nimmt also innerhalb des Planungsprozesses eine zentrale Stellung ein. Sie bezieht sich zum einen auf die jeweiligen Aufgabenkomplexe und soll Fragen auf Detailebene lösen, zum anderen soll damit zum Abschluß der Planung eine ganzheitliche Bewertung aller Lösungsvarianten unter Berücksichtigung gegenseitiger Abhängigkeiten unter übergeordneten Ziele ermöglichen werden.

### Ergebnisdistribution

Nach der abstrakten, modellhaften Planung und der Auswahl einer endgültigen Lösung werden die Ergebnisse dieses Prozesses in operationale Teilpläne transformiert. Dabei sind aus dem Gesamtmodell Informationen entsprechend dem Bestimmungszweck zu selektieren, zu verdichten und an die ausführenden Instanzen weiterzuleiten (Bild 2-10).

Das Einleiten konkreter Maßnahmen zur Realisierung des Planungsvorhabens muß dabei nicht unbedingt erst am Ende des Planungsprozesses geschehen, sondern wird insbesondere, wenn lange Vorlaufzeiten zu erwarten sind, bereits dann erfolgen, wenn einzelne Teilergebnisse der Planung als unrevidierbar festgeschrieben werden.



**Bild 2-10: Ergebnisdistribution**

### 3. Stand der Technik rechnergestützter Hilfsmittel zur Montageplanung

Im Vorfeld der Konzeption eines integrierten rechnergestützten Planungssystems soll die Eignung von derzeit verfügbaren rechnerunterstützten Werkzeugen im Hinblick auf das erklärte Ziel untersucht werden. Ein Überblick über darauf aufbauende, spezifische Planungswerkzeuge zeigt den derzeitigen Entwicklungsstand.

#### 3.1 Basiskomponenten

Der Entwicklungsursprung von Softwarekomponenten hat sich als weitgehend bestimmend für die Funktionalität und die Einsatzmöglichkeiten speziell von *CAD*- und Datenbanksystemen erwiesen. Nachteilige Auswirkungen treten insbesondere dadurch auf, daß die Anforderungen an die Systeme ausschließlich vor dem Hintergrund der ursprünglichen, abteilungsspezifischen Aufgabenstellungen definiert wurden, was einer durchgängigen Informationsverarbeitung in der Regel erschwerend entgegensteht.

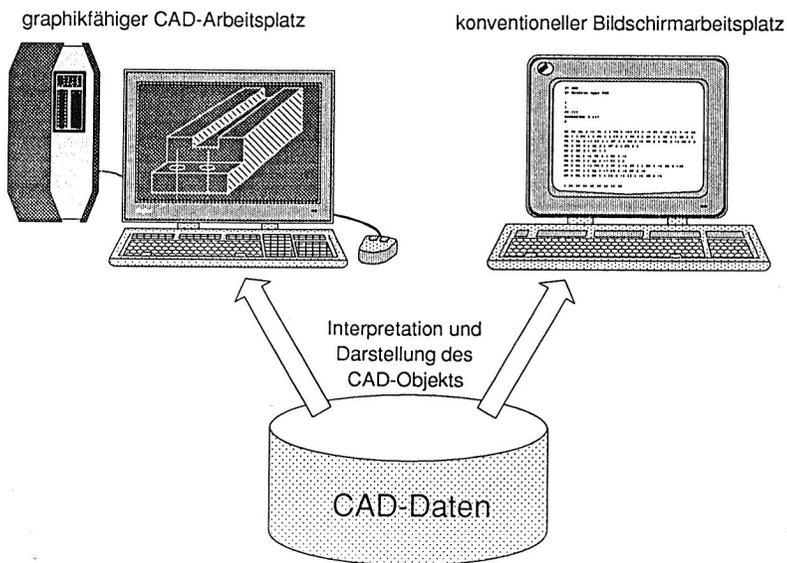
##### 3.1.1 CAD-Systeme

Im Bereich der Konstruktion haben *CAD*-Systeme in den letzten Jahren einen erheblichen Verbreitungsgrad erreicht [31]. Die primäre Intention dieser Entwicklung war die Automatisierung der Zeichnungserstellung [32]. Entsprechend dieser Zielsetzung ist die Funktionalität heute eingesetzter *CAD*-Software auch hauptsächlich auf die Erfordernisse der Geometriedatenverarbeitung in der Konstruktionsphase *Detaillieren* ausgerichtet. Bei zweidimensional (2D) orientierten *CAD*-Systemen entspricht die Arbeitsweise des Konstrukteurs am Bildschirm nahezu der Arbeitsweise am Zeichenbrett. Entscheidende Vorteile ergeben sich im Hinblick auf den Zeitaufwand und die Qualität der Zeichnungsunterlagen. Das Arbeitsergebnis, die maschinell erzeugte Zeichnung, beinhaltet jedoch nicht mehr Informationen als eine konventionell erzeugte Zeichnung.

Dreidimensional (3D) orientierte CAD-Systeme bieten die Möglichkeit, die Gestalt von Objekten rechnerintern darzustellen. Ein räumliches Modellieren von Objekten verlangt in der Regel eine Umstellung der Denk- und Arbeitsweise des Konstrukteurs, was vielfach als Hemmnis gesehen wird, eine Entscheidung zugunsten eines 3D CAD-Systems zu treffen. Der Vorteil der gestaltorientierten gegenüber der abbildungsorientierten Darstellung ist ein höherer Informationsinhalt und ein wesentlich realitätsnäherer Eindruck von den zu bearbeitenden Objekten. Falls erforderlich, können auch aus diesem Modell beliebige Ansichten und Schnitte abgeleitet werden. Der primäre Einsatzbereich der 3D CAD-Systeme bleibt aber auf die Bearbeitung der Geometrie beschränkt. Produktionstechnisch relevante Informationen für Fertigung und Montage, die über die Geometrie- und Gestaltrepräsentation des Objektes hinausgehen und damit in logischer Wechselwirkung stehen, können nicht oder nur in rudimentärer Form als Textattribut verwaltet werden.

Die im CAD-Datenmodell enthaltenen Informationen sind aufgrund spezieller Datenstrukturen nur zur Laufzeit des CAD-Programmsystems interpretierbar. Diese Art der Datenstrukturierung gewährleistet zwar die primär geforderte Effizienz und Performance bei der Geometriedatenverarbeitung, jedoch wird eine Verarbeitung nichtgeometrischer Informationen außerhalb des CAD-Umfeldes nicht unterstützt (Bild 3-1). Dies wirkt sich insbesondere für die Nutzung der als Attribut abgelegten Zusatzinformationen negativ aus.

Weiterentwicklungen der CAD-Technik konzentrieren sich hauptsächlich auf Verfahrensketten der Teilefertigung. Die am CAD-System erzeugten Geometriedaten werden dabei automatisch als Eingangsgrößen für die Programmierung von Werkzeugmaschinen herangezogen anstatt sie erneut aus der Fertigungszeichnung manuell für die Programmierung umzusetzen. Technologische Informationen werden getrennt von dem CAD-Modell erarbeitet und verwaltet. Bestimmte Geometrieelemente an einem Bauteil können zu einem Formelement zusammengefaßt werden, dem ein bestimmtes Werkzeug für die Bearbeitung zugeordnet wird. Die Generierung dieses Formelementes bei der Konstruktion erfolgt dabei nicht über eine elementare Definition der Geometrieelemente, sondern technologieorientiert über eine formspezifisch parametrisierte



**Bild 3-1:** System- und arbeitsplatzabhängige Zugriffsmöglichkeiten auf CAD-Daten

Eingabe, die auf die Bearbeitung oder das Werkzeug abgestimmt ist. Dieses Verfahren bietet sich für häufig verwendete Formelemente wie Nuten, Freistiche, Bohrungen, etc. an, deren Geometrien in Normklassen definiert sind.

Die genannten Entwicklungen konzentrieren sich hauptsächlich auf die Darstellung und Verarbeitung der Mikrostruktur (geometrisch/topologische Struktur eines Einzelteils) und der Mikrogeometrie (Oberflächengestaltung). Informationen zur Beschreibung der Makrostruktur, also der logischen, topologischen und technologischen Beziehungen von Einzelteilen einer Baugruppe oder eines Produktes werden mit heutiger CAD-Technik dagegen nur unzureichend berücksichtigt [33],[34]. Gerade für die Montageplanung sind diese Informationen aber wichtige Eingangsgrößen.

Montagerelevante Informationen sind entweder nur implizit oder überhaupt nicht im *CAD*-Modell enthalten. Die Interpretation einer Schraubenverbindung ist anhand eindeutiger Geometriemerkmale des Modells zwar möglich, eine Unterscheidung, ob zwei Bauteile miteinander verlötet oder verschweißt werden sollen, geht aus der reinen *CAD*-Darstellung nicht unbedingt hervor. Eine systematische Spezifikation der Bauteilverbindungen nach Technologie und Parametern wird bislang von keiner *CAD*-Software unterstützt. Beschreibende Daten werden entweder vollkommen getrennt von dem *CAD*-Modell verwaltet oder günstigstenfalls als Textattribut in der Fertigungszeichnung mitgeführt [35].

Ein weiterer Kritikpunkt gilt der mangelnden Unterstützung der Teileverwaltung. Konventionelle *CAD*-Systeme verwalten Produkt- oder Baugruppenmodelle jeweils komplett in einem einzigen *CAD*-Datenfile. Treten gleiche Baugruppen oder Einzelteile in anderen Produkten auf, so müssen sie dort wiederholt gespeichert werden. Daraus ergeben sich gravierende Nachteile bezüglich der Konsistenz bei etwaigen Änderungen an einzelnen Objekten und ein übermäßiger Speicherplatzbedarf für die Mehrfachspeicherung gleicher Objekte.

Räumliche Anordnungen und Beziehungen einzelner Elemente untereinander sind ebenfalls nur aus der Interpretation der Darstellung des *CAD*-Modells ableitbar. Für auf die Informationen des Gestaltmodells aufsetzende Verfahrensketten, beispielsweise die implizite Roboterprogrammierung, sind Daten über Lage und Orientierung der Einzelteile grundlegende Eingangsdaten.

Die dargestellte Kritik macht deutlich, daß bezüglich der Integration von *CAD*-Systemen in den gesamten betrieblichen Informationsfluß noch inhaltliche Lücken bestehen, die in zukünftigen Entwicklungen berücksichtigt werden müssen.

### 3.1.2 Datenbanksysteme

Softwaremodule zur Verarbeitung alphanumerischer Daten haben ihren Ursprung im kommerziellen Bereich. Vielseitige Anwendungen finden sich im administrativen und organisatorischen Umfeld des betrieblichen Ablaufs [36],[37]. Bezeichnend für die meisten im Einsatz befindlichen konventionellen Systeme ist, daß Anwendungsprogramme und Datenstrukturen eng miteinander verzahnt sind. Durch die anwendungsspezifische Organisation der Daten in sequentiellen Dateien ist eine Mehrfachbenutzung für unterschiedliche Fragestellungen zumeist nur unter Einsatz von Sortierungs- oder Konvertierungsmaßnahmen möglich. Die Folge ist eine redundante und unflexible Datenhaltung. Für eine Aufbereitung der in den Dateien gespeicherten Informationen ist die genaue Kenntnis des Dateiaufbaus erforderlich, um auf die gewünschten Daten zugreifen zu können [38].

Im Hinblick auf eine logisch zentrale, konsistente und redundanzfreie Datenhaltung haben sich spezielle *Datenbanksysteme (DBS)* durchgesetzt (Bild 3-2). Ihr Vorteil liegt in einer weitgehenden Entkoppelung von anwendungsspezifischen Programmen und der Datenorganisation. Die Gesamtheit der für alle Anwendungen interessierenden Daten werden logisch zentral in einem Pool, der Datenbank, gespeichert, die die Grundlage für ein umfassendes Informationssystem ist. Alle Anwendungsprogramme arbeiten auf diesem gemeinsamen Datenbestand. Der Zugriff erfolgt nicht direkt auf die gespeicherten Daten, sondern über eine spezielle Datenbanksoftware, dem *Datenbank-Management-System (DBMS)*, das die Aufgabe hat, den Datenbankzugriff bei Mehrbenutzerbetrieb zu synchronisieren und die Daten gegen unberechtigten Zugriff zu schützen [39].

Kommerziell im Einsatz befindliche Datenbanksysteme beruhen auf dem hierarchischen, dem Netzwerk- oder relationalen Modellansatz [40], wobei insbesondere relationale Datenbanksysteme in letzter Zeit die breiteste Verwendung finden. Dabei stellen homogen strukturierte Tupel die Relationen dar, deren Aufbau durch die verwendeten Attribute gekennzeichnet ist. Die Attribute stammen aus einem eindeutigen Wertebereich in dem Klasse, Typ und eventuell zulässige Attributwerte festgelegt sind.

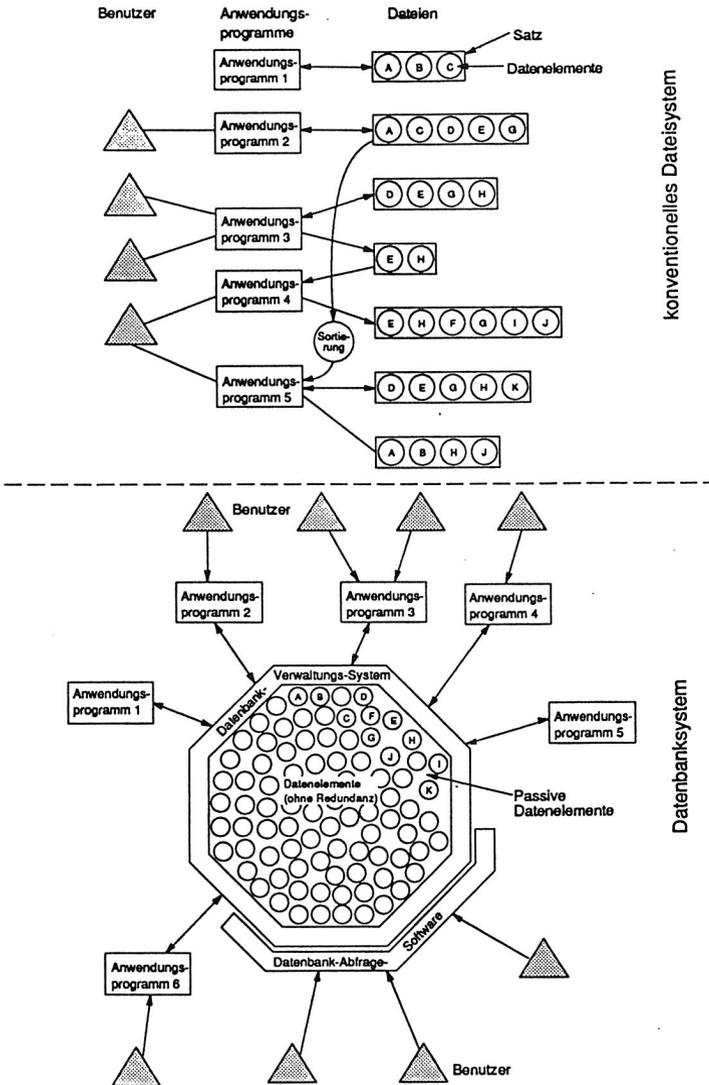


Bild 3-2: Vereinfachte Gegenüberstellung von konventionellen Dateissystemen und einem Datenbanksystem [38]

Tupel sind damit Gruppen von Attributwerten, deren Bedeutung durch die zugehörige Attributstruktur bestimmt wird.

Ein Hauptgrund für den Erfolg relationaler Datenbanksysteme ist der deskriptive Ansatz relationaler Datenbanksprachen, der es im Gegensatz zu prozeduralen Sprachen ermöglicht, ohne die Kenntnis der Datenorganisation gezielt Informationen abzurufen. Dabei teilt der Benutzer dem System lediglich mit *WAS* für Informationen er wünscht und nicht explizit *WIE* das System die Daten extrahieren soll. Beispiel einer deskriptiven Datenbanksprache für relationale Datenmodelle ist die *Structured Query Language (SQL)*, die heute als quasi Standard anzusehen ist.

Datenbanksysteme haben in administrativen Bereichen bewiesen, daß sie ein geeignetes Mittel sind, um Datenredundanz zu vermeiden. Sie garantieren logische und physische Datenunabhängigkeit der Anwendungsprogramme und bilden auf diese Weise eine einheitliche Schnittstelle für alle vorhandenen Systemkomponenten. Hinzu kommt Schutz vor unbefugten Zugriffen und Synchronisation im Mehrbenutzerbetrieb bei klassischen Anwendungen. Trotzdem erweisen sich existierende Datenbanksysteme noch als unzureichend für die speziellen Anforderungen in technischen Bereichen. Administrativ-betriebswirtschaftliche Anwendungen unterscheiden sich in vielerlei Hinsicht von ingenieurwissenschaftlichen Anwendungen, so daß der Einsatz der auf dem Markt verfügbaren Datenbanksysteme schnell zu einer Reihe von Problemen führt. Ursache sind die extrem verschiedenen Anforderungen der Anwendungsgebiete, die sich nicht nur inhaltlich, sondern auch bezüglich Datenmodell, Konsistenz und Transaktionsverhalten drastisch voneinander unterscheiden.

Anforderungen aus dem technischen Bereich erfordern die Abbildung und Handhabung hierarchisch strukturierter Objekte, was mit derzeit verfügbaren Datenbank-Management-Systemen nur unzureichend unterstützt wird. Relationale *DBMS* bauen auf Mengen von flachen Sätzen auf und bieten standardmäßig keine Möglichkeit, Objektstrukturen abzubilden und Objekte, deren Beschreibung sich über mehrere Relationen erstrecken, als Einheit zu verwalten. Komplexe Objektstrukturen bilden aber logisch betrachtet eine Einheit für Zugriff, Speicherung und Sperren.

In konventionellen Datenbanksystemen werden einzelne Manipulationen nur aufgrund einer expliziten Auslösung durch den Benutzer oder ein Anwendungsprogramm ausgeführt. Inkonsistenzen müssen vom Benutzer selbst erkannt werden, die notwendigen Folgemaßnahmen sind explizit zu veranlassen.

Unzureichend ist derzeit auch der Informationsübergang zwischen CAD- und Datenbanksystemen. Er bleibt bei heutigen Lösungen auf eine strikte Trennung zwischen Datenbeständen beschränkt [41]. Logische Abhängigkeiten zwischen den Datenrepräsentationen können nicht berücksichtigt werden. Je mehr Informationen jedoch auf ein Datenmodell abgebildet werden, desto wichtiger wird die systemseitige Berücksichtigung der Wechselwirkungen.

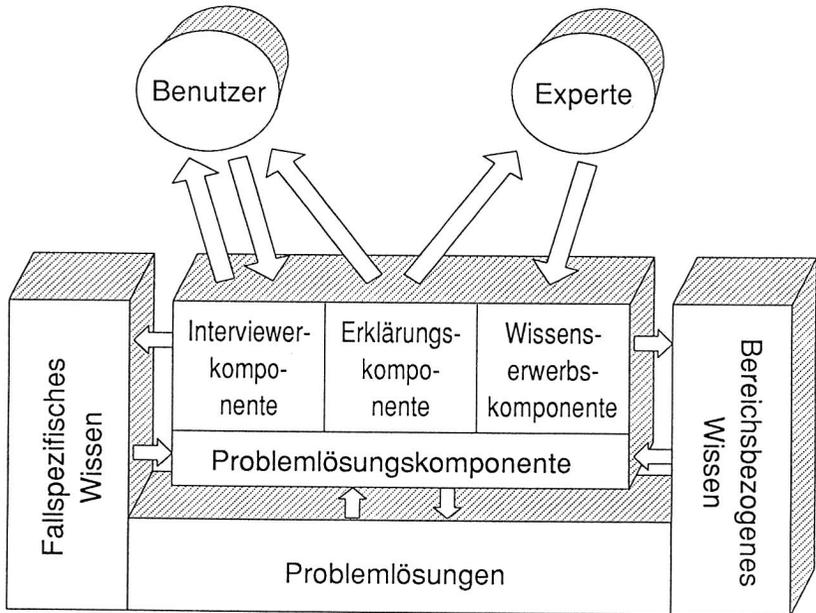
### **3.1.3 Wissensbasierte Systeme**

Als Schlüsselbegriff intelligenter Datenverarbeitung versprechen wissensbasierte Systeme, menschliches Wissen zum Lösen verzwickter Probleme zu nutzen.

In Abgrenzung gegenüber konventionellen Systemen der Informationsverarbeitung haben wissensbasierte Systeme die Fähigkeit, Schlußfolgerungen aus bestimmten Konstellationen zu ziehen, die zur Lösung von gestellten Aufgaben führen. Spezielles Wissen beschreibt, welche Möglichkeiten das System zur Problemlösung hat und wann welche Lösungswege einzuschlagen sind. Der exakte Lösungsweg ist nicht per Programm vorgegeben, sondern wird vom System in Abhängigkeit von erreichten Zwischenergebnissen selbstständig ermittelt. Spezielles Metawissen (Wissen *über* Wissensverarbeitung) steuert dabei übergeordnete Strategien [42].

#### ***Grundsätzlicher Aufbau wissensbasierter Systeme***

Der prinzipielle Aufbau eines wissensbasierten Systems ist in Bild 3-3 dargestellt. Wissensbasierte Systeme bestehen aus einer problemneutralen Programmierumge-

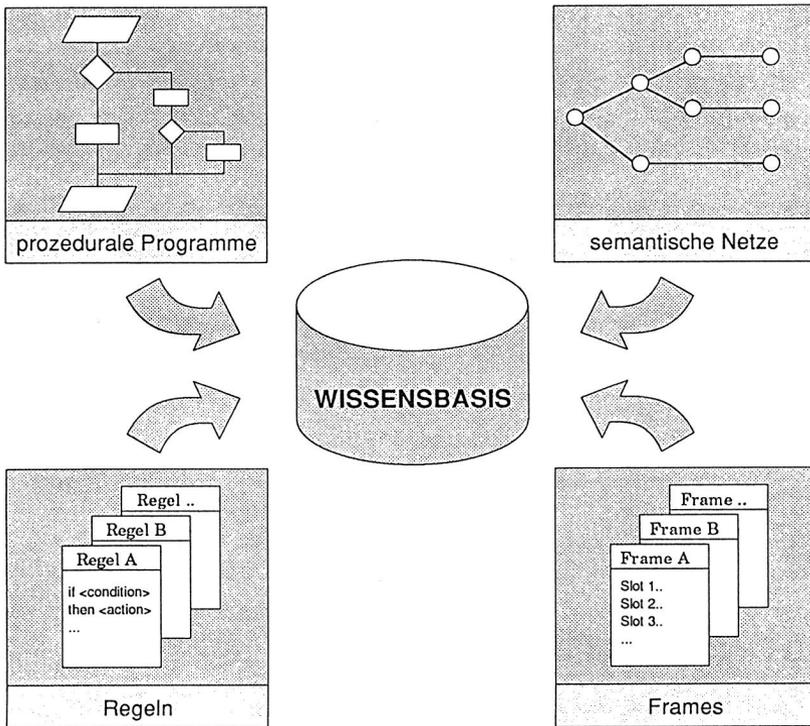


**Bild 3-3:** Grundsätzlicher Aufbau wissensbasierter Systeme

bung (*Shell*) und einer Wissensbasis. Die Programmierumgebung beinhaltet eine Benutzeroberfläche als Schnittstelle für die Mensch-Maschine-Kommunikation. Über eine Wissenserwerbskomponente kann der Fachmann - in der Regel vor der eigentlichen Anwendung des Systems - die Wissensbasis im Dialog mit dem System aufbauen. Mit Hilfe der Problemlösungskomponente sollen die Schlussfolgerungsprozesse zur Lösung der gestellten Aufgabe durchgeführt werden. Ausgehend von einem aktuellen Zustand wird ein neuer Zustand ermittelt, welcher zur Lösung der gestellten Aufgabe hinführt. Die Erklärungskomponente soll den Lösungsweg des Problemlösungsprozesses auch für den *nicht Fachmann* transparent und nachvollziehbar machen [42].

**Methoden der Wissensrepräsentation**

Die Strukturierung, Speicherung und Verwaltung des Wissens ist von entscheidender Bedeutung für die Effizienz und Leistungsfähigkeit wissensbasierter Systeme. Dabei werden die einzelnen Methoden zur Problemlösung und Wissensmanipulation weitgehend von der Repräsentationsform beeinflusst. Bild 3-4 zeigt die gebräuchlichsten Methoden der Wissensrepräsentation.



**Bild 3-4:** Alternative Möglichkeiten der Wissensrepräsentation  
(ohne Anspruch auf Vollständigkeit)

**Prozedurale Programme** werden zumeist in konventionellen Datenverarbeitungssystemen angewendet. Die Reihenfolge der einzelnen Aktionen ist durch fest programmierte Kontrollstrukturen vorgegeben. Einzelne Bausteine dieser Struktur beinhalten Prozeduren, deren Ausführung den Problemlösungsprozeß bildet. Damit wird deutlich, daß der Übergang zwischen konventionellen Programmsystemen und wissensbasierten Systemen fließend ist [42].

**Semantische Netze** bilden das Wissen in Form eines Graphen ab. Die Knoten des Graphen stellen Fakten oder Ereignisse dar, während die Kanten die Beziehungen der einzelnen Objekte zueinander repräsentieren [43]. In semantischen Netzen ist das Prinzip der Vererbung realisiert, wobei Knoten Eigenschaften von verbundenen Knoten erben können [44]. Damit können Hierarchien und Klassen mit Hilfe von *is-a*- und *part-of*-Relationen aufgebaut werden. Der Vorteil dieser Darstellung ist, daß sie der menschlichen Vorstellung über Strukturierung und Verknüpfung von Wissensfakten sehr nahe kommt.

Die **regelbasierte Methode** der Wissensrepräsentation wurde bisher in den meisten Expertensystemen eingesetzt [45]. Hierbei wird das Wissen in Regeln der Form *if* <CONDITION> *then* <ACTION> abgebildet. Im Bedingungsteil einer Regel sind alle Voraussetzungen aufgeführt, die erfüllt sein müssen, damit die im Aktionsteil definierten Handlungen ausgeführt werden können. Die Regeln setzen auf einer aktuellen Beschreibung des Systemzustandes auf. Mit Hilfe systemkontrollierender Funktionen werden jeweils diejenigen Regeln herausgesucht, die im augenblicklichen Systemzustand anwendbar sind, indem geprüft wird, inwieweit der Bedingungsteil der Regeln vom Systemzustand erfüllt ist [46]. Der Vorteil dieser Darstellung ist eine hohe Modularisierbarkeit des Wissens, wobei sich Änderungen und Ergänzungen ohne großen Aufwand durchführen lassen. Nachteilig ist, daß das Wissen explizit nur in Form von Ereignissen (Handlungswissen) gespeichert ist; Faktenwissen ist dagegen nur implizit abgebildet.

**Frames** sind spezielle Datenstrukturen zur Beschreibung von gleichartigen Objekten. Hier besteht eine große Ähnlichkeit zu den Methoden der objektorientierten Programmierung. Frames bieten die Möglichkeit sowohl deklarativ statisches Wissen

(Faktenwissen) als auch prozedural dynamisches Wissen zu verwalten; sie vereinen damit die Vorteile von semantischen Netzen und Regeln. Ein Frame besteht aus einer Menge von *Slots* und *Subslots*, in die Werte und Prozeduren eingetragen werden, womit neben den Objekteigenschaften auch hier das Wissen über dessen Verwendung repräsentiert ist [46]. Die Entwicklung der letzten Jahre weist von den rein regelbasierten Systemen zu hybriden Systemen hin, bei denen insbesondere objektorientierte, regelorientierte und prozedurale Methoden gemischt verwendet werden, da man erkannt hat, daß komplexe Anforderungen durch eine einzige Art der Repräsentation nicht erfüllt werden können.

### ***Mechanismen der Wissensverarbeitung und Problemlösungen***

Analog zu den Methoden der Wissensrepräsentation gibt es ebenso unterschiedliche Möglichkeiten zur Wissensverarbeitung und Problemlösung [47]. Im Vordergrund steht dabei die Art der Ablaufsteuerung des Problemlösungsprozesses. Während in prozedural ablaufenden Programmsystemen die Programmstruktur gleichzeitig die Kontrollstruktur darstellt und damit Daten und Kontrollstruktur auf das Engste miteinander verzahnt sind, wird in regel- und framebasierten Systemen eine strikte Trennung angestrebt.

Die Reihenfolge der Abarbeitung kontrolliert der Regelinterpretier, der völlig problemneutral aufgebaut ist. Damit wird der Ablauf problem- oder situationsspezifisch durch den Austausch von Nachrichten gesteuert.

Mit Hilfe eines Inferenzmechanismus können in regelbasierten Expertensystemen Schlußfolgerungen in Bezug zu gestellten Konstellationen gezogen werden. Falls eine *<IF> Bedingung* einer Regel erfüllt ist, erfolgt eine Schlußfolgerung durch die Auslösung der *<THEN> Regel*. Durch diese Aktion können vorhandene Fakten der Wissensbasis verändert oder neue Fakten erzeugt werden. Die neuen Fakten können dazu führen, daß weitere Regeln aktiviert werden [42].

Der breite Durchbruch der wissensbasierten Systeme im Bereich der Entwicklung und Konstruktion ist bisher allerdings ausgeblieben [48]. Gründe dafür sind zum einen in der mangelnden Akzeptanz dieser Systeme zu sehen und liegen zum anderen in der Komplexität der Aufgabe sowie der Vielschichtigkeit der beeinflussenden Randbedingungen, die eine vollständige Erfassung und Abbildung des notwendigen Wissens nahezu unmöglich erscheinen lassen. Ebenso gibt es bei der Akquisition und Pflege von Wissen Probleme, da Experten nicht immer bereit sind, ihr Wissen auch einem Rechnersystem anzuvertrauen oder aber nicht in der Lage sind, es geeignet zu strukturieren und zu formalisieren, wie es für die Abbildung notwendig ist [49].

Für Anwendungen in Entwicklung und Konstruktion bedeutet dies, daß wissensbasierte Systeme dort ihre Berechtigung haben, wo Problemfelder klar abgrenzbar sind und das notwendige Wissen zur Problemlösung, wenn auch nur als heuristisches Wissen oder als Daumenregel, vorhanden ist.

Ein wesentlicher Entwicklungsschwerpunkt wird die Einbindung von wissensbasierten Systemen in die bestehende *EDV*-Umgebungen sein, womit auf begrenztem Gebiet die Möglichkeit besteht, sich schnell ändernden Problemen und Aufgaben, die auf durch Regeln beschreibbarem Wissen beruhen, mit Unterstützung des Rechners zu lösen. Von besonderer Bedeutung erscheint dabei die Schnittstelle zu Datenbank- und *CAD*-Systemen zu sein [50].

### **3.2 Spezifische Softwarewerkzeuge zur Unterstützung der Montageplanung**

Mit fortschreitender Rechnerdurchdringung im Bereich von Konstruktion und Planung wurden vielfältige Methoden und Werkzeuge zur Unterstützung der Montageplanung entwickelt. Vor dem Hintergrund der in Kapitel 2.2 zusammengestellten Aufgabenbereiche der Montageplanung und den softwaretechnischen Lösungskomponenten erfolgt an dieser Stelle eine Übersicht über ausgewählte Entwicklungen auf dem Gebiet der rechnergestützten Montageplanung, um den Stand der Technik aufzuzeigen.

Zentraler Ausgangspunkt der Montageplanung ist, wie oben bereits erwähnt, das zu montierende Produkt und die Beachtung der damit verbundenen Montagefreiheitsgrade und Restriktionen. Die Möglichkeit geometriebezogene Produkt- oder Teileinformationen auf ein Modell abzubilden, wird dabei durch *CAD*-Systeme weitgehend unterstützt. Da diese Informationen jedoch nur eine eng begrenzte Teilmenge des über den Produktlebenszyklus erarbeiteten oder benötigten Informationsumfangs darstellt oder zum Teil auch nur implizit enthält, gibt es zunächst von dieser Seite Ansätze, die *CAD*-Datenbestände mit weiteren Informationen in Verbindung zu setzen. Zur Verwaltung von Metainformationen über Zeichnungs- und Modelldaten gibt es bereits Koppelungsmöglichkeiten zwischen Datenbank- und *CAD*-Systemen. Dabei fungiert das *DBMS* als intelligentes File-Verwaltungssystem, über das *CAD*-Zeichnungen strukturiert abgelegt und wiederaufgefunden werden können [51], oder es wird über abgeleitete Klassifikationskriterien eine Ähnlichkeitsuche unterstützt [52]. Obwohl über diese Art der Koppelung auch technologie- und verfahrensspezifische Informationen abgebildet werden können, gibt es bislang nur wenige Ansätze in dieser Richtung.

Eine Verknüpfung geometrisch orientierter Bauteilbeschreibungen mit technologischen Daten zur Teilefertigung wird in [53] vorgestellt. Dort werden über die Geometrie hinaus Strukturelemente als neue logische Komponenten eines Bauteils beschrieben, auf denen eine automatische Ermittlung von technologiespezifischen Arbeitsvorgängen und Abläufen basiert. Ebenso werden dem Bauteilmodell technologische Ausprägungen der Elemente, wie beispielweise Oberflächenbeschaffenheit, zugeordnet.

Grundsätzliche Möglichkeiten zur Informationsabbildung für die automatisierte Arbeitsplanung der Teilefertigung werden ausführlich in [54] diskutiert. Speziell montagerelevante Produktinformationen, die einem Modell zuzuordnen sind, werden in [55] aufgezeigt. Für die Analyse des Produktaufbaus und der Ermittlung der sich daraus ergebenden Montagereihenfolgerestriktionen wird das *CAD*-Modell auf vorhandene Fügeflächen reduziert. Aus diesem Teilmodell können dann Reihenfolgebeziehungen für die Montage abgeleitet werden.

Ohne den direkten Bezug zur geometrisch/topologischen Produktbeschreibung gibt es Ansätze, den Montageablauf auf der Grundlage wissensbasierter Systeme zu planen [56]. Ausgangspunkt ist die Stückliste, wobei jede Position mit zusätzlichen, den Montageablauf beeinflussenden Merkmalen ergänzt wird. Unter Berücksichtigung abgelegter Regeln werden Arbeitsvorgänge zerlegt und aufgrund kennzeichnender Merkmale bestimmten Montagemitteln zugeordnet. Dabei bleiben geometrisch/topologische Kriterien unbeachtet.

Zur Unterstützung der Montagemittelauswahl existieren verschiedene Ansätze, die sich hauptsächlich auf Handhabungsgeräte konzentrieren. In [57] werden für diesen Auswahlprozeß die kinematischen Charakteristika der Geräte in den Vordergrund gestellt, um darüber einen Abgleich zu den kinematischen Anforderungen der Arbeitsaufgabe zu finden. Einige Softwareanbieter stellen darüber hinaus bestimmte Robotik-Pakete zur Verfügung, die aus *CAD*-Modellbibliotheken von Handhabungsgeräten bestehen. Obwohl diese Systeme hauptsächlich für Simulation und Programmierung konzipiert sind, lassen sie sich auch zur Unterstützung der Geräteauswahl hinsichtlich kinematischer Kriterien heranziehen [58]. Unberücksichtigt bleiben bei diesen Ansätzen andere technische oder organisatorische/wirtschaftliche Kriterien, die für den Auswahlprozeß ebenfalls relevant sein können.

Für das Teilgebiet der rechnergestützten Layoutplanung werden heute bereits vielfach *CAD*-Systeme eingesetzt [59],[60],[61]. Diese Systeme konzentrieren sich hauptsächlich auf die Groblayouterstellung, d.h. die graphische Darstellung von Flächen oder symbolisierter Montagemittel auf relativ hohem Abstraktionsniveau. Mit Hilfe verschiedener Programmsysteme kann beispielsweise die Anordnungsplanung einzelner Flächen zueinander anhand verschiedener Kriterien bewertet und optimiert werden. In [62] wird ein System für die Groblayoutentwicklung vorgestellt, das eine Verknüpfung eines solchen Algorithmus mit einer graphischen Komponente beinhaltet. Da in realen Planungsvorhaben zumeist umfangreiche Randbedingungen zu beachten sind, die sich nur schwer programmtechnisch berücksichtigen lassen, sind diese Verfahren hauptsächlich auf Idealplanungen oder Neuplanungen ausgerichtet.

Die Unterstützung der Detailplanung von Montagezellen konzentriert sich auf die oben bereits erwähnte Möglichkeit der Bewegungssimulation und der Offline-Programmierung der Roboter vom Bildschirmarbeitsplatz aus [63]. Je nach Informationsinhalt und Abstraktionsgrad der verwendeten Modelle sind die Ergebnisse vielfach noch zu ungenau und unvollständig, so daß sie mit konventionellen Methoden nachbereitet werden müssen.

## **4. Anforderungen an ein integriertes Informations- und Planungssystem**

Trotz der Verwendung neuester Hard- und Softwaretechnologien in einzelnen Teilbereichen der Produktion bestehen Defizite bezüglich einer durchgängigen Informationsbereitstellung und Nutzung. Einerseits ist dies durch die Inkompatibilitäten von eingesetzten Standardbausteinen bedingt, andererseits konzentrieren sich bisherige Entwicklungen zu sehr auf die Lösung von Detailproblemen, ohne den gesamten Prozeß der Weiterverarbeitung einmal generierter Informationen zu beachten. Je mehr problemspezifische Werkzeuge zur Unterstützung von Planungsaufgaben eingesetzt werden, desto mehr spezifische Daten werden benötigt und erzeugt. Da die Teilaufgaben jedoch nicht unabhängig voneinander sind, sondern vielfach auf gemeinsamen Daten aufbauen oder wechselseitig Informationen als In- und Outputwerte erzeugen, wird der Aufwand für die Datenaufbereitung und Konsistenzsicherung unverhältnismäßig schnell wachsen und die erhofften Rationalisierungseffekte insgesamt negativ beeinflussen [64]. Für die Erzielung globaler Rationalisierungseffekte ist daher eine ganzheitliche Sichtweise unabdingbar.

### **4.1 Grundlegende Anforderungen an das Systemkonzept**

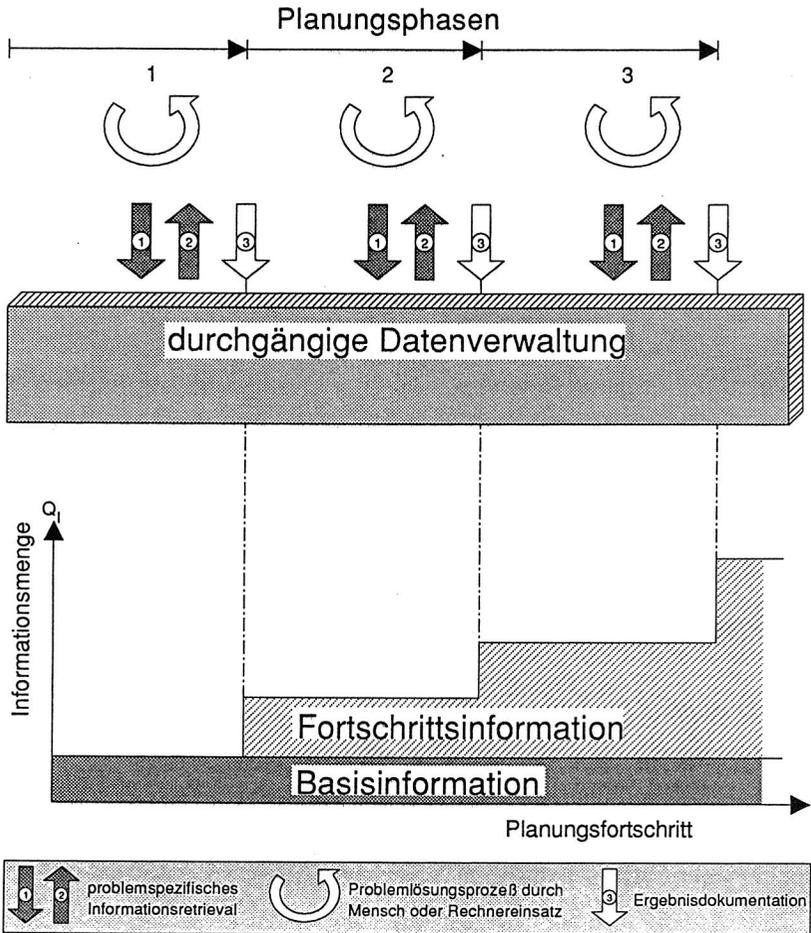
Planungsaufgaben im Bereich der Produktionstechnik sind bezüglich der Kontingenz des Lösungsraums unterschiedlich einzuordnen. So sind die Handlungsfreiräume bei der Generierung eines NC-Bearbeitungsprogramms weitgehend durch die Geometrie des zu fertigenden Einzelteils sowie durch technisch/technologische Zusatzinformationen determiniert. Durch eine überschaubare Anzahl von Randbedingungen können kausale Zusammenhänge explizit formuliert werden, womit die Lösung derartiger Aufgaben zur Routine wird. Diese Art der Aufgabenstellung eignet sich damit grundsätzlich für eine rechnergestützte Durchführung.

Bei der Planung eines Montagesystems ist die Kontingenz des Lösungsraums dagegen ungleich größer. Aufgrund der vielfältigen Einflußgrößen, die fallspezifisch bei der

Systemplanung zu berücksichtigen sind, wird es auch in absehbarer Zukunft unmöglich sein, eine solch komplexe Gestaltungsaufgabe ausschließlich durch Rechnereinsatz befriedigend zu lösen.

Dies hat grundlegende Konsequenzen für die Konzeption eines Informations- und Planungssystems. Im Gegensatz zu häufig beobachteten Entwicklungstendenzen muß bei derartigen Aufgabenstellungen der Mensch mit seinen dem Rechner weitaus überlegenen kognitiven Fähigkeiten in den Mittelpunkt des Problemlösungsprozesses gestellt werden. Nur aufgrund der Kenntnisse des erfahrenen Fachmanns können im speziellen Einzelfall situative Faktoren erkannt und richtig verwertet werden. Die primäre Aufgabenstellung an ein Informations- und Planungssystem muß daher die durchgängige Unterstützung des Anwenders mit grundlegenden Basisinformationen sowie die Verwaltung der manuell oder rechnerunterstützt erzeugten Fortschrittsinformationen sein. Die Entscheidung, welche Information im Einzelfall relevant ist und wie sie für die aktuelle Problemstellung verwertbar ist, soll jedoch in der Hand des Anwenders bleiben. Der Einsatz des Rechners wird bei dem hier zu entwickelnden Modell in erster Linie auf die Abbildung und bedarfsgerechte Bereitstellung planungsrelevanter Informationen ausgerichtet werden. Sein Einsatz zur Problemlösung bleibt zunächst auf die Lösung von Routineaufgaben beschränkt (Bild 4-1).

Mit diesem Konzept soll dem Benutzer die problemorientierte Selektion von Grundinformationen aus einem Informationssystem ermöglicht werden, die er vor dem Hintergrund seiner Erfahrung und des situationsspezifischen Wissens zur Problemlösung verwendet. Das Ergebnis dieses Informationsverwertungsprozesses soll wiederum strukturiert auf Rechnerebene abgelegt werden. Auf diese Weise entstehen, aufbauend auf den selektierten Grundinformationen, im weiteren Planungsverlauf extern generierte Fortschrittsinformationen. Sie dienen in folgenden Bearbeitungszyklen, die möglicherweise mit anderen Fragestellungen und anderen Benutzern durchgeführt werden, als neue Eingangsinformationen. Die Schnittstelle zwischen Informationsmodell und Benutzer soll jedoch offen gestaltet werden, so daß für die Lösung von Routineaufgaben jederzeit auch externe Mechanismen der Problemlösung einbezogen werden können ohne das zugrunde liegende Modell inhaltlich oder strukturell ändern zu müssen.



**Bild 4-1:** Grundkonzept des rechnergestützten Informations- und Planungssystems

Zwingende Voraussetzung für ein solches Informationssystem ist das Vorhandensein eines Basismodells, das den formalen Rahmen für die Informationsbereitstellung und die Wiederablage neu erzeugter Informationen darstellt.

An dieses Basismodell werden formale, funktionale und inhaltliche Anforderungen gestellt, die im folgenden näher erläutert werden sollen.

## 4.2 Formale und funktionale Anforderungen

Im Hinblick auf einen durchgängigen Informationsfluß innerhalb der verschiedenen Planungsphasen muß ein aus Benutzersicht einheitliches Modell für die Abbildung von Grund- und Fortschrittsinformationen bereitgestellt werden, auf dem alle potentiellen Anwendungen beruhen. Dabei hat sich in der Vergangenheit gezeigt, daß unterschiedliche Anwendungen nicht immer auf einem einzigen Datenmodell basieren können, obwohl sie logisch gesehen dasselbe Objekt referenzieren. Diese Arten von logischen Abhängigkeiten zwischen zwangsläufig unterschiedlichen Beschreibungsformen oder Objektrepräsentationen müssen systemseitig definierbar und kontrollierbar gemacht werden, so daß aus Benutzersicht immer nur *ein* konsistentes Modell vorliegt.

Die wichtigste Aufgabe kommt dabei der Integration von CAD-Datenbeständen und alphanumerischen Datenbeständen auf Datenbankebene zu, da sich diese Systeme bereits mit Erfolg als Insellösungen, wenn auch in verschiedenen Bereichen des betrieblichen Umfeldes, etabliert haben. Diese Integration von CAD-Anwendungen in ein Informations- und Planungssystem impliziert für Datenbanksysteme grundsätzlich die Bereitstellung neuer Methoden der Transaktionsverwaltung, der Zugriffsregelung und der Konsistenzsicherung, die ineinander übergreifen.

### ***Transaktionen im Planungsbereich***

"Eine Transaktion ist eine Folge von Operationen, welche die Datenbank in ununterbrechbarer Weise von einem konsistenten Zustand in einen (nicht notwendig verschiedenen) konsistenten Zustand überführt" [65]. Bei Entwurfs- und Planungsprozessen werden jedoch in einzelnen Schritten bewußt inkonsistente Modellzustände herbeigeführt, die diese Forderung nicht erfüllen. Daher kann diese Forderung nicht für alle Konsistenzbedingungen aufrecht erhalten werden, sondern muß nach verschiedenen Ebenen der Konsistenzbedingungen differenziert werden.

Ein weiterer wesentlicher Unterschied der Datenbanksysteme für klassische Anwendungen und Entwurfsanwendungen ist die Dauer der Transaktionen. Transaktionen in herkömmlichen Systemen sind nach einigen Sekunden beendet. Transaktionen im Planungsbereich, insbesondere mit *CAD*-Einsatz, wie beispielsweise die Erstellung eines Layouts, können sich über Tage oder sogar Wochen erstrecken und überschreiten somit in den meisten Fällen die Dauer einer Terminalsitzung. Die von einer Transaktion verursachten Änderungen dürfen in bestimmten Anwendungsfällen erst nach expliziter Beendigung der Transaktion für andere Transaktionen freigegeben werden. In anderen Fällen ist das Warten bis zum kompletten Abschluß einer anderen Transaktion (Blockieren) für den Zugriff auf Objekte nicht zumutbar. Wenn die zu Beginn einer *CAD*-Transaktion angeforderten Objekte bis zum Ende der Planungsphase für andere Transaktionen nicht verfügbar sind und die Wartezeit somit mehrere Wochen betragen kann, ist hier ebenfalls eine problemangepaßte Regelung zu finden.

Weiterhin ist es notwendig, die Transaktion jederzeit abbrechen zu können. In diesem Fall müssen alle durch diese Transaktion durchgeführten Änderungen rückgängig gemacht werden. Hierbei, wie auch im Fehlerfall, muß sichergestellt werden, daß auf einen definierten Datenbankzustand aufgesetzt wird, wobei möglichst wenig Änderungen verloren gehen sollen [66]. Daraus ergibt sich folgende Problematik:

Eine Transaktion wird entweder erfolgreich zu Ende gebracht (*COMMIT*) oder abgebrochen (*ABORT*). In herkömmlichen Systemen bietet sich daher an, die Transaktion als Einheit der Recovery, der Konsistenz und der Synchronisation zu bezeichnen. Als Einheit der Recovery deshalb, weil Transaktionen, die beim Absturz

beendet waren, erhalten bleiben, und die anderen Transaktionen auf einen gültigen Zustand zurückgesetzt werden. Ein Objekt ist zu Beginn und am Ende der Transaktion konsistent. Zwischenzustände sind es meistens nicht. Synchronisation findet bezüglich der Zugriffe von Transaktionen auf Objekte statt [67]. Auf CAD-Datenbanksysteme für Ingenieur Anwendungen übertragen würde dies bedeuten, daß im Fehlerfall oder bei Systemzusammenbruch die noch nicht beendete Transaktion vollständig zurückgesetzt werden muß. Die tage- oder wochenlange Planungssarbeit würde somit verloren gehen. Die CAD-Transaktion als Recoveryeinheit ist daher völlig ungeeignet. Da während des Ablaufs der Transaktion auch Terminalsitzungen beendet und wieder begonnen werden können, und Sperren Systemzusammenbrüche überleben müssen, ist es nicht mehr ausreichend, Sperren im flüchtigen Speicher zu halten, d.h. Sperrinformation muß ebenfalls gesichert werden [68].

### **Zugriffsregelung**

In konventionellen Arbeitssystemen laufen Informationsprozesse zumeist über die direkte mündliche oder schriftliche Kommunikation zwischen den Systemmitgliedern oder über eine lokale Mensch-Maschine Kommunikation ab.

Die Zugriffskontrolle auf Informationen sollte durch die Gestaltung der Aufbau- und Ablauforganisation explizit festgelegt sein. Ihre Handhabung gestaltet sich auch ohne eine allzu formale Regelung einfach, da die Systemmitglieder ihre Informationen physikalisch selbst verwalten und somit situativ über die weitere Verwendung entscheiden. Während der Konstrukteur an der Detaillierung eines Bauteils arbeitet, hat der Arbeitsplaner noch keinen Zugriff auf die Konstruktionsunterlagen, da beide häufig räumlich voneinander getrennt sind. Erst nach erfolgter Freigabe der Konstruktionszeichnung werden die Dokumente an die nächste Abteilung weitergeleitet. Dies hat den Nachteil, daß beide Planungsprozesse streng sukzessiv durchlaufen werden müssen und eine zeitliche Komprimierung nicht erfolgen kann. Der Vorteil besteht jedoch in einer eindeutigen Kompetenz- und Zuständigkeitsregelung in den jeweiligen Phasen.

Bei rechnerintegrierten Informationsprozessen, bei denen jeder Benutzer einen physikalischen Zugriff - beispielsweise über ein Netzwerk - auf die gespeicherten Informationen haben sollte, entfällt aus Benutzersicht zunächst die faktische Trennung und die Kontrolle über die gespeicherten Informationen. Daß neben dem Vorteil zentralen Informationszugriffs und möglicher Parallelisierung von Informationsprozessen daraus auch umfangreiche Gefahren entstehen, ist unmittelbar einsichtig. Daher wird eine Zugriffsüberwachung, die die spezifischen Subjekt-Objekt Beziehungen sowie die Zugriffsintention berücksichtigt, erforderlich, um die Objekte des Informationssystems vor Mißbrauch zu schützen. Zusätzlich sind die Zugriffsberechtigungen in einer Organisation nicht immer statisch, sondern können sich während des Planungsablaufs ändern, was bei der Gestaltung der Zugriffsregelung berücksichtigt werden muß. Wird die Zugriffsmöglichkeit auf ein Objekt strikt im Sinne des klassischen Transaktionskonzeptes abhängig vom Abschluß anderer Transaktionen, so kann die Forderung nach möglichst paralleler Durchführung von Konstruktions- und Planungsaufgaben nicht unterstützt werden. Hier müssen systemseitig Koordinationsmechanismen bereitgestellt werden, die den Objektzugriff im Sinne des Projektablaufs unter Einbezug von mehr Semantik unterstützen beziehungsweise regeln.

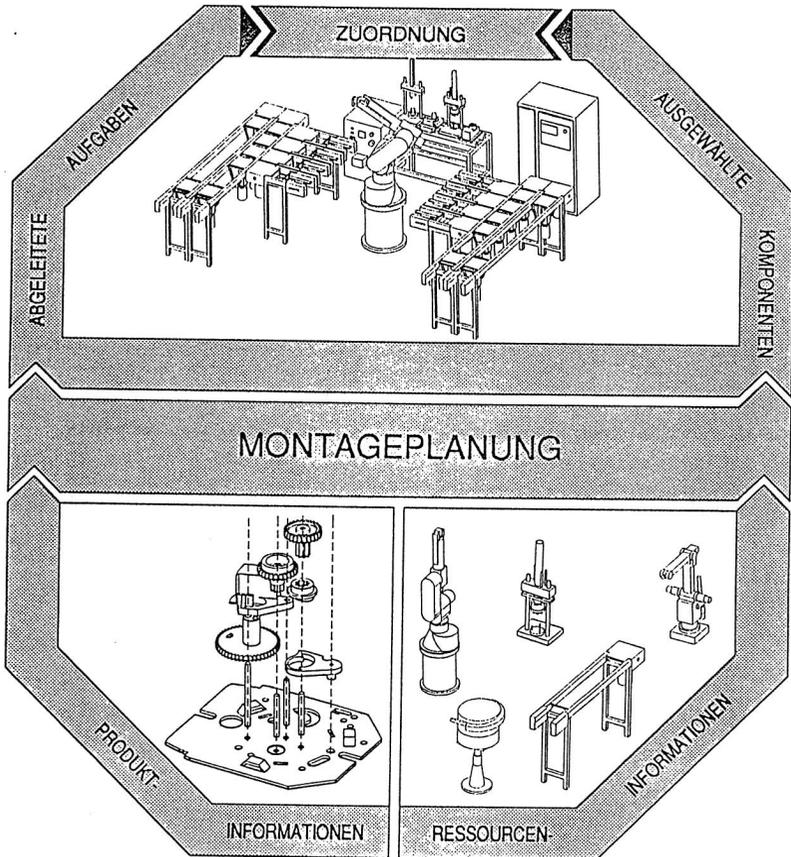
### ***Konsistenzsicherung***

Ein drittes Problem ist die Gewährleistung der formalen und semantischen Konsistenz. Darunter versteht man das Aufrechterhalten eines getreuen Abbildes des relevanten Umweltausschnittes in der Datenbasis. Die in dem Informationssystem gespeicherten Informationen sollen den betrachteten Umweltausschnitt vollständig und widerspruchsfrei repräsentieren. In Bezug auf komplex strukturierte Objekte mit wechselseitigen Abhängigkeiten wird es notwendig, kausale Zusammenhänge zu formulieren und systemseitig zu kontrollieren. Wenn eine Datenbank als zentraler Informationsspeicher für unterschiedliche Informationsarten, wie zum Beispiel Geometrie-, Teilefertigungs- und Montageinformationen dienen soll, so müssen auch Methoden bereitgestellt werden, die es ermöglichen, die logischen Beziehungen, die zwischen den einzelnen Ausprägungen bestehen, abzubilden und zu überwachen. Nicht zu vermeidende

Redundanzen erfordern eine Kontrollmöglichkeit auf der Ebene des Datenbankmanagementsystems, die bei Veränderungen eines Datums die Korrektheit aller übrigen Repräsentationen überwacht, eventuell entsprechende Anpassungen vornimmt oder zumindest den Benutzer auf die Inkonsistenz aufmerksam macht.

### **4.3 Inhaltliche Anforderungen**

Die zur Planung der Montage benötigten Informationen lassen sich inhaltlich in zwei Teilbereiche untergliedern. Auf der einen Seite stehen Informationen, die sich direkt oder indirekt aus der Montageaufgabe, also dem zu montierenden Produkt und den administrativen Vorgaben, ableiten lassen. Demgegenüber stehen Informationen, die die potentiellen Ressourcen beschreiben, die zur Realisierung der Montage eingesetzt werden. Die Aufgabe der Montageplanung ist es, eine strukturelle und funktionale Zuordnung von Aufgaben und Funktionsträgern zu finden, die alle erforderlichen Informationen über das zu erstellende System beinhaltet (Bild 4-2).

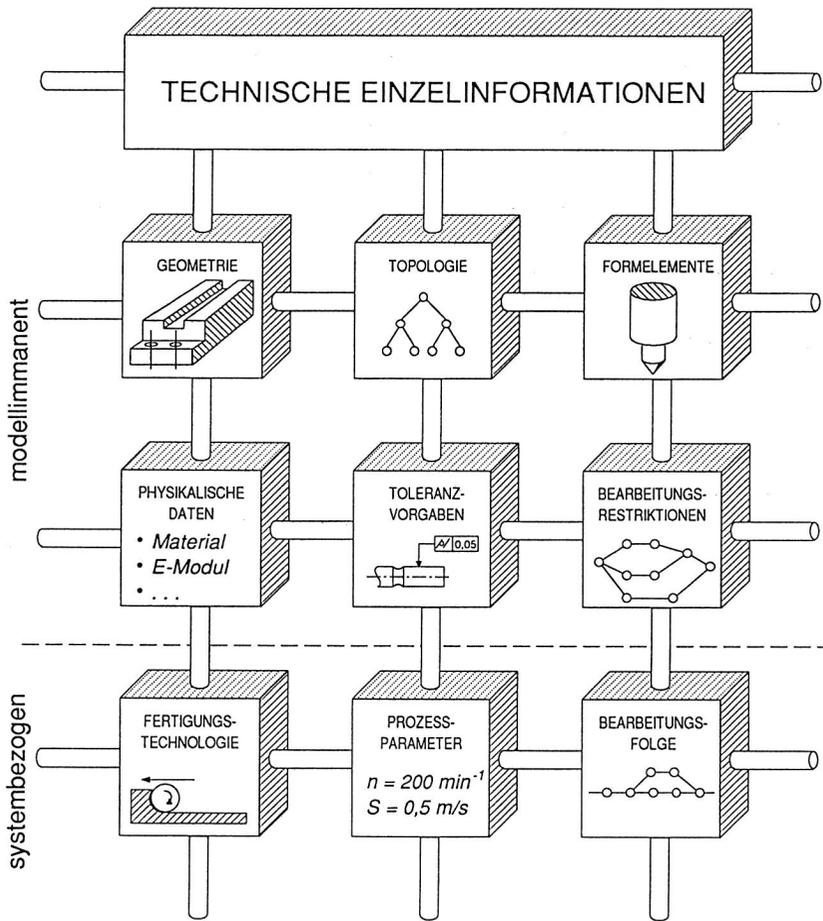


**Bild 4-2:** Basisinformationen und Ergebnis der Montageplanung

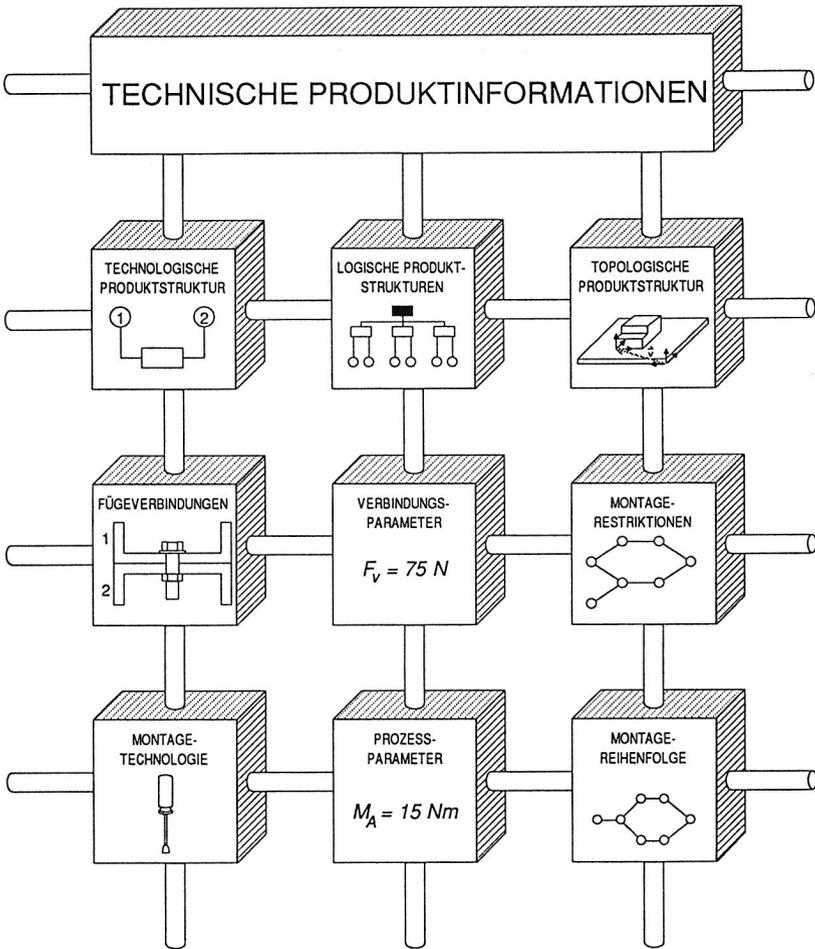
### ***Informationen zur Beschreibung der Montageaufgabe***

Die Basisinformationen zur Beschreibung der Montageaufgabe sind zum Teil bereits implizit in den Konstruktionsunterlagen eines zu montierenden Produktes enthalten. Es handelt sich dabei um technische, technologische, strukturelle sowie geometrisch und topologische Informationen von Einzelteilen, Baugruppen oder Erzeugnissen. Um diese Informationen möglichst effizient bei der Planung nutzen zu können, ist es erforderlich, sie explizit verfügbar zu machen und die Möglichkeit zu schaffen, sie im Rahmen der Planung um weitere nicht unmittelbar aus den Konstruktionsunterlagen hervorgehenden Daten zu ergänzen. Daher ist die inhaltliche Erweiterung des in der Produktkonstruktion verwendeten Modells um die aufgezeigten Informationen (Bild 4-3 und Bild 4-4) notwendig.

Einzelteilbezogene Informationen sind hauptsächlich für die Teilefertigung relevant, während die aus montagetechnischer Sicht relevanten Informationen sich darüber hinaus auf Baugruppen- beziehungsweise Produktebene erstrecken.



**Bild 4-3:** Erweiterter Informationsinhalt auf Einzelteilebene



**Bild 4-4:** Erweiterter Informationsinhalt auf Baugruppen- und Erzeugnisebene

### ***Informationen zur Beschreibung der Ressourcen***

Der zweite Teil abzubildender Eingangsinformationen bezieht sich auf die Beschreibung potentieller Ressourcen zur Durchführung der gestellten Aufgabe.

Mit Hilfe einer problemangepaßten Informationsabbildung auf ein Modell soll die Möglichkeit geschaffen werden, eine effiziente Zuordnung zwischen den auszuführenden Funktionen und den Funktionsträgern zu unterstützen. Dazu ist es erforderlich, daß sowohl produkt- als auch ressourcenbeschreibende Modelle kompatibel sind.

Für die Planung der automatisierten Montage ist die Beschreibung der Montagemittel von besonderer Bedeutung. Je nach Klassifikation der Komponenten und der jeweiligen Planungsaufgabe gibt es unterschiedliche Schwerpunkte der Informationsabbildung (Bild 4-5). Hinzu kommt die Abbildung flächen- und raumbezogener Informationen, die ebenfalls auf ein geeignetes Modell abgebildet werden sollen.

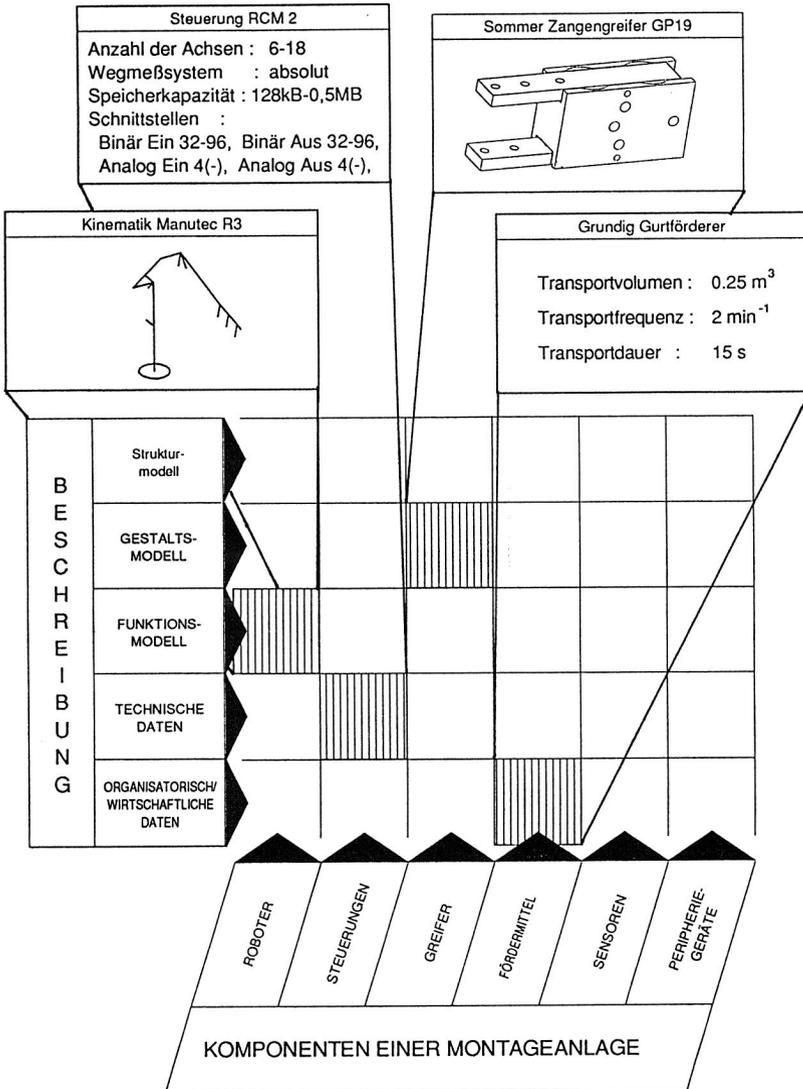


Bild 4-5: Informationen zur Beschreibung der Ressourcen

## 5. Integriertes Modellkonzept zur Informationsabbildung und -verarbeitung

Aufbauend auf der Analyse bestehender Systeme (vgl. Kapitel 3) sowie den dargestellten Anforderungen an ein Informations- und Planungssystem für die Montageplanung (vgl. Kapitel 4) wird ein Modellkonzept vorgestellt, mit dem eine Integration der Anwendungen bei gleichzeitiger Überwindung der angesprochenen Schwachstellen möglich wird.

### 5.1 Grundlagen der Modellbildung

Unabhängig von den konkreten Verwendungszielen, die mit der Modellbildung verfolgt werden, lassen sich allgemeingültig drei Hauptmerkmale nennen, die den Modellbegriff charakterisieren:

#### ***Abbildung***

Modelle sind Abbildungen oder Repräsentationen natürlicher oder künstlicher Originale, die selbst wieder Modelle sein können. Originale können dem Bereich der Vorstellungswelt oder der physischen Wirklichkeit angehören. Als materielle Objekte können sie räumlich/zeitliche Vorgänge oder räumliche Konfigurationen darstellen. Originale und Abbildungen lassen sich durch natürliche oder maschinelle Informationsverarbeiter wahrnehmen oder unabhängig von der momentanen Wahrnehmung in operationalen Prozessen verarbeiten. Original und Modell werden als Attributklassen gedeutet, wobei Attribute des Modells Attributen des Originals zugeordnet werden [69].

Objektkonstituierende Elemente erfüllen je nach Betrachtung in einem Zusammenhang Attribut-Funktionen, in anderem Zusammenhang dagegen Individualfunktion. Aufgrund der grundsätzlichen Vertauschbarkeit werden Attribute jeweils kontextbezogen zu Attributen nullter Stufe, die zur Identifikation der Entität dienen und Attributen höherer

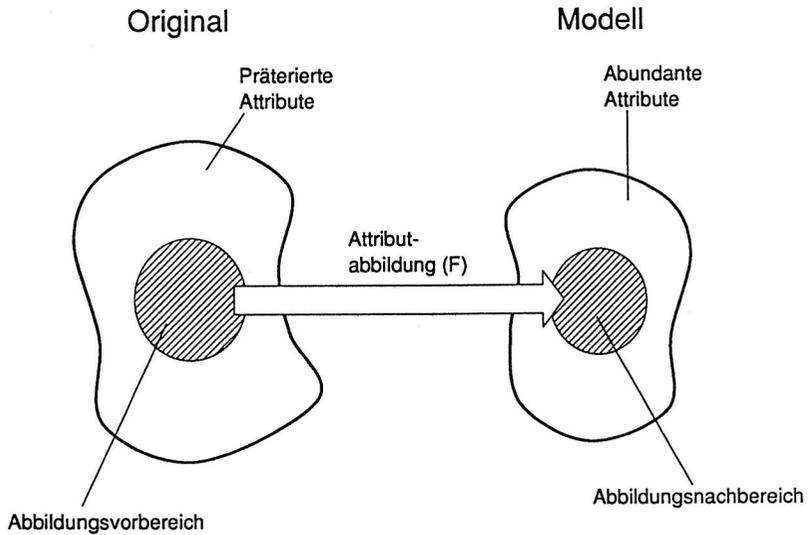
Stufen klassifiziert [69]. Attribute der ersten Stufe umfassen Eigenschaften der Entitäten und Beziehungen zwischen den Entitäten. In der zweiten Stufe können Eigenschaften von Eigenschaften, Eigenschaften von Beziehungen, Relationen zwischen Eigenschaften und Relationen zwischen Relationen abgebildet werden.

Die den entitätsbeschreibenden Attributen zugeordneten Symbolisierungen heißen Prädikate, wobei auch hier eine stufenweise Unterscheidung in o.g. Sinne erfolgen kann. Aufgrund dieser Unterscheidung wird die Anwendung einer formalisierten Prädikatenlogik auf Objekt und Prozeßdarstellung sowie die Durchführung logischer Operationen möglich.

Zu jeder Attributklasse wird mindestens eine sie elementweise repräsentierende Prädikatklasse angenommen, wobei vorausgesetzt wird, daß beide Klassen endlich sind. Attribut- und Prädikatklassen können darüber hinaus Systeme bilden, deren Elemente miteinander in einer Relation stehen.

### **Reduktion**

Modelle erfassen im allgemeinen nicht alle tatsächlichen Attribute des durch sie repräsentierten Originals, sondern nur solche, die im Hinblick auf die Nutzung des Modells relevant erscheinen. Die Gesamtheit der objektbeschreibenden Attribute besteht demnach aus einem *Abbildungsvorbereich* und den sogenannten *präterierten* Attributen, die bei der Modellbildung übergangen beziehungsweise ausgelassen werden. Insofern repräsentiert der *Abbildungsnachbereich* eine Teilmenge der Real-Objektattribute (Bild 5-1). Das Modell als solches kann jedoch zusätzlich durch Attribute gekennzeichnet sein, denen keine Attribute auf der Seite des Originals entsprechen. Solche modellseitigen Attribute werden *abundante Attribute* genannt, da sie im Hinblick auf die Original- Abbildung keinerlei unmittelbare Funktionen haben. Abundante Attribute werden hauptsächlich als technisches Hilfsmittel der Modellkonstruktion und -verwaltung verwendet.



**Bild 5-1:** Die Original-Modell Abbildung [67]

### **Pragmatischer Aspekt**

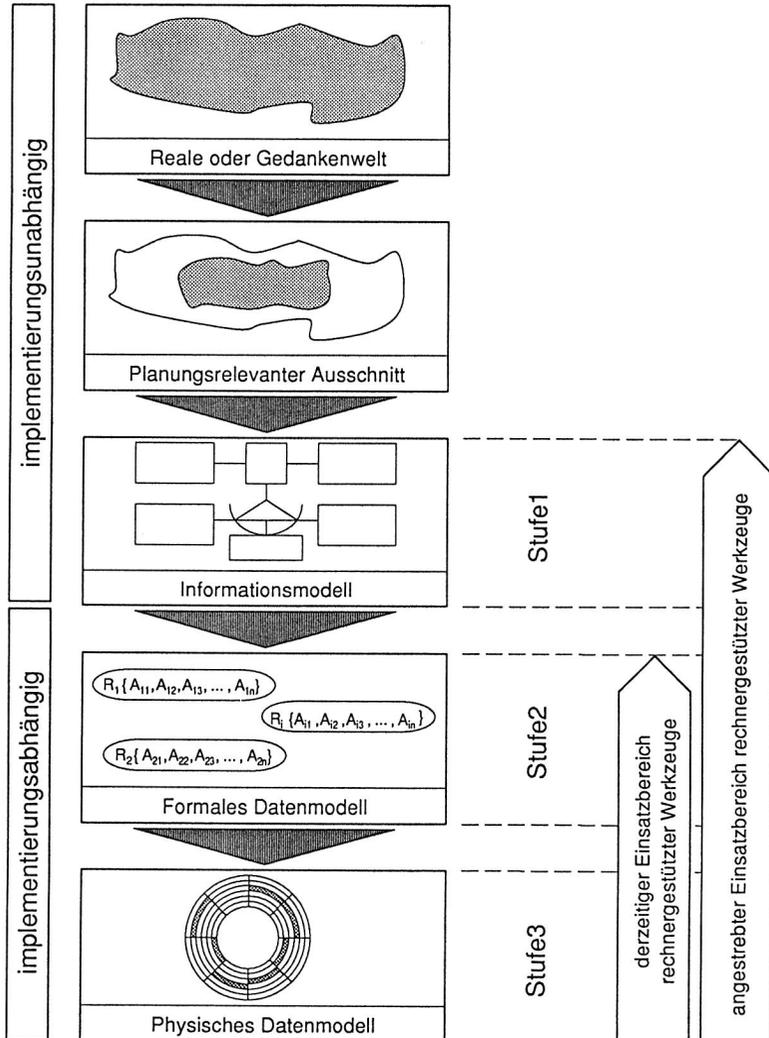
Die Reduktion der auf das Modell abzubildenden Eigenschaften erfolgt unter Berücksichtigung der pragmatischen Anforderungen. Modelle sind ihren Originalen nicht per se zugeordnet, sondern erfüllen Ersetzungsfunktionen für erkennende und/oder handelnde Subjekte unter Einschränkung auf tatsächliche Operationen innerhalb bestimmter Zeitintervalle. Aus pragmatischer Sicht muß daher bei der Frage *wovon* etwas Modell ist auch das *für wen*, *wann* und *wozu* spezifiziert werden. Letztendlich wird also die theoretisch/praktische Erkenntnis über die Eigenschaften des Originals sowie das Verhältnis von Aufwand zu Nutzen bei der Abbildung über den Inhalt und den Umfang des Modells entscheiden. Für die Abbildung bestimmter Informationen aus der

realen- oder Gedankenwelt auf ein rechnerinternes Modell ist ein mehrstufiges Vorgehen sinnvoll, dessen Schnittstellen voneinander abgegrenzt sind (Bild 5-2).

In der obersten Stufe wird unabhängig von möglichen Realisierungen die Semantik des relevanten Informationsausschnittes erfaßt und abgebildet. Dieses *infologische Modell* wird in der Regel ohne Rechnerunterstützung entworfen und mehr oder weniger systematisch dokumentiert.

Die zweite Abbildungsstufe umfaßt die Umsetzung des Informationsmodells auf ein konkretes Datenmodell. Dabei entscheidet der grundsätzliche Aufbau und die Funktionalität des verwendeten Datenmodells weitgehend über das Maß und die Güte der Umsetzung von *Stufe 1* zu *Stufe 2*. Wenn das Informationsmodell ohne Rechnerunterstützung entworfen wird, muß der Benutzer, in diesem Fall der Systementwickler, die Datenmodellierung in Abhängigkeit des verwendeten Datenmodells selbst durchführen und ist so auch für die Handhabung abundanter Informationen auf Modellebene selbst zuständig.

Die dritte Stufe der Abbildung umfaßt schließlich die Umsetzung des Datenmodells auf die physikalische Speicherebene. Diese Umsetzung erfolgt automatisiert durch das *DBMS* des zugrunde liegenden Datenmodells in Zusammenhang mit dem verwendeten Betriebssystem. Die Betrachtung konzentriert sich daher im weiteren auf die beiden ersten Stufen sowie den Übergang von *Stufe 1* nach *Stufe 2*.



**Bild 5-2:** Abstraktionsstufen der Modellbildung

## 5.2 Generierung des Informationsmodells

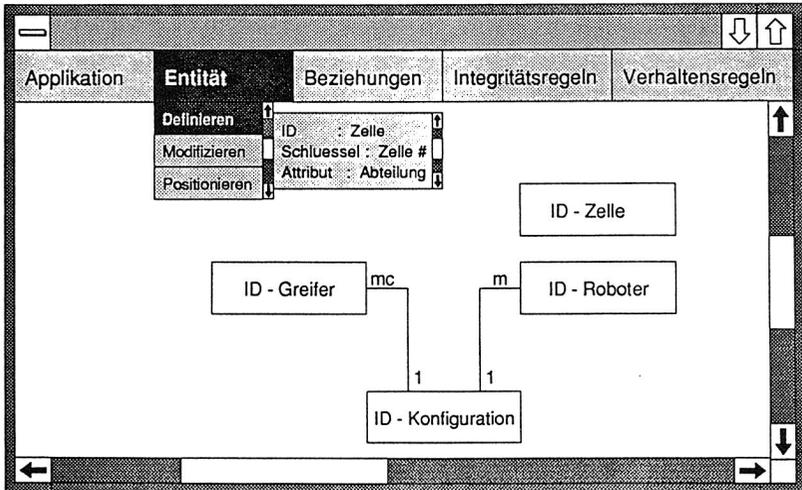
Da die Analyse planungsrelevanter Realitätsausschnitte und die Abbildung dieser Informationen auf ein *infologisches* Modell bislang nur unzureichend durch Rechnereinsatz unterstützt wird, aber gerade dieser Schritt der Informationsmodellierung alle weiteren Schritte grundlegend beeinflusst, ist eine systematische Unterstützung erforderlich. Mit einem speziellen Werkzeug soll eine exakte Erfassung, Abbildung und Dokumentation relevanter Umweltausschnitte ermöglicht werden. Die systematisierte, rechnerinterne Darstellung des Informationsmodells soll zudem Grundlage für eine automatisierte Umsetzung des abgebildeten Realitätsausschnittes auf ein konkretes Datenmodell sein.

### 5.2.1 Abbildung von Informationstrukturen

Basis des Informationsmodells ist ein erweitertes *Entity/Relationship*-Modell (*E/R*-Modell) [70], das rechnergestützt über eine graphische Benutzeroberfläche erzeugt und rechnerintern verwaltet wird (Bild 5-3). Zur Modellbildung stehen dem Benutzer die Grundkonstrukte *Entity* (für Objekte/Individuen) und *Relationship* (für Beziehungen zwischen den Entitäten) zur Verfügung, mit denen er zunächst den relevanten Umweltausschnitt modellieren kann.

Durch Auswahl der gewünschten Symbole kann der Benutzer das gewünschte Konstrukt, zunächst die Entitäten, auswählen und in dem Arbeitsfeld positionieren. Daraufhin erscheint eine alphanumerische Eingabemaske, in der der Benutzer die Entität namentlich spezifizieren muß. Dieser Name wird vom System bei der Eingabe auf Eindeutigkeit geprüft. Optional ist eine textuelle Beschreibung.

Beziehungen zwischen den Entitäten werden durch Kanten dargestellt. Diese Konstrukte referenzieren entweder Objektklassen oder andere Beziehungen, die aus dieser Sicht wieder Entitätsfunktion übernehmen (vgl. Kap. 5.1). Die Identifizierung der referenzierten Entities kann graphisch oder durch Eingabe des bezeichnenden Namens



**Bild 5-3:** Graphisch unterstützte Benutzeroberfläche zur Abbildung des Informationsmodells

erfolgen. Als Erweiterung des ursprünglichen Ansatzes im Hinblick auf die Abbildung hierarchisch strukturierter Objekte kann eine Aggregations- oder Generalisierungshierarchie durch die besonderen Beziehungstypen *part-of* und *is-a* eingeführt werden, die spezifizierende oder generische Merkmalklassen kennzeichnen. Die Angabe des jeweiligen Beziehungstyps - *1:n*, *1:m*, *1:nc* oder *1:mc*- wird über ein Menü eingegeben.

Nach der globalen Konfiguration werden die Entity- und Relationship-Klassen durch spezifizierende Attributklassen ergänzt. Der Benutzer kann über eine weitere Eingabemaske beschreibende Merkmale und den Typ des Merkmals angeben. Durch Benennung eines oder einer Kombination von Attributen als natürlichen Identifikationschlüssel werden diejenigen Attribute gekennzeichnet, durch die sich die Instanzen mindestens unterscheiden müssen. Auf diese Weise wird zunächst die Eindeutigkeit der Instanzen gewährleistet. Zulässige Attributtypen sind über die konventionellen Typen

wie *Charakter*, *String*, *Number* etc. hinaus auch frei vom Benutzer definierbare Datentypen und für CAD-Anwendungen der Datentyp *Gestalt* und *Matrix* beziehungsweise *Vektor*. Ihre Funktion und Verwendung wird später näher erläutert.

Mit Hilfe dieses rechnergestützten Entwurfswerkzeuges kann somit zunächst der planungsrelevante Umweltausschnitt systematisch erfaßt und dargestellt werden. Sowohl das erzeugte Graphikmodell als auch die zugehörige Beschreibung kann über einen Plotter oder Drucker ausgegeben werden.

## 5.2.2 Abbildung von Integritätsbedingungen

Einer der wesentlichen Aspekte beim Aufbau eines umfassenden, mehrbenutzerfähigen Informationssystems ist die Gewährleistung der Modellintegrität. Der Begriff Modellintegrität umfaßt dabei im weiteren Sinne die Korrektheit der abgebildeten Informationen an sich und bezüglich des betrachteten Umweltausschnittes. Diese Betrachtung kann sich sowohl auf diskrete statische Zustände als auch auf Zustandsübergänge erstrecken.

Da das in Kapitel 5.2.1 dargestellte Informationsmodell zunächst nur die Möglichkeit bietet, Strukturen abzubilden, soll das semantische Modell um Konstrukte zur Formulierung von Integritätsbedingungen erweitert werden. Die Begriffe Konsistenz und Datenintegrität werden in der Literatur vielfach synonym verwendet [71]. Für die nachfolgenden Ausführungen soll zwischen formaler, modellimmanenter und modellexterner Ebene unterschieden werden:

- unter modellimmanenter Konsistenz soll die Widerspruchsfreiheit der im Modell enthaltenen Informationen auf formaler, modellimmanenter Ebene verstanden werden. Damit können zum einen bestimmte Zustände und zum anderen auch Zustandsübergänge (operationale Konsistenz) subsumiert werden. Kennzeichen dieser Art von Integritätsbedingungen ist, daß sie relativ stark an den Modellentwurf gebunden sind und über die Laufzeit der Applikation invariant sind.

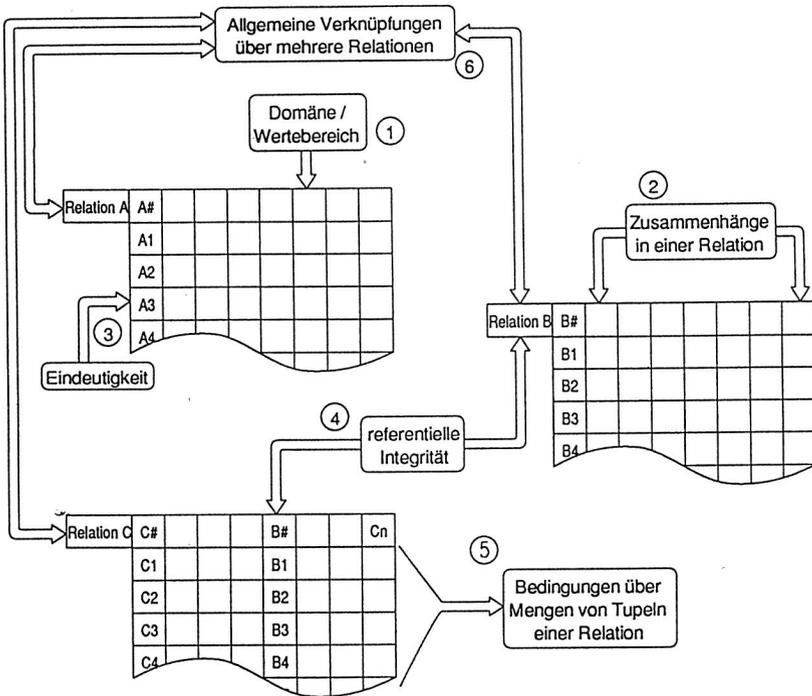
- demgegenüber soll der Begriff modellexternen Konsistenz beziehungsweise Integrität weiter gefaßt werden. Damit wird das inhaltliche Übereinstimmen der Aussagen des Modells mit dem relevanten Realitätsausschnitt verstanden.

Die Formulierung der zur Kontrolle dieser Integrität notwendigen Bedingungen sind jedoch nicht ausnahmslos bei der Informationserfassung evident. Dies bedeutet, daß zusätzlich zu den Integritätsbedingungen, die für alle Repräsentanten einer Entitätsklasse gültig sind, vielfach auch zur Laufzeit einer Applikation semantische Integritätsregeln definiert werden müssen. Sie beziehen sich auf einzelne Individuen (Instanzen) und überwachen individuell deren Ausprägungen. Diese Art von Bedingungen sind sehr stark an die situative Planungsrestriktionen gebunden und daher erst während der Planungsphase formulierbar. Ihre Anwendung soll in Kapitel 5.4.3 erläutert werden. Zunächst konzentriert sich die Betrachtung auf die erste Gruppe von Konsistenzbedingungen, die unabhängig von den Instanzen gültig sind.

Eine dem erweiterten Entity/Relationship-Modell zugeordnete Integritätsbedingung  $I$  soll durch folgende Komponenten beschrieben werden [72]:

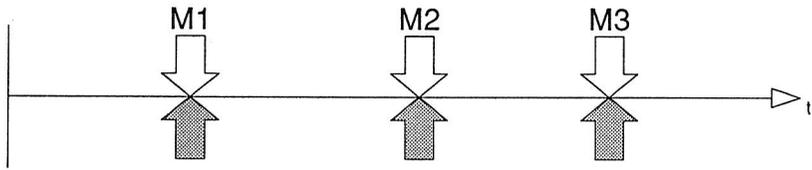
$$I = (O, A, C, R)$$

- (O) spezifiziert den Objektbezug der Integritätsregel. Dabei kann die Integritätsregel die in Bild 5-4 gezeigten Kontrollspannen haben [40]:
  - (1) statische Überwachung des Wertebereiches eines Attributes
  - (2) Kontrolle der Zusammenhänge von Attributen einer Relation (innerhalb eines Tupels)
  - (3) Überwachung der Eindeutigkeitsbedingung
  - (4) Kontrolle der referentiellen Integrität
  - (5) Überwachung von Bedingungen über Mengen von Tupeln einer Relation
  - (6) Überwachung von allgemeinen Bedingungen zwischen mehrere Relationen (allgemeine Verknüpfungen)

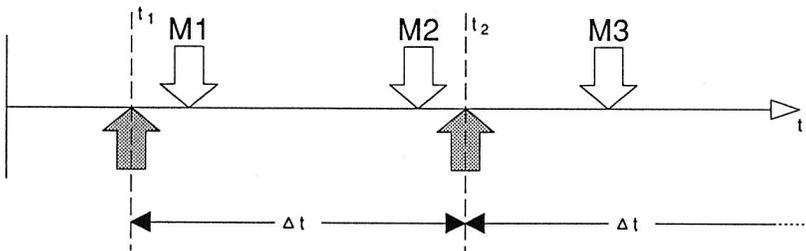


**Bild 5-4:** Reichweite von Integritätsregeln

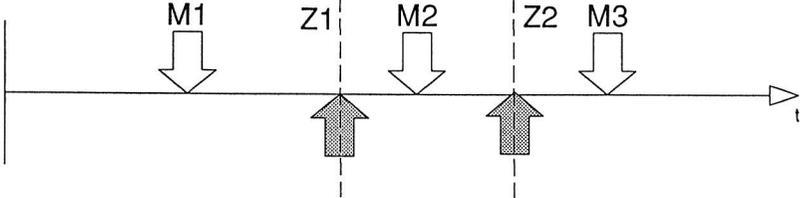
- (A) spezifiziert den auslösenden Faktor für die Überprüfung der Integrität. Grundsätzlich gibt es dazu zwei verschiedene Strategien: die *unverzögerte* und die *verzögerte* Auslösung der Überprüfung [73]. Sofern nicht die Manipulation selbst das auslösende Ereignis ist, können auch andere mittelbar oder unmittelbar abhängige zeit- oder benutzergesteuerte Ereignisse eine verzögerte Überprüfung auslösen (Bild 5-5).



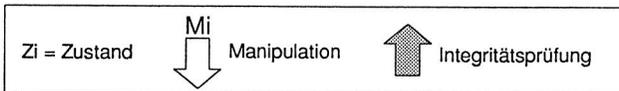
unverzögerte Überprüfung der Integrität



verzögerte Überprüfung der Integrität;  
zeitpunkt- oder zeitraumbezogene Auslösung der Integritätsprüfung



verzögerte Überprüfung der Integrität;  
zustandgesteuerte Auslösung der Integritätsprüfung



**Bild 5-5:** Strategien zur Überprüfung der Integrität

- (C) spezifiziert die Bedingungen, die die referenzierten Objekte oder deren Beziehungen untereinander zum Zeitpunkt der Überprüfung erfüllen müssen.
- (R) beschreibt die Reaktion, die auf die festgestellte Verletzung der Integrität ausgelöst wird. Dies kann die Ablehnung bestimmter Manipulationen sein oder die Rücksetzung auf den zuletzt gültigen Zustand. Als Reaktion können weitere Operationen, beispielsweise in Form von Prozeduren, angestoßen werden, die die Integrität wiederherstellen. Dies gilt insbesondere für eindeutige funktionale Zusammenhänge. Häufig ist aber nur eine Meldung an den Benutzer möglich, um ihn explizit zur weiteren Maßnahmen zu veranlassen.

Die Definition und Abbildung der Integritätsregeln auf das Informationsmodell wird ebenfalls durch die graphische Benutzeroberfläche unterstützt. Dabei gibt der Benutzer zunächst den Bezug und die Kontrollspanne der Integritätsbedingungen an (vgl. Bild 5-4). Daraufhin wird das auslösende Ereignis für die Überprüfung der Integritätsregel über Menü ausgewählt. Die Definition der für den Kontrollbereich zum Zeitpunkt der Überprüfung einzuhaltenden Bedingung kann durch algebraische oder mengentheoretische Ausdrücke erfolgen, ebenso wie die Formulierung der Aktionen, die im Falle des Nichterfülltseins der Bedingung ausgelöst werden soll (Bild 5-6).

Mit der Abbildung der Integritätsregeln wird primär das Ziel verfolgt, Regeln zu formulieren, die die formale und, sofern es an dieser Stelle möglich ist, die semantisch Integrität des Modells zu überwachen. Das grundsätzliche Systemverhalten des Modells bleibt passiv, d.h. es wird nur dann eine Reaktion erfolgen, wenn Integritätsbedingungen verletzt werden.

Eine weiterführende Überlegung ist es, die vorgestellten formalen Mechanismen über die reine Kontrolle hinaus zur Abbildung von Abhängigkeiten zu nutzen. Damit soll der Übergang von einem passiven zu einem aktiven Modell erfolgen, in dem bestimmte Ereignisse oder Zustände weitere Operationen im Sinne des Planungsfortschrittes automatisch initiieren.

Kennzeichnend für die Abbildung des Modellverhaltens ist die Spezifikation von Ereignissen in Bezug zu bestimmten Objekten, optional die Angabe von Bedingungen, die erfüllt sein müssen, um beim Eintreten eines Ereignisses eine Folgeaktion auszulösen sowie die Formulierung von Folgeaktionen. Man erkennt, daß dieses Konzept ähnlich dem zuvor beschriebenen Konzept zur Integritätsicherung ist, jedoch mit unterschiedlicher Intention. Diese Methoden können also auch zur Beschreibung logischer Abhängigkeitsbeziehungen zwischen unterschiedlichen Entitäts- oder Beziehungsklassen verwendet werden.

Zur Abgrenzung gegenüber den *Integritätsregeln* sollen diese Regeln *Verhaltensregeln* genannt werden. Die Definition dieser Regeln erfolgt ebenfalls über die in Bild 5-6 gezeigte Benutzeroberfläche.

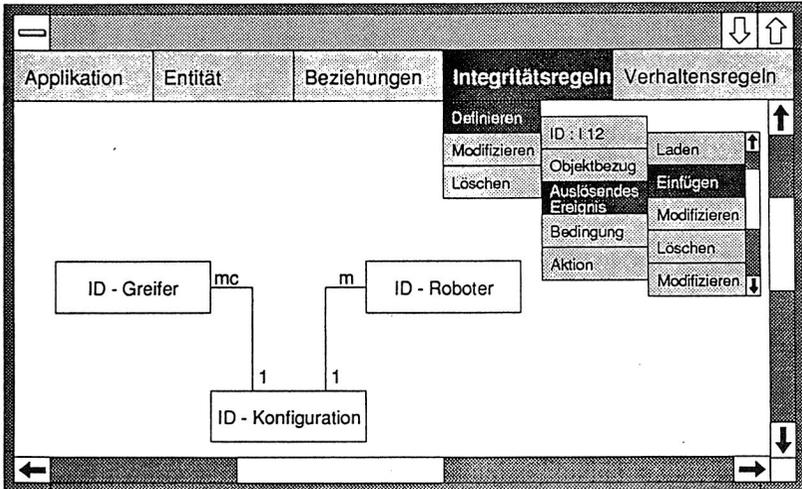


Bild 5-6: Abbildung von Integritätsregeln auf das Informationsmodell

## 5.3 Generierung des Datenmodells

Der nächste Schritt beim Aufbau eines Informationssystems ist die Umsetzung des semantischen Informationsmodells auf ein entsprechendes Datenmodell. Die Kritik an derzeit verfügbaren Datenbanksystemen (vgl. Kap. 3.1.2) hat gezeigt, daß die zugrunde liegenden Datenmodelle sowie die darauf aufsetzenden *DBMS* den gestellten Anforderungen nicht gerecht werden. Da Datenbanksysteme zur standardmäßigen Unterstützung dieser Anforderungen heute noch nicht verfügbar sind, soll die Umsetzung des Informationsmodells auf ein modifiziertes relationales Datenbanksystem erfolgen. Aufbauend auf einem relationalen Datenmodell sollen Methoden zur ganzheitlichen Objektverwaltung, der Integritätssicherung und der Abbildung des Objektverhaltens implementiert werden.

Wesentlicher Vorteil dieses Ansatzes ist, daß er sich aufgrund einer relationalen Schnittstelle relativ einfach mit bestehenden Applikationen verknüpfen läßt [74]. Dennoch sind auch hier einige Erweiterungen am Datenmodell erforderlich.

Um die Durchgängigkeit zwischen Informationsmodell und Datenmodell zu gewährleisten, wird an der Schnittstelle zwischen beiden Modellen ein Compiler eingesetzt, der automatisch den korrekten Aufbau des Datenmodells, insbesondere die Vergabe abundanter Attributklassen, unterstützt. Dieses Modul ist spezifisch auf das zu grunde liegende Datenmodell ausgerichtet.

### 5.3.1 Formale Aspekte

Die vom Grundsatz her wichtigste Erweiterung gegenüber konventionellen Datenbanksystemen ist die Einführung neuer Datentypen, die, entgegen der Forderung der ersten Normalform, nicht atomar sein müssen, sondern ebenfalls eine Struktur aufweisen können. Solche Datentypen können von definiertem Format sein, wie zum Beispiel Vektoren, Matrizen und Tensoren, oder vom Benutzer frei definiert, wie listen- oder mengenförmige Objekte, die intern wieder spezifisch strukturiert sein können. Zu

beachten ist dabei, daß die Methoden zur Manipulation der Daten ebenfalls typspezifisch sind und die Relationenalgebra nicht geeignet ist, um erforderliche Operationen an einem komplex strukturierten Attribut durchzuführen. Entsprechende Erweiterungen der Relationenalgebra speziell für Tensoroperationen sind zwar möglich [75], darüber hinaus sollen aber auch allgemeine abstrakte Datentypen zulässig sein, die vom Benutzer oder von anderen Systemen außerhalb der *DBMS* Umgebung definiert wurden. Mit den Methoden der Relationenalgebra besteht hier allerdings keine Möglichkeit mehr, die interne Struktur zu manipulieren. Diese Objekte werden lediglich unter die Verwaltung des *DBMS* gestellt; die Manipulation dieser Objektstrukturen erfolgt mit externen Mechanismen.

### 5.3.2 Umsetzung der Informationsstrukturen auf ein Datenmodell

Aus der systematischen Darstellung der Objektstrukturen in dem formalisierten E/R-Modell wurden auf der Basis des erweiterten Datenmodells einzelne Module entwickelt, die das Informationsmodell direkt in ein konkretes Datenmodell umsetzen.

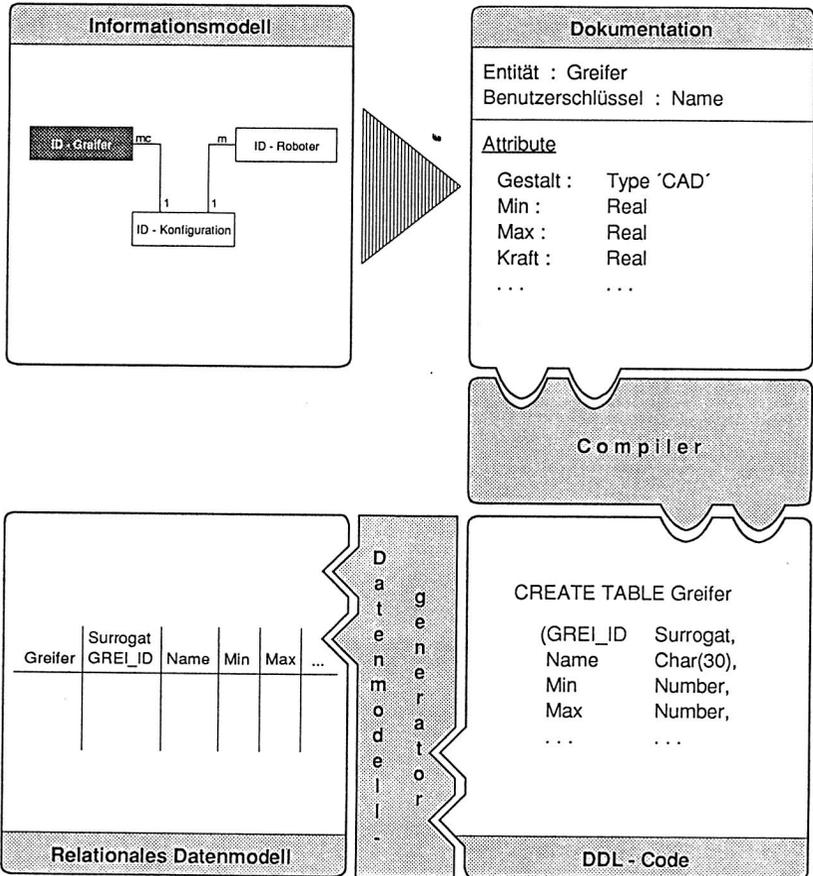
Dazu wird zunächst jede der zuvor definierten Relationen um ein abundantes Attribut ergänzt, dessen Ausprägung als eindeutiger Identifikator für jedes eingetragene Tupel gilt. Dieser Merkmalwert, Surrogat genannt, wird systemseitig vergeben und kontrolliert. Ein einmal verwendetes Surrogat wird nicht wiedervergeben, auch wenn das zugehörige Objekt gelöscht wird [75]. Die Zusammensetzung des Surrogates kann in Anlehnung an ein innerbetriebliches Identifikations- und Klassifikationssystem erfolgen, so daß bestimmte Objekttypen direkt erkannt werden können. Die Surrogatwerte können zwar vom Benutzer verwendet, aber nicht verändert werden.

Eine eindeutige Identifikation von Beziehungen zwischen verschiedenen Entitäten erfolgt durch die Kennzeichnung zusammengesetzter Surrogate der zugehörigen Entitäten, wobei die Komponenten hier auf gleicher Hierachiestufe stehen. Anders dagegen werden sogenannte hierarchische Beziehungen abgebildet. Hier werden die hierarchisch abhängigen Relationen durch Zuweisung des Fremdsurrogates der

übergeordneten Relation als spezielles Attribut gekennzeichnet. Damit lassen sich beliebig tiefe Strukturen aufbauen. Durch Übernahme der beiden Konstrukte *part-of* und *is-a* als Attribute in das Datenschema können die jeweiligen Referenzen erkannt und bezüglich Aggregations- oder Spezialisierungseigenschaften gedeutet werden. Dabei gelten die Eigenschaften übergeordneter Relationen automatisch für alle abhängigen Tupel.

Als weitere abundante Merkmale werden für Objekte mit Gestaltrepräsentation Statusattribute eingeführt, die den Zugriff auf ein Objekt regeln sollen. Ihre Vergabe erfolgt mit der Erstellung des Datenschemas; sie sollen in Kapitel 5.6 diskutiert werden.

Bild 5-7 zeigt beispielhaft die Umsetzung des Informationsmodells auf das Datenmodell mit Hilfe des Compilers, der speziell für das zugrunde liegende *DBMS* und die zugehörige *Data-Definition-Language (DDL)* entwickelt wurde.

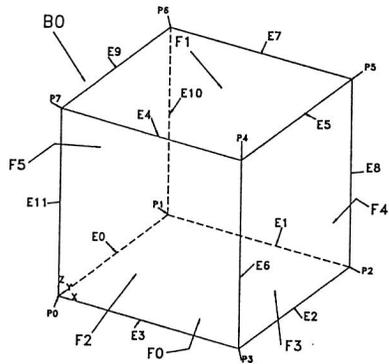


**Bild 5-7:** Umsetzung des Informationsmodells auf ein konkretes Datenmodell

### 5.3.3 Integration geometriebeschreibender Informationen

Ein zentrales Problem ist die aus Benutzersicht erforderliche Integration geometriebeschreibender Objektrepräsentationen. Im Hinblick auf ein einheitliches und konsistentes Datenmodell wäre es wünschenswert, sowohl alphanumerische als auch geometrie- oder gestaltbeschreibende Informationen auf dem in Kapitel 5.3.2 dargestellten erweiterten relationalen Datenmodell abzubilden. Das Konzept eines solchen Datenmodells für die Abbildung des Informationsmodells ist in Bild 5-8 anhand eines Beispiels aufgezeigt. Auf diese Weise kann ein dreidimensionales Objekt durch seine Begrenzungselemente Flächen, Kanten und Punkte beschrieben werden. Die Relation Einzelteil enthält alle zu verwaltenden dreidimensionalen Objekte, die durch einen Identifikator und weitere beschreibende Attribute gekennzeichnet sind. In der Relation Fläche sind sämtliche zu dem Objekt zugehörigen Flächen mit ihrer Beschreibung aufgelistet; die Relation Kante enthält die den Flächen zugeordneten Kanten mit Start- und Endpunkt sowie eventuell zugehörigen Beschreibungen. Letztendlich werden in der Relation Punkte alle kantenbegrenzenden Punkte mit Identifikator, Koordinaten sowie zusätzlichen Attributen verwaltet. Für den graphischen Aufbau dieses einfachen Teiles müssen nun umfangreiche Verbundoperationen durchgeführt werden, da die Struktur des Körpers lediglich über assoziative Selektoren beschrieben ist [76]. Untersuchungen haben ergeben, daß der Zeitaufwand für den Aufbau eines solchen einfachen Elementes aus den Relationen des Datenbankschemas um den Faktor vierzig höher gegenüber konventionellen CAD-Modellierern mit speziellen verzeigerten Datenstrukturen liegt. Die Ergebnisrelation stellt dabei aber zunächst nur die Basiselemente des Objektes zur Verfügung, nicht aber die Struktur, deren Kenntnis für technische Anwendungen notwendig ist.

Eine wesentlich effizientere Möglichkeit der aus Benutzersicht erforderlichen Datenintegration soll durch die Einführung eines *hybriden* Datenmodells erfolgen. Bei diesem Ansatz werden die im Informationsmodell enthaltenen, geometriebezogenen Entitäten und Beziehungen auf ein konventionelles CAD-Datenmodell abgebildet.



Körper	Körper_ID	Beschreibung	Flächen	Körper ID	Flächen ID	Flächennormale (Vektor)
	B0	Würfel		B0	F0	(0,0,-1)
				B0	F1	(0,0,1)
				B0	F2	(0,-1,0)
				B0	F3	(1,0,0)
				B0	F4	(0,1,0)
				B0	F5	(-1,0,0)

Kanten	Körper ID	Kanten ID	Anfangs-punkt	End-punkt	Punkte	Körper ID	Punkte ID	Koordinaten (Vektor)
	B0	E0	P0	P1	B0	P0	(0,0,0)	
	B0	E1	P1	P2	B0	P1	(0,250,0)	
	B0	E2	P2	P3	B0	P2	(250,250,0)	
	B0	E3	P3	P0	B0	P3	(250,0,0)	
	B0	E4	P7	P4	B0	P4	(250,0,250)	
	B0	E5	P4	P5	B0	P5	(250,250,250)	
	B0	E6	P4	P3	B0	P6	(0,250,250)	
	B0	E7	P5	P6	B0	P7	(0,0,250)	
	B0	E8	P5	P2				
	B0	E9	P6	P7				
	B0	E10	P1	P6				
	B0	E11	P0	P7				

**Bild 5-8:** Abbildung eines dreidimensional dargestellten Objektes auf ein relationales Datenmodell

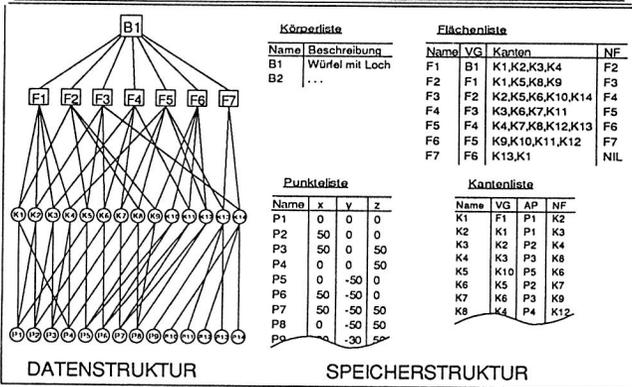
Aufgrund der Einführung neuer Datentypen im erweiterten relationalen Datenmodell, die nicht mit den Manipulationsmethoden des Datenbankmanagementsystems sondern auch mit externen Mechanismen definiert und manipuliert werden können, wird das CAD-Datenmodell als komplexes Attribut mit eigener Struktur verwaltet (Bild 5-9). Die Generierung der Gestalt eines Objektes sowie sämtliche Manipulationen an der Gestalt des Objektes erfolgen ausschließlich mit den Modellier- beziehungsweise Manipulationsfunktionen des CAD-Systems. Als CAD-Modelle werden 2D- und 3D-Volumenmodelle mit *Boundary Representation* Darstellung (*B-Rep*-Modelle) verwendet.

Dem Datenbankbenutzer erscheint das Attribut Gestalt zunächst als monolithische Einheit, das er mit den Manipulationsmöglichkeiten des DBMS nur als Ganzes behandeln kann. Zulässige Operationen auf dieser Ebene können Lösch- oder Kopierfunktionen sein, falls der Benutzer entsprechende Rechte dazu hat. Operationen, die sich auf die Gestalt des Körpers oder dessen topologische Datenstruktur beziehen, lassen sich von dieser Ebene aus nicht durchführen. Attribute, die sowohl das Objekt als Ganzes als auch einzelne Geometrielemente näher beschreiben und außerhalb der CAD-Umgebung bereitgestellt werden sollen, werden als explizites Attribut im Schema des relationalen Datenmodells verwaltet. Die dadurch möglichen Inkonsistenzen zwischen dem Gestaltmodell und der alphanumerischen Beschreibung, die nach bestimmten Manipulationen auftreten können, werden durch den Einsatz von Triggermechanismen kontrolliert.

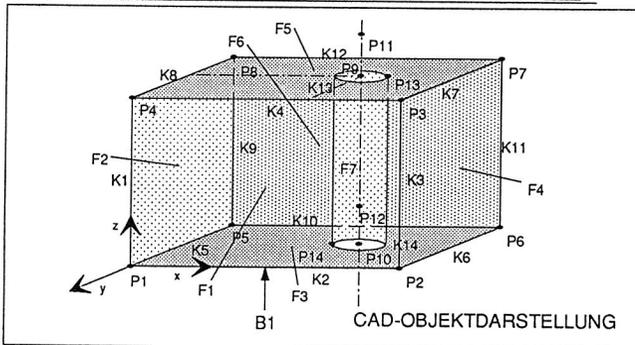
Relation Einzelteile	ID	Gestalt	Werkstoff	....
	B0		ST52	....
	B1		ST37	....
	B2		CrMb	....

DB - EBENE

Abbildung



Abbildung



CAD - EBENE

Bild 5-9: Hybrides CAD/DB-Datenmodell

## 5.4 Einsatz von Triggermechanismen

Zur Kontrolle von Redundanzen, Integritätsbedingungen und wechselseitigen Abhängigkeiten wird das Datenmodell mit sogenannten Triggermechanismen erweitert.

### 5.4.1 Konzept und Wirkungsweise

Unter einem Trigger versteht man im weiteren Sinne ein Signal, das eine bestimmte Operation auslöst. Das Grundkonzept für den Einsatz in Datenbanksystemen wird in [77] vorgestellt. Nach dieser Definition setzt sich ein Trigger aus den zwei Komponenten

- \* *Bedingung* und
- \* *Rumpf*

zusammen. Bei Erfüllung der Bedingung wird der Rumpf, der die Triggerprozedur enthält, zur Ausführung gebracht. Mögliche Triggerbedingungen können sein:

- (1). Vor oder Nach der Ausführung einer bestimmten Operation
- (2). Eintreten eines bestimmten Zustandes
- (3). Auftreten eines bestimmten Zustandsüberganges.

Auslösend für einen Trigger ist stets die Ausführung einer genau zu spezifizierenden Operation auf das Modell oder eine Bedingung über einen oder mehrere Zustände. Diese Definition ermöglicht die starre Verkettung zwischen Bedingung und beabsichtigten Reaktionsmechanismen.

Ein flexibleres Konzept beinhaltet der *Event/Trigger Mechanismus* [78], der sich aus drei Komponenten:

- \* *Ereignis*,
- \* *Aktion* und
- \* *Trigger*

zusammensetzt.

Ein *Ereignis* definiert und indiziert eine Situation, in der eine spezielle Reaktion des Datenbanksystems erforderlich sein kann. Im Gegensatz zu der Definition von Eswaran ist hier das Ereignis nicht weiter eingeschränkt. Ereignisse können beliebig vom Benutzer definiert und ausgelöst werden und müssen sich nicht unmittelbar aus dem Datenbankzustand oder den aktuell ausgeführten *Data-Manipulation-Language (DML)* Operationen ableiten lassen.

Ereignisse lassen sich nach der Art des Erkennens klassifizieren, so daß sich die folgende Gruppierung ergibt [79]:

- (1) Ereignisse, die durch Eintreten einer zugehörigen Bedingung intern im System erkannt werden können und
- (2) Ereignisse, deren Eintreten der Benutzer beziehungsweise ein Anwendungsprogramm kennt und folglich explizit durch eine externe Instanz signalisiert werden.

*Aktionen* sind beliebige Programmodule, die als Reaktion auf Ereignisse zur Ausführung gebracht werden können. Die Definition kann in einer höheren Programmiersprache erfolgen, in die wiederum Datenbankanweisungen eingebettet sein können.

Aktionen sind vergleichbar mit Prozeduren. Sie können einerseits als Teil eines Triggers spezifiziert sein, andererseits als eigenständiges Programmmodul aufgerufen und ausgeführt werden. Jede Aktion kann in verschiedenen Triggern verwendet werden.

*Trigger* verbinden das Ereignis mit der notwendigen Aktion. Ein Trigger  $T$  ist definiert als ein Paar  $(E, A) = T$  aus Ereignis  $E$  und einer Aktion  $A$ . Unmittelbar nach Auslösung von  $E$  wird die Aktion  $A$  ausgeführt. Trigger können aktiviert und deaktiviert werden, d.h. zwischen Ereignis und Aktion besteht eine lose Koppelung. Ein deaktivierter Trigger hat keine Wirkung. Durch Löschen des Triggers wird die Koppelung gelöst, ohne daß das Ereignis mit zugehöriger Aktion entfernt werden muß. Durch Definition von neuen Triggern können beide Komponenten mit neuen Partnern verbunden werden.

Eine Verbindung der beiden vorgestellten Konzepte würde einen Triggermechanismus erzeugen, der bei Eintreten des Ereignisses die Bedingung überprüft und abhängig vom Ergebnis der Auswertung die Aktion auslöst oder nicht.

Die Überwachung der Bedingungen erfolgt durch die Definition sogenannter Dämonen [72]. Durch sie ist ein bedingtes Auslösen der entsprechenden Aktionen möglich. Dämonen stellen voneinander unabhängige, autonome Instanzen dar, die jeweils überwachen, ob eine bestimmte Situation im System eingetreten ist und bei Eintritt dieser Situation geeignete Aktionen auslösen. Dämonen beziehen sich dabei auf einen Zustand oder Zustandsübergang im Grundsystem (Datenbanksystem, CAD-System). Die Deklaration des Dämonen findet dabei jedoch stets innerhalb der Ereigniskomponente statt. Zwischen Dämon und Ereignis besteht dadurch eine starre, unflexible Bindung. Für individuelle Anwendungen ist eine lose Koppelung aller drei Komponenten erforderlich, so daß für die Integritätssicherung, durch Variation von Ereignissen, Bedingungen und Aktionen, zahlreiche Definitionsmöglichkeiten zur Verfügung stehen. Dies soll durch den Einsatz sogenannter *ECA*-Regeln (*Event*, *Condition*, *Action*) ermöglicht werden [80],[81]. Der *Event*-Teil einer *ECA*-Regel beschreibt Operationen, Ereignisse oder Signale; der *Condition*-Teil spezifiziert Bedingungen und die *Action*-Komponente verweist auf Programmodule, die je nach Bedingung ausgeführt werden. Die Definition der drei Komponenten kann unabhängig voneinander erfolgen. Sie können durch eine beliebige Referenzierung miteinander verknüpft werden.

Durch diese lose Koppelung entstehen folgende Vorteile:

- (1) Die Definition der Trigger ist dynamisch änderbar. Durch zahlreiche Koppelungsmöglichkeiten von Ereignissen, Bedingungen und Aktionen können Konsistenzprüfungen und Reaktionen auf ein Ereignis variiert werden, so daß sich beliebige Ablaufstrukturen ergeben.
- (2) Die auf eine festgestellte Inkonsistenz notwendigen Folgeaktionen können beliebig erweitert beziehungsweise reduziert werden (Aktivieren/Deaktivieren von Triggern).

- (3) Konsistenzbedingungen können bei geänderten Bedingungen unkompliziert erweitert und mit den bestehenden Ereignisdefinitionen verbunden werden.

Auf der Grundlage der vorgestellten Basiskonzepte können damit alle zuvor genannten Forderungen zur Überwachung der Integrität sowie die Forderung nach Abbildung bestimmter Verhaltensregeln auf das erweiterte Datenmodell abgebildet werden. Da die Grenze zwischen formaler Konsistenz und semantischer Integrität fließend ist und die Triggermechanismen je nach Anwendungsfall für beide Einsatzzwecke verwendet werden können, sollen im Hinblick auf eine Implementierung der Zeitpunkt und die Definitionsmöglichkeiten eines Triggers in den Vordergrund gestellt werden.

#### 5.4.2 Global gültige Trigger

Als global gültige Trigger werden umfassend alle Mechanismen definiert, die bereits beim Systementwurf berücksichtigt und abgebildet werden und für die gesamte Lebensdauer einer Applikation invariant sind. Sie können sowohl zur Aufrechterhaltung formaler Konsistenzregeln als auch zur Überwachung der semantischen Integrität eingesetzt werden. Systemreaktionen können dabei konditional oder bedingungslos in Abhängigkeit bestimmter Ereignisse ausgelöst werden. Ausgangspunkt der Definition eines Triggers ist die Spezifikation systemseitig erkennbarer Ereignisse oder Zustände, die eine Systemreaktion auslösen. Mögliche Ereignisse für das definierte Datenmodell sind primär sämtliche Operationen, die Daten einfügen, verändern, lesen oder löschen. Darüber hinaus sollen der Eintritt eines definierten Zeitpunktes und explizit für diesen Zweck definierte Benutzeraktionen als Auslösefaktor zugelassen werden. Als Objektbezug können je nach Kontrollspanne die in Bild 5-4 aufgezeigten Möglichkeiten definiert werden.

Auf das spezifizierte Ereignis können nun vor oder nach einer Operation beliebige Aktionen, die entweder direkt in der *DML* des Datenbanksystems oder aber in einer höheren Programmiersprache formuliert sind, aufgerufen und abgearbeitet werden.

Eine besondere Problematik stellt sich bei der Konsistenzerhaltung zwischen dem *CAD*-Datenmodell und den teilweise redundant mitgeführten Informationen auf der Ebene des Relationenschemas. Für diesen speziellen Fall werden auf sämtliche modifizierenden Operationen des *CAD*-Modellierers Trigger definiert, die nach einer Änderung des Gestaltmodells diejenigen Attributwerte, die von der Änderung betroffen sind und im Schema der Datenbank verwaltet werden, entsprechend aktualisieren. Mit Hilfe dieser Trigger können die wechselseitigen Abhängigkeiten zwischen den beiden Modellrepräsentationen vollständig kontrolliert werden (Bild 5-10). Der Zugriff auf die abgeleiteten Daten ist nur lesend erlaubt, da geometrieverändernde Modifikationen mit den Manipulationsmöglichkeiten der *Data-Manipulation-Language* des Datenbanksystems ohne visuelle Kontrolle am Gestaltobjekt nicht sinnvoll erscheinen. Die gleichen Triggermethoden können ebenso zur Sicherung semantischer Integritätsbedingungen herangezogen werden sofern sie bereits beim Systementwurf bekannt sind.

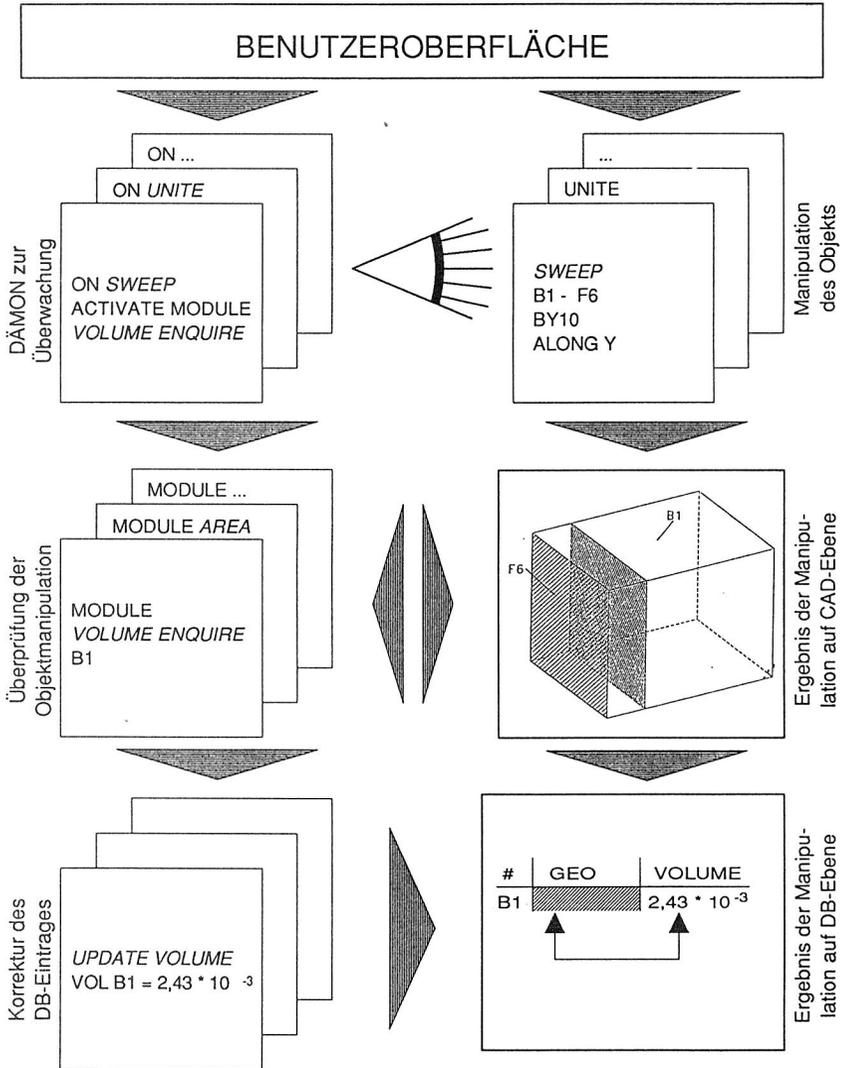


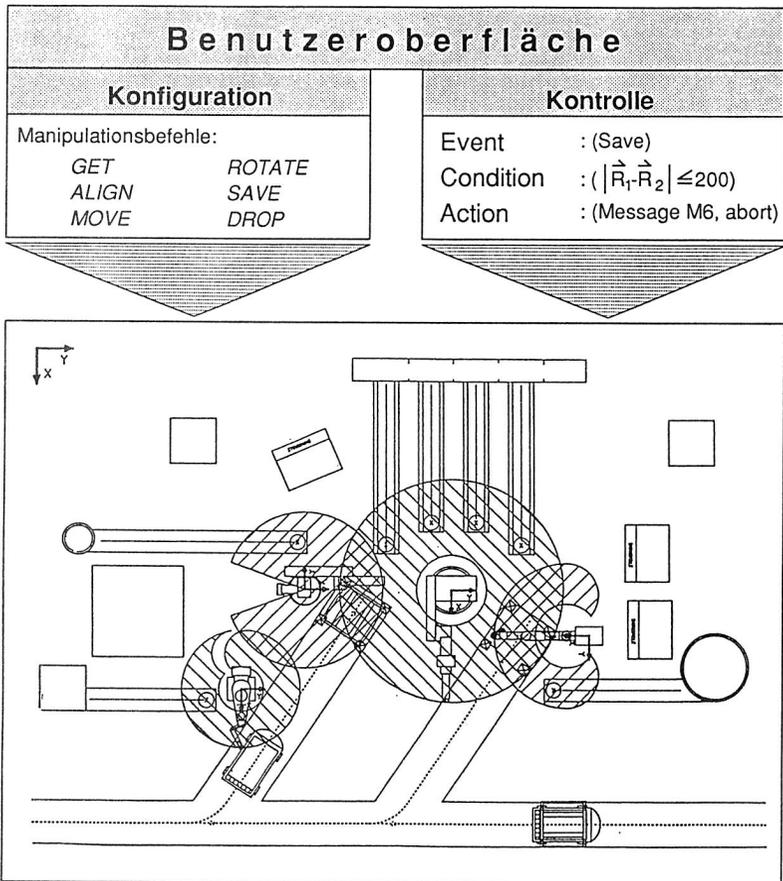
Bild 5-10: Einsatz von global gültigen Triggern

### 5.4.3 Flexible Trigger

Eine weitere Kategorie von Triggern soll speziell für die Aufgaben im Konstruktions- und Planungsbereich konzipiert und implementiert werden. Mit dieser Art von Triggern wird es möglich, innerhalb komplexer Planungsaufgaben Restriktionen und Beziehungen abzubilden, die sich auf einzelne, individuelle Objekte beziehen und die sich erst im Laufe des Planungsfortschrittes aus dem Kontext situativ ergeben. Primäres Einsatzziel dieser Trigger ist die Kontrolle von Konstruktions-, Konfigurations- und Planungsarbeiten mit dem geometrischen Modellierer. Ein Beispiel soll auch hier die besondere Problematik erläutern (Bild 5-11).

Bei der modellhaften Konfiguration einer Montagezelle aus mehreren zuvor ausgewählten Komponenten wird in einer der ersten Planungsphasen festgelegt, daß zwei bestimmte Roboter in einem genau spezifizierten Abstand zueinander aufgestellt werden müssen, um die geplanten Handhabungsfunktionen ausführen zu können. Unabhängig von der endgültigen Zellenkonfiguration kann der Benutzer diese einzuhaltende Bedingung auf das Modell abbilden. Systemseitig wird nun nach einer noch zu bestimmenden Strategie überprüft, ob die auf einzelne Objekte oder deren Beziehungen formulierten Bedingungen bei der weiteren Konfiguration eingehalten werden. Diese flexiblen Definitionsmöglichkeiten sind vor allem bei komplexen Planungsaufgaben, die sich über mehrere Arbeitssitzungen hinziehen oder bei Aufgaben, die von mehreren Benutzern mit unterschiedlichen Kenntnissen und Intentionen durchgeführt werden, von höchster Bedeutung.

Die Definition der flexiblen Trigger erfolgt über einen Menüaufruf während der Arbeitssitzung am CAD-Arbeitsplatz. Mit dem Befehl *Trigger definieren* bekommt der zu erstellende Trigger zunächst eine systeminterne Identifikation. Daraufhin kann der Benutzer das auslösende Ereignis für die Überprüfung auswählen. Möglich sind explizite und implizite Auslösemechanismen. Die explizite Auslösung wird vom Benutzer aktiviert. Damit hat er jederzeit während der Planung die Möglichkeit, den aktuellen Modellzustand auf definierte Bedingungen hin zu überprüfen. Eine implizite Auslösung kann an bestimmte Ereignisse oder Zustände, so zum Beispiel an das Ende einer



*Bild 5-11: Einsatz flexibler, benutzerdefinierter Trigger*

Arbeitsstation gebunden werden, wenn die Objekte aus der privaten Arbeitsumgebung wieder in den allgemein zugänglichen Speicherbereich transferiert werden sollen (vgl. dazu Kap. 5.6).

In einem weiteren Schritt kann der Benutzer flexibel Bedingungen definieren, die bei Eintritt der Ereignis/Zustands-Objektbeziehung ausgelöst werden. Diese Bedingungen werden in Form von Programmmodulen formuliert, die entweder direkt in das CAD-Modul eingebettet sind oder in einer höheren Programmiersprache formuliert wurden, zu der sowohl das DBMS als auch das CAD-System eine Schnittstelle besitzen. Weiterhin wird das/die Bezugsobjekt(e) spezifiziert. Zulässig sind dabei alle Elemente des CAD-Datenmodells, also Körper, Flächen, Kanten, Punkte, Hilfsgeometrien und beschreibende Attribute sowie deren logische und geometrische Beziehungen.

Im dritten Schritt schließlich können Aktionen definiert werden, die bei Nichterfüllung der spezifizierten Bedingungen ausgelöst werden. An dieser Stelle stehen die gleichen programmtechnischen Möglichkeiten wie bei der Definition der Bedingungen zur Verfügung. Das Spektrum der Reaktionsmöglichkeiten reicht dabei von der einfachen Ablehnung der intendierten Operation über die Abgabe von Fehlermeldungen, die den Benutzer auf Lokalität und Art der Integritätsverletzung aufmerksam machen, bis hin zur Ausführung bestimmter Programmmodule, die das Modell automatisch wieder in einen konsistenten Zustand überführen, sofern kausale Abhängigkeiten eindeutig formulierbar sind.

Bild 5-12 zeigt das Menü zur Definition der flexiblen Trigger. Durch die logischen Verweise zwischen Ereignissen, Bedingungen und Aktionen können beliebige Verknüpfungen zwischen den Triggerkomponenten hergestellt werden.

Die Verwaltung der flexiblen Triggermodule erfolgt über Relationen des DBMS. In einer Relation *Ereignis* werden sämtliche triggerauslösenden Ereignisse verwaltet. Über ein Attribut *Priorität* ist eine Bearbeitung der zugehörigen Bedingungsmodule nach einer vorgegebenen Präferenzordnung möglich. Ein zusätzliches *Aktivbit* wird automatisch bei der Aktivierung des Triggers gesetzt, um endlose rekursive Triggerungen zu verhindern. Die Relation *Bedingungen* verwaltet alle definierten Triggerbedingungen. In dieser Relation ist der Verweis auf die Bedingungsmodule abgelegt, die bei Bedarf aufgerufen und ausgewertet werden sollen.

DECTerm 2

Commands Edit Customize Help

Flexible Triggerkomponente

Ereignis

Identifikator: 1 Prioritaet: 1 Bedingung: 2

Beschreibung: SICHERN DES LAYOUTENTWURFFS

Bedingung

Identifikator: 2 Modul: STANDORTRESTRIKTIONEN Aktion: 4

Beschreibung: MINDESTABSTAND VON MESSZELLE ZU MAUERN > 5 M

Aktion

Identifikator: 4 Modul: KORREKTUR DER ZELLENSTANDORTE

Beschreibung: LAYOUTENTWURF NICHT SPEICHERN, AUSGABE ETNER FEHLERMELDUNG

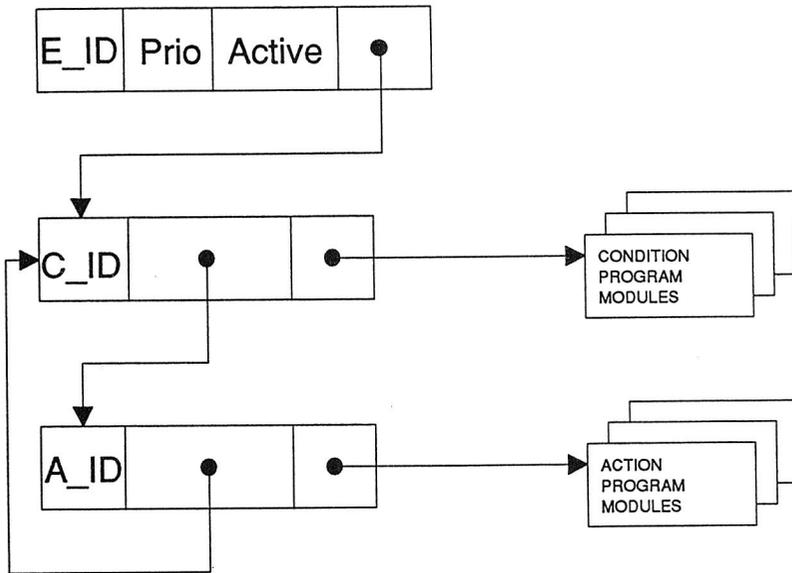
Suchen <select> Wechsel zwischen den Bloecken <pgup>/<pgdn> MIPS - FAPS

Char Mode: Replace Page 1 Count: \*0

**Bild 5-12:** Menü zur Definition der flexiblen Trigger

Die Relation *Aktionen* verwaltet die Aktionsmodule, die nach entsprechender Auswertung der Bedingungen zur Ausführung gebracht werden. Die benutzerseitig festgelegten Beziehungen zwischen Ereignissen, Bedingungen und Aktionen werden über entsprechende assoziative Referenzen zwischen den einzelnen Identifikatoren abgebildet, wobei die Ablaufkontrolle systemgesteuert durch den Einsatz fest formulierter Trigger erfolgt. Der schematische Aufbau des Triggermoduls ist in Bild 5-13 dargestellt.

Mit Hilfe dieses neuen, flexibel einsetzbaren, aktiven Triggermoduls können sämtliche komplexen, mehrstufigen Planungsaufgaben auch auf der Ebene des individuellen Objektes unterstützt werden.



**Bild 5-13:** Aufbau des flexiblen Triggermoduls

Der Benutzer hat damit ein mächtiges Werkzeug zur Verfügung, semantische Integritätsbedingungen während der Planungsphase auf das Informations- und Planungssystem abzubilden und den Objektzustand sowie die Manipulationsmöglichkeiten in sehr differenzierter Form an die tatsächlichen Randbedingungen anzupassen. Die Einsatzmöglichkeiten des vorgestellten Triggerkonzeptes lassen sich über die Sicherung der semantischen Integrität hinaus auch zur aktiven Kontrolle und Einleitung von Maßnahmen im Sinne eines Arbeitsfortschrittes einsetzen. Dies gilt zum einen für die dynamische Vergabe von Zugriffsrechten auf bestimmte Objekte in Abhängigkeit definierter Arbeitsfortschritte, sogenannten *Meilensteinen*, als auch das systemseitige Auslösen weiterer, automatisch ablaufender Arbeitsschritte infolge bestimmter Ereignisse.

## 5.5 Geschachtelte Integritätstransaktionen

Das für konventionelle Datenbanksysteme entwickelte Transaktionskonzept ist für Applikationen im technischen Umfeld der Planung, insbesondere beim Einsatz von CAD-Systemen, nicht geeignet, um die speziellen Anforderungen zu erfüllen. Durch die sich über längere Zeiträume erstreckenden Planungsaufgaben, bei denen inkonsistente Zustände bewußt herbeigeführt oder in Kauf genommen werden, kann die Forderung nach Ununterbrechbarkeit von Transaktionen bei gleichzeitiger Überführung des Modellzustandes von konsistentem zu wiederum konsistentem Zustand nicht immer bezüglich aller Forderungen erfüllt werden. Ebenso ist eine Transaktion als Einheit für Recovery-Maßnahmen ungeeignet, da ansonsten im Fehlerfall die Arbeit von Tagen oder Wochen verloren gehen würde.

Für die speziellen Planungs- und Konfigurationsaufgaben auf der Basis des vorgestellten Modells soll daher das konventionelle Transaktionskonzept für bestimmte Anwendungen modifiziert und erweitert werden. Kern dieser Modifikation ist die Einführung geschachtelter Transaktionen sowie die Aufgabe der Bedingung, daß nach jeder Transaktion das Modell wieder in einem vollständig den Integritäts- und Konsistenzbedingungen entsprechenden Zustand sein muß. Als weiteres wird die Recoveryeinheit von der Transaktionseinheit gelöst.

Als Transaktionen im Planungsbereich sollen folgende Typen definiert werden:

- \* die *atomare Transaktion*; sie entspricht der konventionellen Datenbanktransaktion und umfaßt im CAD-Bereich eine elementare Operation (Beispiel *CREATE, MOVE, MODIFY,...*). Für diese Art der Transaktion gilt weiterhin das *Alles oder Nichts Prinzip*, d.h. entweder wird eine solche Transaktion erfolgreich durchgeführt oder gar nicht [72].
  
- \* die *geschachtelte, hierarchische Transaktion*; sie umfaßt beliebig viele atomare Transaktionen beziehungsweise weitere geschachtelte Transaktionen, deren Spannen projektabhängig gewählt werden. Diese Art von Transaktionen können

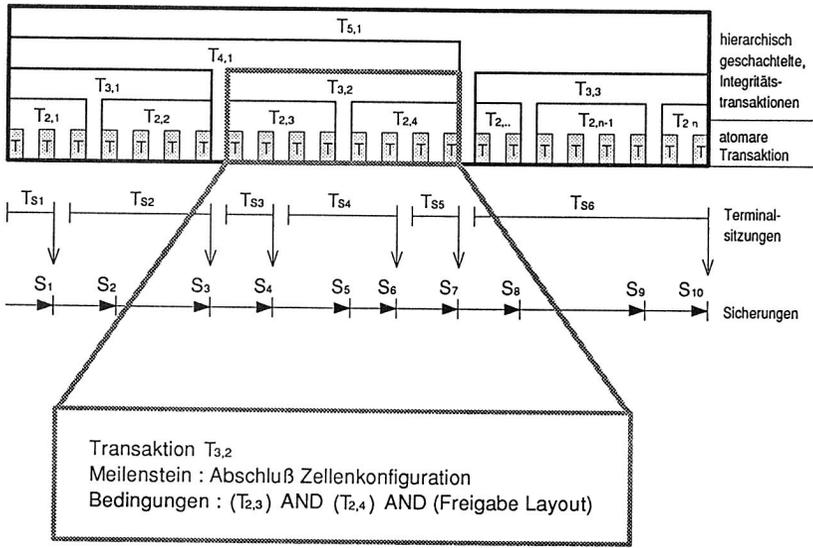
kürzer als eine Terminalsitzung am CAD-System sein sie können mit Beginn und Ende einer Arbeitssitzung (Beispiel *GET/SAVE*) zusammenfallen oder über mehrere Arbeitssitzungen hinausgehen.

Ziel dieser Schachtelung von Transaktionen ist es, stufenweise einen höheren Grad an Integrität herbeizuführen (Bild 5-14). Dabei können an jede Transaktionsebene bestimmte Bedingungen gebunden werden, so daß von lokalen Integritätsbedingungen schrittweise zu globalen Bedingungen übergegangen werden kann. Jeder Transaktion kann somit eine Integritätsbedingung zugeordnet werden, die definiert, welche untergeordneten Transaktionen abgeschlossen sein müssen, bevor die äußere Transaktion abgeschlossen ist. Das Schachteln von Transaktionen entspricht dem Schachteln von Integritätsbedingungen. Die Verschachtelung selbst kann über verschiedene Arten erfolgen:

- \* *AND-Schachtelung*; alle an untergeordnete Transaktionen gebundenen Bedingungen müssen erfüllt sein, ehe die äußere Transaktion endet.
- \* *XOR-Schachtelung*; genau eine Transaktion einer bestimmten Menge muß beendet sein, bevor die äußere Transaktion enden kann. Diese Verknüpfung wird verwendet, wenn für die Planung Alternativen existieren.
- \* *OR-Schachtelung*; wenigstens eine Transaktion einer bestimmten Menge von Transaktionen muß beendet sein, ehe die äußere Transaktion enden kann.

Übergeordnete Bedingungen können aber auch vollkommen disjunkt von untergeordneten Bedingungen auf einer semantischen Ebene kontrolliert werden. So kann eine Integritätstransaktion, die im weiteren Sinne einem Planungsabschnitt gleichkommt, dann beendet werden, wenn sie von einem autorisierten Benutzer als solche gekennzeichnet wurde.

Die Bestimmung der Transaktionsspanne ist vom Benutzer (in der Regel durch den Projektmanager) definierbar; Anfang und Ende einer Transaktion können beispielsweise



**Bild 5-14:** Geschachtelte Integritätstransaktionen

an gewisse *Meilensteine* der Planung gebunden werden. Ebenso kann der Benutzer bei Bedarf explizit die Überprüfung der Integritätsbedingungen auslösen und bei erfolgreicher Überprüfung die Transaktion abschließen.

Geschachtelte Transaktionen unterstützen somit die Projekthierarchie und die Teamarbeit [82]. Die Hierarchie der Teilaufgaben innerhalb eines Projektes kann auf eine Transaktionshierarchie abgebildet werden, womit speziell die Kooperation innerhalb eines Planungsteams sowie die Vergabe von Teilaufgaben an einzelnen Instanzen unterstützt wird.

Die Einheit für *Recovery* im Fall eines Systemabsturzes kann abhängig von den Anforderungen und dem erforderlichen Wiederholaufwand bei Datenverlust zeit- oder ereignisgesteuert definiert werden. Äußerste Spanne ist dabei die Dauer einer

Arbeitssitzung; kleinere Spannen lassen sich in beliebigen Zeitinkrementen definieren oder an spezielle Systemfunktionen knüpfen. Bei einem eventuellen Systemausfall kann damit auf einen Zustand aufgesetzt werden, der möglichst nahe vor dem Ausfallzeitpunkt liegt, aber nicht unbedingt einen konsistenten Modellzustand bezüglich übergeordneter Bedingungen darstellt. Da Sicherungsoperationen im CAD-Bereich bei komplexen Objekten jedoch einen erheblichen Zeitaufwand bedeuten, ist in Abhängigkeit der Modellkomplexität und des Arbeitsaufwandes die Inkrementspanne situationspezifisch zu wählen.

Wegen der Bearbeitungsdauer einzelner Planungsschritte ist es nicht sinnvoll, Transaktionen auf höherer Ebene soweit zu isolieren, daß alle unmittelbar und mittelbar davon betroffenen Objekte für andere Zugriffe gesperrt sind. Hierzu ist eine differenzierte Zugriffsregelung erforderlich, die in Kapitel 5.7 dargestellt werden soll.

## 5.6 Zugriffskontrolle

Aufgrund des hohen Integrationsgrades von Daten in einem Informationssystem kommt dem Aspekt der Zugriffskontrolle eine besondere Bedeutung zu, da verschiedene Benutzer mit unterschiedlichen Intentionen auf dieselben physischen Datenbestände zugreifen können.

Mit Hilfe eines Moduls zur Zugriffskontrolle soll verhindert werden, daß nicht autorisierte Benutzer auf das Modell zugreifen und daß konkurrierende Zugriffe autorisierter Benutzer systemseitig kontrolliert werden. Für die Zugriffsregelung sind daher zunächst folgende Punkte zu berücksichtigen:

Erster Aspekt ist die Spezifikation von *Subjekten*, d.h. Instanzen, die auf Objekte des Informationssystems zugreifen möchten. Dies können sowohl Benutzer als auch bestimmte Applikationen sein. Die Identifikation der Subjekte erfolgt systemintern über Prozeßattribute, die über eine Systemtabelle verwaltet werden.

Der zweite Aspekt betrifft die *Objektklassen*, d.h. die Oberklasse von Relationen, in denen die Objekte verwaltet werden. Die Berücksichtigung der Objektklassen im Schutzkonzept soll zusätzlich zu den individuellen Objekten mitgeführt werden, da es in einzelnen Fällen zuviel Aufwand erfordert, einzelne Objekte zu schützen.

Dennoch ist es in bestimmten Anwendungsfällen notwendig, auch die *individuellen Objekte* innerhalb der spezifizierten Objektklasse differenziert zu schützen. Je nach Granularität können hierunter übergeordnete und untergeordnete Objekte oder einzelne Ausprägungen von Objekten verstanden werden.

*Operationen* sind die vom Subjekt intendierten Zugriffe auf die Objekte. Definierte Operationen auf übergeordneter Ebene sind *READ*, *COPY*, *INSERT*, *MODIFY* und *DELETE*. Mit dem *READ*-Privileg hat der Benutzer die Möglichkeit, Daten über ein bestehendes Objekt abzufragen; das *COPY*-Privileg erlaubt ihm darüber hinaus, Daten in einen privaten Speicherbereich zu kopieren; mit dem *INSERT*-Privileg dürfen in der Objektklasse neue Objekte erzeugt werden. Um ein Objekt zu ändern, bedarf es dem *MODIFY*-Privileg. Hierbei kann sich der Benutzer ein Objekt in seinen persönlichen Arbeitsbereich kopieren, es verändern und wieder in die Datenbank zurückspeichern. Mit dem *DELETE*-Privileg ist er letztlich befugt, Objekte zu löschen. Ob ein Subjekt mit einer bestimmten Intention Zugriff auf ein Objekt hat, wird damit zunächst durch die Definition der Subjekt-Objekt-Beziehung festgelegt.

Darüber hinaus können über einen Planungszeitraum verschiedene *Phasen* definiert werden, in denen die Autorisierung bestimmter Subjekte bezüglich des Objektzugriffs variiert. Diese Phasen sind durch übergeordnete Integritätstransaktionen gekennzeichnet und entsprechen sogenannten *Meilensteinen* bei der Planung. So dürfen beispielsweise nach erfolgter Freigabe einer Konstruktion keine Änderungen mehr an den Objekten vorgenommen werden. Den Konstrukteuren kann so nach der Freigabe der Konstruktion der modifizierende Zugriff auf die Objekte untersagt werden. Der Übergang zwischen zwei Phasen kann durch die Erfüllung der an die Integritätstransaktion gebundenen Bedingung erfolgen oder explizit durch den Projektmanager ausgelöst werden.

Neben der grundsätzlichen Zugriffsautorisierung ist letztlich der *Zustand* eines Objektes maßgeblich für die aktuelle Gewährung des intendierten Zugriffs. Sobald ein Objekt in Bearbeitung ist, können andere Instanzen die Arbeitsschritte nicht direkt mitverfolgen. Daher wird es ermöglicht, diese Objekte trotz genereller Autorisierung vor weiteren Zugriffen zu schützen.

Die sicherste Methode, diese Bestandteile des Zugriffsschutzes in die Praxis umzusetzen, ist die Anbindung aller Informationen direkt auf der Objektebene. Aufgrund der vielfältigen Kombinationsmöglichkeiten, die sich für die Zugriffskontrolle ergeben, würde dies zu einem unverhältnismäßig hohen Verwaltungsaufwand führen, der sich negativ auf die Performance des Informationssystems auswirkt. Daher wird dem Modell ein Modul überlagert, das den Zugriff zentral regelt (Bild 5-15).

Kern dieses Moduls ist die Zuordnung von Zugriffsrechten zu einem Tripel *Subjekt/Objekt/Phase*. Die in Bild 5-15 graphisch dargestellten Zusammenhänge werden in Relationen des Datenbankschemas verwaltet. Die erste Kontrollroutine identifiziert das zugreifende Subjekt, seine Intention sowie die aktuelle Planungsphase. Im Folgeschritt werden die prinzipiellen Zugriffsrechte in Bezug auf die Objektklasse geprüft. Ist dieser prinzipielle Klassenzugriff möglich, wird anhand einer weiteren Tabelle geprüft, ob die angeforderten individuellen Objekte dieser Klasse differenzierten Schutzbestimmungen unterliegen. Die Informationen in diesen Tabellen werden von einer zentralen Instanz eingetragen. Diese Instanz ist ebenso dafür verantwortlich, die aktuelle Planungsphase zu spezifizieren.

Ist das Ergebnis dieser prinzipiellen Autorisierungsüberprüfung positiv, wird direkt in der Objektrelation geprüft, in welchem Status sich das Objekt befindet. Abhängig von diesem Status kann der Zugriff nun entweder gewährt, bedingt gewährt oder abgewiesen werden.

Für diese letzte prüfende Instanz wird ein speziell an die Aufgaben in Konstruktion und Planung angepaßter *Check-out/Check-in*-Mechanismus implementiert [83]. Da alle Operationen unter Verwendung des *CAD*-Modellierers nicht unmittelbar auf der Ebene

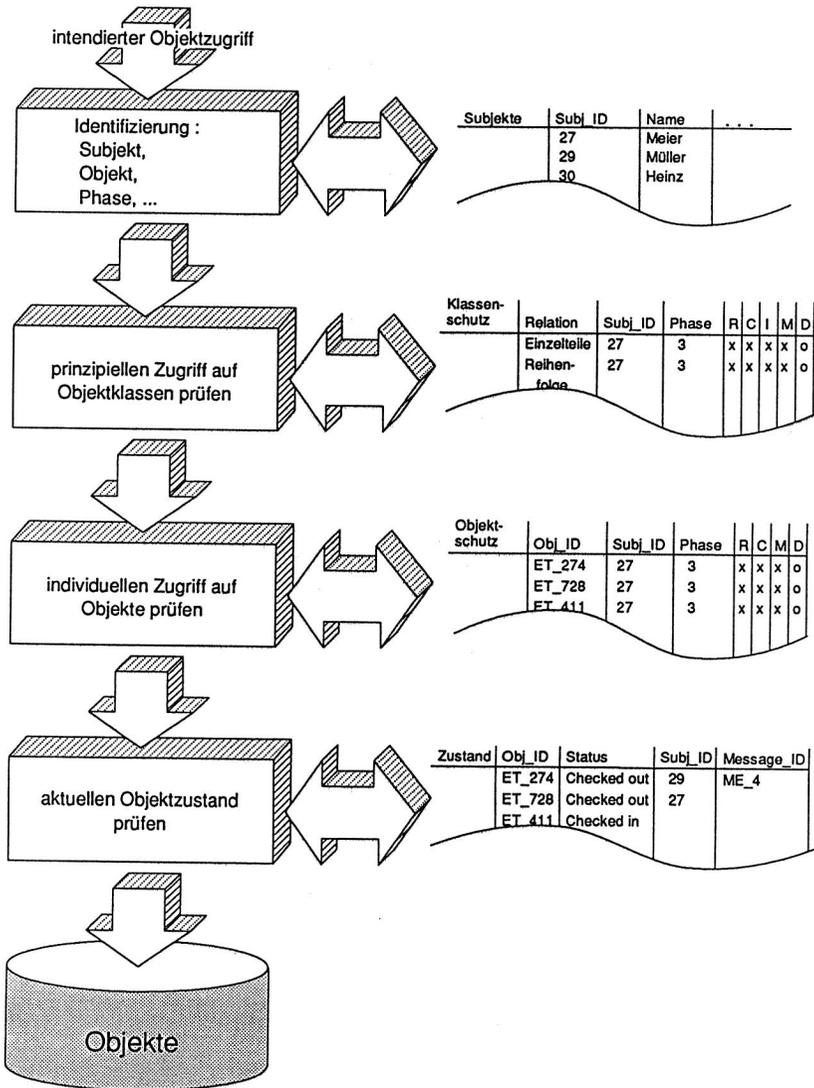


Bild 5-15: Modul zur Regelung des Objektzugriffs

des permanenten Speicherbereichs durchgeführt werden, sondern an einer lokalen Kopie des Objektes im flüchtigen Speicherbereich, könnten während der Bearbeitung eines Objektes beliebig viele andere autorisierte Instanzen ebenfalls auf das Objekt zugreifen, sich eine Arbeitsversion kopieren und Modifikationen vornehmen. Eine semantische Synchronisation parallel ablaufender Operationen ist somit nicht mehr gewährleistet. Aus diesem Grund wurde jedem Objekt, für das eine CAD-Repräsentation vorgesehen ist, ein weiteres abundantes Attribut zugewiesen, das den aktuellen Objektzustand kennzeichnet. Wird ein solches Objekt aus dem allgemein zugänglichen Speicherbereich in einen privaten Speicherbereich oder direkt in den Arbeitsspeicher kopiert, wird im Attributfeld *Zustand* das Merkmal *Checked-Out* eingetragen. Über eine weitere Relation wird vermerkt, welcher Benutzer das Objekt aktuell bearbeitet und welche Folgen sich für weitere Zugriffsversuche ergeben. Dies kann jedoch nur in Abhängigkeit spezifischer organisatorischer Regelungen erfolgen. Für einen implementierten Prototyp werden die zwei folgenden Möglichkeiten unterstützt, die der Benutzer beim *Check-out* spezifiziert:

(1). *Das vollständige Sperren*

Mit dem Kopieren eines Objektes aus dem öffentlichen Bereich der Datenbank wird prinzipiell jeder weitere Objektzugriff systemseitig unterbunden, bis das Objekt wieder korrekt in die Datenbank eingebracht wird.

(2). *Das bedingte Sperren*

Vor dem Kopieren des Objektes aus dem öffentlichen Bereich kann der Benutzer eine Meldung formulieren, in der er auf semantischer Ebene beschreibt, ob und gegebenenfalls welche Modifikationen er am entsprechenden Modell vornehmen möchte. Dies ist insbesondere dann von Bedeutung, wenn mehrere Objekte zu Informationszwecken gleichzeitig angefordert werden, aber nur ein Objekt modifiziert werden soll. Die Zugriffsrechte bleiben dabei für andere Benutzer unverändert. Bei versuchtem Zugriff bekommt der Benutzer aber automatisch eine Meldung, daß die betreffenden Objekte in Bearbeitung sind und was Gegenstand der aktuellen Arbeit ist. Andere Benutzer können so zwar ebenfalls Arbeitskopien anfordern, können aber eventuell modifizierte Objekte nicht wieder

in den öffentlichen Bereich einlagern. Dieses Privileg hat nur der Benutzer, der das Objekt zuerst angefordert hat.

Da sich die Zugriffskontrolle mit diesem Modul nur undifferenziert auf die Ebene eines gesamten Objektes erstreckt, wird durch den Einsatz des vorangehend beschriebenen, flexiblen Triggerkonzeptes bei Bedarf ein bis auf die Detailebene eines Objektes bezogener Zugriffsschutz möglich. Speziell bei Planungs- und Konfigurationsaufgaben werden während des Planungsfortschritts einzelne Details oder Ausprägungen eines Objektes bestimmt. Andere dagegen besitzen noch Freiheitsgrade. Diese Teilbereiche lassen sich gegen weitere Änderungen durch das Setzen von Triggern differenziert schützen, ohne den Zugriff auf das ganze Objekt zu sperren.

Die Wirkungsweise soll abschließend an einem Beispiel erläutert werden:

Bei dem in Bild 5-16 gezeigten Bauteil ist der Abstand der beiden Bohrungen durch einen bereits existenten Fügepartner festgelegt. Die weitere Gestalt des Bauteils kann jedoch noch modifiziert werden. Um solche Bedingungen auch im Mehrbenutzerbetrieb zu unterstützen, lassen sich auf die geometrisch/topologischen Elemente Trigger definieren, die das Einhalten der spezifizierten Bedingungen systemseitig überwachen. Ohne das gesamte Objekt während einer Planungsphase bezüglich manipulierendem Zugriff zu sperren, können durch die Verwendung der flexiblen Trigger Objekte auch differenziert gegen unzulässige Manipulationen geschützt werden. Diese ist insbesondere für einen simultanen Objektzugriff von entscheidender Bedeutung.

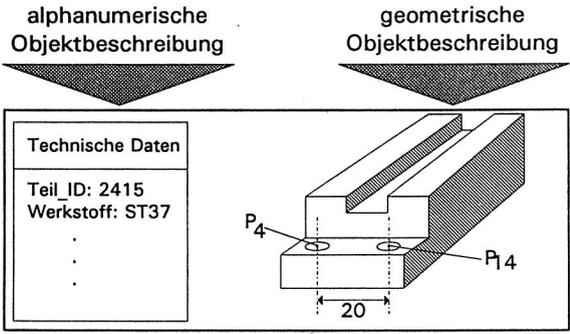


Abbildung geometrischer und alphanumerischer Information auf das Datenmodell

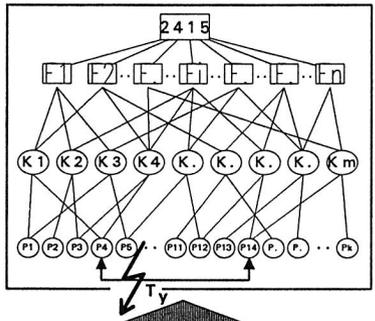


Abbildung der Integritätsbedingungen auf das Datenmodell

Trigger $T_y$	
Event	: (Modify)
Condition	: $( P_4 - P_{14}  \neq 20)$
Action	: (Abort)
Triggerkomponente	

Definition individueller Schutzbedingungen auf Einzelteilebene

**Bild 5-16:** Differenzierter Zugriffsschutz auf Einzelteilebene durch Einsatz flexibler Trigger

## 6. Abbildung planungsrelevanter Basisinformationen

Auf der Basis des im vorangegangenen Kapitel beschriebenen Konzeptes wird ein Informationsmodell für die Montage vorgestellt, das alle planungsrelevanten Daten enthält. Es umfaßt zum einen Informationen über die Montageobjekte und die damit verbundene Montageaufgabe und zum anderen Informationen über die zur Durchführung der Aufgabe erforderlichen materiellen Ressourcen.

### 6.1 Produkt und Montageaufgabe

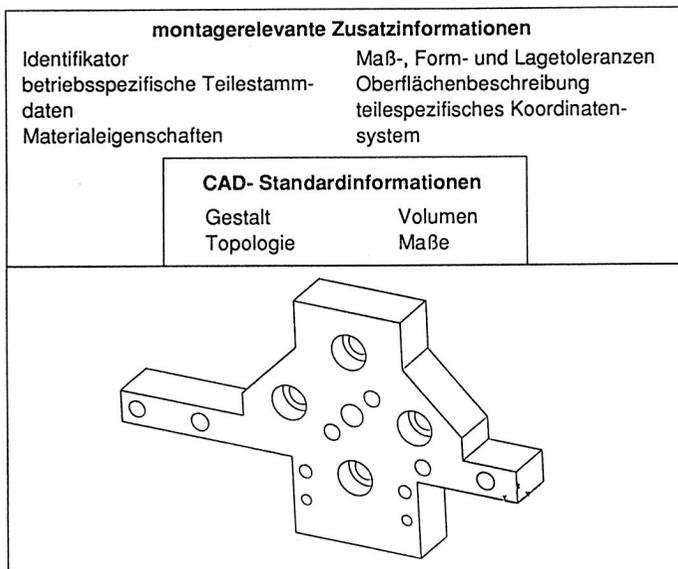
Im Gegensatz zu Planungsaufgaben der Teilefertigung erstrecken sich bei der Informationsabbildung von montagerelevanten Produktinformationen die beschreibenden Daten über die Einzelteilebene hinaus und umfassen in besonderem Maße die Beziehungen zwischen den Einzelteilen. Daher soll im folgenden zwischen diesen beiden Ebenen unterschieden werden.

#### 6.1.1 Abbildung von Informationen auf Einzelteilebene

Ein Teil der zur Montage notwendigen Informationen ist direkt mit den Einzelteilen verknüpft. Sie lassen sich entweder unmittelbar aus dem Gestaltobjekt ableiten oder müssen explizit im Sinne des Konstrukteurs oder Arbeitsplaners während des Planungsablaufs ergänzt werden.

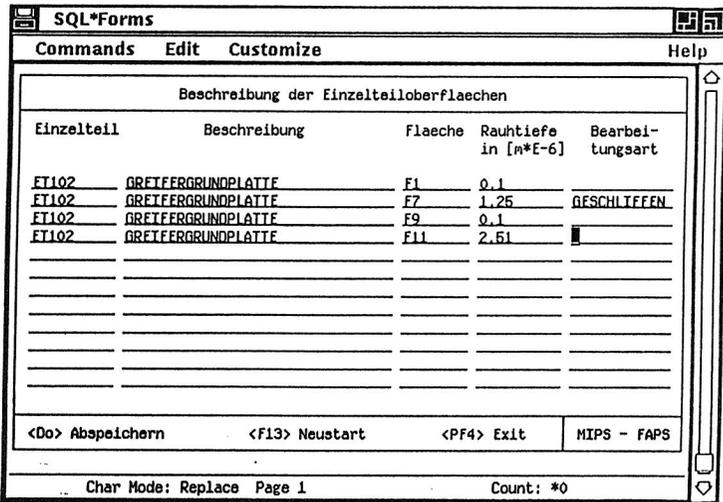
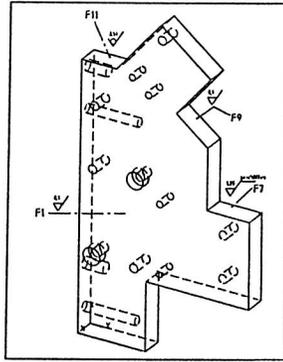
Dazu wird das originäre *CAD*-Modell inhaltlich um die in Bild 6-1 gezeigten zusätzlichen Informationen erweitert, die über eine alphanumerisch/graphische Benutzeroberfläche spezifiziert und auf das hybride Datenmodell abgebildet werden (Bild 6-2).

Zunächst bekommt jedes Objekt, das erstmals in einen allgemeinzugänglichen Speicherbereich eingebracht werden soll, einen eindeutigen Identifikator über einen *Surrogatgenerator* zugewiesen. Weiterhin müssen alle Einzelteile vor dem erstmaligen



**Bild 6-1:** *Erweiterter Informationsinhalt auf Einzelteilebene*

Abspeichern mit einem expliziten, körpereigenen Koordinatensystem versehen werden, dessen Ursprung und Orientierung anwendungsspezifisch, d.h. nach Zweckmäßigkeitskriterien frei wählbar ist. Zur Beschreibung der Oberflächen eines Einzelteiles, die für Funktion, Handhabung und Montage bedeutsam sind, können einzelne Flächen der CAD-Objekte identifiziert und qualitativ und quantitativ beschrieben werden. Auf die gleiche Weise lassen sich Form-, Maß- und Lagetoleranzen mit den topologischen Elementen Punkt, Kante und Fläche in Beziehung setzen und entsprechend den definierenden Normen [84] beschreiben. Die infologische Darstellung und die Datenstruktur der abgebildeten montagerelevanten Zusatzinformationen ist in Bild 6-2 beispielhaft aufgezeigt. Abhängige oder redundante Informationen zwischen dem komplexen CAD-Gestalt-Attribut und den übrigen Attributen werden über Trigger kontrolliert.



Einzelteile	OBJ ID	Gestalt	Oberfläche	OBJ ID	F ID	Werte
	ET102			ET102	F1	0,1
				ET102	F7	1,25
				ET102	F9	0,1
				ET102	F11	251

Bild 6-2: Abbildung und Verwaltung von Zusatzinformationen

In einigen Entwicklungsansätzen werden Fügeflächen, Greifflächen und Fügerichtungen direkt auf Einzelteilebene definiert [85],[86]. Bei einer solchen Betrachtung wird jedoch außer acht gelassen, daß diese topologischen und geometrischen Elemente immer nur in Abhängigkeit der tatsächlichen Einbaulage bestimmt werden können. Ein Einzelteil hat nicht per se eine Fügefläche oder eine Fügeachse. Diese Definition kann nur im Zusammenhang mit den benachbarten Bauteilen getroffen werden. Sobald ein Einzelteil mehrfach und in verschiedenen Baugruppen verwendet wird, wäre eine ausschließlich auf das Einzelteil bezogene Definition ungültig; sie soll daher an späterer Stelle kontextbezogen erfolgen.

Abschließend kann jedes Einzelteil nach innerbetrieblichen Kriterien durch die Angabe von Teilstammdaten und Sachmerkmalen beschrieben werden (Bild 6-3). Die Daten stehen in direktem Zusammenhang mit dem jeweiligen Einzelteil und können durch graphisches Identifizieren der Objekte jederzeit abgerufen werden.

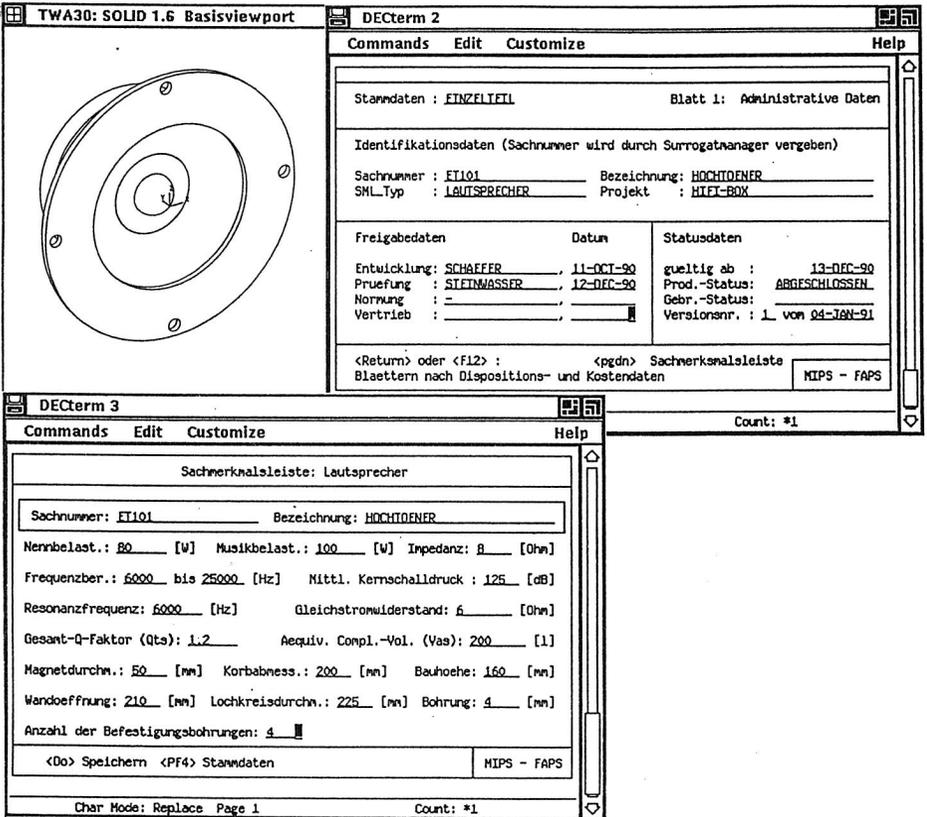


Bild 6-3: Eingabe und Abfrage von Teilestammdaten und Sachmerkmalen

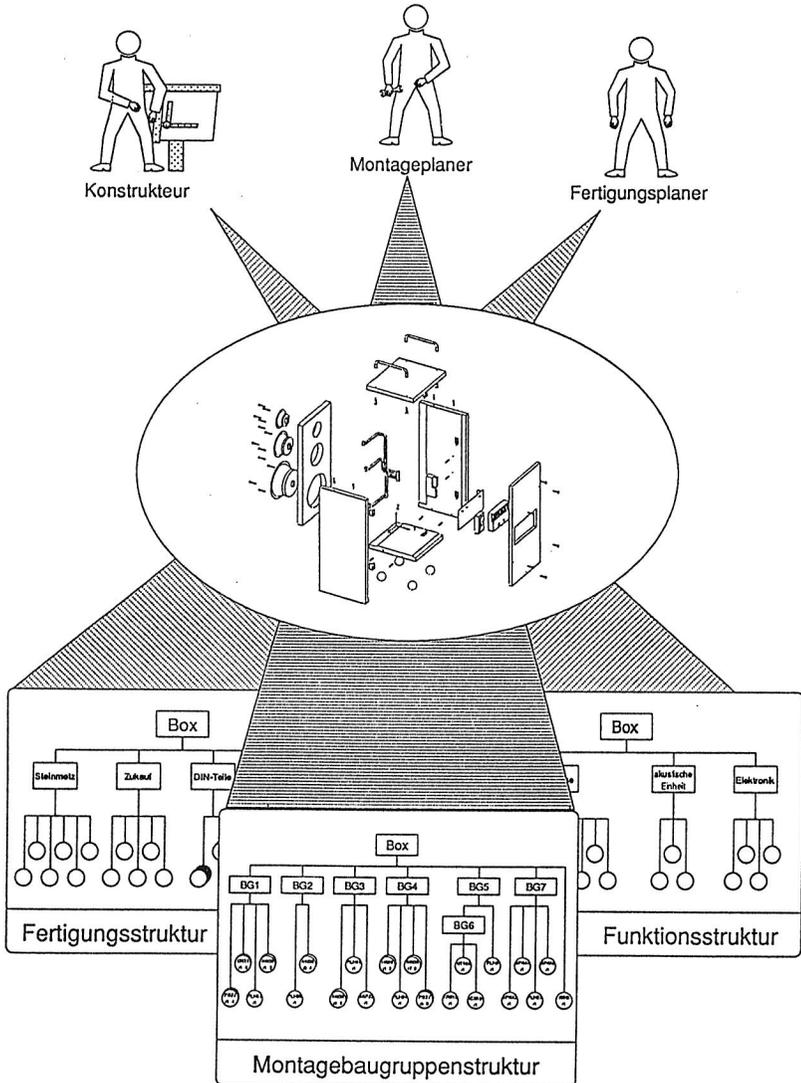
### 6.1.2 Abbildung logischer Produktstrukturen

Erzeugnisse, die aus mehreren Einzelteilen bestehen, können auf logischer Ebene nach verschiedenen Kriterien strukturiert werden (Bild 6-4) (vgl. dazu auch [87],[22]).

Für das hier zu lösende Problem steht die montageorientierte Produktstrukturierung im Vordergrund, d.h. das Zusammenfassen von Einzelteilen oder Baugruppen zu hierarchisch gegliederten Baumstrukturen, die aufgrund bestimmter montagerelevanter Merkmale entstehen. Eine solche Struktur ist einem Erzeugnis nicht a priori inhärent, sondern sie wird ihm aufgrund gedanklicher Annahmen aufgeprägt. Für den Aufbau des Informationsmodells ist es daher erforderlich, beliebig tiefe Strukturierungsmöglichkeiten für die generierten Objekte vorzusehen, wobei mehrere gültige Beschreibungsformen nebeneinander zulässig sind.

Eine Methode zur Abbildung von Erzeugnisstrukturen auf Datenbankebene ist das Aufstellen sogenannter *Oberteil/Unterteil-Beziehungen* [88]. Die Einzelteile des in Bild 6-5 gezeigten Erzeugnisses werden dazu interaktiv in die im mittleren Bildteil dargestellte Struktur überführt. Dabei repräsentieren die als Kanten eingezeichneten Verbindungen zwischen zwei Knoten jeweils eine hierarchische Beziehung zwischen einem Oberteil (logisches Objekt) und einem Unterteil (logisches oder reales Objekt). Durch Abbildung aller Beziehungen zwischen den Objekten unterschiedlicher Hierarchieebenen kann das Erzeugnis automatisch in das im unteren Teil von Bild 6-5 dargestellte Schema abgebildet werden. Redundante Abbildungen, die durch mehrfach verwendete Baugruppen oder Einzelteile innerhalb einer Struktur auftreten können, werden durch die Angabe der Verwendungshäufigkeit ausgeschlossen.

Durch eine Interpretation der im Datenbankschema abgelegten Beziehungen ist eine automatische Rekonstruktion der Erzeugnisstruktur auf die im Bild gezeigte mittlere Darstellungsebene sofort möglich.



**Bild 6-4:** Beispiele für unterschiedliche Erzeugnisstrukturierungen auf logischer Ebene

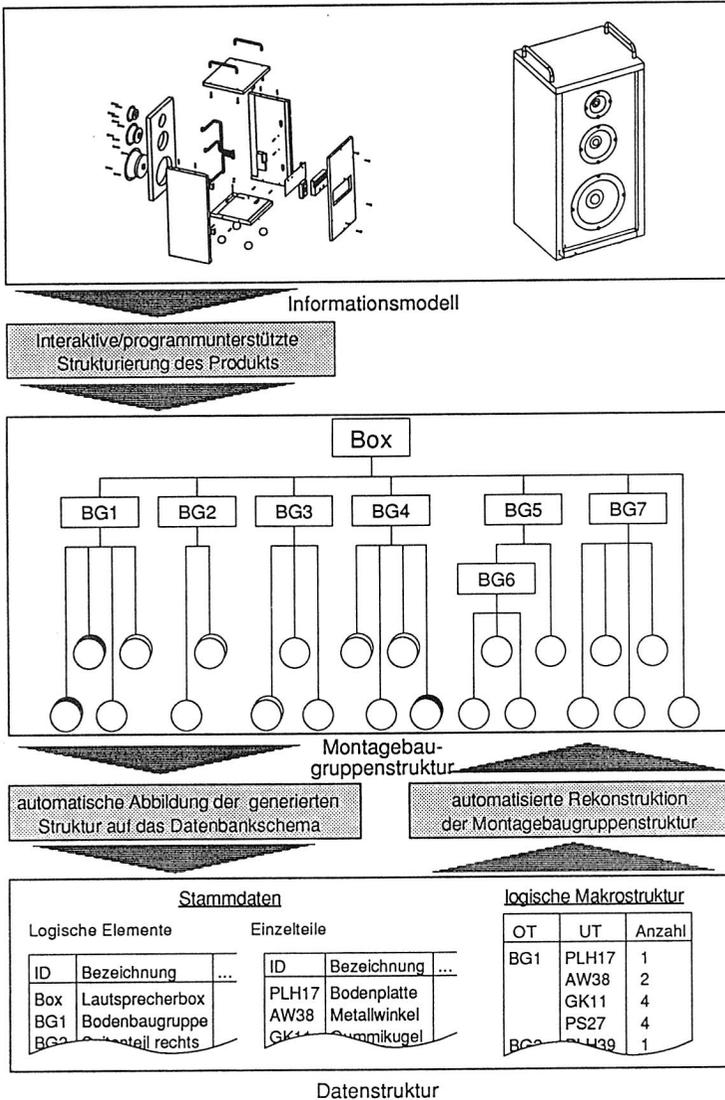


Bild 6-5: Abbildung n-ärer Baumstrukturen auf ein relationales Schema

Eine Rekonstruktion des gesamten Erzeugnismodells ist jedoch ausgeschlossen, da bei der Abbildung alle topologischen Informationen verlorengehen. Die Abbildung der Makrotopologie des Erzeugnisses müßte in diesem Fall gesondert erfolgen, also konventionell in einem *CAD*-Datei. Dies bringt jedoch die in Kapitel 3.1.1 beschriebenen Nachteile mit sich.

Zum Aufbau logischer Strukturen ist diese Abbildungsform möglich; für die Aufgaben der Konstruktion und Technologieplanung soll darüber hinaus eine geschlossene Abbildungsform bereitgestellt werden.

### 6.1.3 Abbildung der topologischen Makrostruktur

Um auch außerhalb des *CAD*-Systems auf die topologische Erzeugnisstruktur zurückgreifen zu können und um eine redundante Datenhaltung von *CAD*-Objekten zu vermeiden, werden die dazu erforderlichen Daten explizit im Datenbankschema verwaltet.

Grundvoraussetzung dieser Abbildungsmethode ist die vorangegangene Definition der einzelteilbezogenen Körperkoordinatensysteme und eines Bezugssystems sowie die Unterstützung des Datentyps *Matrix* als Attribut im Relationenschema der Datenbank.

Erzeugte Einzelteile werden unabhängig von der Verwendungshäufigkeit im hybriden Datenmodell nur einmal als *CAD*-Objekt gespeichert. Sie können aus einer zentralen Teilebibliothek bei Bedarf beliebig oft instanziiert und räumlich transformiert werden. Zur Ergebnisdokumentation wird lediglich dem Tupel aus Objektidentifikator und Instanznummer eine auf ein Referenzkoordinatensystem bezogene Transformationsmatrix zugeordnet. Durch ein im *CAD*-System implementiertes Transformationsmodul kann die einmal erstellte Konfiguration jederzeit wiederhergestellt werden.

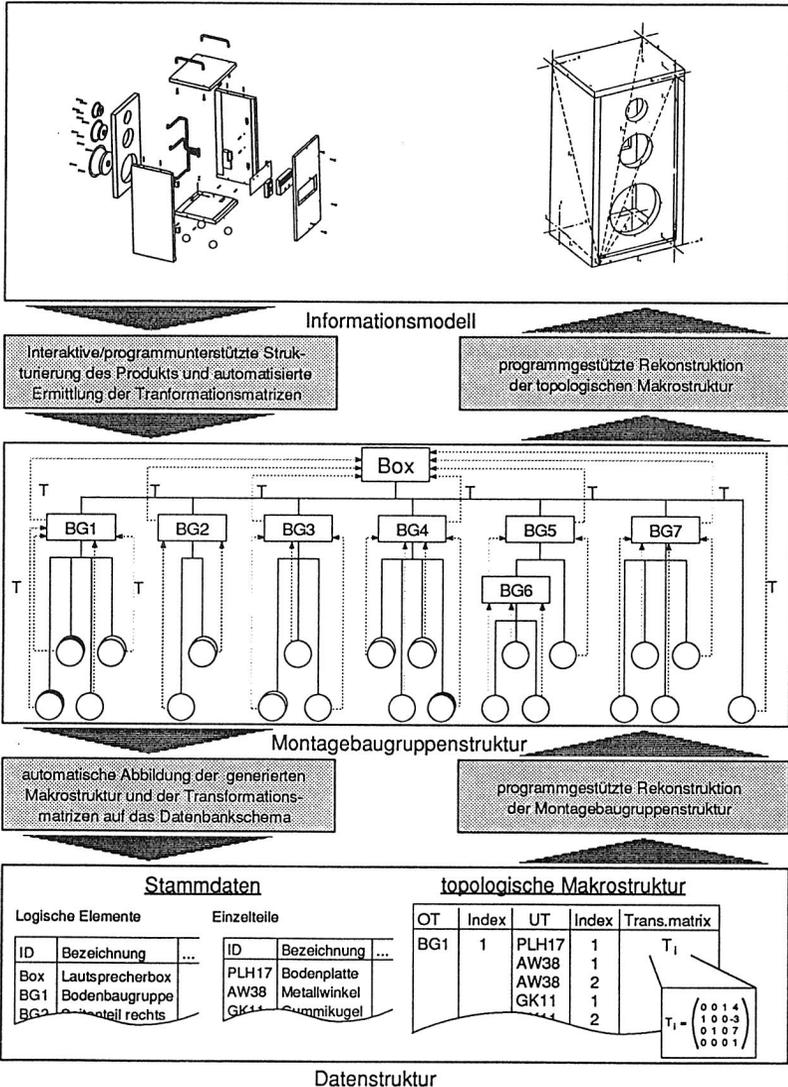
Mit Hilfe dieses Konzeptes ist der Informationskreis geschlossen, d.h. beide Darstellungsarten, das *CAD*-Erzeugnismodell und die Strukturbeschreibung lassen sich bidirektional ohne Informationsverlust ineinander überführen (Bild 6-6).

Beziehen sich jedoch alle Elemente direkt auf ein Referenzsystem, sind partielle, baugruppenbezogene Betrachtungen nicht mehr möglich. Daher wird die Abbildung der topologischen Makrostruktur mit der logischen, montageorientierten Baugruppenstruktur überlagert. Bei diesem Ansatz geht die Vorstellung davon aus, möglichst vormontierbare Baugruppen zu bilden, die im weiteren Montageprozeß als Einheit behandelt werden können.

Um diese hierarchisch über mehrere Ebenen gegliederte Darstellung zu ermöglichen, enthält zusätzlich jedes logische Objekt, also eine Baugruppe oder ein Erzeugnis, ein explizites Referenzkoordinatensystem, auf das sich alle direkt untergeordneten Objekte beziehen. Die Baugruppe selbst wird in Beziehung zum nächst höheren logischen Objekt gesetzt. Je nach Wahl des Referenzsystems können somit alle innerhalb dieser Struktur enthaltenen Elemente wieder in ihrer räumlichen Lage dargestellt werden (Bild 6-6).

Die endgültige Struktur unter montagetechnischen Kriterien muß nicht unbedingt während der Konstruktion festgelegt werden. Dort können alle Einzelteile zunächst in ein beliebiges Referenzsystem in einer flachen Struktur abgebildet und in einer späteren Phase der Arbeitsplanung beliebig verfeinert werden (vgl. Kapitel 7).

Die Definition der topologischen Makrostruktur erfolgt teilautomatisiert. Nach der graphischen Identifikation des Teils und der Eingabe der logischen Referenz wird die räumliche Beziehung beider Elemente berechnet. Die Transformationsmatrix wird dem Tupel der Elementenbeziehung im Datenbankschema zugeordnet. Bei erneutem Modellaufbau am *CAD*-System werden die Einzelteile aus der Teilebibliothek kopiert, instanziiert und entsprechend der Transformationsmatrix in das Bezugssystem eingeordnet.



**Bild 6-6:** Integrierte Abbildung der logischen und topologischen Makrostruktur

Auf der Ebene der Baugruppen- oder Erzeugnisdarstellung erfolgt nun die Abbildung verwendungsabhängiger Zusatzinformationen, da erst jetzt auf der Basis von Einzelteilidentifikator und Instanznummer eine eindeutige Identifikation gleichartiger Teile in unterschiedlichem Kontext möglich ist. Diese in Bild 6-7 gezeigten einbauabhängigen Zusatzinformationen werden im Schema der Datenbank verwaltet und über den Triggermechanismen kontrolliert. Sie können bei Bedarf am instanziierten Teil visualisiert werden.

Die einzelnen Elemente sind wie folgt definiert:

**Kontaktflächen (-kanten, -punkte)** beschreiben Elemente einer Oberfläche eines Einzelteils, die in montiertem Zustand ein oder mehrere Bauteile berühren, wobei Kanten und Punkte als idealisierte Elemente angesehen werden.

**Fügeflächen (-kanten, -punkte)** beschreiben Elemente einer Oberfläche eines Einzelteils, die in montiertem Zustand eine form-, kraft- und/oder stoffschlüssige Verbindung mit einem oder mehreren anderen Bauteilen eingehen.

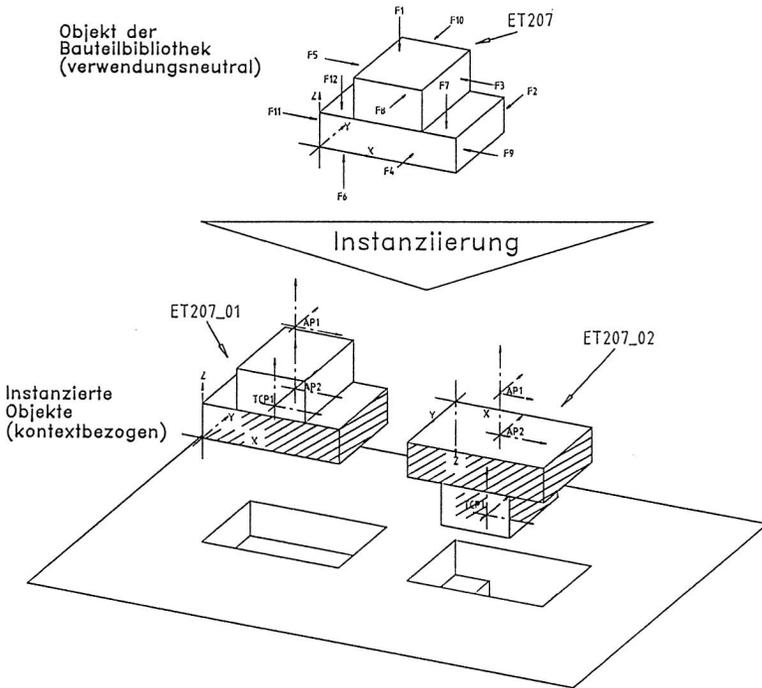
**Handhabungsflächen (-kanten, -punkte)** sind Teilflächen einer Oberfläche, an denen ein Montagewerkzeug ansetzen kann, um das Objekt zu handhaben und in einer bestimmten Umgebung zu fügen.

**Fügevektoren** beschreiben die kinematischen Möglichkeiten, Einzelteile in einer bestimmten Umgebung in ihre endgültige Lage zu transformieren.

**Anfahrtspunkte und Anfahrtsachsen** sind geometrische Hilfskonstruktionen für die automatische Handhabung der Teile. Durch diese Hilfskonstruktionen wird systembezo-

gen die Orientierung und Richtung eines Greifwerkzeuges für die automatisierte Montage beschrieben. Die Achse wird durch zwei Koordinatensysteme, die in den Punkten  $AP_1$  und  $AP_2$  liegen, bestimmt. In  $AP_1$  wird ein Koordinatensystem definiert, ab dem das Greifwerkzeug eine bestimmte Orientierung eingenommen haben muß und entlang einer fest vorgegebenen Raumkurve bis zum Koordinatensystem in  $AP_2$ , dem Greifpunkt, verfährt (Bild 6-7). (Für den vorliegenden Fall werden nur Geraden zwischen den zwei Punkten angenommen; ebenso wird die Raumorientierung zwischen  $AP_1$  und  $AP_2$  als identisch vorausgesetzt)

**Tool Center Points (TCP's)** sind in diesem speziellen Fall teilebezogene Punkte mit eigenen Koordinatensystemen, die zur Unterstützung der Programmierung dienen. Die Koordinaten dieser Punkte und Vektoren sollen zu einem späteren Zeitpunkt aus dem Modell an die Gerätesteuerung übertragen werden. Sie beinhalten den Versatz zwischen dem *TCP* des Roboterflanschkoordinatensystems und dem o.g. Hilfskoordinatensystem im Einzelteil, wenn der Roboter das Teil aufgenommen hat.



Fügeelement	Teil	Index	Elemente
	ET207	1	F6
	ET207	2	F1
	ET207	2	F7
	ET207	2	F12

TCP's	Teil	Index	TCP#	$\vec{TCP}$	TCP Ori.
	ET207	1	1	(35,37.5,15)	(0,0,0)
	ET207	2	1	(50,47.5,50)	(180,0,0)

Anfahrpunkte	Teil	Index	$\vec{AP}$	AP Ori.	$\vec{AP}_2$	AP <sub>2</sub> Ori.
	ET207	1	(50,37.5,75)	(0,0,0)	(50,37.5,75)	(0,0,0)
	ET207	2	50,37.5,-30)	(180,0,0)	(50,37.5,0)	(180,0,0)

Handhabungs-element	Teil	Index	Element
	ET207	1	F3
	ET207	1	F5
	ET207	2	F6

Kontakt-element	Teil	Index	Element
	ET207	1	F2
	ET207	1	F4
	ET207	1	F6
	ET207	1	F9
	ET207	1	F11
	ET207	2	F1
	ET207	2	F2
	ET207	2	F3
	ET207	2	F4
	....	..	..

Bild 6-7: Ergänzung von kontextbezogenen Topologie- und Geometrieminformationen

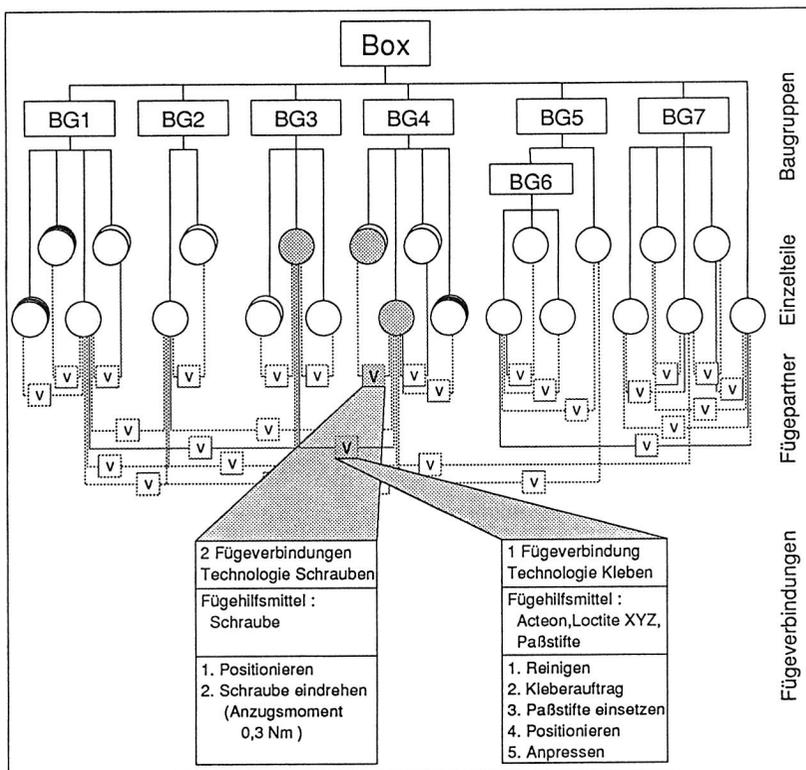
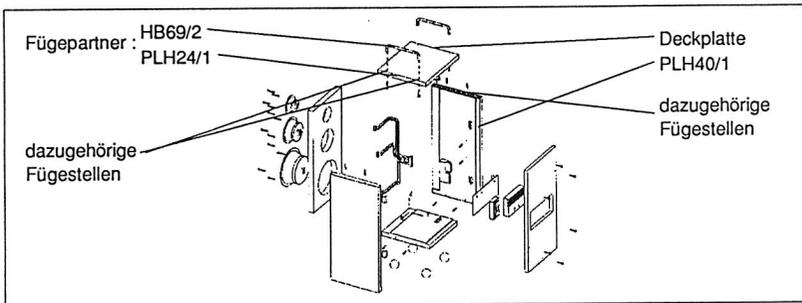
#### 6.1.4 Abbildung der technologischen Makrostruktur

Zur Aufrechterhaltung des räumlichen Zusammenhaltes einer Baugruppe (resp. eines Produktes) unter realen Belastungszuständen bestehen zwischen Einzelteilen der Baugruppe(n) physikalische Beziehungen, die nach Klassifikation und Parametrisierung zentrale Eingangsgröße für die Planung des Montageprozesses sind. Nach Stöferle [89] werden diese Beziehungen als Fügeverbindungen definiert, die die geforderte Festigkeit der Verbindung bei gewünschter Position und räumlicher Lage der zu fügenden Partner aufrecht erhalten.

Die Abbildung dieser speziellen Beziehungen, die zwischen Einzelteilen einer Baugruppe oder eines Erzeugnisses bestehen, erfolgt im hier vorgestellten Modell unter dem Begriff *technologische Makrostruktur*.

Grundlage der Betrachtung ist die zuvor gezeigte Darstellung der topologischen Baugruppenstrukturen, die jedes Einzelteil explizit nach Ort und Lage im Schema der Datenbank beschreibt. Unabhängig von Montagebaugruppenstrukturen können zwischen den instanziierten Einzelteilen verschiedene physikalische Beziehungen bestehen, deren weitergehende Beschreibung die technologische Struktur des Produktes aus montagetechnischer Sicht darstellt (Bild 6-8).

Sämtliche der oben genannten Beziehungen, die zwischen verschiedenen Einzelteilen eines Produktes bestehen, werden in einer Relation *Fügepartner* dargestellt. Da Baugruppen nur logische Einheiten sind, läßt sich eine Beziehung zwischen zwei oder mehreren Baugruppen immer auf die darin enthaltenen Einzelteile zurückführen. Hat ein Einzelteil mehrere Fügepartner gleichzeitig, werden die Beziehungen zur Beschreibung auf mehrere 1:1 Beziehungen aufgeteilt, die das Verhältnis zwischen je **zwei** Einzelteilen charakterisieren. Der Inhalt dieser Relation bezeichnet zunächst jedoch nur, daß zwischen den Einzelteilen eine direkte, d.h. unmittelbare form-, kraft- und/oder stoffschlüssige Beziehung besteht. Zwei Fügepartner können darüber hinaus durch eine oder mehrere Fügeverbindungen miteinander verbunden sein, die nicht notwendigerweise gleichartig sein müssen. Diesen Fügeverbindungen wird in Anlehnung an die Norm

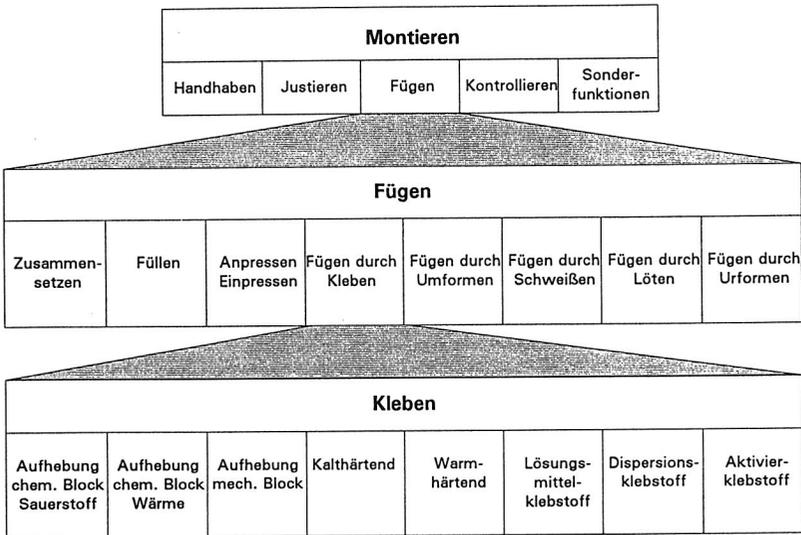


**Bild 6-8:** Abbildung der technologischen Makrostruktur

DIN 8593 [17] eine Verbindungsklassifikation zugewiesen, wobei die Betrachtung rein statisch zu interpretieren ist, d.h. bezogen auf den herzustellenden Endzustand. Der Prozeß, der zur Herstellung dieses Endzustandes führt, wird an dieser Stelle noch nicht berücksichtigt (Bild 6-9). Die Entscheidung zugunsten einer bestimmten Fügeverbindung wird entweder nach funktionalen Kriterien (Funktionserfüllung - statische und dynamische Belastung - Umgebungseinflüsse) und/oder nach bestimmten Zweckmäßighkeitsüberlegungen (Kosten alternativ möglicher Verbindungstechniken) getroffen. Sie kann gegebenenfalls auch durch den Einsatz eines wissensbasierten Systems unterstützt werden.

Jede einzelne Fügeverbindung ist weiterhin in Abhängigkeit des Verbindungstyps durch bestimmte Parameter gekennzeichnet, deren Festlegung unter Berücksichtigung der für die Fügeverbindung maßgeblichen Belastung sowie weiterer Randbedingungen erfolgt. Die Ermittlung dieser spezifischen Parameter setzt u.a. die Kenntnis der angenommenen Beanspruchung der Fügeverbindung voraus. Obwohl die Erfassung von Kräften und Momenten hauptsächlich in den konstruktiven Bereich fällt, soll deren Abbildung an dieser Stelle behandelt werden, da deren Ausprägungen den Fügeprozeß beeinflussen können.

Um die einwirkenden Kräfte und Momente auf das Modell abzubilden, werden die Fügeverbindungen idealerweise auf die topologischen Elemente Punkt, Kante und Fläche zurückgeführt, womit sich die Möglichkeit bietet, Kräfte oder Momente diesen Elementen als Vektoren zuzuordnen. Die Angabe der Kraft- und Momentenvektoren erfolgt graphisch interaktiv im Bezugssystem des Einzelteils. Die Werte werden wie die zuvor beschriebenen Zusatzinformationen über das Schema der Datenbank verwaltet. Da gleiche Teile innerhalb einer Baugruppe oder eines Erzeugnisses an unterschiedlichen Stellen eingesetzt werden können und dort unterschiedlichen Belastungen vorliegen können, bezieht sich auch das Kräftesystem auf die zusammengesetzte Beziehung zwischen Einzelteilidentifikator und Instanznummer. Zur Aufrechterhaltung der Gleichgewichtsbedingungen entsprechen sich einander zugeordnete Fügestellen durch ein komplementäres Kräftesystem. Diese Integritätsbedingung wird durch das Triggersystem überwacht.



**Bild 6-9:** Klassifikation von Fügeverbindungen

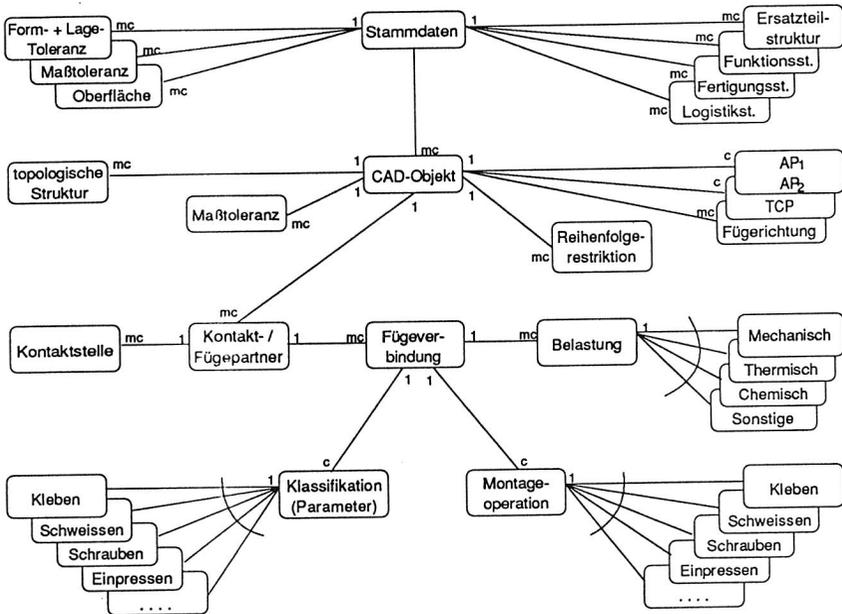
Zusätzliche Einflußfaktoren wie zum Beispiel Umgebungsbedingungen, geforderte Lebensdauer etc., die für die weitere Spezifizierung der Verbindung maßgeblich sind, werden über die menügesteuerte Benutzeroberfläche interaktiv eingegeben und der Fügeverbindung zugeordnet. Alle Angaben können bereits während der Entwurfsphase auf das Modell abgebildet werden und dienen bei der Detaillierung, insbesondere der Auswahl und Feingestaltung von Fügeverbindungen, als Eingangsinformationen.

Die Berechnung der einzelnen, verbindungsbelastenden Kräfte erfolgt aufgrund der von außen aufgeprägten Kräfte sowie von inneren Kräften. Jedes Einzelteil eines Systems wird kräfte- und momentenmäßig freigeschnitten, um die Belastung der einzelnen Fügeverbindungen zu ermitteln und einzutragen. Ein automatisches Errechnen dieser Kräfte und Momente ist möglich, soll jedoch hier nicht weiter verfolgt werden.

Die quantifizierte Abbildung der Anforderungsparameter und die prinzipielle Auswahl des Verbindungstyps sind maßgeblich für die technologiespezifische Bestimmung der Fügeparameter. Zur systematischen Erfassung dieser Parameter wird in Abhängigkeit der Verbindungsklassifikation ein Beschreibungsschema bereitgestellt, in dem für jede Fügeverbindung die determinierenden Parameter abzubilden sind.

Die Parametrisierung der Fügeverbindungen erfolgt entweder interaktiv über die menügesteuerte Benutzeroberfläche oder durch den Einsatz eines wissensbasierten Systems (vgl. Kap. 7.2.1). Durch Anwahl des Menüs *Verbindung* werden dem Benutzer in einer Maske alle sich berührende Elemente aufgezeigt und gleichzeitig am Bildschirm farblich hervorgehoben. Er kann daraufhin zu jeder Kombination angeben, ob diese Elementkombination Fügepartner im oben beschriebenen Sinne sind. Ist das der Fall, können die Fügeverbindungen des Teilepaares klassifiziert werden. Nach der menüunterstützten Auswahl des Verbindungstyps wird eine technologieabhängige Eingabemaske zur Beschreibung der Fügeparameter aufgerufen, deren Parameter der Benutzer ebenfalls im Dialog spezifizieren kann. Somit ist eine vollständige produktimmanente Beschreibung der technologischen Makrostruktur eines Erzeugnisses unter montagerelevanten Gesichtspunkten möglich.

Aus der Darstellung lassen sich jederzeit statistische Analysen über den Produktaufbau und die eingesetzten Verbindungen ableiten, die wertvolle Eingangsdaten für Wertanalysen und konstruktive Vereinheitlichungen sind. Sämtliche Beziehungen und Strukturen zwischen Einzelteilen und Baugruppen können weiterhin über die integrierte *DB-CAD* Benutzeroberfläche abgefragt werden. Auch außerhalb des graphischen Arbeitsplatzes und unabhängig von der Laufzeit des *CAD*-Moduls kann von jedem beliebigen alphanumerischen Bildschirmarbeitsplatz, Autorisierung vorausgesetzt, auf diese Informationen zugegriffen werden. Es ist jedoch sinnvoll, modifizierende Eingriffe, die sich auf die Gestalt beziehungsweise die topologische Makrostruktur der Objekte beziehen, nur über die graphische Benutzeroberfläche zuzulassen, da hier die Möglichkeit der visuellen Kontrolle besteht und unsinnige Modifikationen vermieden werden können. Bild 6-10 zeigt abschließend übersichtlich die informationellen Erweiterungen des erstellten Informationsmodells. Damit sind alle produktseitigen Eingangsgrößen,



**Bild 6-10:** Gesamthafte Darstellung des CAD/DB-Informationsmodells

die für die Planung der eigentlichen Montageanlage erforderlich sind, abbildbar.

## 6.2 Ressourcen der Montage

Im folgenden wird der Aufbau einer ressourcenbeschreibenden Datenbank für Montagemittel und Raum- beziehungsweise Flächeninformationen dargestellt.

### 6.2.1 Montagemittelinformationen

Ein unter technisch/wirtschaftlichen Kriterien optimaler Produktionsprozeß impliziert aufgrund der Ressourcenknappheit eine effiziente Nutzung der Produktionsfaktoren [90]. Dies bedeutet einerseits, daß Produktionsfaktoren ausreichend dimensioniert sein müssen, um den gestellten Anforderungen an Kapazität, Qualität und Flexibilität zu genügen, andererseits jedoch nicht überdimensioniert sein sollen, da ungenutzte Potentiale in der Regel nur die Kosten negativ beeinflussen.

Um eine technisch/wirtschaftlich angepaßte Montagemittelauswahl treffen zu können, ist daher neben der systematischen Beschreibung der Montageaufgabe auch eine entsprechende Beschreibung potentieller Montagemittel erforderlich, um eine geeignete Zuordnung zu treffen.

Dabei stellt sich zunächst das Problem, ein geeignetes Klassifikationsschema für Montagemittel zu erstellen, in dem die benötigten Informationen abgelegt werden können, denn unterschiedliche funktionale Kennzeichen einzelner Komponenten eines Montagesystems erfordern verschiedenartige Beschreibungskriterien.

Sinnvoll erscheint zunächst eine Orientierung an der in Bild 2-2 aufgezeigten, funktionalen Aufgabengliederung der Montage. Erfolgt die Beschreibung einer Montageaufgabe nach diesem Schema, so lassen sich bei einer spiegelbildlichen Einteilung von Funktionsträgern Suchprozeß und Zuordnung effizient gestalten. Diese Zuordnung ist aufgrund der vielseitigen Gestaltungsmöglichkeiten von Montagesystemen nur in einer Richtung eindeutig möglich. Ein Greifwerkzeug eines Industrieroboters kann sowohl für die Handhabung (Sekundärmontage) als auch für das Fügen

(Primärmontage) einsetzbar sein. Ebenso kann ein Roboter in bestimmten Zusammenhängen auch Zuführefunktionen übernehmen. Zuführsysteme und Roboter lassen sich jedoch nicht im gleichen Beschreibungsschema erfassen und abbilden. Welche Komponenten bestimmte Funktionen ausführen, läßt sich bei vielen Montagemitteln erst im spezifischen Kontext bestimmen.

Unter anwendungstechnischen Gesichtspunkten steht der Wunsch im Vordergrund, Montageanlagen möglichst aus standardisierten Komponenten zu konfigurieren. Daher erscheint die primäre Strukturierung potentieller Montagemittel in Montagemittelklassen mit ähnlichem Beschreibungsschema der geeignetere Weg. Dies steht nicht im Widerspruch zu der oben genannten Methode, da den einzelnen Montagemitteln beliebige, charakterisierende Funktionsmerkmale zugewiesen werden können, aufgrund derer ein Suchprozess erfolgen kann; in manchen Anwendungsfällen ist bei dieser Struktur ebenso eine direkte Zuordnung möglich.

Gegenstand der hier vorgestellten Arbeit ist der exemplarische Aufbau einer Montagemitteldatenbank und der Abbildung von marktgängigen Repräsentanten der in Bild 4-5 dargestellten Montagemittelklassen.

Aufgrund des umfangreichen Angebotes an Montagemitteln und der teilweise sehr speziellen Ausrichtung kann hier selbstverständlich nur eine begrenzte Anzahl von Komponenten berücksichtigt werden. Ebenso steht der Forderung nach detaillierter Beschreibung einzelner Komponenten die Universalität des Beschreibungsrahmens und der Aufwand für die Beschaffung und Abbildung der planungsrelevanten Daten gegenüber. Auf Forschungsebene wurden vereinzelt Datenbanken zur Speicherung gerätespezifischer Daten entwickelt [91]. Ein adäquates Verhältnis von Nutzen zu Aufwand kann langfristig nur durch Standardisierung der Beschreibungsschemata und einer firmenübergreifenden Erfassung und Nutzung der Daten erwartet werden. Solche Dienste werden derzeit im Bereich der Montagetechnik erst begrenzt angeboten [92].

Die Informationen zur Beschreibung der berücksichtigten Montagemittelklassen lassen sich nach :

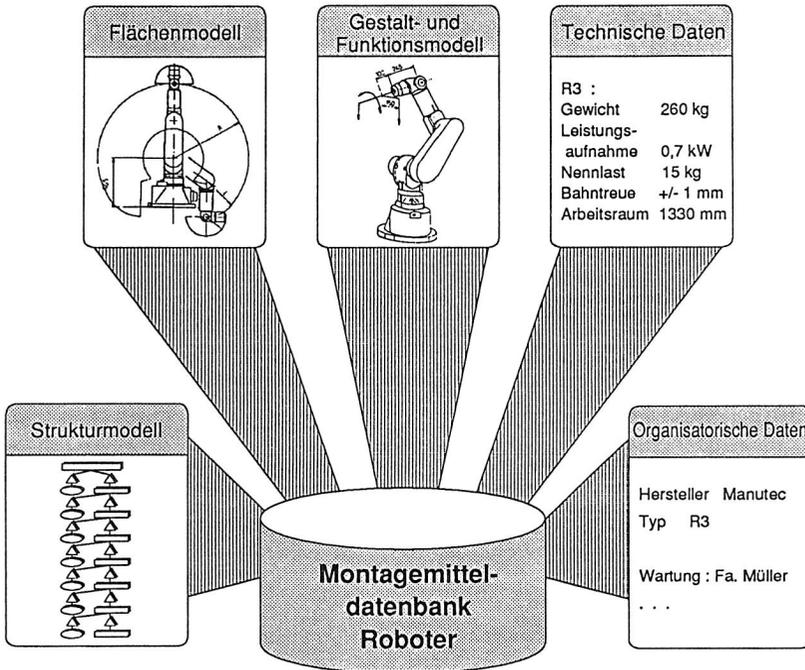
- \* *funktionalen,*
- \* *strukturalen,*
- \* *gestaltbeschreibenden,*
- \* *technischen und*
- \* *organisatorisch/betriebswirtschaftlichen*

Aspekten untergliedern.

Infolge der Heterogenität der abzubildenden Objekte und der damit verbundenen divergenten Informationsrelevanz der Beschreibungsmerkmale in den unterschiedlichen Planungsphasen sind die Schwerpunkte der Informationsabbildung ebenfalls sehr unterschiedlich. Dieser Sachverhalt wirkt sich unmittelbar auf den Abstraktionsgrad (Verkürzungsmerkmal) des jeweiligen Modells aus. So wird eine detailgetreue Gestaltabbildung eines Roboters in der Regel mehr Aufwand verursachen als Nutzen erbringen, da für die Aufgaben der Layoutplanung und der Gerätesimulation funktionale Kriterien im Vordergrund stehen. Für die Auswahl eines Greifwerkzeuges hingegen ist die wirklichkeitsgetreue Abbildung der Gestalt, insbesondere der Wirkgeometrie, absolut notwendig. Ebenso können bei verschiedenen Planungsaufgaben Modelle mit unterschiedlichen Abstraktionsgraden beziehungsweise unterschiedlichen Aussagen eingesetzt werden. Die Anforderungen an die Abbildung von Montagemitteln auf Modellebene unterscheiden sich damit wesentlich von den Anforderungen bei der Abbildung der Montageaufgabe. Der Abstraktionsgrad bei der Modellbildung ist daher dem verfolgten Informationszweck anzupassen (pragmatischer Aspekt).

Der Aufbau der Montagemitteldatenbank wird beispielhaft für die Komponentenkategorie *Roboter* anhand des oben aufgeführten Schemas erläutert (Bild 6-11).

Im strukturalen Beschreibungssystem wird der komponentenhafte Aufbau eines Robotersystems aus den einzelnen mechanisch/kinematischen Elementen abgelegt.



**Bild 6-11:** Beschreibungsformen der Montagemittelklasse Roboter

Da Robotersysteme vielfach baukastenförmig konfigurierbar sind, können damit unterschiedliche Systeme durch Variation der Elemente erstellt werden.

Für die Aufgaben der Layouterstellung sowie der Simulation wird eine graphische Darstellung eines Roboters erzeugt. Dabei wird zwischen zwei Modellrepräsentationen unterschieden. Für die Aufgaben der Flächenplanung werden von den layoutbestim-

menden Montagemitteln Abbilder als invariante Symbole erstellt und verwaltet, die den Grundriß mit Kennzeichnung des Ursprungkoordinatensystems, den Arbeitsraum, den Sicherheitsraum, die Bedien- und Wartungsflächen sowie die Anschlußpunkte für die energetische und informationstechnische Versorgung beinhalten. Diese geometrischen Informationen werden strukturiert abgelegt und können in beliebiger Kombination selektiert und dargestellt werden.

Für detailliertere Planungsaufgaben stehen gestaltbeschreibende Modelle der einzelnen Komponenten zur Verfügung, die programmgestützt anhand der strukturalen Beschreibung aus einzelnen Komponenten aufgebaut werden. Die Komponenten sind dabei mit speziellen Verbindungsgelenken und -achsen definiert, so daß ein funktionsfähiges Modell modular aufgebaut werden kann.

Die technische Beschreibung der Montagemittelklasse *Roboter* beinhaltet umfangreiche Kataloginformationen über den gesamten Roboter mit seinen einzelnen Komponenten, wie in Bild 6-11 ausschnittsweise gezeigt ist. Darin enthalten sind u.a. Angaben über Achslängen, kinematische Freiheitsgrade, Verfahrwege und -winkel der einzelnen Elemente, die für das kinematische Simulationsmodell mit als Eingangsgrößen dienen. Da die Gestaltmodellierung eines Roboters oftmals zu viel Aufwand erfordert, kann anhand einer strukturierten Beschreibung des kinematischen Aufbaus im *DB*-Schema automatisch ein einfaches Gerüstmodell erzeugt werden.

Mit Hilfe eines auf die spezifischen Daten des Roboters ausgerichteten Simulationsprogramms können die kinematischen Fähigkeiten eines Robotersystems am graphischen Bildschirm simuliert werden. Dieses Programmsystem greift unmittelbar auf die technischen Daten im Datenbankschema zu und transformiert die einzelnen Komponenten des Gestaltmodells oder des Gerüstmodells entsprechend der Aufgabenstellung.

Zu den organisatorischen Beschreibungselementen gehören Angaben über Hersteller, Lieferanten, Service etc.. Diese allgemeinen Angaben können um betriebsinterne Daten erweitert werden, falls das betrachtete Objekt nicht nur als Katalogobjekt, sondern als tatsächliches Montagemittel im Unternehmen existiert. In diesem Fall werden Instanzen

---

gebildet, die durch eine zusätzliche Inventarnummer identifizierbar sind. Diesem Modell eines real existenten Objektes werden individuelle, objektspezifische Eigenschaften wie räumlich/organisatorische Zugehörigkeit auf Datenbankebene zugewiesen. Die betriebswirtschaftlichen Daten geben Auskunft über Anschaffungs- und Betriebskosten eines Roboters. Auch hier lassen sich durch die o.g. Instanzenbildung individuelle Daten bereits vorhandener Montagemittel abbilden. Aufgrund dieser umfangreichen Beschreibung der Montagemittel wird es dem Benutzer ermöglicht, aus einem potentiellen Bestand einen aufgabenangepaßten Funktionsträger auszuwählen. Dazu kann er in parametrisierter Form Bedingungen formulieren, die das gesuchte Montagemittel erfüllen muß. Die Formulierung dieser Bedingungen orientiert sich am Beschreibungsschema der Montagemittelklasse auf Datenbankebene. Sie können über die maskengesteuerte Benutzeroberfläche quantifiziert werden (Bild 6-12).

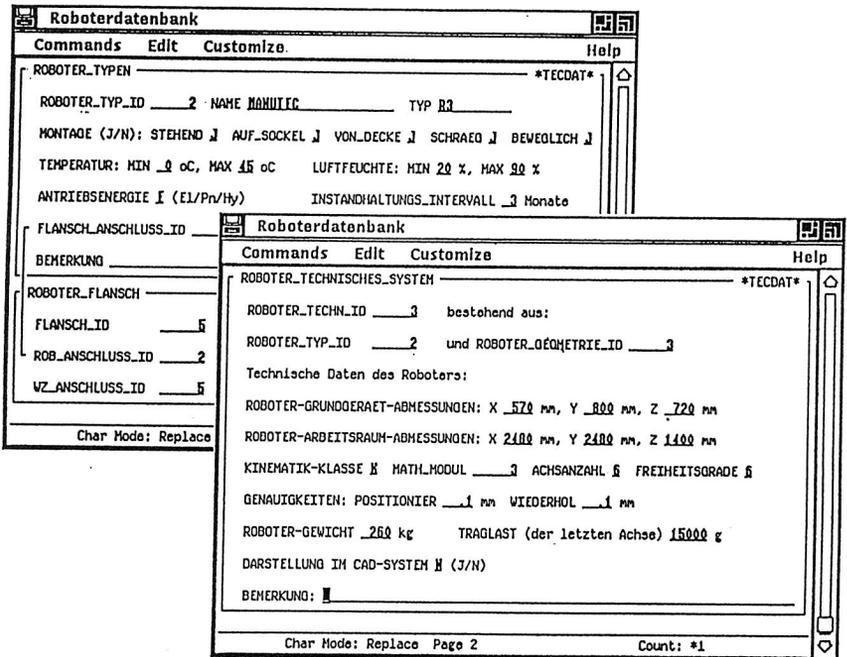


Bild 6-12: Benutzeroberfläche zur Kommunikation mit der Roboterdatenbank

## 6.2.2 Raum- und Flächeninformationen

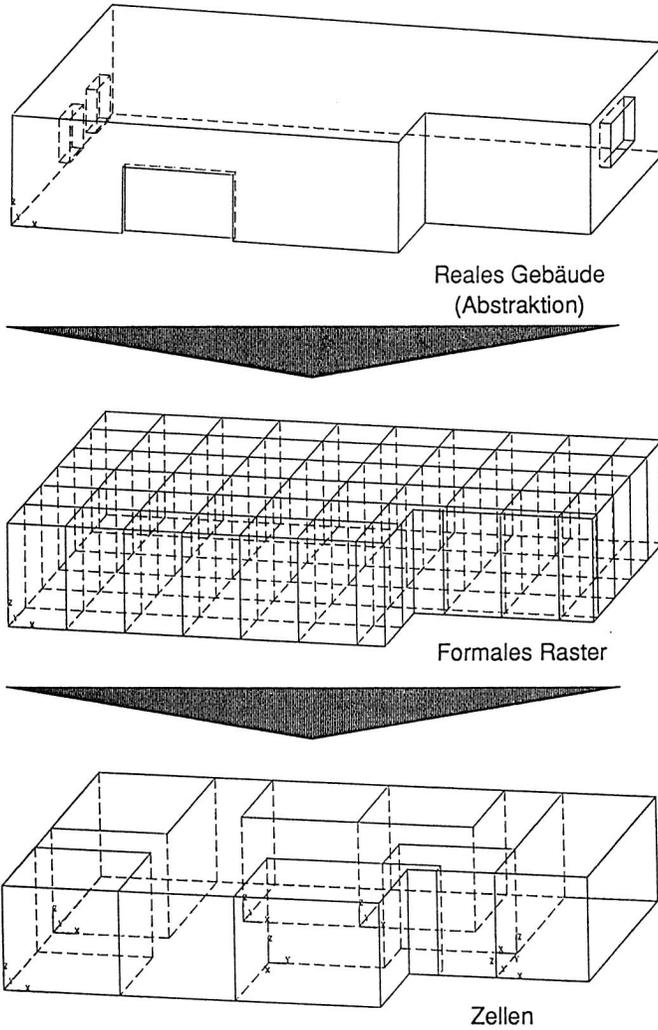
Eine weitere zentrale Bedeutung für die Planung der Montage kommt der optimalen Anordnung und Nutzung von verfügbaren Produktionsflächen zu. Die Anordnung der einzelnen räumlichen Funktionseinheiten sowie deren Beziehungen untereinander haben einen wesentlichen Einfluß auf die Effizienz und Transparenz des Gesamtsy-

stems. Daher soll abschließend die Möglichkeit geschaffen werden, raum- und flächenbezogene Informationen mit auf das Basismodell abzubilden.

In der Vergangenheit wurden mehrfach rechnerbasierte Methoden zur Unterstützung der Layoutplanung vorgestellt (vgl. u.a.[93],[94],[95]). Wesentlicher Nachteil vieler Ansätze ist die Beschränkung auf einzelne Detaillierungsphasen ohne Durchgängigkeit zwischen globalen und detailorientierten Betrachtungen sowie die Beschränkung auf graphische Darstellungen ohne Bezug zu funktionalen und strukturellen Informationen.

Ziel dieses Ansatzes ist es, die Layoutplanung in den gesamten Planungsprozeß zu integrieren und neben den logisch/strukturellen Beziehungen, die zwischen Funktionen und Funktionsträgern bestehen, gleichzeitig auch räumliche Zuordnungen abzubilden. Bezugsbasis für die Layoutplanung ist der faktisch zur Verfügung stehende Raum, der unabhängig von der Belegung oder Nutzung formal in ein Raster eingeteilt wird (Bild 6-13). Die Gitterkonstante des Rasters sowie das Referenzsystem können je nach Zweckmäßigkeitskriterien frei gewählt werden. Definition und Darstellung dieses Grundrasters erfolgen mit den Werkzeugen des CAD-Systems; die Verwaltung der Informationen erfolgt jedoch ausschließlich über die Datenbank, wobei jedes Rasterelement einen eindeutigen Identifikationsschlüssel zugewiesen bekommt. Innerhalb dieses an die äußeren Bedingungen angelehnten Grundrasters können den einzelnen Raum- oder Flächenelementen beliebige Strukturen aufgeprägt werden.

Durch diese Strukturierung von Grundelementen nach funktionalen Kriterien entstehen übergeordnete Einheiten, die als Zellen bezeichnet werden [96]. Jede Zelle bekommt auf Datenbankebene einen eindeutigen Identifikator und ein Koordinatensystem zugeordnet, das einerseits den räumlichen Bezug zu einem übergeordneten Referenzkoordinatensystem herstellt und andererseits selbst als Bezugssystem für die in der Zelle zu platzierenden Montageteile dient. Die konkrete Konfiguration der Elemente innerhalb einer Zelle sowie die Anordnung der Teileinheiten untereinander sind Aufgaben der Layoutplanung und sollen in Kapitel 7.4 erläutert werden.



**Bild 6-13:** Abbildung raum- und flächenbezogener Informationen

## 7. Durchgängige Verfahrenskette zur Montageplanung

Nach der Erfassung und Abbildung produkt- und ressourcenseitiger Basisinformationen zur Montage wird in diesem Kapitel eine integrierte Verfahrenskette zur Planung flexibel automatisierter Montagesysteme vorgestellt. Das Ziel dieser Verfahrenskette ist es, aufbauend auf den Grundinformationen, eine funktionale, strukturele und räumliche Zuordnung von Aufgaben und Funktionsträgern zu erstellen. Der Aufbau der Verfahrenskette orientiert sich an dem in Kapitel 2 beschriebenen Planungsablauf.

### 7.1 Grundsätzliche Überlegungen

Mit dem zuvor beschriebenen Modellkonzept wurde eine Möglichkeit zur zusammenhängenden und konsistenten Verwaltung von Objektinformationen vorgestellt. Bei dieser Betrachtung lag der Schwerpunkt auf der Verwaltung und internen Verarbeitung extern erzeugter Informationen. Die Generierung von Fortschrittsinformationen wurde bisher noch nicht berücksichtigt. Dies bleibt Aufgabe systemexterner Instanzen, wobei zwei grundsätzliche Möglichkeiten unterschieden werden:

- (1). Der Montageplaner selbst ist die problemlösende Instanz. Er selektiert auf der Grundlage seiner Erfahrung die notwendigen Eingangsinformationen aus dem Modell und verarbeitet sie vor dem Hintergrund seines Wissens. Dies wird immer dann die Methode der Wahl sein, wenn Probleme einzigartig sind und die Einflussfaktoren nicht von vornherein bekannt sind. Ebenso wird diese Methode dort einen Vorteil bieten, wo der Aufwand für die Formulierung und Implementierung einer rechnergestützten Problemlösungsmethode in keinem Verhältnis zum erwarteten Nutzen steht. Die Funktion des Rechners bleibt damit auf systematisierend unterstützende Aufgaben beschränkt.
- (2). Die Problemlösung/-bearbeitung wird durch Rechneinsatz unterstützt. Hier werden wiederum zwei Kategorien von Aufgaben und Lösungswegen unterschieden:

- i. Bei der zu lösenden Aufgabe ist der Lösungsweg eindeutig, strukturierbar und bekannt. Alle Randbedingungen sind systemseitig erfaßt und abgebildet. In diesem Fall kann eine rechnerunterstützte Aufgabenbewältigung durch den Einsatz konventioneller Programmsysteme erfolgen. Das Programm selektiert bestimmte Daten aus der Datenbank, verarbeitet oder transformiert sie und legt die Ergebnisse wieder in der Datenbank ab. Als Voraussetzung muß das Programm eine Schnittstelle zum verwendeten *DBMS*- und *CAD*-System besitzen.
  
- ii. Bei der zu lösenden Aufgabe ist der Lösungsweg nicht eindeutig bekannt. Randbedingungen und Einflußfaktoren können jedoch in Form von Heuristiken als Daumenregel formuliert und abgebildet werden. In diesem Fall soll zur Problemlösung ein wissensbasiertes System eingesetzt werden, das die Grunddaten zur Informationsverarbeitung aus dem zuvor beschriebenen Datenmodell extrahiert und aufgrund eines ständig aktualisierbaren Regelwissens verarbeitet. Auch in diesem Fall sollen die Ergebnisse wieder auf das Planungsmodell abgebildet werden. Der grundsätzliche Unterschied zu den geschlossenen Ansätzen wie sie in Kapitel 3 vorgestellt wurden ist, daß die Basisinformationen außerhalb des wissensbasierten Systems auf Datenbankebene verwaltet werden und damit jederzeit außerhalb der Laufzeitumgebung verfügbar sind. Zur Kommunikation zwischen beiden Systemen läßt sich die Datenmanipulationssprache des *DBMS* in das wissensbasierte System einbinden.

Die berücksichtigten Möglichkeiten zur Problemlösung innerhalb des vorgegebenen Aufgabenbereiches sind zusammenfassend in Bild 7-1 dargestellt. Dabei bietet der Einsatz eines wissensbasierten Systems die höchste Integrationsstufe. Dennoch sind die Aufgabenstellungen vielfach so komplex, daß der breite Einsatz eines solchen Systems zum heutigen Zeitpunkt keine befriedigenden Ergebnissen erwarten läßt. In der vorliegenden Arbeit werden für die einzelnen Aufgaben daher alle drei Varianten eingesetzt. Welche Integrationsstufe im speziellen Anwendungsfall gewählt wird, hängt neben den o.g. Einflußgrößen in der Praxis stark vom Aufwand/Nutzen-Verhältnis ab.

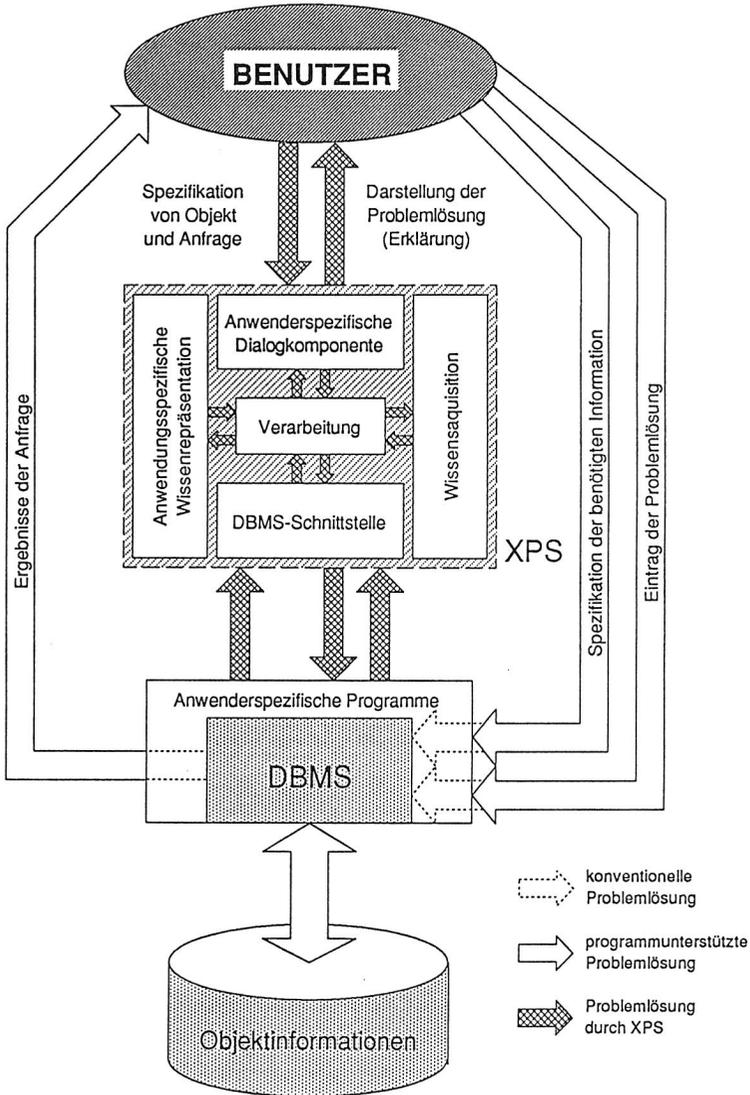


Bild 7-1: Möglichkeiten zur Generierung von Planungsfortschrittsinformationen

Da die einzelnen Aufgaben der Montageplanung in der Praxis von unterschiedlichen Instanzen bearbeitet werden, können über die nachfolgenden Planungsphasen die Zugriffsrechte, die zugehörigen Objekte sowie ihre Beziehungen in Abhängigkeit fallspezifischer, organisatorischer Regelungen getroffen werden.

## 7.2 Analyse der Montageaufgabe

Der erste Teilschritt der Montageplanung ist eine Qualifizierung und Quantifizierung der produktseitig bedingten Montageaufgaben und die Ableitung der Anforderungen, die sich daraus an das zu errichtende Montagesystem stellen. Weiterhin müssen die Reihenfolgerestriktionen, die sich aus dem Produktaufbau ergeben, analysiert werden.

### 7.2.1 Bestimmung der Montageoperationen

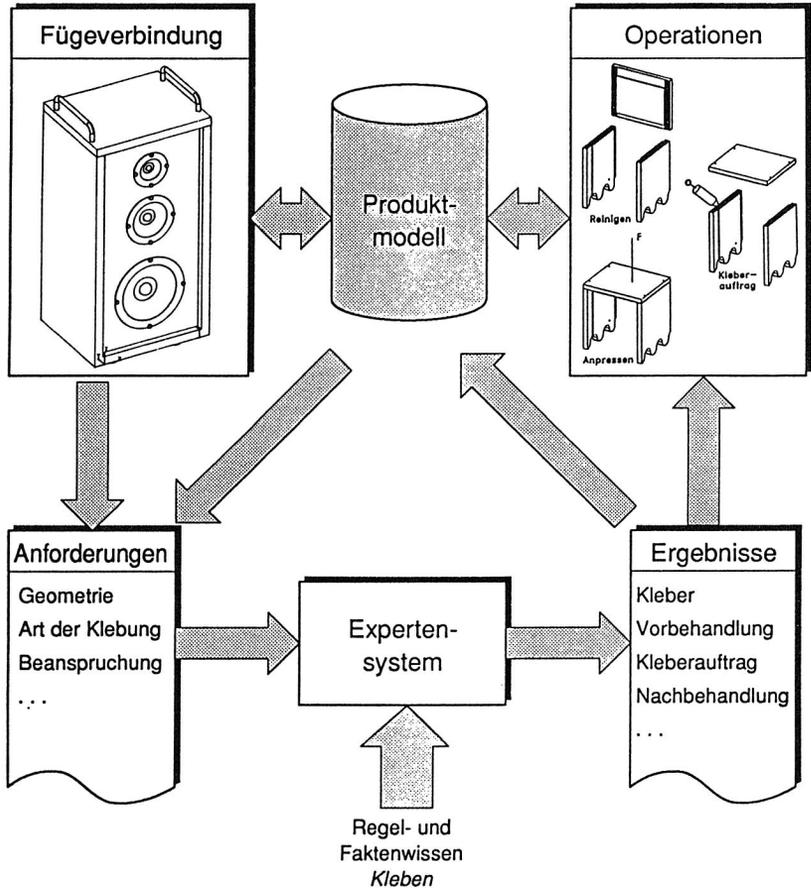
Zugehörig zu den herzustellenden topologischen und technologischen Beziehungen zwischen den Einzelteilen eines Produktes sollen zunächst die Operationen festgelegt werden, die zu dem geforderten Endzustand führen. Dies können im einfachsten Fall, beispielsweise beim *Einlegen* oder *-pressen* eines Einzelteils elementare kinematische Operationen sein, die durch die Definition einer Fügebewegung und der Bestimmung der erforderlichen Fügekraft hinreichend beschrieben werden können. Eine rechnerseitige Unterstützung dieses Planungsschrittes könnte sich in diesem Fall auf die Berechnung der erforderlichen Fügekräfte aus einem Finite-Elemente-Berechnungsmodul erstrecken, falls diese Werte nicht aus Praxisversuchen ermittelt wurden. Bei komplizierteren Fügeverfahren sind die durchzuführenden Operationen sowie die Prozeßparameter, die zur Herstellung der Verbindung führen, nicht immer offensichtlich, so daß hier rechnergestützte Methoden eine deutliche Aufwandsminimierung in der Planung leisten können. Die Methoden und die Wahl der geeigneten Hilfsmittel sind jedoch im Einzelfall an die jeweilige Fügetechnologie anzupassen.

Da eine Exploration aller Verfahren den Rahmen dieser Arbeit übersteigen würde, soll beispielhaft für die Füge­technologie *Kleben* ein wissenbasiertes System vorgestellt werden, das ausgehend von den gestellten Anforderungen die notwendigen Operationen und Bestimmungsgrößen für den ersten Teilschritt der Montageplanung bestimmt. Der Einsatz eines wissenbasierten Systems erscheint gerade in diesem speziellen Falle besonders vorteilhaft, da bei dieser Füge­technologie viele unterschiedliche Eingangsgrößen die Verbindung und den Prozeß beeinflussen, deren Zusammenwirken sich jedoch nicht in formelmäßige Beziehungen setzen lassen [97]. Diese Beziehungen sind überwiegend durch Erfahrung und Versuch bestimmt und lassen sich daher besser in Form von Regel- und Faktenwissen formulieren (vgl. Kap. 3.1.3).

Ausgangspunkt der Bestimmung elementarer Operationen ist die strukturierte, technologieorientierte Beschreibung der Produkt-Makrostruktur (vgl. Kap. 6.1.3). Diese Darstellung bietet unabhängig von dem hier exemplarisch beschriebenen Technologiebeispiel für alle zu bestimmenden Operationen eine umfassende Informationsbasis.

Die zur Herstellung einer Klebeverbindung erforderlichen Operationen leiten sich zum Teil unmittelbar aus den zu verbindenden Einzelteilen und den an die Verbindung gestellten Anforderungen ab. Die festzulegenden Operationen und Parameter stehen jedoch in vielseitigen Wechselwirkungen zueinander. So ist die erforderliche Vorbehandlung der Fügeflächen, die Prozeßtemperatur beim Klebstoffauftrag und beim Fügen, die mindestens notwendige Anpreßdauer u.a. Parameter sowohl von den verwendeten Werkstoffen als auch vom Klebstoff und den Einsatzbedingungen abhängig, so daß die im Einzelfall notwendigen Operationen jeweils individuell bestimmt werden müssen.

Zur Analyse und Bestimmung der für eine spezielle Fügeverbindung notwendigen Operationen wurde ein wissenbasiertes System entwickelt, daß mit dem zuvor beschriebenen integrierten CAD/DB-Modell gekoppelt ist. Die grundsätzliche Wirkungsweise des Gesamtsystems ist in Bild 7-2 dargestellt.



**Bild 7-2:** Einsatz eines Expertensystems zur Bestimmung von Montageoperationen

Alle zur Auswahl eines Klebers und zur Bestimmung durchzuführender Operationen benötigten Eingangsinformationen werden über eine Schnittstelle des wissensbasierten Systems aus dem CAD/DB-Produktmodell extrahiert. Dieser Vorgang erfolgt

automatisiert, sofern die Fügeverbindung vollständig im Modell beschrieben wurde. Ist dies nicht der Fall, kann der Anwender diese Angaben über die interaktive Dialogkomponente des Systems nachträglich ergänzen. Das notwendige Expertenwissen zur Bestimmung der Operationen und Parameter ist in der Wissensbasis abgelegt. Für den implementierten Prototyp wurde eine Regelbasis von etwa 500 Regeln aufgebaut, die sich auf die Verarbeitung von verschiedenartigen Klebstoffen, Materialien bei unterschiedlichen Beanspruchungen sowie deren speziellen Behandlungsvorschriften erstrecken. Das dazu erforderliche Wissen wurde aus der Literatur sowie aus Angaben der Klebstoffhersteller erfaßt [98],[99].

Unter Berücksichtigung der Eingangsgrößen und des Verarbeitungswissens ermittelt das wissensbasierte System nun mögliche Klebstoffe, die den zu erwartenden Beanspruchungen genügen.

Dieser erste Schritt der Klebstoffauswahl kann bereits während der Konstruktion durchgeführt werden, um frühzeitig zu testen, ob es für die betrachtete Verbindung einen geeigneten Klebstoff gibt.

Hat sich der Konstrukteur oder im anderen Fall der Arbeitsplaner für einen Systemvorschlag entschieden, ermittelt das System in der zweiten Bearbeitungsstufe die für diese Kombination notwendigen Operationen, parametrisiert sie sofern erforderlich und dokumentiert die Ergebnisse in der Datenbank.

Damit erfolgt der Übergang von der rein statischen zur operationalen Beschreibung der Fügeverbindung, indem die erforderlichen Basisoperationen den jeweiligen Fügeverbindungen im *CAD/DB*-Modell zugeordnet werden. Eine solche logische Zusammenfassung von Operationen zur Herstellung einer Fügeverbindung wird im folgenden als Operationskomplex definiert.

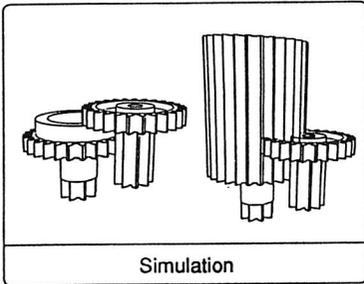
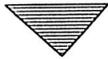
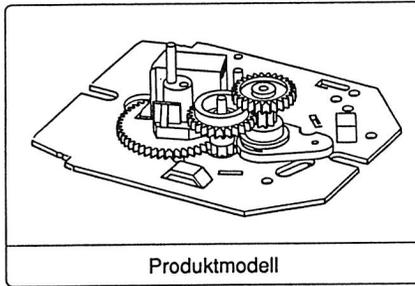
## 7.2.2 Ermittlung der Montagereihenfolgerestriktionen

Der zweite Analyseschritt dient zur Ermittlung der für die Montage gültigen Reihenfolgerestriktionen, wie sie sich aus dem Produktaufbau ergeben. Diese Aufgabe wird durch den Einsatz eines Simulationssystems unterstützt.

Mindestens ein Teilvorgang der zuvor ermittelten Operationen eines Operationskomplexes ist die Herstellung der endgültigen geometrisch/topologischen Beziehungen zwischen den beiden betrachteten Fügepartnern. Dies gilt unabhängig davon, ob die Fügepartner selbst schon mit anderen Teilen verbunden sind. Der Teilvorgang *Positionieren* unterliegen somit bestimmten Restriktionen, die sich aus dem gesamten Produktaufbau ergeben. Sie müssen daher in eine kausale Beziehung gesetzt werden, die die prinzipiellen Freiheitsgrade bezüglich der Montagereihenfolge darstellt. Da die einer Fügeverbindung zugeordneten Operationen nur die logische Zusammenfassung von Teilvorgängen sind, können Teilvorgänge unterschiedlicher Fügeverbindungen durchaus miteinander verschränkt sein. Mindestens die Teilvorgänge *Positionieren* unterliegen jedoch einer chronologischen Restriktion, die durch die Simulation ermittelt werden soll.

Eingangsgröße dieser Simulation ist das integrierte Produktmodell des betrachteten Erzeugnisses oder einer Teilmenge (Baugruppe) mit den damit verbundenen montagerelevanten Zusatzinformationen. Da ein rechnerinternes Modell mit der vollständigen Beschreibung der topologischen Makrostruktur bereits aus der Konstruktionsphase vorliegt, wird zur Ermittlung der Restriktionen bei der Montage zunächst die Demontage des Produktes analysiert, deren Umkehrung später die Montagemöglichkeiten aufzeigt (Bild 7-3).

Aus der CAD-Volumendarstellung des Erzeugnisses in zusammengebautem Zustand transformiert das Simulationsmodul sukzessive jedes Einzelteil entgegen seiner



Restriktion	Teil A	Ind A	Teil B	Ind B	A vor B	A u.v. B
ET327	1	1	ET211	1	x	x
ET327	1	2	ET211	2	x	x
ET327	1	3	ET211	3	x	x
ET327	1	1	ET405	1	x	0
ET211	3	1	ET410	1	x	0
ET405	1	1	ET410	1	x	x
ET211	3	1	ET635	1	x	0
ET211	3	1	ET701	1	x	x
ET211	2	1	ET705	1	x	0
ET701	1	1	ET635	1	x	x

Ergebnisrelation

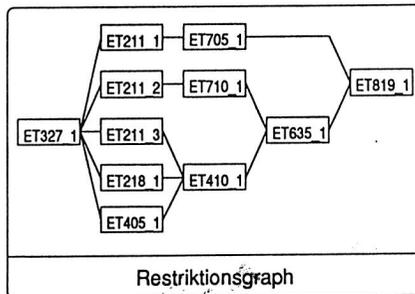


Bild 7-3: Rechnergestützte Analyse von Montagerihenfolgebeziehungen

definierten, kontextbezogenen FÜgerichtung und entfernt es aus dem Modell <sup>1)</sup>. Dabei wird mit erweiterten Funktionen des CAD-Systems ein Hüllvolumen des zu entfernenden Einzelteils erzeugt, das den für die Montage mindestens notwendigen FÜgeraum aufspannt (Bild 7-3). Die Erzeugung dieses Hüllvolumens erfolgt in inkrementalen Schritten aus der Ausgangsposition heraus, wobei nach jedem Schritt durch eine Boolesche Operation geprüft wird, ob sich das Hüllvolumen mit einem anderen Einzelteil überschneidet. Die so festgestellten Kollisionen implizieren, daß genau diese Elemente bei der Montage chronologisch vor dem momentan betrachteten Objekt gefügt werden müssen.

Das Resultat der paarweisen Betrachtung wird dem Tupel *Vorgänger/Nachfolger* in der Relation *Reihenfolgerestriktionen* zugeordnet (Bild 6-10). Entsprechend der Art der Beziehungen werden drei Beziehungstypen unterschieden:

- \* *kausale Unabhängigkeit*
- \* *indirekte Vorgängerbeziehung*
- \* *direkte Vorgängerbeziehung*

*Kausale Unabhängigkeit* bedeutet, daß es für die Reihenfolgeplanung zweier Vorgänge *A* und *B* gleichgültig ist, welcher der beiden Vorgänge zuerst ausgeführt wird.

Die *indirekte Vorgängerbeziehung*,  $A \rightarrow B$ , besagt, daß Teil *A* vor Teil *B* positioniert sein muß; zwischen den beiden Vorgängen können jedoch noch andere Teile gefügt werden.

Bei der *direkten Vorgängerbeziehung*,  $A \rightarrow B$ , muß dem Positioniervorgang von Teil *A* unmittelbar der Positioniervorgang von Teil *B* folgen.

Die automatische Ermittlung der Restriktionen kann jedoch bei Verwendung formvarianter Einzelteile, deren Verhalten nicht auf das Gestaltmodell abbildbar ist oder bei Einsatz besonderer FÜgeverbindungen, unmöglich werden. Dies erfordert dann eine

---

<sup>1)</sup> Für Betrachtungen auf höheren Ebenen werden Baugruppen wie invariante Einzelteile behandelt.

interaktive Bearbeitung. Da der Konstrukteur während der Konstruktion bereits eine Vorstellung über Montagereihenfolgebeziehungen haben kann, ist ein direktes Abbilden dieses Wissens auf das Modell möglich. Der interaktiv/dialoggestützte Eintrag der Reihenfolgebeziehungen erfolgt durch Selektion eines Erzeugnisses oder einer Baugruppe, die als Gestaltmodell am Bildschirm dargestellt wird. Zur visuellen Unterstützung dieser Interaktion wird das jeweils selektierte Teilepaar gegenüber den übrigen Teilen am Bildschirm farblich gekennzeichnet. Ebenso lassen sich Fügeachsen einblenden, entlang derer die Einzelteile bewegt werden können.

Voraussetzung für dieses Verfahrens ist, daß die Fügevektoren dem System bekannt sind. Diese Eingangsbedingungen werden beim Aufruf des Programms durch einen Trigger geprüft. Ist dies nicht der Fall, muß der Anwender diese Informationen mit den in Kapitel 6 beschriebenen Werkzeugen ergänzend definieren.

Zur automatischen Ermittlung dieser Teilaufgabe wurde in der Literatur ein Verfahren vorgestellt, das die Fügerichtungen aus den Flächennormalen der Fügeflächen ermittelt [86]. Aufgrund der dabei zu beachtenden Sonderfälle bei mehreren oder komplex geformten Fügeflächen soll die Definition der Fügerichtung im vorliegenden Fall nur manuell gestattet sein. Dies erlaubt auch die Erzeugung komplexer Fügebahnen, die aus der Betrachtung des *CAD*-Modells unmittelbar hervorgehen, deren rechnergestützte Analyse jedoch zu einem unverhältnismäßig hohen Aufwand führen würde.

Zur Darstellung der aus der Simulation ermittelten Restriktionen wird ein Graph verwendet, der die Beziehungen zwischen hier relevanten Teilvorgängen anschaulich darstellt (Bild 7-3). Der Graph besteht aus gerichteten Kanten und Knoten, wobei die Kanten kausale Abhängigkeiten zwischen den Knoten (Operationen) darstellen.

Der in Bild 7-3 gezeigte Graph beinhaltet noch keine Aussage über die tatsächliche Fügereihenfolge. Er stellt lediglich die vorhandenen Freiheitsgrade bei der Produktmontage dar, auf deren Grundlage sich später systembezogen eine reale Ablaufstruktur ableiten läßt.

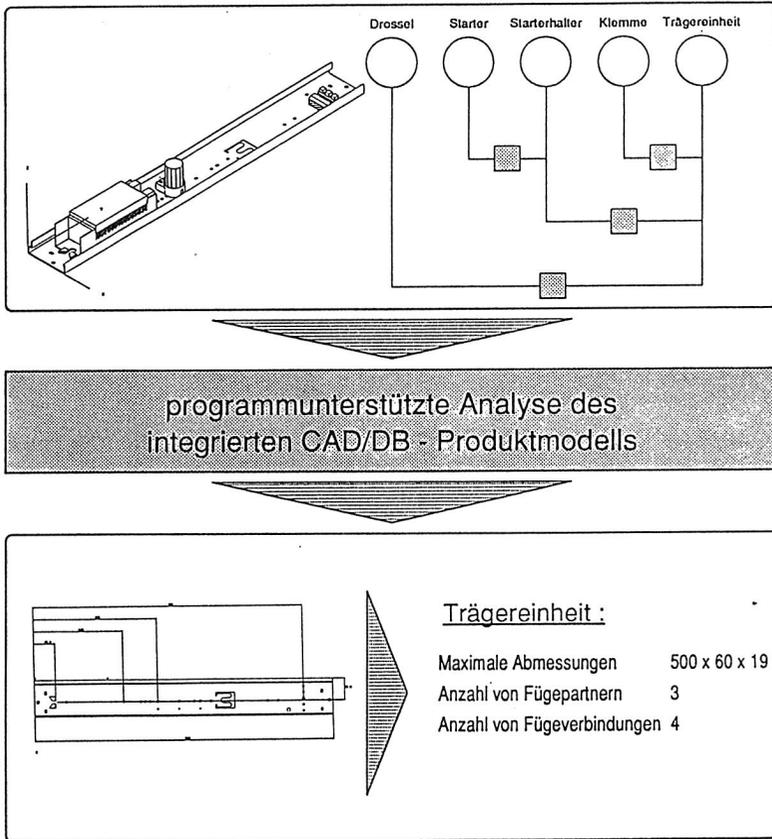
Zur Analyse komplexer Produkte ist je nach Rechnerbelastung und Leistungsfähigkeit ein erheblicher Zeitaufwand erforderlich, der es sinnvoll erscheinen läßt, diesen Schritt über Nacht im Batch Betrieb durchzuführen. Auf diese Weise wirkt sich der Zeitaufwand für die Berechnung nicht nachteilig auf den gesamten Planungsablauf aus. Die Ergebnisse der Analyse müssen auf jeden Fall durch den Anwender bestätigt werden. Dazu werden die sich ergebenden Montagemöglichkeiten visuell am Bildschirm überprüft. Auch an dieser Stelle hat der Benutzer die Möglichkeit, korrigierend einzugreifen, um technologisch unsinnige Kombinationen von vornherein auszuschließen.

Als zusätzliches Ergebnis der Simulation kann eine Explosionsdarstellung des Produktes am Bildschirm generiert werden, die zur visuellen Überprüfung oder zu Dokumentationszwecken verwendbar ist.

### **7.2.3 Ermittlung potentieller Basisteile**

Für den Übergang von der restriktiven Darstellung möglicher Montagereihenfolgen zu einer realisierbaren Lösung ist es notwendig, geeignete Basisteile zu ermitteln. Als Basisteil wird das erste Einzelteil einer Montagereihenfolge bezeichnet, an das die nachfolgenden Teile montiert werden [100]. Potentielle Basisteile in Bezug auf einen betrachteten Vorranggraphen sind diejenigen Einzelteile, die durch keine Vorgängerbedingung belastet sind, also bildlich gesehen am Anfang des Graphen stehen. Sofern nicht direkt ersichtlich, beziehungsweise während der Konstruktion festgelegt, welches Teil die Funktion übernehmen soll, können die in Frage kommenden Teile auf charakteristische Eigenschaften hin untersucht werden, um die notwendige Entscheidung zu treffen. Einflußfaktoren auf die Basisteileignung sind u.a. die Anzahl der Fügepartner und Fügeverbindungen, die ein Einzelteil mit anderen Einzelteilen gemeinsam hat, mögliche Spann- und Auflageflächen, die Abmessungen und die Gestalt sowie die Form- und Lagestabilität der Teile. Ein Teil dieser Angaben kann unmittelbar aus dem produktseitigen Informationsmodell ermittelt und vergleichend gegenübergestellt werden (Bild 7-4).

Die letztendliche Entscheidung, welches Teil als Basisteil verwendet wird, obliegt jedoch dem Anwender, der abschließend die entsprechenden Teile in der Datenbasis kennzeichnet.

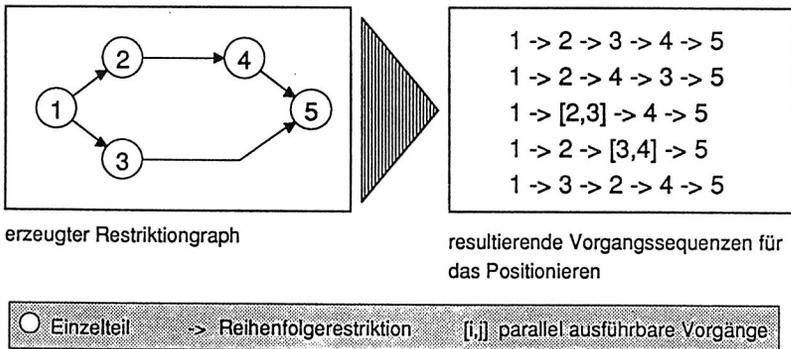


**Bild 7-4:** Analyse der Basisteileigenschaften

## 7.2.4 Strukturierung der Montageoperationen

Aus der Beschreibung von Operationen und der Darstellung des Restriktionsgraphens lassen sich alle prinzipiellen Möglichkeiten ableiten, ein Produkt oder eine Baugruppe aus den Einzelteilen zu montieren. Dem aus der Simulation entstammenden Graphen ist zu entnehmen, daß ein Einzelteil immer dann gefügt werden kann, wenn alle seine links von ihm angeordneten Vorgänger bereits positioniert sind. Stehen mehrere Teile in derselben Spalte (Hierarchiestufe), bestehen zwischen ihnen keine Reihenfolgerestriktionen. Die Aussage des Graphen beinhaltet, wie bereits erwähnt, noch keine Angaben über einen technisch sinnvollen und realisierbaren Ablauf. Für das in Bild 7-5 gezeigte, einfache Beispiel bedeutet dies, daß aus dem Graphen bereits fünf verschiedenen Möglichkeiten der Reihenfolgeregelung entstehen können.

Aus dieser Darstellung wird leicht ersichtlich, daß die Menge der real existierenden Lösungsmöglichkeiten bei großer Teileanzahl relativ schnell unüberschaubar wird. Ein Hilfsmittel zur Vorauswahl und Bewertung ist daher notwendig, sofern der Montageplaner nicht bereits eine konkrete Lösung verfolgt.



**Bild 7-5:** Beispiel möglicher Reihenfolgebeziehungen der Montage;  
abgeleitet aus dem Restriktionsgraph

Aus diesem Grunde sollen die potentiellen Möglichkeiten der Montage rechnergestützt ermittelt und dargestellt werden. Als Hilfsmittel dazu wird eine spezielle Form des *Petri-Netzes* verwendet [101], in das der Restriktionsgraph automatisch überführt wird. Dieses Netz besteht aus zwei Arten von Knoten, den *Aktivknoten* und den *Passivknoten*, die durch gerichtete Kanten miteinander verbunden werden. *Passivknoten* repräsentieren Zustände oder Bedingungen eines Systems. Sie werden graphisch als Kreise dargestellt. Ist die Aussage eines Passivknotens erfüllt, wird dies durch das Belegen des Knotens mit einer Marke kenntlich gemacht. *Aktivknoten*, dargestellt durch Rechtecke, symbolisieren Operationen, beziehungsweise Vorgänge. Operationen können dann ausgeführt werden, wenn die vorangestellten Bedingungen erfüllt sind; sie üben zudem Schaltfunktionen aus, indem sie nach Ausführung der Operation(en) die Marken von ihren Vorgänger- zu den Nachfolgerknoten versetzen.

In diesem speziellen Fall beinhalten die Passivknoten die Aussage *Teil in endgültige Position überführt*. Die Aktivknoten stehen für die Teilvorgänge der Montage, die zu diesem Zustand führen. Die Verbindungsrelation zwischen den aktiven und den passiven Systemelementen, das sogenannte Prozeßnetz, wird auf Datenbankebene verwaltet. Die Relationen lassen sich unmittelbar aus den Vorgänger/Nachfolger Beziehungen ableiten, die gegebenenfalls um weitere Zusatzbedingungen oder Restriktionen ergänzt sind. Durch die Belegung der Bedingungen mit Markierungen (*Flags*) können Zustände und Verhalten eines Systems nachgebildet werden. Mit den abgebildeten Relationen ist genau definiert, in welcher Weise die Flags bei Eintreten eines Ereignisses weitergeschaltet werden können. Eine Anfangsbedingung ist im einfachsten Fall durch das Vorhandensein (Bereitstellung) der benötigten Einzelteile definiert. Es handelt sich dabei um exogene Markierungen. Alle anderen innerhalb des Netzes auftretenden Markierungen erfolgen endogen, d.h. nach Ausführung eines Vorganges gelten die Nachbedingungen als erfüllt und werden markiert. Die Funktionsweise dieses Teilschrittes ist in Bild 7-6 dargestellt.

Der erste Schritt der Variantengenerierung ist die Bestimmung einzelner Operationen. Diese Informationen werden rechnergestützt aus dem Graph ermittelt (vgl. Bild 7-6, oberer Teil). Jede Kante des Restriktionsgraphen kann zunächst als Operation interpre-

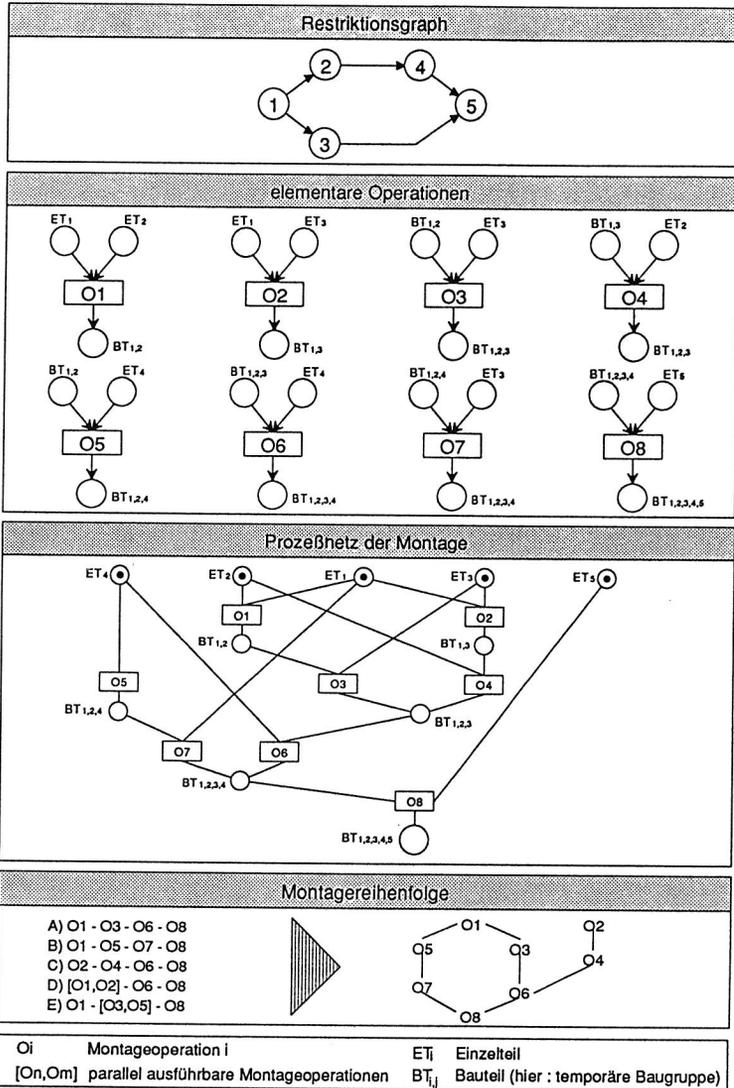


Bild 7-6: Überführung eines Restriktionsgraphen in ein Petri-Netz

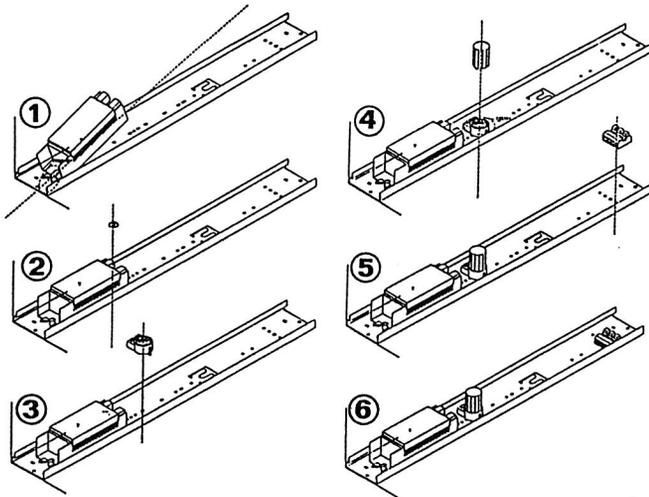
tiert werden. Zusätzliche Kanten werden zwischen Knoten gleicher Hierarchieebene und unterschiedlichen Ästen eingeführt. Auf das Beispiel bezogen bedeutet dies, daß zwischen *Teil 2* und *Teil 3* sowie zwischen *Teil 3* und *Teil 4* je zwei Kanten eingeführt werden. Daraus entstehen zunächst acht einzelne Operationen. Jede Operation hat zwei Vorbedingungen, entweder mindestens zwei vorhandene Einzelteile, die miteinander gefügt werden sollen, oder eine temporäre Baugruppe, d.h. ein momentaner Zustand aus bereits gefügten Teilen sowie das im Folgekomplex neu hinzuzufügende Teil. Ebenso existiert eine Nachbedingung, die die durch eine Operation entstehende temporäre Baugruppe kennzeichnet.

Durch Überführen gleicher Vor- beziehungsweise Nachbedingungen erhält man das in der Mitte von Bild 7-6 dargestellte Prozeßnetz. Die exogenen Anfangsmarkierungen kennzeichnen das Vorhandensein der Einzelteile  $T_1$  bis  $T_5$ . Eine Konfliktsituation beim Weiterschalten der Markierungen tritt bezüglich der Operationen  $O_1$  und  $O_2$  auf. Wird  $O_1$  aktiviert, so ist die Vorbedingung  $T_1$  für die Operation  $T_2$  nicht mehr erfüllt und umgekehrt. Wird  $O_1$  ausgeführt, so entsteht ein neuer Konflikt zwischen  $O_3$  und  $O_5$ . Diese beiden Paare von Operationen sind, wie später zu zeigen ist, Kandidaten für die Parallelisierung.

Aus dem Prozeßnetz ergeben sich durch Schalten der Ereignisse zunächst drei Möglichkeiten der Montage, die als Baumstruktur dargestellt werden. Aus dieser Baumstruktur können zusätzlich Operationen bestimmt werden, die möglicherweise auch parallel ausführbar sind. Es gilt für alle Operationen, die in derselben Gliederungstiefe stehen und eine gemeinsame Wurzel haben, daß sie parallel ausgeführt werden können [102]. Auf das Beispiel bezogen bedeutet dies, daß zwei Mengen von parallelisierbaren Operationen entstehen, die durch die eckigen Klammern gekennzeichnet sind. Insgesamt ergeben sich hier fünf grundsätzlich realisierbare Möglichkeiten der Anordnung von Operationen mit den jeweils beschriebenen Ein- und Ausgangszuständen (Bild 7-6, unten).

Je nach der Funktionalität des *CAD*-Systems können entweder die nach den Operationen entstandenen temporären Montagebaugruppen als Gestaltmodell

visualisiert werden oder die Montage kann als Bewegungssimulation am Bildschirm ausgeführt werden (Bild 7-7).



**Bild 7-7:** Beispiel der CAD-unterstützten Visualisierung von Montagefolgen

Die Entscheidung zugunsten einer Alternative wird durch eine Zeit- und Technologiebetrachtung unterstützt. Ausgehend von den geschätzten Durchführungszeiten für die einzelnen Operationskomplexe wird die Taktzeitverteilung der einzelnen Schritte sowie die Netto-Gesamtzeit der Montagefolge ausgerechnet, die allerdings in diesem Stadium nur sehr grobe Anhaltswerte liefern kann. Hilfreicher ist die Kennzeichnung technologie- oder kinematikähnlicher Fügevorgänge, die zweckmäßigerweise aufeinanderfolgen sollen.

Erfolgt die Auswahl einer Alternative, wird diese Reihenfolge für die weiteren Betrachtungen rechnerintern gekennzeichnet. Die anderen Alternativen werden zusätzlich zum Produktmodell mitverwaltet. Darauf kann gegebenenfalls sofort

aufgesetzt werden, falls sich die gewählte Alternative in späteren Planungsschritten als ungeeignet erweist.

### **7.3 Montageprinzip- und strukturplanung**

Im zweiten Schritt der Montageplanung soll anhand der systematisch erarbeiteten Eingangsinformationen ein unter den gegebenen Randbedingungen zweckmäßig erscheinender realer Montageablauf und die prinzipielle Systemstruktur definiert werden.

#### **7.3.1 Bildung von Montageabschnitten**

Um eine optimale Raum- und Montagemittelausnutzung zu gewährleisten, werden aus dem Produkt abgeleitete Operationen unter technisch/wirtschaftlichen Kriterien zu einzelnen Montageabschnitten zusammengefaßt. Die Montageabschnitte dienen damit zur Strukturierung der Operationen im Hinblick auf das zu erstellende Montagesystem unter räumlich/zeitlichen Aspekten. Jeder Montageabschnitt soll einer funktionalen Einheit innerhalb des zu erstellenden Montagesystems zugewiesen werden.

Zur Bildung eines Montageabschnittes werden die einzelnen Operationen hinsichtlich Zeit und Montagetechnologie analysiert. Die notwendigen Eingangsinformationen sind aus der vollständigen technologieorientierten Produktbeschreibung bekannt.

Ist aufgrund von äußeren Randbedingungen eine feste Taktzeit vorgegeben, so erfolgt eine Einteilung des Gesamtablaufs anhand der vorgegebenen Schätzzeiten. Dazu werden in der Folge automatisch so viele Vorgänge zusammengefaßt, bis die verfügbare Nettotaktzeit erreicht ist. Dieses Verfahren kann nur allererste Anhaltspunkte für eine Blockung liefern. Tatsächliche Taktzeiten für die automatische Montage können technologie- oder gerätebedingt stark von den Schätzzeiten abweichen, wie zahlreiche Erfahrungen im Praxistest gezeigt haben.

Eine Zeitvorgabe kann andererseits auch als Richtwert für die später zu spezifizierende Lösung angesehen werden. Durch Wahl der Funktionsträger und die Entscheidung zugunsten eines bestimmten Montageprinzips können Taktzeiten in gewissen Grenzen der Vorgabe angepaßt werden. Als Beispiel sei hier die Verwendung eines Multifunktionsgreifers anstelle eines Greiferwechselsystems zu nennen, bei dessen Verwendung Rüstzeiten vermieden werden.

Sinnvoller für die Blockung von Operationen zu Montageabschnitten kann im Hinblick auf die automatisierte Montage eine technologieorientierte Zusammenfassung von Operationen sein. Primäres Kriterium für eine Blockung ist dann die anzuwendende Montagetechnologie der Operationen. Automatisierte Montagezellen sind in ihrer Funktionalität weitaus stärker auf bestimmte Montagetechnologien ausgerichtet und damit wesentlich unflexibler als vergleichbare manuelle Arbeitsplätze. Dies liegt zum einen an den begrenzten kinematischen und sensorischen Fähigkeiten und zum anderen an der aufgabenbezogenen Auslegung der Zellenperipherie. Daher können hier die erzeugten Ablaufvarianten hinsichtlich gleicher oder ähnlicher Anforderungen an den Montageprozeß und die auszuwählenden Montagemittel untersucht werden. Durch gezielte Abfragen kann der Benutzer die Operationen nach Kriterien wie Einheitlichkeit der Fügerichtungen, kinematisch erforderliche Freiheitsgrade zum Fügen, Handhabungsgewichte, erforderliche Fügekräfte sowie Toleranzanforderungen vergleichend gegenüberstellen. Gleiche Fügerichtungen kennzeichnen beispielweise Montageoperationen, die ohne Umorientierung des Basisteils erfolgen können. Ebenso können die Greifflächen zu fügender Einzelteile hinsichtlich gleicher Merkmale untersucht werden, um gegebenenfalls mehrere Teile mit Hilfe eines Greifwerkzeuges innerhalb eines Montageabschnittes zu handhaben beziehungsweise zu fügen.

Wie durch die angeführten Beispiele schnell deutlich wird, ist über die Relevanz der einzelnen Kriterien, die zu einer Zusammenfassung von Operationen führen, nur situationsspezifisch zu entscheiden. Eine automatische Blockung würde aufgrund der vielfältigen Einflußfaktoren nur bei eng begrenzten Aufgabenstellungen sinnvolle Ergebnisse liefern. Daher soll die Rechnerunterstützung in diesem Teilschritt auf die Bereitstellung der produktbezogenen Basisinformationen beschränkt bleiben. Die Ent-

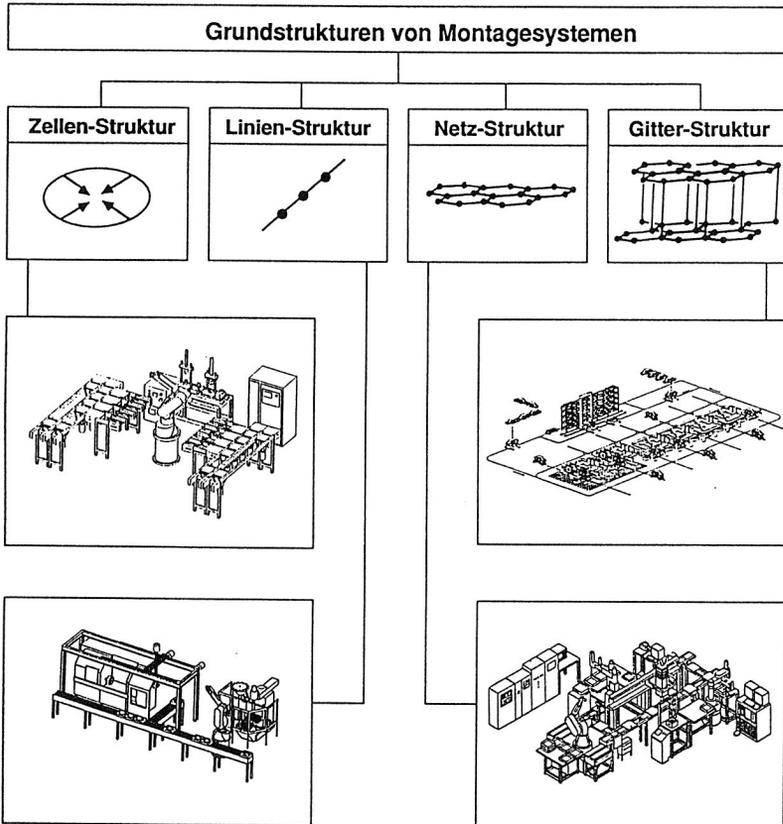
scheidung, welche der abgebildeten Kriterien im Einzelfall maßgeblich sind, trifft jedoch der Montageplaner.

Aus der vergleichenden Gegenüberstellung der Anforderungen einzelner Operationen an den Montageprozeß können diese Vorgänge interaktiv zu Montageabschnitten zusammengefaßt werden. Durch Auswahl des Menüfeldes *Generiere Montageabschnitt* wird auf Datenbankebene automatisch eine Relation referenziert, in der ein neuer Eintrag für den Montageabschnitt eingefügt wird. Diesem Eintrag werden die ausgewählten Operationsfolgen zugewiesen. Auf diese Weise entsteht rechnerintern eine aus dem zu montierenden Produkt abgeleitete, strukturierte Darstellung des gesamten Montageumfangs und -ablaufs.

### 7.3.2 Erstellung der Montagesystemstruktur

In der folgenden Stufe wird die ermittelte Ablaufstruktur auf eine Montagesystemstruktur abgebildet. Dazu ist die Wahl des Grundprinzips und die Bestimmung der Beziehungen zwischen den einzelnen Elementen erforderlich.

Prinzipiell können Montageanlagen nach den in Bild 7-8 gezeigten Möglichkeiten strukturiert werden. Entscheidend für die Wahl der Grundstruktur sind neben den zuvor behandelten produktimmanenten technischen Daten hauptsächlich die äußeren Randbedingungen aus dem administrativ/organisatorischen Aufgabenumfeld. Wichtige Einflußgrößen sind u.a. die geforderte Produktivität, die Flexibilität, das Verhältnis und die Reihenfolge von automatisierten zu nicht oder teilautomatisierten Montageabschnitten sowie eine bereits vorhandene und zu berücksichtigende Infrastruktur. Aufgrund der Vielschichtigkeit der fallspezifisch zu berücksichtigenden Faktoren kann diese Entscheidung nur durch den Benutzer getroffen werden. Die Definition der konkreten Systemstruktur und der Systembeziehungen soll daraufhin systematisch erstellt und rechnerunterstützt verwaltet werden.



**Bild 7-8:** Grundstrukturen von Montagesystemen [85]

Jedem definierten Montageabschnitt wird zunächst eine Montagezelle als abstrakte Systemeinheit zugewiesen. Diese zu erstellenden Zellen werden anschließend nach allen relevanten Kriterien beschrieben. Die Definition und Verwaltung dieser Daten erfolgt mit den Werkzeugen der Datenbank. Zum überwiegenden Teil können die abzubildenden Eingangsdaten direkt aus den zuvor erzeugten Informationen abgeleitet werden. Aus der Spezifikation des Montageumfangs und der gewählten Montagefolge

geht für jede Montagezelle unmittelbar hervor, welche Teile als temporäre Baugruppe in die Zelle eingebracht und welche Teile zusätzlich in der betrachteten Zelle hinzugefügt werden. Weiterhin ist ersichtlich, welche temporären Baugruppen die Systemeinheit nach der Durchführung der geplanten Operationen wieder verlassen und mit welchem Ziel.

Auf der Grundlage dieser Systembeschreibung kann eine graphische Darstellung der geplanten Systemstruktur am Bildschirm erstellt werden (Bild 7-9).

Jedes Rechteck entspricht dabei einer Montagezelle, die Pfeile kennzeichnen die Materialflußbeziehungen zu und zwischen den Zellen. Durch graphisches Identifizieren der Elemente können die zugeordneten Informationen aus der Datenbank abgerufen und bei Bedarf modifiziert werden.

Zusätzlich können auf dieser Ebene weitere systembestimmende Fakten definiert werden, die für die nachfolgende Auswahl der Funktionsträger relevant sind. Für die durchzuführenden Funktionen und für die Materialflußbeziehungen zwischen den Systemeinheiten können Grundprinzipien sowie der beabsichtigte Automatisierungsgrad festgelegt und dokumentiert werden.

Insgesamt ist durch diesen Schritt eine systematische und vollständige Beschreibung der geplanten Montage möglich, die als Pflichtenheft für die folgenden Planungsschritte dient.

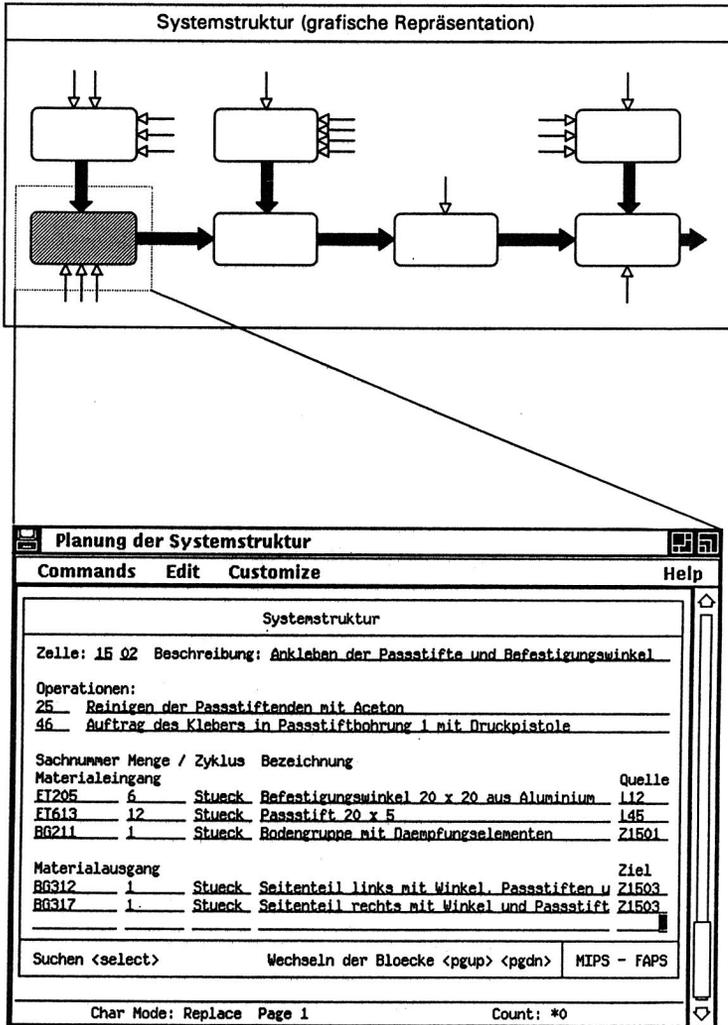


Bild 7-9: Planung der Systemstruktur

## 7.4 Auswahl der Funktionsträger

Zu jedem definierten Montageabschnitt sollen im weiteren Planungsverlauf Montagemittel oder allgemein bezeichnet, Funktionsträger zur Durchführung der Montageoperationen ausgewählt und zugeordnet werden. Dieser Prozeß umfaßt mehrere Teilschritte, da die Funktionsträger aufgabenspezifisch konfiguriert oder angepaßt werden müssen. Wie bereits erwähnt, ist bei der konkreten Auslegung der Zelle die Montageaufgabe und der Prozeß maßgeblich für die Auswahl der Systemkomponenten und deren räumlicher Konfiguration. Daher ist das Vorgehen bei der Planung im allgemeinen und bei der Auswahl der Funktionsträger im speziellen wesentlich stärker *vom Prozeß zur Anlage hin* ausgerichtet als bei Systemen der Teilefertigung. Diese besonderen Randbedingungen sollen bei der Auswahl der Funktionsträger berücksichtigt werden.

### 7.4.1 Grundkomponenten

Um den Aufwand und die Kosten für die Konfiguration einer Montagezelle möglichst gering zu halten, ist es sinnvoll bei der Auswahl der Funktionsträger soweit als möglich auf marktübliche Grundkomponenten zurückzugreifen. Aus diesem Grund wurde eine Montagemitteldatenbank mit der rechnerinternen Beschreibung potentieller Montagemittel errichtet.

Durch Gegenüberstellung von Anforderungs- und Leistungsprofil können Funktionsträger aufgabenspezifisch ausgewählt werden. Die Anforderungen an die Funktionsträger lassen sich aus einer gemeinsamen Betrachtung aller in einer Montagezelle durchzuführenden Operationen nach unterschiedlichen Kriterien ermitteln. Dazu kann der Benutzer sich einen speziellen Montageabschnitt auswählen, die darin durchzuführenden Operationen mit den Gestaltmodellen am Bildschirm visualisieren und gleichzeitig die zugehörigen, technischen Parameter abfragen.

Weitgehend systembestimmend sind die primären Montageoperationen, da sie direkt aus der Aufgabe hervorgehen und wenig Wahlmöglichkeiten zulassen. Mehr

systemseitige Freiheitsgrade gewähren dagegen die sekundären Montageoperationen. Eine strikte Trennung ist jedoch nicht immer möglich, da ein Funktionsträger sowohl primäre als auch sekundäre Montageoperationen durchführen kann.

Die rechnergestützte Auswahl von Standardkomponenten soll anhand eines Beispiels näher erläutert werden, bei dem Handhabungs- und Fügefunktionen durch eine Montagemittelgruppe durchgeführt werden sollen. Ausgangspunkt ist zunächst der Fügeprozeß der in Bild 7-7 gezeigten Einzelteile eines Leuchtstoffröhrenträgers auf das Basisteil.

Die diesem Montageabschnitt zugeordneten Aufgaben beinhalten folgende Operationen:

- \* *Drossel aufschrauben*
- \* *Starterhalter einklippen*
- \* *Starter eindrehen*
- \* *Kabelklemme einklippen*

Zur Lösung dieser Aufgabe können unterschiedliche Prinzipien angewendet werden. Entweder können für jede Operation eigene Montagemittel ausgewählt und zugeordnet werden oder es wird versucht, möglichst viele Operationen mit minimalem Montage-mittelaufwand durchzuführen. Aus der Betrachtung der möglichen Montagefolgen ergibt sich lediglich die Restriktion, daß die Drossel aufgelegt sein muß, bevor der Schraubvorgang erfolgt. Eine parallele Ausführung der übrigen Operationen wäre also möglich, um eine minimale Taktzeit zu erreichen. Da im vorliegenden Fall die Taktzeitvorgabe für diesen Montageabschnitt eine sequentielle Montage zuläßt, soll zunächst die Strategie verfolgt werden, den gesamten Funktionsumfang mit geringstem Montage-mittelaufwand durchzuführen. Geht man von der primären Montagefunktion aus, ist es erforderlich, einen Greifer für das Handhaben und Fügen der Einzelteile zu finden. Auch hier kann zunächst die Strategie verfolgt werden, möglichst alle Teile nacheinander mit einem Greifer aufzunehmen und zu fügen. Eine vergleichende Betrachtung der

Fügetechnologien und der Greifflächengeometrien der Einzelteile implizieren dabei bereits mögliche Lösungen. Durch die Angabe der Auswahlkriterien wie zum Beispiel *Greifweitenbereich* und *Greiferfunktionsprinzip* über die Dialogkomponente der Montagemitteldatenbank können die Datenbestände hinsichtlich der geforderten Kriterien untersucht werden (Bild 7-10).

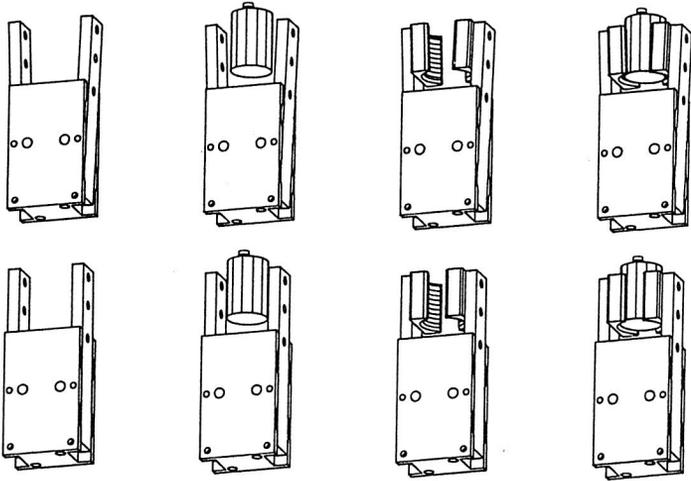
Commands		Edit	Customize	Help
GREIFER_TEC				*TECDAT*
TECHNISCHE_ID :	<input type="text" value="3"/>	BAUART :	<input type="text" value="ZWEIFINGER"/>	
		FUNKTIONSPRINZIP :	<input type="text" value="SCHWENK-GREIFEND (ZANGE)"/>	
GEWICHT :	<input type="text" value="250"/> g	GREIFBEREICH MIN/MAX :	<input type="text" value="25"/> mm / <input type="text" value="35"/> mm	
BEMERKUNG : <input type="text" value="DOPPELWIRKEND / ALU / LUFTVERBR. 0,04 l/zycl."/>				
	SCHLIESS_BEWEGUNG		OEFFNUNGS_BEWEGUNG	
ENERGIEART (EINH)	<input type="text" value="PNEUMATISCH(DRUCKLUFT)(bar)"/>		<input type="text" value="PNEUMATISCH(DRUCKLUFT)(bar)"/>	
ENERGIE MIN/MAX	<input type="text" value="4"/> / <input type="text" value="8"/>		<input type="text" value="4"/> / <input type="text" value="8"/>	
KRAFT MIN/MAX	<input type="text" value="25"/> N / <input type="text" value="35"/> N		<input type="text" value="25"/> N / <input type="text" value="35"/> N	
BEWEGUNGSZEIT	<input type="text" value=""/> s		<input type="text" value=""/> s	
KRAFT GESICHERT	GREIFER GESCHLOSSEN <input type="checkbox"/> (J/N)	GREIFER GEOEFFNET <input type="checkbox"/> (J/N)		
Char Mode: Replace Page 3			Count: *1	

**Bild 7-10:** Benutzerschnittstelle zur Spezifizierung der Anforderungen an ein Betriebsmittel

Die Auswahlkriterien können im Rahmen der abgebildeten, charakteristischen Beschreibungsmerkmale frei formuliert und kombiniert werden, wodurch eine problemorientierte Suche ermöglicht wird. Da sich zur Handhabung dieser Teile prinzipiell verschiedenartige Lösungen anbieten, ist die Erfahrung des Anwenders auch hier unabdingbar.

Er muß im speziellen Fall entscheiden, welche Strategien und Lösungsprinzipien verfolgt werden und welche Kriterien im Einzelfall auswahlrelevant sind.

Erfolgt der Selektionsprozeß unter Zuhilfenahme des *CAD*-Moduls, können die Gestaltrepräsentationen der ausgewählten Montagemittelmodelle direkt am Bildschirm dargestellt werden. Mit diesen Modellen ist eine Simulation der kinematischen Funktion, hier die Öffnungs- und Schließfunktion der Greifer, möglich, womit die Eignung der ausgewählten Komponenten in Bezug auf Objekte und Aufgaben verifiziert werden kann (Bild 7-11).



**Bild 7-11:** Simulation der Greiferfunktion

Als nächster Auswahlschritt wird ein geeignetes Handhabungsgerät für die Aufnahme der Greifer und der Objekte gesucht. Als relevante Auswahlkriterien werden die kinematischen Fähigkeiten, Fügegenauigkeiten, maximales Handhabungsgewicht und der verfügbare Arbeitsraum angesehen.

Die kinematischen Anforderungen leiten sich aus der Darstellung der Fügevektoren des Produktmodells ab. Die Zusammenfassung aller erforderlichen translatorischen und rotatorischen Fügevektoren legt die mindestens erforderlichen Freiheitsgrade des auszuwählenden Handhabungsgerätes fest.

Zu beachten ist, daß für das Aufnehmen und Verfahren der Einzelteile zusätzliche Freiheitsgrade erforderlich sein können, die nicht aus der produktimmanenten Betrachtung hervorgehen, sondern erst im Kontext der zu konfigurierenden Montagezellen mit allen peripheren Einrichtungen ersichtlich werden.

Weiteres Auswahlkriterium soll die Positionier- und Wiederholgenauigkeit des auszuwählenden Handhabungsgerätes sein. Aus der Analyse der CAD-Modelle oder, sofern sich hieraus keine sichere Aussage ableiten läßt, aus praktischen Versuchen werden zulässige Abweichungen ermittelt und den Fügevektoren als Toleranzangabe in der Datenstruktur zugeordnet. Der geringste zulässige Wert aus dem Aufgabenumfang ist somit bestimmend für die Geräteauswahl.

Die mindestens erforderliche Tragkraft des auszuwählenden Roboters wird automatisch aus der Summe der Einzelteilmomente sowie der vorgesehenen Greifer ermittelt. Diese Objektinformationen sind im Stammdatenbereich der Einzelteile und der Montagemittel-datenbank abgelegt. Gegebenfalls sind zusätzlich überlagernde Fügekräfte zu berücksichtigen.

Die ermittelte Systemkonfiguration kann mit Hilfe des Triggermoduls auf ihre Zulässigkeit überwacht werden. Im vorliegenden Beispiel besteht die Restriktion, daß das zulässige Handhabungsgewicht 3 kg nicht übersteigen darf. Aus den Strukturinformationen ist unmittelbar ersichtlich, welche Greifer und welche Einzelteile dem Handhabungsgerät zugeordnet wurden. Damit kann systemseitig bei der Konfiguration geprüft werden, ob die o.g. Bedingung erfüllt wird, indem auf diese Beziehung ein Trigger definiert wird.

Ein weiteres Auswahlkriterium kann der benötigte Arbeitsraum sein. Dazu wird ein Quader definiert, der die maximale Abmessungen des Basisteils sowie ausreichenden Raum für die Bereitstellung der Einzelteile umfaßt. Diese Angaben referenzieren die maximalen Verfahrswege des auszuwählenden Roboters entsprechend den festgelegten Raumachsen. Die Suchbedingungen, hier die geometrischen Mindestanforderungen, können über die Dialogkomponente der Roboterdatenbank angegeben werden. Als Ergebnis dieses Selektionsprozesses werden alle unter der Objektklasse Roboter gespeicherten Montagemittel aufgelistet, die den gestellten Kriterien genügen. Diese Art der Suche kann jedoch nur als Vorauswahl gesehen werden, die durch weitere Untersuchungen bestätigt werden muß. Dazu können diese Modelle bei Bedarf als flächenhaftes- oder als funktionsfähiges Gestaltmodell am Bildschirm visualisiert werden. In gleicher Weise lassen sich für andere Teilfunktionen Montagemittel aus den gespeicherten Objektklassen ermitteln. Die ausgewählten Komponenten werden anschließend dem definierten Montageabschnitt beziehungsweise der Montagezelle zugewiesen und das Ergebnis in der Datenbank dokumentiert (Bild 7-12).

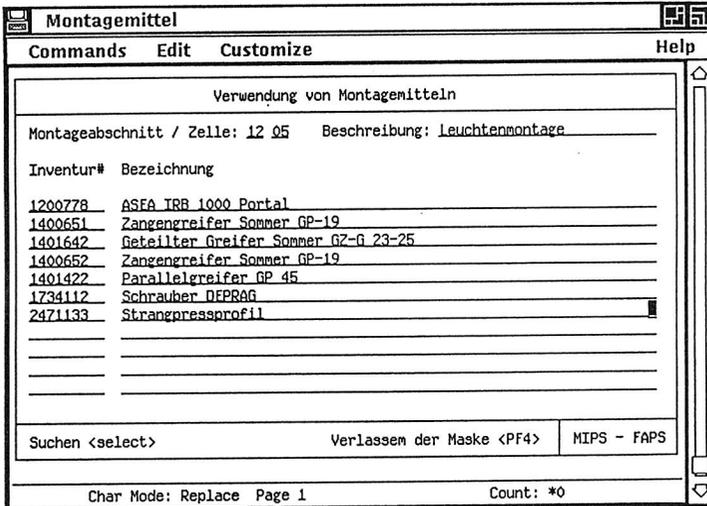
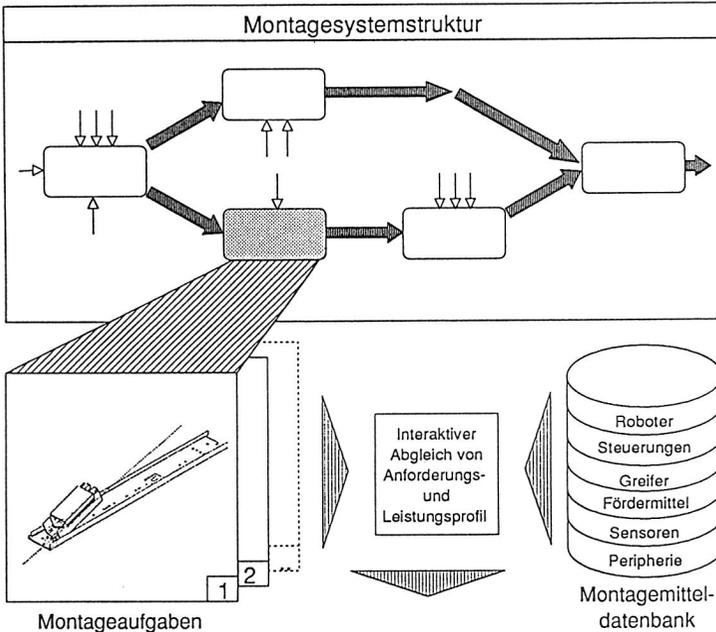


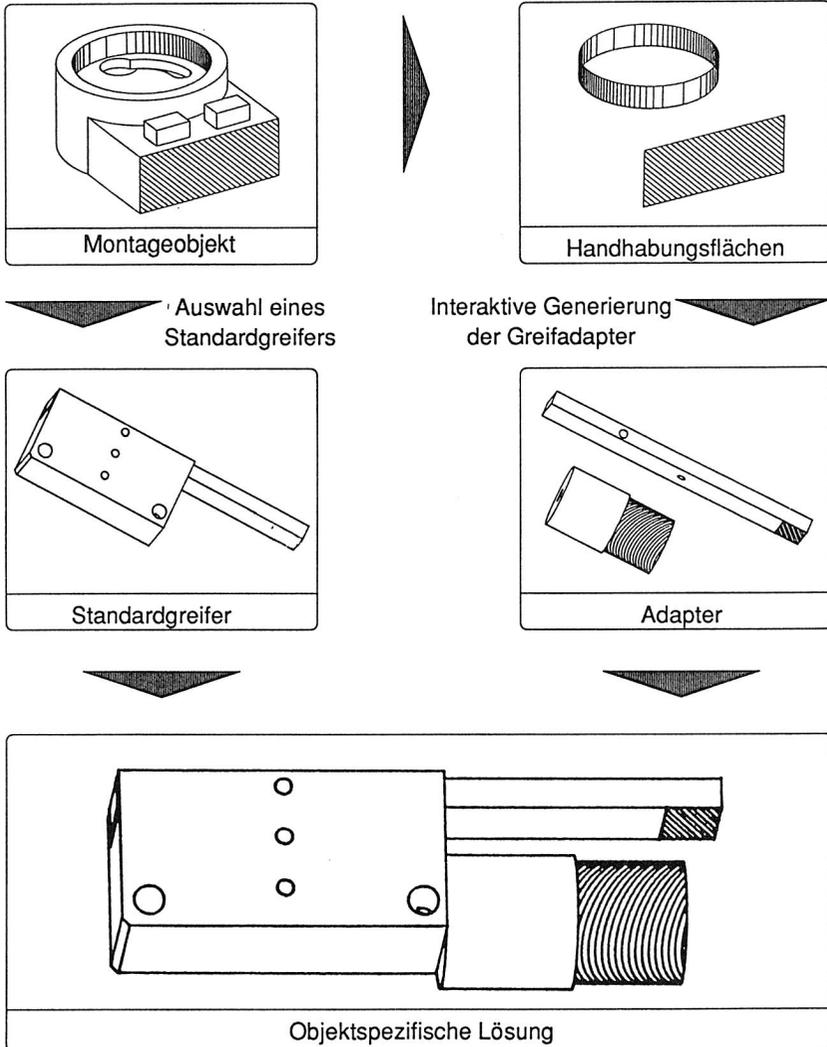
Bild 7-12: Zuweisung von Montagemitteln zu Montageabschnitten

### 7.4.2 Konstruktive Anpassungen und Erweiterungen

Mit Hilfe der ausgewählten Standardkomponenten läßt sich der geplante Montageumfang in der Regel noch nicht durchführen. Systemspezifische Anpassungen und Ergänzungen sind in den meisten Fällen erforderlich, um Montageobjekt und Funktionsträger aufeinander abzustimmen. Die Detaillierungen können zum Teil schon in einer frühen Planungsphase der Montage notwendig werden, um nachzuweisen, ob das verfolgte Konzept funktionsfähig ist. Im negativen Fall muß bereits an dieser Stelle das Zellenkonzept geändert werden, was auf die nachfolgenden Planungsschritte weitreichende Folgen haben kann.

Für das Beispiel der Leuchtenmontage soll in diesem Planungsstadium geprüft werden, ob der gesamte Funktionsumfang mit Hilfe eines Mehrfachgreifers durchgeführt werden kann. Dazu kann mit Hilfe der *CAD*-Modelle untersucht werden, ob die Anordnung aller Greifer mit den teilespezifischen Adaptern auf einem Basisträgersystem kollisionsfrei möglich ist. Wenn ja, kann die favourisierte Lösung mit einem Roboter weiterverfolgt werden. Falls nicht, müßten diesem Montageabschnitt zwei oder mehrere Roboter zugewiesen, beziehungsweise ein Konzept mit Greiferwechselsystem verfolgt werden, was sich unmittelbar auf die Layoutplanung auswirkt. Unabhängig davon, zu welchem Zeitpunkt diese Detaillierungen nun im Einzelfall tatsächlich notwendig werden, ist es wünschenswert, benötigte Vorrichtungen, die in der Regel auf die Einzelteil- oder Montagemittelgeometrie bezogen sind, möglichst direkt aus den bereits vorhandenen Geometrieinformationen abzuleiten. Zur Anpassung von Greifwerkzeugen an spezielle Objektgeometrien wurde ein *CAD*-Makro erstellt, das die an den Greifobjekten definierten Greifflächen sowie die Anschlußflächen an den Greifern kopiert. Aus den Teilflächen wird daraufhin das zu erzeugende Volumenmodell des Greiferadapters interaktiv generiert (Bild 7-13).

Nächster Schritt ist die Anordnung der so vervollständigten Greifwerkzeuge auf einen Basisträger, der am Roboter angeflanscht wird. Mit Hilfe des Gestaltmodells kann nun am Roboter simuliert werden, ob die geplanten Operationen mit der erstellten Konfiguration durchgeführt werden können.



**Bild 7-13:** Makrounterstützte Anpassung von Standardgreifern an die spezifische Objektgeometrie

## 7.5 Layoutplanung

Aufgabe der rechnergestützten Layoutplanung in der Verfahrenskette ist die räumliche Anordnung der Zellen innerhalb eines vorgegebenen Rasters sowie die Konfiguration der Montagemittel in den einzelnen Zellen. Damit soll ein möglichst realitätsnahes, rechnerinternes Modell der zu errichtenden Montageanlage erstellt werden, mit dem die Funktionalität der angestrebten Lösung beurteilt werden kann. Aus den in Kapitel 7.4.2 genannten Gründen müssen die Stufen Strukturlayout, Zellenlayout und Detaillayout nicht unbedingt in dieser klassischen Reihenfolge durchlaufen werden. Insbesondere bei autonomen Montagezellen kann ein umgekehrtes Vorgehen sogar zwingend sein. In diesem Fall sind jedoch vorab übergreifende Schnittstellendefinitionen erforderlich, die bei der Zellenkonfiguration zu berücksichtigen sind.

### 7.5.1 Überführung der Systemstruktur in ein Strukturlayout

Unter Strukturlayout wird eine maßstäbliche Darstellung der geplanten Montageanlage innerhalb des vorgegebenen Grundrasters definiert. Die einzelnen Elemente des zur Verfügung stehenden Raumes werden je nach Bedarf zu logischen Einheiten im Datenmodell zusammengefaßt. Sie repräsentieren den pro Montageabschnitt verfügbaren Raum für die Ausführung der definierten Operationen.

Die räumliche Definition der Zellen erfolgt interaktiv am Bildschirm mit den Werkzeugen des CAD-Systems. Eingangsgrößen sind die Systemstruktur und die den Montageabschnitten logisch zugewiesenen Montagemittelkomponenten (Bild 7-14). Durch die Angabe der Grundfläche layoutbestimmender Montagemittel in der Datenbank können erste Anhaltswerte des Flächenbedarfs einzelner Montagezellen numerisch berechnet werden. Da diese Angaben aber in der Regel um weitere Grundflächen ergänzt werden müssen, empfiehlt es sich, die maßstabsgerechten Flächenmodelle der Montagemittel als Hilfe heranzuziehen, um durch eine Grobpositionierung unter funktionalen Gesichtspunkten die äußere Form und Abmessung der Zelle zu ermitteln.

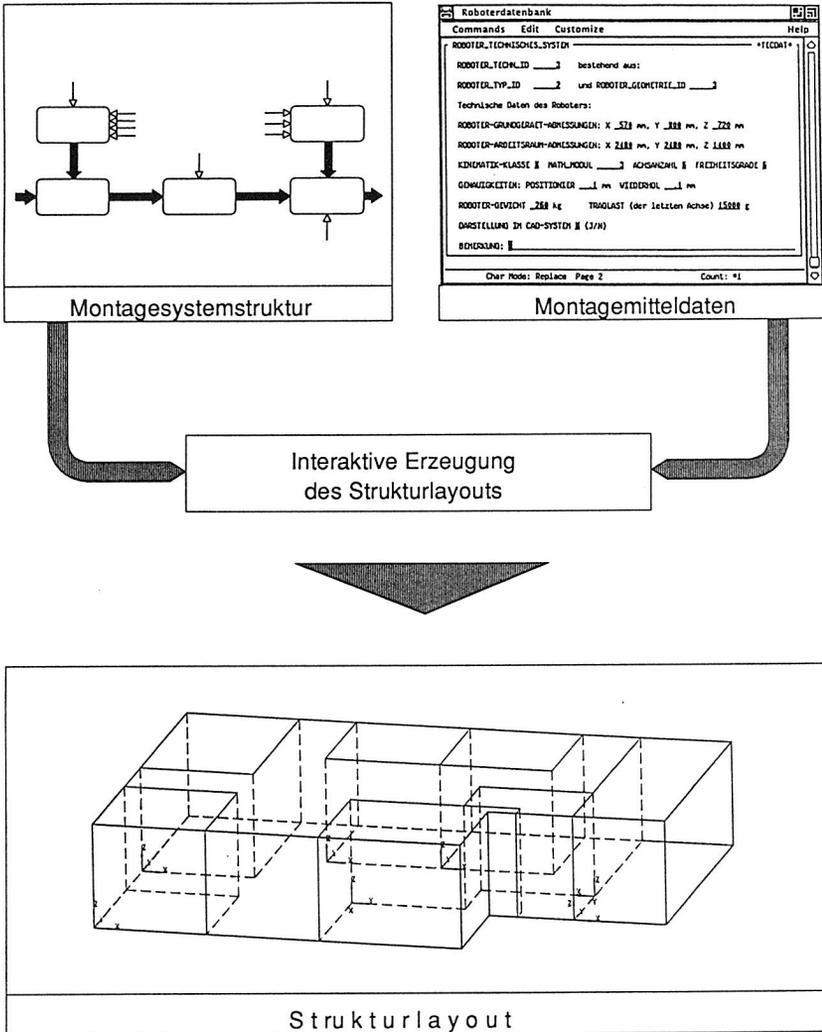


Bild 7-14: Zuordnung von Montageabschnitten zu räumlichen Einheiten

Die Positionierung der einzelnen Zellen im vorgegebenen Raster wird interaktiv in Bezug zu einem übergeordneten Referenzkoordinatensystem durchgeführt. Neben den reinen Funktionsflächen, denen die Montageabschnitte zugeordnet sind, lassen sich auf dieser Ebene weitere Flächenarten wie Transport-, Lager-, Bereitstellflächen etc. definieren, die nach Lage und Größe sowie mit dem logischen Bezug auf Datenbankebene abgebildet sind. Aus dieser Darstellung können direkt Kennzahlen über die relative oder absolute Flächenverteilung gewonnen werden.

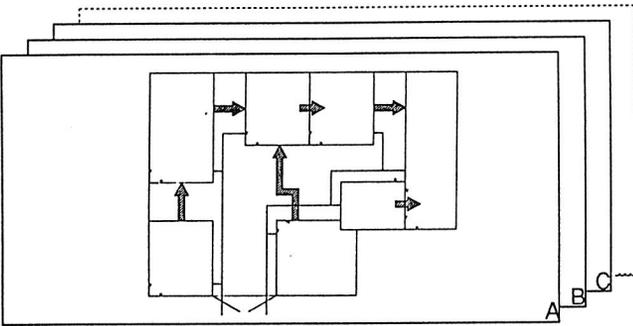
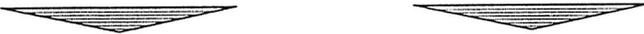
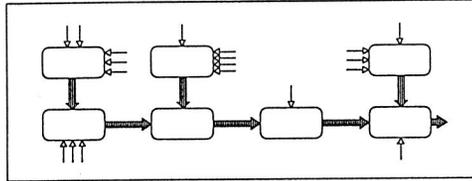
Für materialflußtechnische Untersuchungen werden die Flächenelemente in der Datenstruktur um die Konstrukte *Quelle* und *Senke* ergänzt, die als Symbole an den Flächen gekennzeichnet werden. Sie beschreiben die räumliche Lage der Materialflußschnittstellen einzelner Zellen. Struktur und Spezifikation der Materialflußbeziehungen gehen unmittelbar aus der Funktionsstruktur hervor, so daß aus diesen Daten die Beziehungen zwischen den Zellen direkt im Strukturlayout sichtbar gemacht werden können. Die Beziehungen werden unabhängig von der Zellenanordnung, also auch bei Änderungen, mitgeführt. Auf der Basis dieses Modells wird ein Simulationsmodul eingesetzt, das die Transportstrecken zwischen den einzelnen Zellen aufbaut und berechnet [103],[104]. Bei etwaigen Iterationsschritten in der Anordnungsplanung lassen sich Verbesserungen und Verschlechterungen hinsichtlich des Transportaufwandes direkt ableiten (Bild 7-15).

In verschiedenen Arbeiten wurden Verfahren vorgestellt, die aus der Angabe der Materialflußbeziehungen zwischen einzelnen Zellen ein sogenanntes Ideallayout erstellen (vgl. z.B. [62]). Dabei wird unabhängig von äußeren Restriktionen eine unter dem Kriterium des Transportaufwandes optimale Anordnung der Flächen untereinander ermittelt. Der Übergang von diesem Ideallayout zu einem realen Layout ist jedoch rechnerunterstützt derzeit nicht möglich, da die Einflußfaktoren der zu beachtenden Randbedingungen zu groß sind.

Materialflußbeziehungen

	1	2	3	4	5	6	7
1		0	15	0	0	0	0
2	0		0	0	35	0	0
3	0	0		0	20	0	0
4	0	0	0		0	0	25
5	0	0	0	0		75	0
6	0	0	0	0	0		80
7	0	0	0	0	0	0	

Montagesystemstruktur



Visualisierung der Layoutvarianten und der Materialflüsse

Berechnung des Transportaufwandes aus dem CAD-Layout

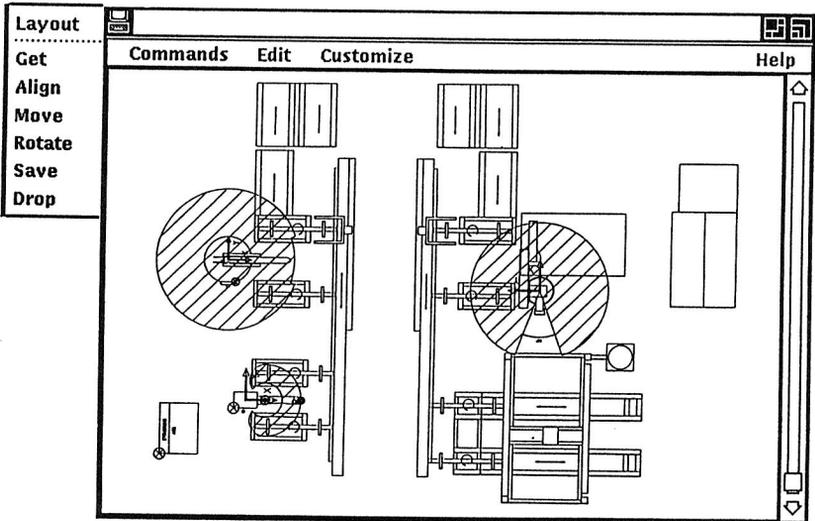
Transportaufwand				
Alternative	Menge	Einheit	Menge	Einheit
A	2250	kg x m	31	cbm x m
B	2130	kg x m	33	cbm x m
C	3120	kg x m	47	cbm x m
D	3050	kg x m	27	cbm x m

Numerische Ergebnisdarstellung

Bild 7-15: Ableitung des Transportaufwandes aus dem Modell

## 7.5.2 Zellenlayout

Für die Konkretisierung der Montagemittelanordnungen innerhalb eines Montageabschnittes werden die gebildeten Zellen in diesem Planungsschritt einzeln betrachtet. Aus der Aufstellung der den Montageabschnitten zugeordneten Montagemitteln kann der Benutzer die gewünschten Komponenten menügestützt auswählen und als 2D-Flächenmodell darstellen, falls zu dem betreffenden Objekt eine solche Modellrepräsentation in der Datenbank existiert. Mit Hilfe der menügesteuerten Benutzeroberfläche lassen sich die Montagemittel identifizieren und bezüglich ihrer Anordnung frei innerhalb der Zelle positionieren (Bild 7-16).



*Bild 7-16: Interaktive Grobkonfiguration der Montagemittel*

Aus Gründen der Übersichtlichkeit sind die objektbeschreibenden, graphischen Informationen der Modelle strukturiert abgelegt; sie können selektiv durch Anwahl der gewünschten Informationsebene über das Menü ein- oder ausgeblendet werden.

Für die Positionierung eines Roboters in einer Zelle sind der verfügbare Arbeitsraum und die zu erreichbaren Positionen zu beachten. Anhand der in Bild 7-16 gezeigten Informationen werden Montagemittel zur Teilezuführung oder -ablage und Bearbeitungsstationen zunächst so plziert, daß sie vom Arbeitsraum des entsprechenden Handhabungsgerätes überdeckt werden. Durch Visualisierung von Gefahren-, Bedien-, oder Wartungsflächen können verbotene und freie Zonen für das Aufstellen weiterer peripherer Zelleneinrichtungen gefunden werden. Aus Gründen der Übersichtlichkeit sollen auf dieser Abstraktionsstufe nur Modelle layoutbestimmender Montagemittel verwendet werden, obwohl in der Datenbank aus vorangegangenen Planungsschritten eventuell schon mehr Detailinformationen bezüglich ausgewählter Montagemittel vorliegen.

Die Positionen und Orientierungen der Objekte werden am Ende dieses Planungsschrittes in Bezug zum definierten Zellenkoordinatensystem automatisch errechnet und in der Datenbank abgelegt. Die z-Koordinate und eventuell vorhandene Drehungen  $A$  und  $B$  um die Körperachsen  $x$  und  $y$  werden hier nicht berücksichtigt; sie werden bei erstmaliger Positionierung in dieser Phase vorerst mit Nullwerten belegt.

Aus den zellenspezifischen Informationen über die erstellte Konfiguration kann jederzeit das graphische Modell wieder aufgebaut werden, ohne daß die *CAD*-Zeichnung explizit gespeichert werden muß. Diese Art der Objektdatenhaltung ist Grundlage für die durchgängige Planung mit unterschiedlichen Modellrepräsentationen. Damit bleiben alle Informationen auch außerhalb der *CAD*-Umgebung verfügbar.

### 7.5.3 Detaillayout

Die wichtigste Phase im Rahmen der Layouterstellung automatisierter Montagezellen ist die detaillierte Anordnungsplanung der Zellenkomponenten. Durch den Einsatz weitgehend realitätsnaher, rechnerintern dargestellter, dreidimensionaler Modelle soll vor den eigentlichen Realisierungsmaßnahmen die Funktionalität der präferierten Lösung nachgewiesen werden.

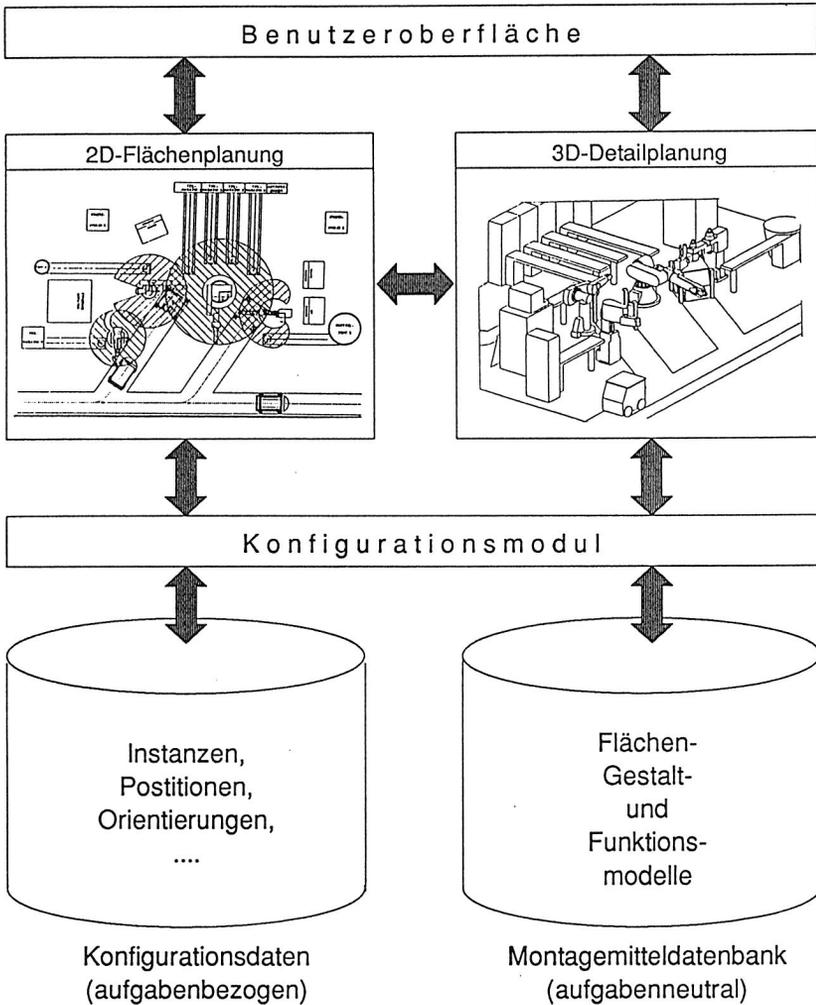
Je nach Planungsansatz der Layoutplanung *top down* oder *bottom up* sind die Eingangsgrößen dieser Phase entweder die Ergebnisse der 2D-Zellenplanung oder der Montageprozeß, d.h. das Zusammenwirken von Funktionsträgern und Montageobjekten. In diesem Fall werden die übrigen Komponenten und deren Anordnung durch den Wirkprozeß bestimmt. Da einzelfallabhängig beide Lösungswege erforderlich sein können, muß das Planungssystem beide Varianten unterstützen.

Die drei verschiedenen hier vorgestellten Abstraktionsgrade der Layoutplanung sind voll kompatibel, so daß es für den Benutzer je nach Zielsetzung möglich ist, in jeder dieser Stufe zu beginnen oder die Abstraktionsstufen beliebig zu wechseln (Bild 7-17).

Basis der Detaillayoutplanung sind die dreidimensionalen Gestaltmodelle der ausgewählten Montagemittel und Objekte. Wurden bereits in einer höheren Abstraktionsstufe bestimmte Grundkonfigurationen ermittelt und in der Datenbank dokumentiert, so erfolgt an dieser Stelle die Substitution der 2D-Flächenmodelle durch die jeweiligen 3D-Gestaltmodelle der Montagemittel in der vorgegebenen Position und Orientierung. Die Modelle können entweder komplett entsprechend des bisherigen Planungsstandes visualisiert oder aber einzeln aus der Liste der Zellenkomponenten selektiert werden.

Mit Hilfe des in allen drei Abstraktionsstufen gleichen Auswahlmenüs lassen sich die Objekte nach Identifikation innerhalb der Zelle beliebig verschieben oder verdrehen. An dieser Stelle können auch z-Koordinatenwerte und Drehungen um die x- und y-Achse berücksichtigt werden. Ziel ist es, eine räumliche Anordnung der Komponenten zu finden, in der sämtliche erforderliche Operationen des Montageprozesses ausgeführt werden können.

Um bezüglich der Montagemittelausstattung eine gewisse Homogenität und damit auch Nachfolgeflexibilität zu erreichen, werden in vielen Anwendungsfällen Standardsysteme für den Aufbau der Zellenperipherie verwendet [105]. Um die Detailplanung einer Montagezelle mittels solcher Komponenten effizient zu unterstützen, wurde ein menügesteuertes Konfigurationsmodul entwickelt, mit dem der Benutzer graphisch/interaktiv bestimmte Grundelemente aus der Datenbank auswählen, gegebenenfalls



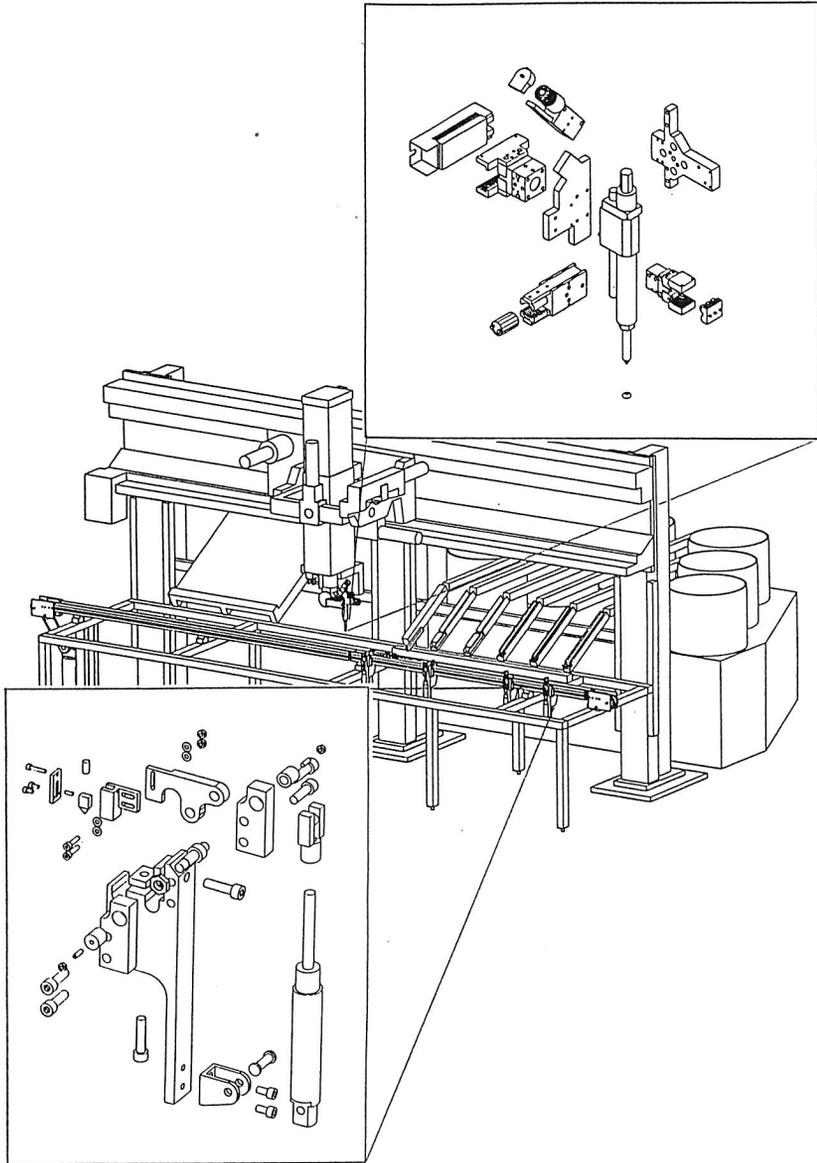
**Bild 7-17:** Durchgängige Planung zwischen unterschiedlichen Detaillierungsphasen

parametrisieren und in der Zelle plazieren kann. Berücksichtigt wurden für den exemplarischen Aufbau der Zellenperipherie Aluminiumprofile, Befestigungselemente, Standardtransportbänder, Übergabestationen und Antriebssysteme, mit denen man die Montagezellen bis auf kleinste Details konfigurieren kann (Bild 7-18).

Sobald der Anwender eine Zelle mit diesen Standardkomponenten graphisch/interaktiv zusammengestellt hat, wird die gefundene Konfiguration auf Wunsch im Schema der Datenbank abgelegt.

Nach abgeschlossener Zellenkonfiguration erfolgt ein Funktionstest am generierten Modell. In Praxisversuchen hat sich gezeigt, daß aufgrund der kinematischen Beschränkungen eines Handhabungsgerätes oftmals nach Aufbau einer Montagezelle Konfigurationsänderungen durchgeführt werden müssen, da die Funktionsträger bestimmte Füge- oder Teilbereitstellungen entweder gar nicht oder nicht in der gewünschten Orientierung erreichen können. Diese Inkompatibilitäten sind aus den reinen Arbeitsraumbetrachtungen, wie sie in Bild 7-16 gezeigt wurden, nicht unmittelbar ersichtlich. Um die Funktionalität einer Zellenkonfiguration am Modell nachzuweisen, wurde ein spezielles Simulationsmodul entwickelt, um die gefundene Konfiguration auf ihre Funktionalität hin zu untersuchen.

Kern dieses Simulationsmoduls sind auf die geometrisch/kinematische Grundstruktur eines Handhabungsgerätes ausgerichtete Koordinatentransformationsprogramme, die je nach zu simulierendem Gerät mit den spezifischen Achsparametern als Eingangsgrößen versehen werden. Mit Hilfe einer Koordinatenrücktransformation erfolgt aus einer vorgegebenen Position die rechnerische Ermittlung der rotatorischen und translatorischen Achsstellungen eines bestimmten Gerätetyps aus der zuvor definierten Aufstellungsposition heraus. Dabei werden die in der Datenbank abgelegten, kinematischen Grenzwerte der Verfahrenswege einzelner Achsen zugrunde gelegt, wodurch das Simulationsmodell den gleichen Bewegungsbeschränkungen unterliegt wie das reale Gerät. Das Ergebnis dieser Transformation ist jedoch in vielen Fällen nicht eindeutig, so daß für bestimmte Robotertypen zusätzliche Einschränkungen getroffen werden müssen, wie der Roboter die Position erreichen soll [106].

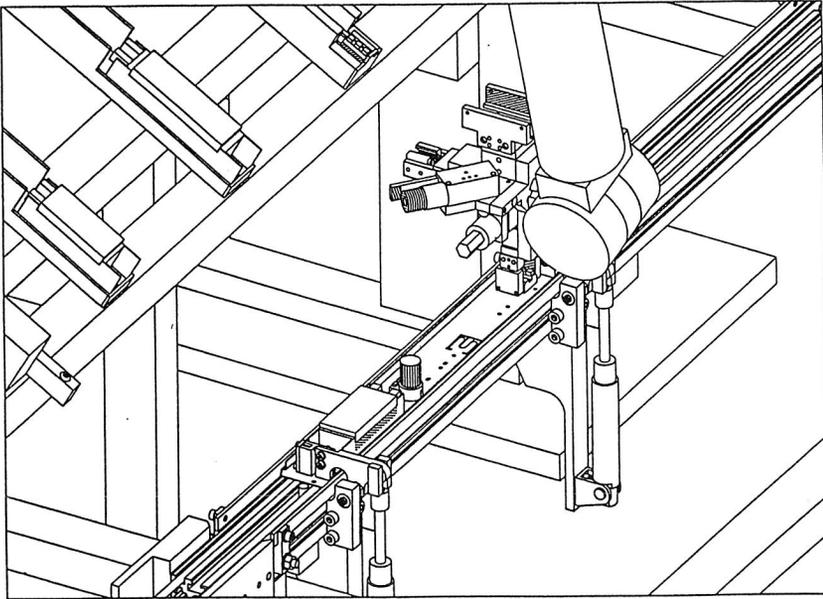


**Bild 7-18:** Detaillierte Darstellung der Komponenten einer Montagezelle

Mit Hilfe der datentechnischen Erweiterungen der zu montierenden Bauteile um die zwei in den jeweiligen Punkten  $AP_1$  und  $AP_2$  liegenden Koordinatensysteme ist die geforderte Orientierung und der notwendige Verfahrensweg eines Werkzeuges durch Positionierung eines zu handhabenden Objektes im Raum bereits festgelegt. Diese Positionen können der Teileaufnahme-Position, den Fügepositionen oder eventuell einzufügenden Zwischenpositionen entsprechen. Ebenso besitzen Greifwerkzeuge ein vom Anwender definiertes Koordinatensystem im sogenannten *Tool Center Point (TCP)*. Um nachzuweisen, ob die geforderte Position erreichbar ist, wird mit Hilfe des Transformationsmoduls geprüft, ob das im *TCP* liegende Koordinatensystem zur Überdeckung mit denen der Handhabungsobjekte gebracht werden kann. Dazu wird je nach Werkstück-Werkzeug Beziehung jeweils ein anderes Greifwerkzeug selektiert, wie es beispielsweise für den in Bild 7-19 gezeigten Multifunktionsgreifer notwendig ist. In diesem Fall wird jeweils die greiferbezogene Transformationsmatrix zwischen den Roboterflanschkoordinaten und dem anwendungsbezogenen Koordinatensystem bei der Simulation berücksichtigt.

Der Layouttest erfolgt durch graphisches Identifizieren der Objekte am Bildschirm und durch Eingabe des entsprechenden Befehls, dieses Objekt anzufahren. Ist dies in der aktuellen räumlichen Konfiguration nicht möglich, wird es dem Benutzer angezeigt. Er kann daraufhin entweder Handhabungsgerät oder Objektpositionen im Raum verschieben oder verdrehen, bis alle erforderlichen Positionen erreichbar sind (Bild 7-19).

Neben den diskreten Positionen können ebenfalls Bewegungsbahnen verifiziert werden. Für die Bahnplanung müssen die Bewegungskurven zwischen zwei vorgegebenen Punkten spezifiziert werden. Der Benutzer hat dazu die Möglichkeit, zwischen *Point To Point- (PTP)* und *Continous Path- (CP)* Simulation zu wählen. *PTP*-Bewegungen werden dann eingesetzt, wenn die Bahn zwischen zwei Punkten beliebig ausfallen kann. Position und Orientierung eines Greifwerkzeuges sind bei Verfahren des Handhabungsgerätes unbestimmt. Aufgrund der kinematischen Eigenschaften des Roboters ist die Simulation und die tatsächliche Bewegung des Roboters nicht unbedingt identisch. Wichtiger für diese Verifikationsphase ist die *CP*-Simulation. Hier



**Bild 7-19:** Funktionale Überprüfung des erstellten Zellenlayouts

kann nachgewiesen werden, ob ein Handhabungsgerät eine bestimmte, vorgegebene Raumkurve zwischen zwei Punkten durchfahren kann. Dazu wird die Raumkurve je nach Genauigkeitsanforderungen in  $n$ -Teilschritte zerlegt. Für jeden Schritt werden die Achsparameter berechnet und überprüft. Entsprechend der Aufgabenstellung kann dabei für ein Werkzeug eine raumfeste oder eine bahnabhängige Orientierung vorgegeben werden.

## 7.6 Planung detaillierter Ablaufstrukturen

Nach der Konfiguration der Montagezellen und der Definition der in den einzelnen Zellen durchzuführenden Montageoperationen, die sich unmittelbar aus dem Produkt

selbst ableiten lassen, folgt die Bestimmung zusätzlicher sekundärer Operationen eines Montageabschnittes unter Berücksichtigung der konkreten Anlagenkonfiguration. Der prinzipielle Ablauf dieser systembezogenen Detaillierung ist in Bild 7-20 dargestellt.

Die einem Montageabschnitt zugeordneten, primären Montageoperationen sind wie zuvor beschrieben nach logischem Bezug zu den herzustellenden Fügeverbindungen strukturiert. Diesen Operationskomplexen sollen nun die zugehörigen sekundären Montageoperationen zugeordnet werden. Die einzelnen Montageoperationen können daraufhin aus der logischen Ordnung interaktiv in eine chronologische Ordnung überführt werden (Bild 7-20).

Aufgrund der Systembezogenheit dieses Planungsteilschrittes soll die Beschreibung anhand des zuvor geschilderten Montagebeispiels näher erläutert werden. Dem dort betrachteten Montageabschnitt *Leuchtvormontage* sind die vier nachfolgend beschriebenen Operationen in einer definierten Reihenfolge zugeordnet. Die zugehörigen Operationskomplexe sind bisher nur durch die primären Montageoperationen spezifiziert, da sich bei diesem Beispiel aus der Aufgabenanalyse keine zwingenden, sekundären Montageoperationen ableiten lassen.

Unter Berücksichtigung der Anlagenkonfiguration ergeben sich jedoch für jeden Operationskomplex neben den primären Operationen *Fügen der Einzelteile* folgende zusätzlichen sekundären Montageoperationen:

- \* *Prüfen, ob Einzelteil in Bereitstellungsposition ist,*
- \* *Verfahren zur Bereitstellungsposition,*
- \* *Greifen des Einzelteils,*
- \* *Verfahren des Greifers mit Einzelteil zur Fügeposition,*
- \* *Lösen/Öffnen des Greifers und*
- \* *Verfahren zur nächsten Position.*

Diese sekundären Operationen sollen den logischen Einheiten interaktiv zugeordnet werden. Ausgangspunkt dazu ist die symbolische Darstellung des Ablaufes (Bild 7-21).

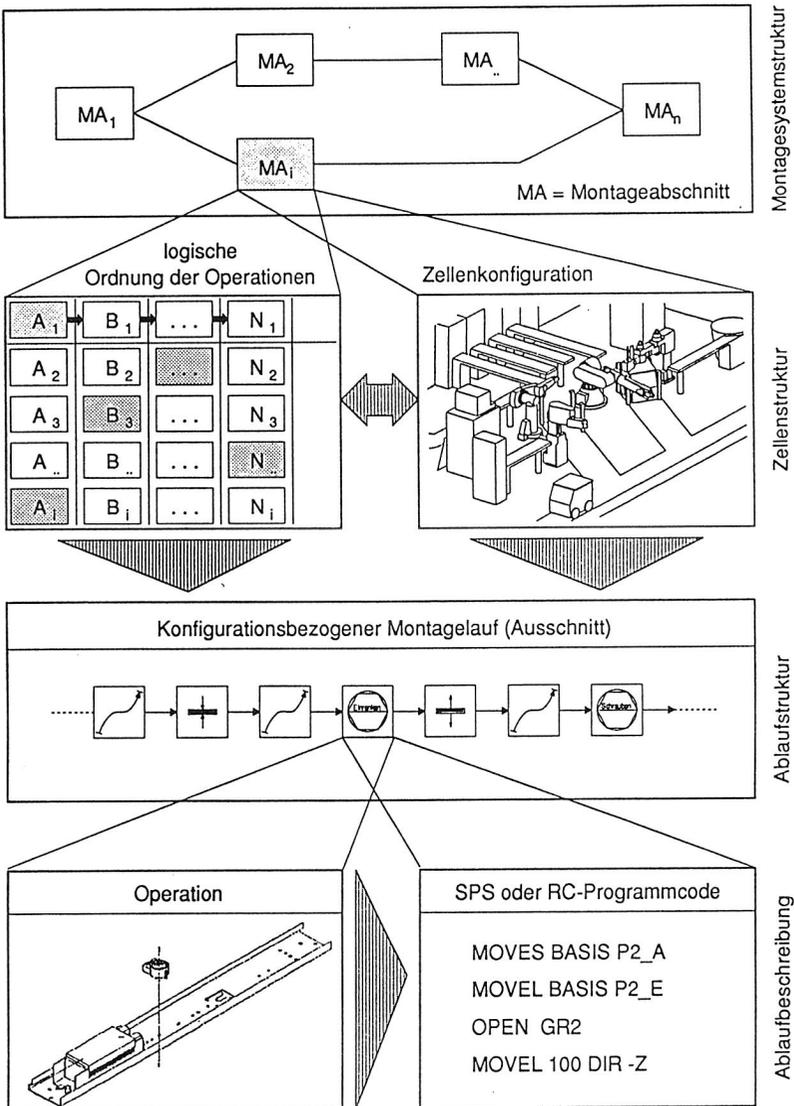


Bild 7-20: Planung detaillierter Ablaufstrukturen

Jedes übergeordnete Rechteck repräsentiert einen Operationskomplex, der zunächst nur durch die bis zu dieser Phase zwingenden, produktimmanenten Montageoperationen gekennzeichnet ist. Diese Operationen sind am Bildschirm besonders gekennzeichnet. Zwischen den primären Montageoperationen der einzelnen Montagekomplexe bestehen die zuvor festgelegten Reihenfolgebeziehungen, die als gerichtete Kanten gekennzeichnet sind.

Sowohl das Beschreibungsschema der Operationen mit den zugeordneten, primären Funktionen als auch deren Strukturbeziehungen werden rechnerintern verwaltet. Aus einem Menüfeld kann der Benutzer entsprechende sekundäre Montageoperationen selektieren und interaktiv in den Operationskomplex einordnen. Für jedes zu der Darstellung ergänzten Symbole wird ein neuer Datenbankeintrag generiert. Er enthält ein auf die Teilfunktion abgestimmtes, spezifisches Beschreibungsschema, über das der Benutzer die Funktion strukturiert beschreiben kann (Bild 7-22).

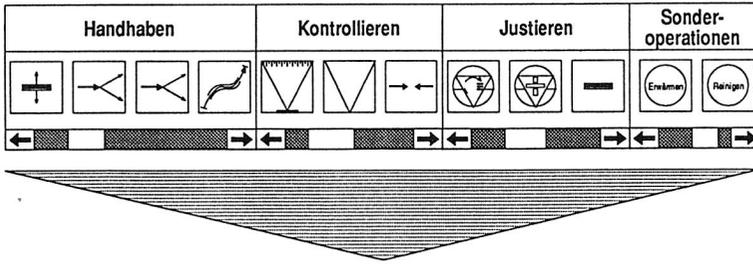
Damit kann jeder Operationskomplex zunächst für sich betrachtet als logische Einheit vollständig beschrieben werden.

Neben den definierten Reihenfolgebeziehungen zwischen den Operationskomplexen treten innerhalb eines Operationskomplexes zwischen primären und sekundären Montageoperationen ebenfalls Reihenfolgebeziehungen auf, die berücksichtigt werden müssen.

Im Beispiel ist die Reihenfolge für einen Operationskomplex:

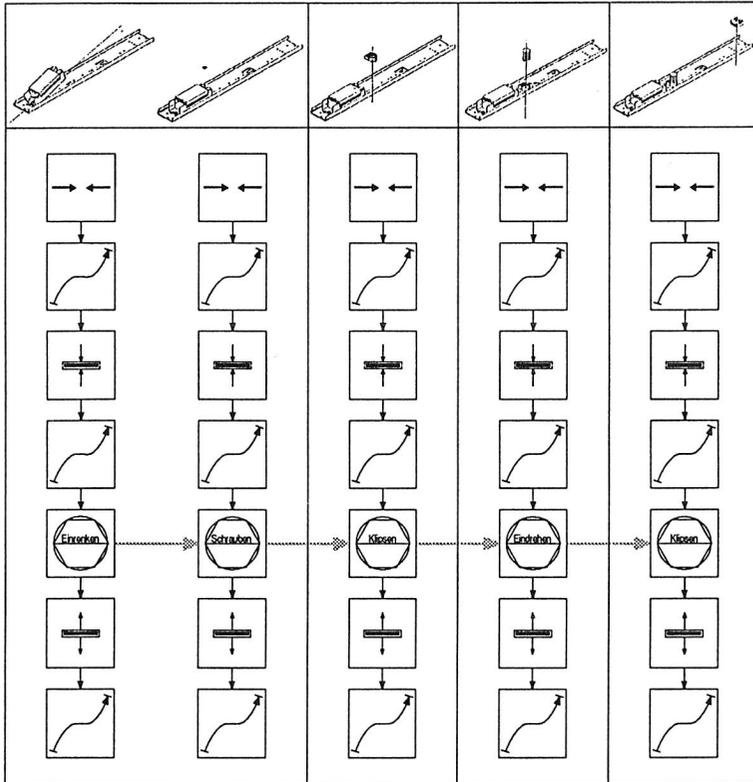
***Prüfen -> Verfahren -> Greifen -> Verfahren -> Fügen -> Lösen -> Verfahren***

Für die Planung des Gesamtablaufs innerhalb einer Montagezelle ist es jedoch nicht unbedingt sinnvoll, die so spezifizierten und nach logischen Kriterien geordneten Operationen auch in dieser Reihenfolge für alle Teile nacheinander so auszuführen. Unter Berücksichtigung der ausgewählten Anlagenkonfiguration ist es für das betrachtete Beispiel mit Multifunktionsgreifer zweckmäßiger, als erstes an allen Übergabestationen zu prüfen, ob die Einzelteile vorhanden sind, daraufhin sequentiell



Menüfeld

Zuordnung

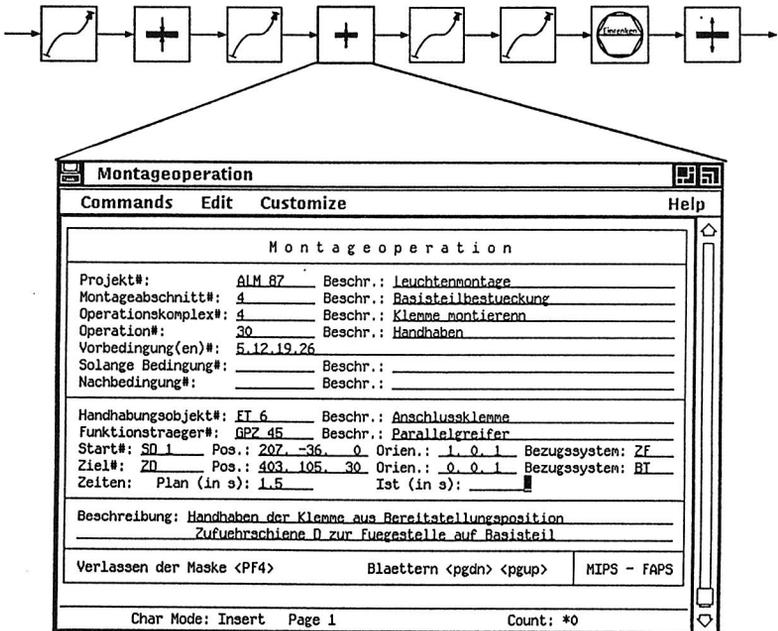


auszuführende Operationen je Operationskomplex



Bild 7-21: Interaktive Ergänzung sekundärer Montageoperationen

die Bereitstellungspositionen anzufahren, die Teile aufzunehmen und erst dann an die einzelnen Fügepositionen zu verfahren, um die Teile zu fügen. Die logisch geordneten und mit bestimmten Reihenfolgerestriktionen versehenen primären und sekundären Operationen aller Montagekomplexe sind also in ein auf das Anlagenprinzip ausgeichtetes Ablaufschema zu überführen. In den meisten Fällen ist das auf dieser Detaillierungsstufe eine strenge Sequenz von einzelnen Teilfunktionen. Die Überführung der

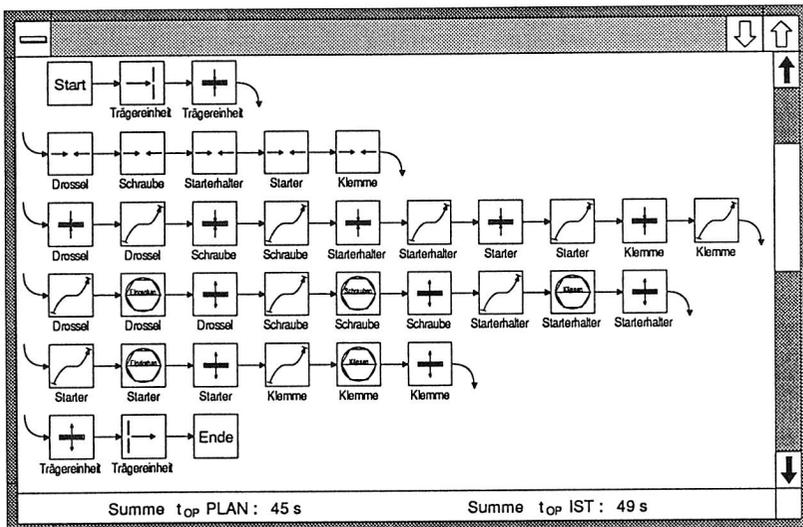


**Bild 7-22:** Menü zur Spezifikation von Montageoperationen

logischen Darstellung aus Bild 7-21 in eine ablauforientierte Darstellung erfolgt ebenfalls interaktiv. Der Anwender kann einzelne Teilfunktionen auswählen und in einer bestimmten Reihenfolge ordnen. Eine Automatisierung dieses Vorgangs erscheint nicht zweckmäßig, da die zu berücksichtigenden Randbedingungen je nach betrachtetem Einzelfall zu vielseitig sind. Der Anwender kann aber nach bestimmten Suchkriterien die Teilaufgaben ordnen und strukturieren. Systemseitig wird bei diesem Vorgehen

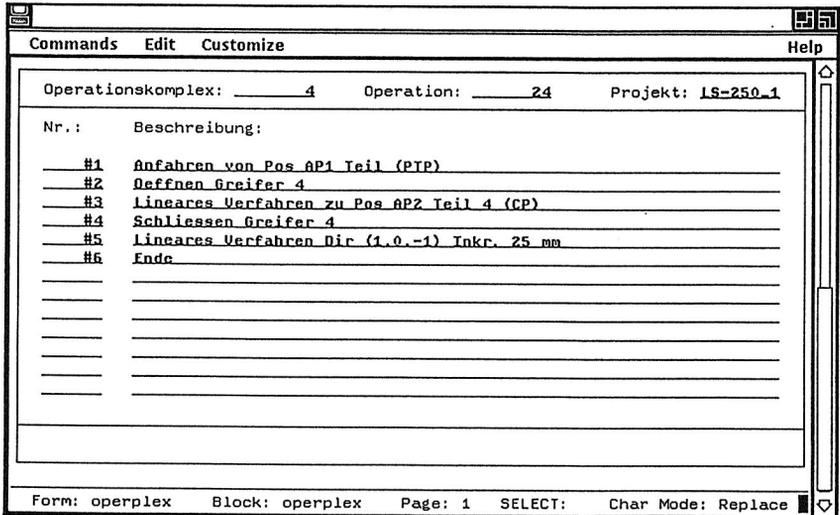
kontrolliert, ob die globalen und lokalen Restriktionen, die sich aus der Ordnung der primären Montageoperationen über den Gesamttablauf und den Bedingungen innerhalb der einzelnen Montagekomplexe ergeben, nicht verletzt werden.

Ergebnis dieses Prozesses ist eine vollständige, chronologische Beschreibung des Montageablaufs für den betrachteten Montageabschnitt (Bild 7-23). Zu jedem funktionsbeschreibenden Symbol kann die zugehörige Beschreibung direkt über Menü abgefragt werden.



**Bild 7-23:** Interaktiv generierte Ablaufsequenz für den betrachteten Montageabschnitt

In einem weiteren Detaillierungsschritt können die Montageoperationen optional bis auf die Ebene von elementaren Anweisungen detailliert werden (Bild 7-24), die von der Bedeutung her auf der Stufe von einzelnen Programmanweisungen in speicherprogrammierbaren Steuerungen (SPS) beziehungsweise Robotersteuerungen (RC) stehen.



*Bild 7-24: Detaillierung der Operationen*

## 7.7 Bewertung und Lösungsbestimmung

Werden bis zu diesem Zeitpunkt mehrere, technisch realisierbare Lösungen verfolgt, so ist spätestens vor dem Einleiten erster Realisierungsmaßnahmen eine abschließende Beurteilung der Varianten erforderlich. Dies soll durch eine vergleichende Gegenüberstellung entscheidungsrelevanter Kosten unterstützt werden.

Die bisher erarbeiteten und in der Datenbank abgelegten Informationen beinhalten nur Anschaffungskosten über die eingeplanten Montagemittel. Mit Hilfe einfacher, finanzmathematischer Methoden können so bestimmte Kennzahlen ermittelt werden (Bild 7-25). Zu beachten ist, daß bei diesem Vorgehen eine auf reine Zahlenwerte reduzierte Scheinobjektivität erzeugt wird, die die im Einzelfall relevanten Einflußgrößen und die damit verbundenen Folgen nur unzureichend berücksichtigt. Diese Informatio-

nen liefern die Grundlage für eine ausführliche Wirtschaftlichkeitsrechnung, die unter Berücksichtigung einzelfallabhängiger Randbedingungen und Einflußfaktoren erfolgen muß (vgl. dazu u.a. [107],[108]).

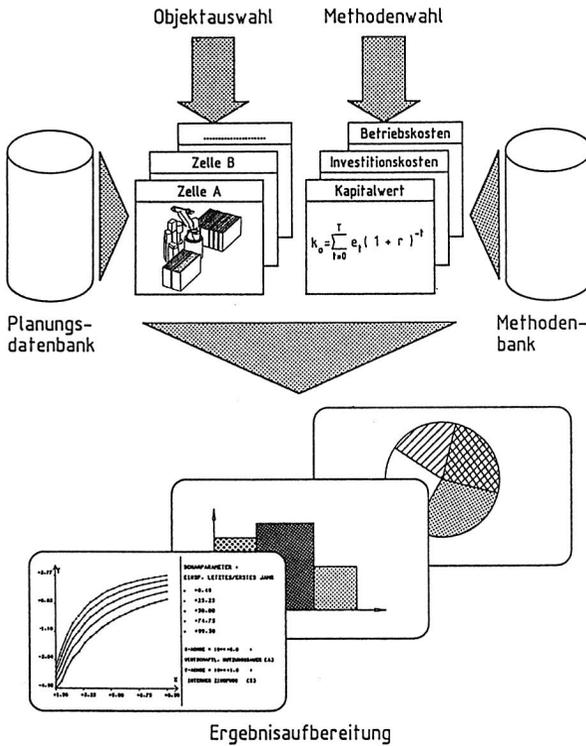


Bild 7-25: Kostenmäßige Bewertung technisch möglicher Varianten

## 7.8 Ergebnisdistribution

Als letzter Schritt der Planungskette sollen die Planungsergebnisse an die für die Realisierung verantwortlichen Instanzen weitergeleitet werden. Dabei ergeben sich folgende Problemstellungen:

- \* die im Gesamtmodell akkumulierten Informationen müssen nach operativen Kriterien selektiert und verdichtet werden,
- \* nach der Freigabe der Planungsergebnisse müssen die ausführenden Instanzen die Zugriffsrechte auf die für sie relevanten Informationen erhalten.

Die sich daraus ableitenden Teilaufgaben lassen sich nur einzelfallbezogen spezifizieren. Aus den abgelegten Informationen können zum Beispiel zielgerichtet die eingeplanten Montagemittel nach den Beschaffungswegen strukturiert werden, um Bestellungen oder Fertigungsaufträge auszulösen. Eine andere Aufgabe besteht darin, aus den verschiedenartig detaillierten Konfigurationsmodellen bemaßte Darstellungen und Zeichnungen für den Aufbau und die Installation der Anlage zu erstellen.

Je nach betrieblicher Organisation kann in dieser Phase ein dynamisches Weiterleiten von Objektzugriffsrechten durch den verantwortlichen Projektleiter erfolgen. Mitarbeitern der Planung wird dabei das Modifikationsrecht für die gesamten Planungsobjekte entzogen, während beispielsweise Mitarbeiter des Beschaffungswesens nun mit den notwendigen Zugriffsrechten auf die Datenbestände ausgestattet werden, um etwaige Bestellungen auszulösen.

## 8. Nutzen des Modells für die operative Montageplanung

Abschließend soll anhand der Roboterprogrammierung (*RC*-Programmierung) gezeigt werden, daß mit dem vorgestellten Modellkonzept eine bis auf die Steuerungsebene durchgängige Lösung möglich ist.

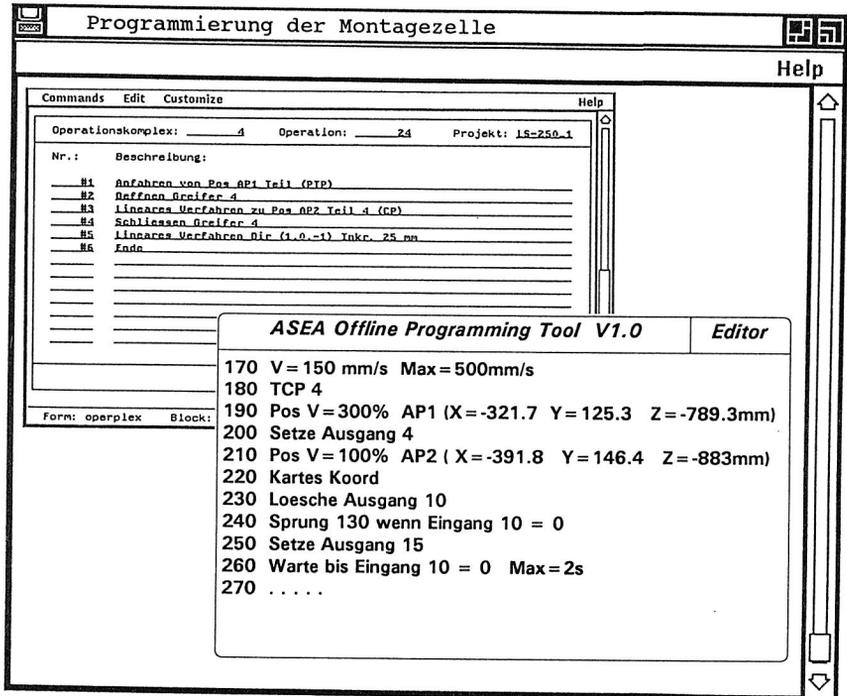
Die operative Planung des Montageablaufs erfordert die Umsetzung der zuvor definierten und datenbankseitig abgelegten Ablaufstrukturen auf die Steuerungsebene der Montagemittel.

Im Hinblick auf eine durchgängige Verfahrenskette zur Einsatzplanung von Robotern wurden in den letzten Jahren verstärkt Anstrengungen unternommen, die Programmierung von Robotersystemen von der Werkstattebene in die Planungsebene zu verlagern, um unter anderem lange Stillstandzeiten der Anlagen zu vermeiden [109].

Durch die problemorientierten, inhaltlichen Erweiterungen der Produkt- und Montagemittelmodelle sind wesentliche Informationen, die für die Programmierung der Roboter erforderlich sind, bereits explizit vorhanden. Dies sind zum einen die Angaben über Fügepositionen, -orientierungen und -vektoren und zum anderen die Beschreibung des geplanten Montageablaufs innerhalb einer vorgegebenen Montagezelle.

Durch die modellseitig abgelegten Basisinformationen wird es möglich, die Programmierung der Systeme direkt zu unterstützen. Viele Steuerungssysteme unterstützen bereits die textuelle Programmerstellung auf einem übergeordneten Rechner. Dabei können Bewegungsanweisungen, Sensorabfragen, Steuerungssignale etc. in einer Hochsprache definiert werden, die je nach Steuerung zuerst kompiliert und gelinkt oder direkt in der Steuerung interpretiert werden. Angaben über Greifer, Positionen und Orientierungen werden bei der Programmierung mit logischen Variablennamen belegt, die in diesem speziellen Fall direkt die entsprechenden Einträge in der Datenbank referenzieren. Damit wird die Möglichkeit geschaffen, das Ablaufprogramm im Bezug zur realen Zellengeometrie auf der Planungsebene zu generieren.

Der erste Schritt hierzu ist die Erstellung des Programmgerüsts aus der definierten Ablaufstruktur. Der Benutzer kann die zu bearbeitende Sequenz am Bildschirm über die Dialogkomponente der Datenbank selektieren und parallel dazu in einem anderen Fenster die zugehörigen Programmanweisungen in der Syntax des Zielsystems editieren (Bild 8-1).



**Bild 8-1:** Umsetzung der auf semantischer Ebene beschriebenen Ablaufstruktur in Programmcode

Durch die zuvor erfolgte detaillierte semantische Beschreibung des Ablaufs ist bis an dieser Stelle jede Möglichkeit offen, verschiedenartige Zielsysteme anzusprechen. Steht jedoch bereits im Vorfeld der Planung das Zielsystem fest, können die Funkti-

onsschritte auch direkt in der entsprechenden Syntax formuliert und in das zu erzeugende Programm kopiert werden. Aufgrund der Heterogenität verfügbarer Gerätesteuerungen, die jeweils über einen speziellen Befehlssatz und über eine eigene Syntax verfügen, wäre im Hinblick auf eine universelle Einsatzmöglichkeit eines Offline-Programmiersystem eine neutrale Standardschnittstelle zwischen Planungs- und Programmiersystem erforderlich. Bemühungen in dieser Richtung mündeten in der Spezifikation einer Schnittstelle [110], die jedoch bis heute nicht auf die erhoffte Akzeptanz gestoßen ist wie Normierungsvorschläge für Verfahrensketten der Teilefertigung. Gründe für die mangelnde Akzeptanz liegen im begrenzten Befehlsvorratssatz, der für viele Applikationen unzureichend ist, und je nach Aufgabenstellung bestimmter Ergänzungen bedarf. Ebenso läßt ein mangelndes Angebot an Preprozessoren zur Umsetzung des neutralen Codes auf die spezifische Steuerungsebene derzeit eine direkte Erzeugung des benötigten Programmcodes auf Ebene des Programmiersystems als die sinnvollere Lösung erscheinen.

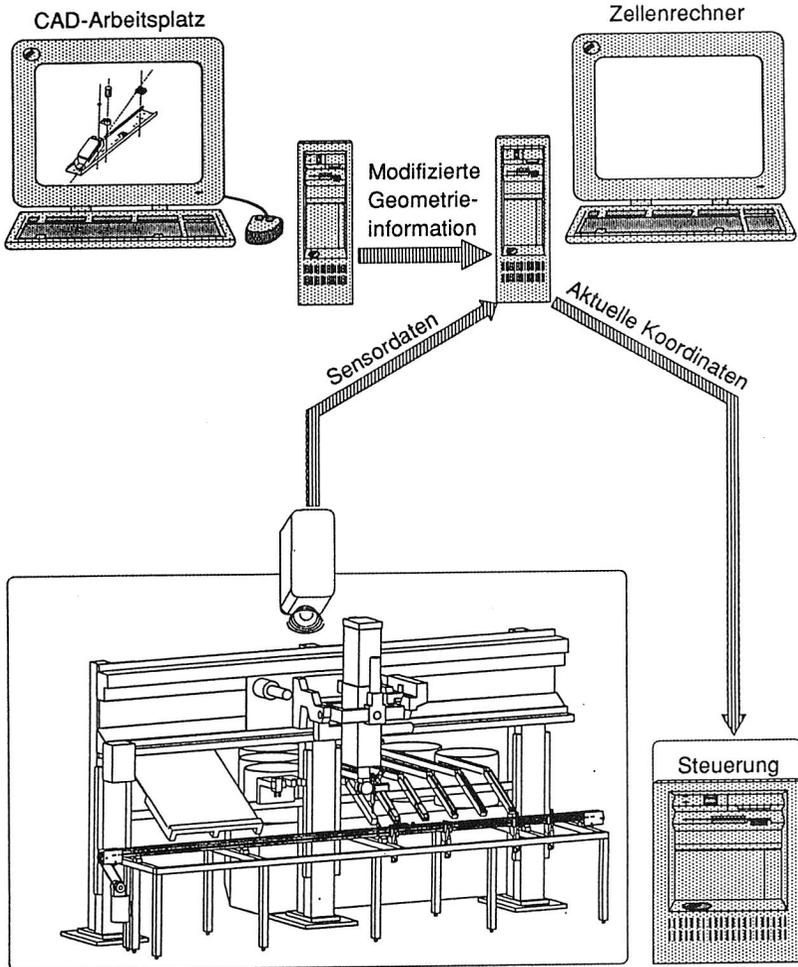
Für die Offline-Programmierung von Robotern bieten sich prinzipiell mehrere Möglichkeiten an, die sich hinsichtlich des erforderlichen Programmieraufwandes unterscheiden. Die häufigst angewandte Methode der *Offline*-Programmierung ist das sogenannte *graphische Teachen* der Modelle am Bildschirm. Dabei wird, aufbauend auf der erstellten Zellenkonfiguration, der Roboter mittels Eingabehilfsmitteln wie Maus, Cursortasten u.a. entsprechend seinen tatsächlichen Bewegungsmöglichkeiten am Bildschirm in die gewünschten Positionen verfahren. Diese Positionen können anschließend gespeichert und später direkt an die Robotersteuerung weitergegeben werden. Der Aufwand für diese Art der Programmierung ist jedoch ähnlich dem der direkten Werkstattprogrammierung; aufwendig bleibt das Einstellen der richtigen Position und Orientierung gerade bei komplexeren Werkstück-Werkzeugbeziehungen, so daß der eigentliche Vorteil in der Reduzierung von Stillstandszeiten der Geräte sowie in der Minimierung der Kollisionsgefahr während des Teachens besteht.

Innerhalb der Programme werden je nach Aufgabe verschiedene Fügepositionen und -richtungen, Werkzeugkoordinatensysteme (*TCP's*) und Bezugskordinatensysteme über die Variablennamen aktiviert. Die Validierung dieser Variablen erfolgt aus den in der Datenbank abgelegten Geometrieminformationen der Gestaltmodelle von Werkstück-

ken und Werkzeugen. Nach der Definition der einzelnen *TCP*'s und der endgültigen Konfiguration des Greifersystems werden mit Hilfe eines Programmes die Koordinaten- und Orientierungsverschiebungen der Greifer automatisch aus dem Modell ermittelt und in der Datenbank abgelegt. Ebenso werden die Koordinaten und Orientierungen von Einzelteilen in den Abholpositionen in einem Bezugssystem ermittelt und abgelegt.

Die Fügepositionen und Fügerichtungen der Einzelteile sind bereits aus dem erzeugten Produktmodell bekannt; hier muß lediglich das Bezugssystem des Basisteils in ein übergeordnetes Roboterarbeitskoordinatensystem eingeordnet werden. Durch die automatische Einbindung der modellseitigen Geometrieinformationen in das Programmiersystem entfällt der Aufwand für die explizite Spezifikation von Positionen und Orientierungen für die Geräteprogrammierung. Fehlermöglichkeiten dieser Verfahrenskette entstehen durch die nicht zu vermeidenden räumlichen Divergenzen zwischen dem rechnerinternen Modell und der realen Montageanlage. Aus diesem Grund wurde eine bidirektionale Verbindung zwischen Modellsystem und Steuerungssystem aufgebaut, über die eine Kalibrierung erfolgen kann. Zweckmäßigerweise werden räumlich invarianten Komponenten einer Zelle Bezugskoordinatensysteme zugeordnet, die mit Hilfe des roboterinternen Koordinatenmeßsystemes über drei Raumpunkte erfaßt und an den übergeordneten Rechner zurückgegeben werden. Aus diesen realen Meßwerten und den Modelldaten wird eine Ausgleichsmatrix bestimmt, die bei der Programmerzeugung zu berücksichtigen ist.

Durch den Einsatz von intelligenten Sensoren auf Zellenebene kann der Regelkreis für den Abgleich zwischen Modell und Realität weiter verkürzt werden. Mit Hilfe bildverarbeitender Systeme können Teile innerhalb einer definierten Arbeitsumgebung nach Position und Lage identifiziert werden. Aus den so gewonnenen Sensordaten lassen sich auf Steuerungsebene pro Bearbeitungssequenz die aktuell erforderlichen Positionen für das Aufnehmen, Bearbeiten und Fügen einzelner Teile ermitteln. Die notwendigen Grundinformationen zum Identifizieren der Einzelteile werden dabei aus dem Gestaltmodell der Zelle abgeleitet. Das Prinzip eines solchen verkürzten Regelkreises für die Programmierung von Montagezellen zeigt Bild 8-2.



**Bild 8-2:** Einsatz von bildverarbeitenden Sensoren innerhalb der Verfahrenskette

## 9. Zusammenfassung

Zunehmender Wettbewerb und kürzere Produktlebenszyklen zwingen Unternehmen stärker wie je zuvor, Rationalisierungspotentiale der Produktion zu erschließen. Nach der Teilefertigung rückte in den letzten Jahren die Montage zunehmend in den Vordergrund automatisierungstechnischer Bemühungen. Während bei der Teilefertigung die Durchgängigkeit des Informationsflusses von der Konstruktion bis zum Fertigungsprozeß schon häufig zu beobachten ist, gibt es im Bereich der Montage bislang keine durchgängigen Verfahrensketten.

In der vorliegenden Arbeit wird daher ein integriertes, rechnergestütztes Modell und eine darauf aufbauende Verfahrenskette zur informationstechnischen Unterstützung der Montageplanung vorgestellt. Damit wird es möglich, Montageplanung von der Konstruktion bis zum eigentlichen Montageprozeß durchgängig zu unterstützen.

Zu Beginn der Arbeit werden zunächst die wesentlichen Aufgaben und der grundsätzliche Ablauf der Montageplanung dargestellt.

Kapitel 3 gibt einen Überblick über den Istzustand rechnerbasierter Werkzeuge zur Unterstützung der Planungsaufgaben. An dieser Stelle werden Einsatzmöglichkeiten von CAD-, Datenbank- und wissensbasierten Systemen diskutiert und die Grenzen ihrer derzeitigen Anwendungsmöglichkeiten aufgezeigt. Fazit der Analyse ist, daß mit den heute verfügbaren Werkzeugen nur eine eingeschränkte Abbildung und Handhabung der planungsrelevanten Informationen möglich ist.

Aufbauend auf den funktionalen Aufgabenstellungen aus Kapitel 2 und der Analyse bestehender Hilfsmittel werden in Kapitel 4 systematisch die Anforderungen an ein integriertes Informations- und Planungssystem erarbeitet. Insbesondere werden dazu Möglichkeiten der Integritätsüberwachung, der Zugriffsregelung und eines erweiterten Transaktionsmanagements gefordert, die auf die spezifischen Bedürfnisse der Informationsverarbeitung zwischen Konstruktion und Planung abgestimmt sind.

---

Auf der Grundlage dieser Anforderungen wird in Kapitel 5 ein Modell entwickelt. Grundsätzliches Merkmal dieses Lösungsansatzes ist die Integration von gestaltbezogenen und alphanumerischen Objektrepräsentationen in einem Datenmodell. Dadurch wird es möglich, auf die in der Konstruktion bereits verwendeten *CAD*-Modelle wesentlich mehr Semantik abzubilden. Ein zu diesem Modell konzipiertes Triggermodul erlaubt es, modellimmanente und modellexterne Integritätsbedingungen abzubilden und systemseitig zu überwachen.

Nach den modelltheoretischen Grundlagen erfolgt in Kapitel 6 eine inhaltliche Darstellung der auf das Modell abgebildeten, planungsrelevanten Informationen. Diese Informationen beschreiben das zu montierende Produkt und die sich daraus ableitenden Aufgaben aus der Sicht der Montage sowie die potentiellen Montagemittel. Ein besonderer Schwerpunkt liegt auf der Erfassung technologieorientierter Produktdaten, womit Aufgaben aus Konstruktion und Arbeitsplanung in hohem Maße integrierbar werden.

Kapitel 7 beschreibt den Ablauf der rechnergestützten Planung von flexibel automatisierten Montageanlagen. Hier werden in Abhängigkeit der speziellen Aufgaben verschiedene Wege aufgezeigt, den Planungsprozeß wirkungsvoll zu unterstützen. Ergebnis dieses Schrittes ist die funktionale, strukturelle und räumliche Zuordnung von Montageaufgaben zu Funktionsträgern und die systematische Dokumentation der Ergebnisse. Bei der Darstellung dieser Verfahrenskette wird beispielhaft auf realisierte Praxisanwendungen zurückgegriffen, mit denen das Konzept ausgiebig getestet wurde.

Abschließend wird in Kapitel 8 aufgezeigt, wie die generierten Informationen bis hin zur operativen Montageplanung effizient genutzt werden können.

## 10. Literatur

1. **Spur, G.:**  
Aufschwung, Krisis und Zukunft der Fabrik; Produktionstechnisches Kolloquium Berlin, PTK '83; Carl Hanser Verlag, München 1983.
2. **Feldmann, K.:**  
Rechnergestützte Automatisierung - Schwerpunkt fertigungstechnischer Entwicklung; atp-Sonderheft Fertigungsautomatisierung '87, S. 3.
3. **Milberg, J.:**  
Entwicklungsstufen flexibel automatisierter Produktionssysteme; Münchner Kolloquium '85, S. 1-25.
4. **Milberg, J.:**  
Wettbewerbsvorteile durch Stärkung der Integration; Münchner Kolloquium '88, S. 1-18.
5. **Feldmann, K.:**  
Entwicklung und Einsatz rechnerintegrierter Produktionssysteme; ZWF 83(1988) 6, S. 290-295.
6. **Seliger, G.:**  
Montagetechnik - Schwerpunkt produktionstechnischer Unternehmensstrategie; CIM-Management 4/90, S. 4-11.
7. **Warnecke, H.-J.:**  
Roboter und Montageaufgaben; Roboter (1989) 2, S. 50.
8. **Spur, G.:**  
Informationstechnik im industriellen Produktionsprozeß; ZWF 83(1988) 3, S. 115.
9. **Milberg, J.; Diess, H.:**  
Rechnerunterstützte Planung von automatischen Montageanlagen; VDI-Z 128(1986) 11, S. 443-449.
10. **Spur, G. (Hrsg.):**  
Handbuch der Fertigungstechnik, Band 5: Fügen, Handhaben und Montieren; Carl Hanser Verlag, München Wien 1986.
11. **Richter, E.; Schilling, W.; Weise, M.:**  
Montage im Maschinenbau; Verlag Technik, Berlin 1974.
12. **Brankamp, K.:**  
Handbuch der modernen Fertigung und Montage; Verlag Moderne Industrie, Landsberg 1975.

13. **Arlt, J.; Miese, M.:**  
Analyse des Produktionsbereichs Montage - Voraussetzungen und Möglichkeiten; Industrie-Anzeiger 93 (1971) 67, S. 1703-1709.
14. **Warnecke, H.-J.; Löhr, H.-G.; Kiener, W.:**  
Montagetechnik - Schwerpunkt der Rationalisierung; Produktionstechnik heute, Bd. 7, Krausskopf-Verlag, Mainz 1975.
15. **N.N.:**  
VDI 2860 E Blatt 1: Handhabungsfunktionen, Handhabungseinrichtungen - Begriffe, Definitionen und Symbole; Beuth Verlag GmbH, Berlin Köln 1982.
16. **N.N.:**  
DIN 8580 E: Fertigungsverfahren, Begriffe - Einteilung; 1985.
17. **N.N.:**  
DIN 8593: Fertigungsverfahren *Fügen*, 1985.
18. **Lotter, B.:**  
Montagetechnik; Krausskopf-Verlag, Mainz 1982.
19. **Warnecke, H.-J.:**  
Ablauf der Montage; in: *Fügen, Handhaben und Montieren*; Spur, G. (Hrsg.), Carl Hanser Verlag, München Wien 1986, S. 607-620.
20. **Bullinger, H.J. (Hrsg.):**  
Systematische Montageplanung; Carl Hanser Verlag, München Wien 1986.
21. **Eversheim, W.:**  
Organisation in der Produktionstechnik; Band 4: Fertigung und Montage, VDI-Verlag, Düsseldorf 1981.
22. **Ungeheuer, U.:**  
Methodik zur Planung einer anforderungsgerechten Produkt- und Montagestruktur für komplexe Erzeugnisse der Einzel- und Kleinserienfertigung; Dissertation TH-Aachen 1986.
23. **N.N.:**  
VDI 2222 Blatt 1: Konzipieren technischer Produkte; Beuth Verlag GmbH, Berlin Köln 1977.
24. **N.N.:**  
VDI 2221: Methodik zum Entwickeln und Konstruieren technischer Systeme und Produkte; Beuth Verlag GmbH, Berlin Köln 1986.
25. **Diess, H.:**  
Rechnerunterstützte Entwicklung flexibel automatisierter Montageprozesse; Springer Verlag, 1988.

26. **Eversheim, W.:**  
Organisation in der Produktionstechnik, Band 4: Fertigung und Montage; VDI-Verlag, Düsseldorf 1981.
27. **Muschiol, M.:**  
Rechnerunterstützte Informationsbereitstellung für den Konstruktionsprozeß am Beispiel montageorientierter Gestaltungsrichtlinien; Carl Hanser Verlag, München Wien 1988.
28. **Aggteleky, B.:**  
Fabrikplanung, Band 1 und 2; Carl Hanser Verlag, München Wien 1987.
29. **Kettner, H.:**  
Leitfaden der systematischen Fabrikplanung; Carl Hanser Verlag, München Wien 1984.
30. **Miese, M.:**  
Systematische Montageplanung in Unternehmen mit Kleinserienproduktion; Giradet Verlag 1976.
31. **N.N.:**  
Effizienzsteigerung durch CAD; Studie der Diebold GmbH, Frankfurt 1989.
32. **Spur, G.:**  
Von der rechnerunterstützten Zeichnungserstellung zur rechnerintegrierten Produktentwicklung; ZWF 84(1989) 6, Carl Hanser Verlag München 1989, S. CA 74.
33. **Gausemeier, J.:**  
Von CAD zu CIM - Gesichtspunkte für den Aufbau von ganzheitlich automatisierten Produktionsprozessen; ZWF 81(1986) 9, Carl Hanser Verlag München 1986, S. 467-472.
34. **Gausemeier, J., Daßler, R.:**  
Aufbau von langfristig tragbaren CIM-Lösungen; ZWF 84(1989) 8, Carl Hanser Verlag München 1989, S. 431-435.
35. **Fritz, R.; Muschiol, M.; Schäfer, G.:**  
Ist-Zustand und Perspektiven der CAD/CAM-Technologien; ZWF 85(1990) 10, Carl Hanser Verlag München 1990, S. 526-530.
36. **Mertens, P.; Griese, J.:**  
Industrielle Datenverarbeitung; Band 1: Administrations- und Dispositionssysteme; 4. Auflage, Gabler Verlag, Wiesbaden 1982.
37. **Mertens, P.; Griese, J.:**  
Industrielle Datenverarbeitung; Band 2: Informations- und Planungssysteme; 3. Auflage, Gabler Verlag, Wiesbaden 1982.

- 
38. **Martin, J.:**  
Einführung in die Datenbanktechnik; Carl Hanser Verlag, München Wien 1981.
  39. **Schlageter, G.; Stucky, W.:**  
Datenbanksysteme: Konzepte und Modelle; B.G. Teubner Verlag, Stuttgart 1983.
  40. **Vetter, M.:**  
Aufbau betrieblicher Informationssysteme mittels konzeptioneller Datenmodellierung; B.G. Teubner Verlag, Stuttgart 1989.
  41. **Brändli, N.:**  
CAD-Datenbanken; CAD/CAM-Labor, Karlsruhe 1989.
  42. **Puppe, F.:**  
Einführung in Expertensysteme; Springer Verlag, Berlin 1988.
  43. **Trost, H.:**  
Wissensrepräsentation in der AI am Beispiel semantischer Netze; Artificial Intelligence, B.G. Teubner Verlag, Stuttgart 1984.
  44. **Harmon, P.; King, D.:**  
Artificial Intelligence in Business; John Willey & Sons 1985.
  45. **Brownston, L.; Farrel, R.; Kant, E.:**  
Programming Expert Systems in OPS 5; Addison-Wesley Publishing Company, Reading M.A. 1985.
  46. **Hemberger, A.:**  
Innovationspotentiale in der rechnerintegrierten Produktion durch wissensbasierte Systeme; Carl Hanser Verlag, München Wien 1988.
  47. **Winston, P.H.:**  
Artificial Intelligence; Second Edition, Addison-Wesley Publishing Company, London 1984.
  48. **Lehmann, C.M.:**  
Wissensbasierte Unterstützung von Konstruktionsprozessen; Carl Hanser Verlag, München Wien 1989.
  49. **Laske, O.E.:**  
Ungelöste Probleme bei der Wissensakquisition; KI (1989) 4, S. 4-12.
  50. **Wode, U.:**  
Integration von Datenbankzugriffen in TWAICE; KI (1989) 4, S. 47-52.
  51. **Ehrlenspiel, K.:**  
CAD-Teileverwaltung mit relationaler Datenbank; CAD/CAM (1989) 5, S. 84-86.

- 
52. **Schunke, A.:**  
Ähnlichkeitsuche zur Werkstückwiederverwendung bei der Neukonstruktion mit CAD; VDI-Z 129(1987) 11, S. 52-58.
  53. **Eversheim, W.; Diels, A.; Rozenfeld, H.:**  
Datenmodell für eine integrierte Arbeitsplanerstellung; VDI-Z 130(1988) 3, S. 40-44.
  54. **Pistorius, E.:**  
Informationsabbildungen für die automatisierte Arbeitsplanung;  
Carl Hanser Verlag, München 1985.
  55. **Weule, H.; Friedmann, T.:**  
Rechnerunterstützte Produktanalyse in der Montageplanung;  
VDI-Z 129(1987) 12, S. 59-63.
  56. **Köhler, F.; König, D.:**  
PIA, ein wissenschaftliches Programmsystem zur automatischen Erstellung von Montagearbeitsplänen; WT Werkstattstechnik 78(1988), S. 251-255.
  57. **Schopen, M.:**  
Die Auswahl von Handhabungsgeräten aufgrund der charakteristischen Merkmale ihrer kinematischen Strukturen; VDI-Verlag, Düsseldorf 1987.
  58. **N.N.:**  
PLACE, User Guide, McDonnell Douglas Corporation, Cypress California 1987.
  59. **Schlaich, G.:**  
CADLAS - eine rechnergestützte Methode für die Layouterstellung von automatischen Montagesystemen; VDI-Z 127(1985) 20, S. 808-810.
  60. **Faber, H.:**  
Integrierte Fabrikplanung mit dem CAD-Anwendungssystem FABLIS;  
CAD/CAM (1987) 6, S. 79-85.
  61. **Thein, A.:**  
Interaktive Fabrikplanung auf einem CAD-System; in: VDI-Berichte Rechnerunterstützte Fabrikplanung '87; VDI-Verlag, Düsseldorf 1987, S. 217-233.
  62. **Enghardt, W.:**  
Groblayout-Entwicklung und -Bewertung als Baustein der rechnerintegrierten Fabrikplanung; VDI-Verlag, Düsseldorf 1987.
  63. **Kleineidam, G.:**  
CAD/CAP: Rechnergestützte Montagefeinplanung; Carl Hanser Verlag,  
München Wien 1990.

- 
64. **N.N.:**  
Der Datenbestand kann zur Zeitbombe werden; Computerwoche, (1988) 11, S. 10-12.
65. **Lockemann, P.C.; Schmidt, J.W. (Hrsg.):**  
Datenbank Handbuch; Springer Verlag, Berlin 1987, S. 404.
66. **Neumann, T.:**  
Konzepte zur Erweiterung von Datenbanken für die Unterstützung von CAD/CAM-Anwendungen; Dissertation TH-Darmstadt 1983.
67. **Krepper, A.:**  
Transaktionen in Entwurfsdatenbanken; in: Gotthard, W. u.a.: Datenbanksysteme für technische Anwendungen, Universität Karlsruhe, Fakultät für Informatik; Interner Bericht Nr. 13, Karlsruhe 1985.
68. **Dittrich, K.R.; Kotz, A.M.; Mülle, J.A.; Lockemann, P.C.:**  
Datenbankunterstützung für den ingenieurwissenschaftlichen Entwurf; Informatik-Spektrum (1985) 8, Springer Verlag, Berlin 1985, S. 113 ff.
69. **Stachowiak, H.:**  
Allgemeine Modelltheorie; Springer Verlag, Berlin 1973.
70. **Chen, P.P. (Hrsg.):**  
Entity-Relationship approach: the use of ER concept in knowledge representation; Fourth Int. Conference on Entity-Relationship Approach (Chicago, Oct. 1985), Washington D.C.: IEEE Computer Society Press 1985.
71. **Müller, P.:**  
Lexikon der Datenverarbeitung; 10. Auflage, Verlag Moderne Industrie, Landsberg 1988.
72. **Kotz, A. M.:**  
Triggermechanismen in Datenbanken; IFB 201, Springer Verlag, Berlin 1989.
73. **Reuter, A.:**  
Maßnahmen zur Wahrung von Sicherheits- und Integritätsbedingungen; in: Lockemann, P.C.; Schmidt, J.W. (Hrsg.): Datenbank Handbuch, Springer Verlag, Berlin 1987.
74. **Dittrich, K.R.; Kotz, A.M.; Lockemann, P.C.; Mülle, J.A.:**  
Datenbankunterstützung für den ingenieurwissenschaftlichen Entwurf; Informatik Spektrum, 8(1985) 3, S. 113-125.
75. **Meier, A.:**  
Erweiterung relationaler Datenbanksysteme für technische Anwendungen; Springer Verlag, Berlin 1987.

- 
76. **Lockemann, P.C.; Adams, A.; Bever, M.; Dittrich, K.R.; Ferkinghoff, B.; Gotthard, W.; Kotz, A.M.; Liedtke, R.P.; Lüke, B.; Mülle, J.A.:**  
Anforderungen technischer Anwendungen an Datenbanksysteme; Informatik Fachbericht 94, Springer Verlag, Berlin 1985.
77. **Eswaran, K.P.:**  
Specifications, Implementations and Interactions of a Trigger Subsystem in an integrated Database System, IBM Research Report RJ 1820, San Jose 1976.
78. **Kotz, A.M.; Dittrich, K.R.; Mülle, J.A.:**  
Supporting Semantic Rules by a Generalized Event/Trigger Mechanism; in: Schmidt, J.W.; Ceri, S.; Missikoff, M. (Eds.): Advances in Database Technology EDBT 1988, Proc. Int. Conf. on Extending Database Technology, Venice March 1988, Springer Verlag, Berlin 1988.
79. **Dittrich, K.R.; Kotz, A.M.; Mülle J.A.:**  
Basismechanismen für komplexe Konsistenzprobleme in Entwurfsdatenbanken; BTW Karlsruhe 20.-22. Mai 1985. IFB 94, Springer Verlag, Berlin 1985.
80. **Dayal, U.:**  
Active Database Management Systems; Proc. 3rd International Conference on Data and Knowledge Bases, June 1988.
81. **Dayal, U. et. al.:**  
The HIPAC Project: Combining Databases Time Constraints; Sigmod Record Vol. 17, No. 1; March 1988.
82. **Dittrich, K.R.; Kotz, A.; Mülle J.A.; Lockemann P.C.:**  
Datenbankkonzepte für Ingenieur Anwendungen; GI-14. Jahrestagung, Braunschweig, Oktober 1984, IFB 88, Springer Verlag, Berlin 1984.
83. **Lorie, R.A.; Plouffe, W.:**  
Complex Objects and Their Use in Design Transactions; Proc. Data Base Week, IEEE Comp. Society Press No. 489, San Jose 1983.
84. **Klein:**  
Toleranzen und Passungen / Technische Oberflächen; in: Einführung in die DIN-Normen, B.G. Teubner Verlag, Stuttgart 1980.
85. **Deuschländer A.:**  
Integrierte rechnerunterstützte Montageplanung; Carl Hanser Verlag, München Wien 1989.
86. **Friedmann, T.:**  
Integration von Produktentwicklung und Montageplanung durch neue, rechnerunterstützte Verfahren; Dissertation Universität Karlsruhe 1989.

- 
87. **REFA:**  
Methodenlehre der Planung und Steuerung; Teil 1: Grundlagen,  
Carl Hanser Verlag, München Wien 1978.
  88. **Scheer, A.W.:**  
Wirtschaftsinformatik; 2. Aufl., Springer Verlag, Berlin 1988.
  89. **Stöferle, T.; Dilling, H.-J.; Rauschenbach, T.:**  
Rationalisierung und Automatisierung in der Montage; Werkstatt und Betrieb  
107(1974) 6, S. 327-335.
  90. **Gutenberg, E.:**  
Grundlagen der Betriebswirtschaftslehre; 24. Aufl., Springer Verlag, Berlin 1983.
  91. **Genschow, H.; Harnisch, H.G.:**  
Werkzeugmaschinen-Datenbank; VDI-Z 130(1988) 11, S. 49-51.
  92. **Reinisch, H.:**  
Datenbank für Betriebsmittel der Montageautomatisierung; ZWF 85(1990) 7,  
S. 352-356.
  93. **Schlaich, G.:**  
CADLAS-Eine rechnergestützte Methode für die Layouterstellung von automati-  
schen Montagesystemen; VDI-Z 127(1985) 20, S. 808-810.
  94. **Hahn, D.:**  
Interaktive Planung und Beurteilung von Layoutalternativen im Rahmen des  
Fabrikplanungsprozesses mit Hilfe eines CAD-Systems, VDI-Verlag,  
Düsseldorf 1984.
  95. **Deutschländer, A.; Severin, F.:**  
Rechnerunterstützte Layoutplanung für Industrieroboteranwendungen;  
ZWF 81(1986) 10, S. 515-522.
  96. **Milberg, J.; Groha, A.:**  
Der Zellengedanke als Strukturierungsprinzip im Informations- und Materialfluß  
flexibler Fertigungssysteme; ZWF 81(1986) 12, S. 682-687.
  97. **Käufer, H.:**  
CAD-Expertensystem (ICX) Kunststoff-Metallkleben; Springer Verlag,  
Berlin 1989.
  98. **Habenicht, G.:**  
Kleben: Grundlagen, Technologie, Anwendungen; Springer Verlag, Berlin 1986.
  99. **Schindel-Bandinelli, E. (Hrsg.):**  
Kleben in der Metalltechnik und Konstruktion; Verlag IKD Mertz GmbH 1990.

100. **Löhr, H.-G.:**  
Eine Planungsmethode für automatische Montagesysteme;  
Dissertation Universität Stuttgart 1976.
101. **Itter, F.:**  
Einsatz von Petrinetzen zur Beschreibung von Fertigungssystemen;  
ZWF 84(1989) 4, S. 206-210.
102. **Kalde, M.:**  
Methode zur Festlegung der Flexibilität in der Montage;  
Dissertation TH-Aachen 1987.
103. **Schäfer, G.; Thim, C.:**  
Integrierte Informationsverarbeitung; Maschinenmarkt (1990) 13, S. 64-70.
104. **Schäfer, G.; Thim, C.:**  
Konfiguration von Montagesystemen; Maschinenmarkt (1990) 35, S. 134-138.
105. **Kaufmann, H.; Köwius, A.:**  
Mit modularen Aluminium-Strangpreßprofilen und Mechanik-Grundelementen  
zu flexiblen Fertigungseinrichtungen; VDI-Z 129(1987) 9, S. 112-117.
106. **Goldenberg, A.A.; Benhabib, G.; Fenton, R.G.:**  
A Complete Generalized Solution To The Inverse Kinematics Of Robots;  
IEEE Journal Of Robotics And Automation, Vol. RA-1 No.1, March 1985.
107. **Nolting, F.-W.:**  
Projektierung von Montagesystemen; Carl Hanser Verlag, München Wien 1988.
108. **Eisele, R.:**  
Konzeption und Wirtschaftlichkeit rechnerintegrierter Planungssysteme;  
Carl Hanser Verlag, München Wien 1990.
109. **Milberg, J.; Wrba, P.:**  
Roboter-Einsatzplanung und Offline-Programmierung mit USIS; ZWF 81(1986) 9,  
S. 484-488.
110. **N.N.:**  
IRL-Sprachenentwurf; Normenausschuß Maschinenbau im DIN, FB-IA, UA  
96.2.2, Frankfurt 1989.

# Reihe

## Fertigungstechnik

### Erlangen

#### Band 1

Andreas Hemberger

**Innovationspotentiale in der rechnerintegrierten Produktion durch wissensbasierte Systeme**

208 Seiten, 107 Bilder. 1988. Kartoniert.

#### Band 2

Detlef Classe

**Beitrag zur Steigerung der Flexibilität automatisierter Montagesysteme durch Sensorintegration und erweiterte Steuerungskonzepte**

194 Seiten, 70 Bilder. 1988. Kartoniert.

#### Band 3

Friedrich-Wilhelm Nolting

**Projektierung von Montagesystemen**

201 Seiten, 107 Bilder, 1 Tabelle. 1989. Kartoniert.

#### Band 4

Karsten Schlüter

**Nutzungsgradsteigerung von Montagesystemen durch den Einsatz der Simulationstechnik**

177 Seiten, 97 Bilder. 1989. Kartoniert.

#### Band 5

Shir-Kuan Lin

**Aufbau von Modellen zur Lageregelung von Industrierobotern**

168 Seiten, 46 Bilder. 1989. Kartoniert.

#### Band 6

Rudolf Nuss

**Untersuchungen zur Bearbeitungsqualität im Fertigungssystem Laserstrahlschneiden**

206 Seiten, 115 Bilder, 6 Tabellen. 1989. Kartoniert.

Band 7

Wolfgang Scholz

**Modell zur datenbankgestützten Planung automatisierter Montageanlagen**

194 Seiten, 89 Bilder. 1989. Kartoniert.

Band 8

Hans-Jürgen Wißmeier

**Beitrag zur Beurteilung des Bruchverhaltens von Hartmetall-Fließpreßmatrizen**

179 Seiten, 99 Bilder, 9 Tabellen. 1989. Kartoniert.

Band 9

Rainer Eisele

**Konzeption und Wirtschaftlichkeit von Planungssystemen in der Produktion**

183 Seiten, 86 Bilder. 1990. Kartoniert.

Band 10

Rolf Pfeiffer

**Technologisch orientierte Montageplanung am Beispiel der Schraubtechnik**

216 Seiten, 102 Bilder, 16 Tabellen. 1990. Kartoniert.

Band 11

Herbert Fischer

**Verteilte Planungssysteme zur Flexibilitätssteigerung der rechnerintegrierten Teilefertigung**

201 Seiten, 82 Bilder. 1990. Kartoniert.

Band 12

Gerhard Kleineidam

**CAD/CAP : Rechnergestützte Montagefeinplanung**

203 Seiten, 107 Bilder. 1990. Kartoniert.

Band 13

Frank Vollertsen

**Pulvermetallurgische Verarbeitung eines Übereutektoiden verschleißfesten Stahls**

XIII + 217 Seiten, 67 Bilder, 34 Tabellen. 1990. Kartoniert.

Band 14

Stephan Biermann

**Untersuchungen zur Anlagen- und Prozeßdiagnostik für das  
Schneiden mit CO<sub>2</sub>-Hochleistungslasern**

VIII + 170 Seiten, 93 Bilder, 4 Tabellen. 1991. Kartonierte.

Band 15

Uwe Geißler

**Material- und Datenfluß in einer flexiblen Blechbearbeitungszelle**

124 Seiten, 41 Bilder, 7 Tabellen. 1991. Kartonierte.

Band 16

Frank Oswald Hake

**Entwicklung eines rechnergestützten Diagnosesystems für  
automatisierte Montagezellen**

XIV + 166 Seiten, 77 Bilder. 1991. Kartonierte.

Band 17

Herbert Reichel

**Optimierung der Werkzeugbereitstellung durch  
rechnergestützte Arbeitsfolgenbestimmung**

198 Seiten, 73 Bilder, 2 Tabellen. 1991. Kartonierte.

Band 18

Josef Scheller

**Modellierung und Einsatz von Softwaresystemen für  
rechnergeführte Montagezellen**

198 Seiten, 65 Bilder. 1991. Kartonierte.

Band 19

Arnold vom Ende

**Untersuchungen zum Biegeumformen mit elastischer Matrize**

166 Seiten, 55 Bilder, 13 Tabellen. 1991. Kartonierte.

Band 20

Joachim Schmid

**Beitrag zum automatisierten Bearbeiten von Keramikguß  
mit Industrierobotern**

XIV + 176 Seiten, 111 Bilder, 6 Tabellen. 1991. Kartonierte.

Band 21

Egon Sommer

**Multiprozessorsteuerung für kooperierende  
Industrieroboter in Montagezellen**

188 Seiten, 102 Bilder. 1991. Kartoniert.

Band 22

Georg Geyer

**Entwicklung problemspezifischer Verfahrensketten  
in der Montage**

192 Seiten, 112 Bilder. 1991. Kartoniert.

Band 23

Rainer Flohr

**Beitrag zur optimalen Verbindungstechnik in der  
Oberflächenmontage (SMT)**

186 Seiten, 79 Bilder. 1991. Kartoniert.

Band 24

Alfons Rief

**Untersuchungen zur Verfahrensfolge Laserstrahlschneiden  
und -schweißen in der Rohkarosseriefertigung**

VI + 145 Seiten, 58 Bilder, 5 Tabellen. 1991. Kartoniert.

Band 25

Christof Thim

**Rechnerunterstützte Optimierung von Materialflußstrukturen  
in der Elektronikmontage durch Simulation**

188 Seiten, 74 Bilder. 1992. Kartoniert.

Band 26

Roland Müller

**CO<sub>2</sub>-Laserstrahlschneiden von kurzglasverstärkten Verbundwerkstoffen**

141 Seiten, 107 Bilder, 4 Tabellen. 1992. Kartoniert.

Band 27

Günther Schäfer

**Integrierte Informationsverarbeitung bei der Montageplanung**

195 Seiten, 76 Bilder. 1992. Kartoniert