

Georg Geyer

*Entwicklung problemspezifischer
Verfahrensketten in der Montage*

Georg Geyer

*Entwicklung problemspezifischer
Verfahrensketten in der Montage*

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:	06. 05. 1991
Tag der Promotion:	27. 07. 1991
Vorsitzender:	Prof. Dr.-Ing. G. Kuhn
Berichterstatte:	Prof. Dr.-Ing. K. Feldmann
	Prof. Dr. rer. pol. P. Mertens

Die Deutsche Bibliothek - CIP-Einheitsaufnahme

Geyer, Georg:

Entwicklung problemspezifischer Verfahrensketten in der
Montage / von Georg Geyer. Hrsg. von Klaus Feldmann. -
München; Wien: Hanser 1991

(Fertigungstechnik - Erlangen; 22)

Zugl.: Erlangen, Nürnberg, Univ., Diss., 1991

ISBN 3-446-16552-5

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 1991

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 Friedrich–Alexander–Universität Erlangen–Nürnberg.

Herrn Prof. Dr.–Ing. K. Feldmann, dem Leiter des Lehrstuhls für Fertigungsautomatisierung und Produktionssystematik am Institut für Fertigungstechnik, danke ich herzlich für die großzügige Förderung bei der Durchführung dieser Arbeit und die vertrauensvolle Betreuung.

Herrn Prof. Dr. rer. pol. P. Mertens, dem Leiter des Lehrstuhls für Betriebswirtschaftslehre insbes. Wirtschaftsinformatik an der Wirtschafts– und Sozialwissenschaftlichen Fakultät, danke ich für die Übernahme des Korreferats, für seine Verbesserungsvorschläge und wohlwollende Unterstützung.

Herrn Prof. Dr.–Ing. H. Meerkamm, dem Leiter der Abteilung für Maschinenelemente und fertigungsgerechtes Konstruieren, danke ich für seine Bemühungen bei der Durchführung des Promotionsverfahrens.

Ferner gilt mein Dank allen Kollegen, Studenten und wissenschaftlichen Hilfskräften, die durch ihre Unterstützung zum Gelingen dieser Arbeit beigetragen haben. Insbesondere möchte ich mich bei Herrn Michael Wullenweber, Herrn Dirk Bischoff, Herrn Stefan Böker, Herrn Martin Gehrecke, Herrn Thomas Holzner, Herrn Robert Jäger, Herrn Lutz Lauchstedt, Herrn Thorsten Riemer, Herrn Franz Singer, Herrn Patrick Strohmenger und Herrn Berthold Zink für den hervorragenden Einsatz und die gute Zusammenarbeit bedanken. Einen besonders herzlichen Dank möchte ich meinen Kollegen Herrn Dipl.–Ing. Hubert Reinisch, Herrn Dr.–Ing. Rainer Eisele und Herrn Dipl.–Ing. Jörg Franke für ihre unermüdliche Diskussionsbereitschaft und tatkräftige Unterstützung aussprechen.

Georg Geyer

Entwicklung problemspezifischer Verfahrensketten in der Montage

Inhaltsübersicht

1. Einleitung	1
2. Randbedingungen und Anforderungen der Montageplanung	3
2.1 Planung flexibel automatisierter Montagesysteme	4
2.1.1 Bedeutung von Erfahrungswissen	5
2.1.2 Ebenen der Montageplanung	7
2.1.3 Wechselwirkung zwischen Planung und Programmierung	9
2.2 Systematische Montageplanung	11
2.2.1 Einteilung rechnergestützter Planungswerkzeuge	12
2.2.2 Rechnergestützte Werkzeuge für die Montageplanung	13
2.3 Defizite und Möglichkeiten rechnergestützter Montageplanung	16
3. Eine Arbeitsumgebung für die Montageplanung	20
3.1 Problemspezifische Verfahrensketten	21
3.2 Anforderungen an Planungswerkzeuge	23
3.2.1 Dialogorientierte Entwicklung von Planungsdokumenten	26
3.2.2 Verwaltung von Versionen und Alternativen	26
3.2.3 Wissensverarbeitung	27
3.2.4 Explizite Speicherung und Verwaltung von Relationen	33
3.3 Entwicklungsphasen dialogorientierter, wissensbasierter Planungswerkzeuge	35
4. Programmierungsumgebung als Grundlage eines rechnerintegrierten Arbeitsplatzes für die Montageplanung	38
4.1 Wissensbasierte Programmierungsumgebungen	40
4.2 Heterogene Systemstruktur und Kommunikation	42
4.3 Schnittstelle zum Datenbanksystem INGRES	44
4.3.1 Datenbankbasierte Expertensysteme	45
4.3.2 Entwurf der Schnittstelle KEE-INGRES	45
4.4 Schnittstelle zum CAD-System	47
4.5 Schnittstelle zum graphischen Simulationssystem CARo	50
4.6 Hilfsmittel zum Wissenserwerb	50

4.6.1	Einteilung von Wissenserwerbswerkzeugen	51
4.6.2	Darstellung von Erfahrungswissen in der Montage	52
4.6.3	Werkzeug zur Erfassung von Objektstrukturen	54
5.	Wissensbereich Greiferplanung	60
5.1	Aufgaben der Greiferplanung	62
5.1.1	Aufbau von Greifersystemen	63
5.1.2	Anforderungen an Greifersysteme	65
5.1.3	Greif-Situationen	66
5.1.4	Feinplanung der Greifbewegung	67
5.1.5	Einflußfaktoren der Greiferplanung	68
5.1.6	Sensoren und Steuerungen für Greifersysteme	70
5.2	Ansätze zur systematischen Greiferplanung	71
5.2.1	Methodische Greiferplanung	71
5.2.2	Nicht wissensbasierte Planungswerkzeuge zur Greiferplanung	72
5.2.3	Wissensbasierte Planungswerkzeuge zur Greiferplanung	73
5.3	Defizite und Möglichkeiten rechnergestützter Greiferplanung	75
6.	Verfahrenskette zur Greiferplanung	78
6.1	Werkzeuge zur greiftechnischen Montageplanung	78
6.1.1	Anforderungen an ein Greiferplanungssystem	78
6.1.2	Grobkonzept einer exemplarischen Verfahrenskette	80
6.2	Verwaltung der Greifersystemparameter	83
6.2.1	Datenbank für Greifersysteme	84
6.2.2	Greiferdatenbasis aus CAD-Modellen	88
6.3	Bereitstellung einer Testumgebung	92
7.	Greiftechnische Produktanalyse	97
7.1	Features zur Greiferplanung	98
7.2	Produktmodell für die Greiferplanung	99
7.3	Ableitung und Übertragung von Greiffeatures	102
8.	Wissensbasierte Strukturplanung von Montagesystemen	104
8.1	Konventionelle Abtaktungsverfahren	105
8.2	Verlauf der Strukturplanung	107

8.2.1 Problemlösungskonzept und Entwurfsentscheidungen	108
8.2.2 Dialogfunktionen und Planungsverlauf	110
8.2.3 Bereitstellung der Grunddaten	111
8.2.4 Zeitbasierte Abtaktung nach der Rangwertregel	115
8.3 Empirische Optimierung	117
8.3.1 Interaktive Optimierung	119
8.3.2 Konfliktprädikate und –interpreter	120
8.3.3 Suchverfahren zur Konfliktbeseitigung	121
8.3.4 Regeln zur Optimierung einer Situation	124
8.4 Integration in ein betriebliches Umfeld	128
9. Greiferauswahl und Ermittlung von Greifpunkten	131
9.1 Dialogorientierte Auswahl von Greifersystemen	131
9.2 Problemlösungskonzept für die Sauggreiferauswahl	134
9.2.1 Auswahl eines Sauggreifersystems für ein Teil	135
9.2.2 Auswahl eines Sauggreifersystems für mehrere Teile	137
9.2.3 Wissensrepräsentation zur Sauggreiferauswahl	138
9.3 Wechselwirkungen Sauggreiferauswahl, Saugpunktermittlung und Bewegungsplanung	139
9.4 Greifpunktplanung	140
9.4.1 Verfahren zur Positionierung von Saugelementen	141
9.4.2 Planungsergebnisse des Greifpunktplanungsmoduls	144
10. Bewegungsplanung und Überprüfung der Greifkräfte	147
10.1 Generierung von Steuerungsanweisungen für Roboterzellen	147
10.1.1 Ein problemspezifisches Programmiersystem	148
10.1.2 Ein zellenspezifisches Programmiersystem zum Stapeln von Flachteilen	149
10.1.3 Bereitstellung der Ausgangsdaten	151
10.1.4 Generierung von Steuerungsprogrammen	152
10.1.5 Übertragung der Steuerprogramme	154
10.2 Kräftemodell für Sauggreifer	156
10.3 Diagnose des Planungsverlaufes	160
11. Zusammenfassung	162
12. Literatur	164

1. Einleitung

Ein wesentliches Ziel der fertigungstechnischen Entwicklung ist die Bereitstellung von Verfahrensketten zur Planung rechnerintegrierter Montagesysteme analog zur Teilefertigung /1/. Tätigkeiten der Montageplanung sind überwiegend empirischer Art. Entscheidungen unterliegen in hohem Maß firmenspezifischen Randbedingungen. Dabei sind die Entscheidungskriterien schwer erfaßbar. Daraus ergeben sich Schwierigkeiten, Aufgaben der Montageplanung zu modellieren und rechnerintern zu verarbeiten /2/. Mit konventionellen rechnergestützten Werkzeugen und Sukzessivplanung können die wechselseitigen Einflüsse und Beziehungen der einzelnen Planungsschritte nicht ausreichend berücksichtigt und damit Verfahrensketten für die Montage nur bedingt entwickelt werden /3/.

Planerisches Handeln ist – wie konstruktives Handeln (vergl. /4/) – durch individuelles Vorgehen, Abstraktion und die Anwendung gedanklicher Modelle gekennzeichnet. Zur durchgängigen Unterstützung der Montageplanung fehlen brauchbare Verfahren und Modelle, um planerisches Vorgehen zu erfassen und auf einem Rechner abzubilden. Die Wissensverarbeitung könnte entscheidende Impulse zur Entwicklung neuer Planungssysteme liefern, die das individuelle Vorgehen der Planungsexperten unterstützen und unterschiedliche Denkrichtungen und Lösungswege zulassen.

Auf dem Gebiet der Künstlichen Intelligenz und der Wissensverarbeitung wurden leistungsfähige, flexible Programmiertechniken und –werkzeuge entwickelt. In der vorliegenden Arbeit sollen die Möglichkeiten dieser Werkzeuge und Methoden zur rechnergestützten Montageplanung aufgezeigt werden. Neben der Entwicklung individueller Planungssysteme für bestimmte Teilaufgaben der Montageplanung wird auch deren Integration zu einer Verfahrenskette untersucht. Damit soll nachgewiesen werden, daß sich weitgehend durchgängige Verfahrensketten für die Planung automatisierter Montageanlagen entwickeln lassen.

Dazu wird von der Annahme ausgegangen, daß die Entwicklung genereller, umfassender Planungswerkzeuge für alle Bereiche und Branchen der Montage weder möglich noch sinnvoll ist. Für spezielle, zum Teil betriebs- oder personenspezifische

Planungsvorgänge und -vorgehensweisen, lassen sich jedoch Funktionsmerkmale rechnergestützter Hilfsmittel definieren. Der Einsatz leistungsfähiger Programmierwerkzeuge und -methoden soll eine sinnvolle Realisierung individueller Planungswerkzeuge gewährleisten, wobei neben der eigentlichen Funktionalität zusätzlich struktureller Aufbau, Flexibilität und Entwicklungszeit und weitere wirtschaftliche Gesichtspunkte berücksichtigt werden.

Aus den Erfahrungen bei der Entwicklung, Erprobung und Integration einzelner wissensbasierter Planungsmodule lassen sich Anforderungen und Möglichkeiten einer *wissensbasierten Arbeitsumgebung* für die Montageplanung ableiten. Im diesem Sinn ist die vorliegende Arbeit ein Beitrag zur Entwicklung einer *wissensbasierten Arbeitsumgebung für die Montageplanung*. Eine Arbeitsumgebung sollte individuelles, erfolgreich planerisches Vorgehen durch gewachsenes Wissen unterstützen und auf verschiedenartige Planungsaufgaben und Anwendungsgebiete ausrichtbar sein /4/.

2. Randbedingungen und Anforderungen der Montageplanung

Vorherrschend in der Montage sind bisher starr automatisierte Anlagen für die Massenfertigung sowie manuelle Systeme in der Klein- und Mittelserienfertigung. Durch den zunehmenden Einsatz freiprogrammierbarer Betriebsmittel, wie z.B. Handhabungs- und Transportsysteme, sollen für die automatisierte Montage höhere Flexibilitätsgrade erreicht werden, um neue Rationalisierungspotentiale zu erschließen.

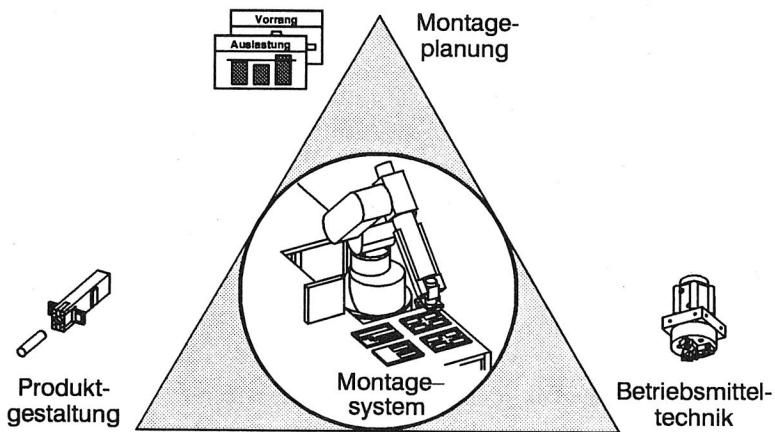


Abb. 1: Flexible Automatisierung durch Weiterentwicklung der Betriebsmittel, Produktgestaltung und Montageplanung

Damit ist eine Entkoppelung des Menschen von den unmittelbaren Funktionen des Materialflusses – einschließlich Bearbeiten und Prüfen – verbunden. Seine Aufgabenschwerpunkte verlagern sich zu den Planungs-, Überwachungs-, und Steuerungsfunktionen. Entsprechend ändern sich die Aufgabenstrukturen und Anforderungen an die Ingenieurarbeit: Verdichtung von Erkenntnissen, Spezialisierung, interdisziplinäre Verknüpfung und steigende Komplexität als Ergebnis evolutionärer Wechselwirkung von Mensch und Technik. /5/

Durch Forschungs- und Entwicklungsarbeiten auf den Teilgebieten Betriebsmittel-technik, Produktgestaltung und Montageplanung wird versucht, die Flexibilität automatisierter Montagesysteme zu erhöhen (Abb. 1).

Das Ziel, eine flexibel automatisierte Montage, ist nur durch gegenseitige Einflußnahme und gemeinsame Weiterentwicklung dieser Teilgebiete erreichbar.

Es existiert noch relativ wenig Erfahrung über automatisierte Fügeprozesse /6, 7/. Nicht nur die Produkte, sondern auch die Betriebsmittel sind einem wachsenden Innovationsdruck ausgesetzt. Durch Modularisierung, sowie durch Verbesserung der Kommunikations- und Integrationsfähigkeit, sollen wiederverwendbare, intelligente Betriebsmittel entstehen. Eine an die Bedürfnisse der automatisierten Montage angepaßte Produktkonstruktion erleichtert die Automatisierbarkeit und trägt damit zur Flexibilisierung bei.

Zwischen diesen beiden Teilgebieten steht die Montageplanung, deren Aufgabe darin besteht, aus Konstruktionsdaten Fertigungsdaten abzuleiten und Montagepläne unter Berücksichtigung vorhandener Arbeitssysteme bereitzustellen. Die Montageplanung ist für den effizienten Einsatz und die Konfiguration der Betriebsmittel zu automatisierten Montagesystemen verantwortlich. Auch die Nutzung und Anschaffung neuer Arbeitssysteme muß geplant und wirtschaftlich bewertet werden.

2.1 Planung flexibel automatisierter Montagesysteme

Im Vergleich zu manuellen Montagesysteme bedingen automatisierte einen deutlich höheren Planungsaufwand. Risiken, die mit den zusätzlichen Investitionskosten verbundenen sind, verlangen erweiterte Planungssicherheit und -qualität /6/. Die kürzeren Produktlebenszyklen und Planungszeiträume fordern neue rechnergestützte Planungsmethoden und -hilfen, die eine hohe Produktivität gewährleisten /1, 6/ (Abb. 2).

Die flexible Automatisierung von Montage- und Handhabungsvorgängen mit Industrierobotern ist zudem erheblich komplexer und schwieriger als die Automatisierung mit Hilfe der NC-Technik in der Teilefertigung. Ursachen sind u.a. die Anzahl der Freiheitsgrade von Greifer- und Werkzeugbewegung, der Sensoreinsatz sowie die Vielfalt der möglichen Einsatz- und Prozeßbedingungen /5/. Bei Verfahrensketten zur Teilefertigung werden in der Regel Arbeitsgänge und Bewegungsdaten generiert. Zusätzliche kann auch die Werkzeugauswahl unterstützt werden. Fertigungssysteme und deren Leistungsmerkmale sind aber im wesentlichen

vorgegeben. Eine darüber hinaus gehende Aufgabe der Montageplanung ist die Konzeption des eigentlichen Montagesystems. Dieses System muß vorgegebene Merkmale unter wirtschaftlichen Gesichtspunkten erfüllen und ist mit seinen Komponenten als zusätzlicher Freiheitsgrad zu berücksichtigen.

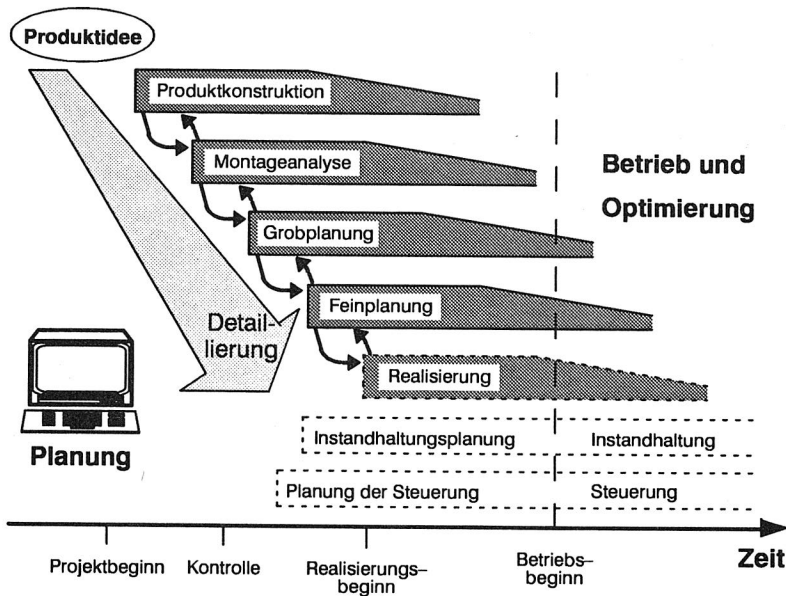


Abb. 2: Überlappung einzelner Planungstätigkeiten durch rechnergestützte Betriebsmittel- und Produktmodelle

2.1.1 Bedeutung von Erfahrungswissen

Für eine durchgängige Rechnerunterstützung der Montageplanung fehlen geeignete Methoden und Modelle. Systematische und analytische Verfahren, die mit kompakten Algorithmen abbildbar sind, führen nicht zum Ziel. Ein Grund dafür sind die vielfältigen, komplex strukturierten Randbedingungen und Abhängigkeiten, die von Bedeutung sein können. Ein Planungsexperte liefert dennoch, mit Hilfe seiner Erfahrung, brauchbare Ergebnisse. Dabei kommen individuelles Wissen und Vorgehen,

die Fähigkeit zur Abstraktion und die Anwendung gedanklicher Modelle zum tragen (vergl. /4/). Die Planung flexibel automatisierter Montageanlagen ist durch eine zeitaufwendige, iterative Vorgehensweise gekennzeichnet; die Planungsgüte ist entscheidend von der Erfahrung des Planers, von dessen Wissen über den aktuellen Stand der Technik, sowie von der genauen Kenntnis des zu montierenden Produkts abhängig /8/.

Eine wirtschaftliche Montageplanung ist unter betriebspezifischen Randbedingungen – wie z.B. Verfügbarkeit automatisierter Montageprozesse, Handhabungs- und Transportsysteme und entsprechende Einsatzerfahrungen – durchzuführen.. In diesem Zusammenhang spielt die Wissensverarbeitung bei der rechnergestützten Montageplanung eine entscheidende Rolle.

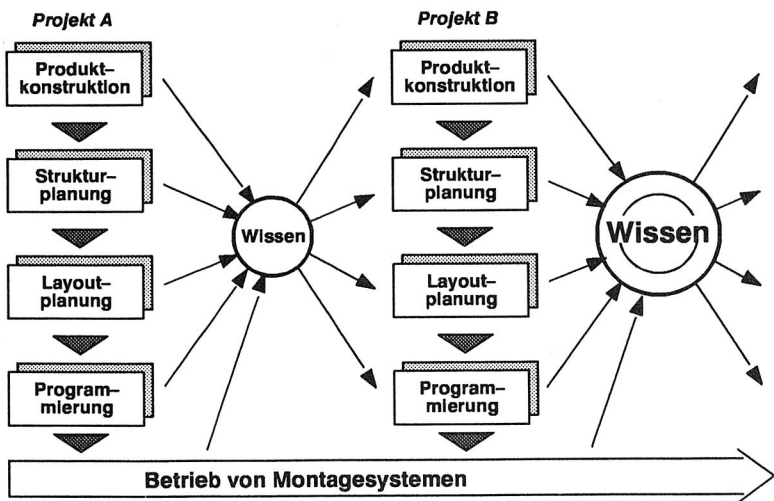


Abb. 3: Lernprozeß bei Planung und Betrieb von Montagesystemen

Das produktionstechnische Wissen – auch innerhalb eines Betriebes oder einer Planungsabteilung – ist einem ständigen Wandel unterworfen. Ein wesentlicher Beitrag zur Wettbewerbsfähigkeit besteht darin, dieses Wissen in optimierte Anlagen umzusetzen und daraus neues Erfahrungswissen zu gewinnen.

Planungssysteme, die nicht auf Wissen und Erfahrungen basieren oder dieses verarbeiten, können deshalb nur beschränkte Teilaufgaben übernehmen, deren Lösungsweg nicht oder begrenzt vom produktionstechnischen Fortschritt beeinflusst wird. Sollte dennoch ohne Einbeziehung des neuesten Wissensstandes geplant werden, wird die Weiterentwicklung der Montagetechnik behindert.

Der Lernprozeß, der bei Planung, Realisierung und Betrieb automatisierter Montagesysteme durchlaufen wird, ist ein wesentlicher Bestandteil der Problemlösungsfähigkeit (Abb. 3). Lernvorgänge und kreative, schöpferische Handlungsweisen sind noch größtenteils unerforscht und entziehen sich weitgehend der Mechanisierung. Sinnvolle Rechneranwendung bleibt damit heute auf einfache Planungstätigkeiten und Routinevorgänge mit geringem kreativen Anteil beschränkt. Die möglichen automatisierbaren Entscheidungen sind vom abgespeicherten Wissen abhängig.

Der Mensch bleibt mit seiner Lernfähigkeit und Kreativität notwendiger und zentraler Bestandteil der Montageplanung bzw. des Produktionsprozesses. Auch wenn Informationstechnik und Rechnersysteme eine zunehmende Automatisierung und Integration der Material- und Informationsflüsse ermöglichen, wird der Mensch immer mit neuen Aufgaben und Problemen konfrontiert, wie z.B. die zunehmende Komplexität durch Entwicklung geeigneter Hilfsmittel zu beherrschen /5/.

2.1.2 Ebenen der Montageplanung

Die Planung komplexer technischer Systeme – wie z.B. automatisierter Montageanlagen (vgl. Abb. 2) – erfolgt auf unterschiedlichen Abstraktionsebenen /3/. Abstraktion ist in diesem Zusammenhang das Hervorheben wesentlicher, für die Lösung eines Problems relevanter Eigenschaften /9/. Auf einer Abstraktionsebene werden vom Planer Objekte dieser Ebene erzeugt bzw. ausgewählt, Zusammenhänge zwischen Objekten dieser oder anderer Ebenen festgelegt und Ebenen nach Bedarf gewechselt /10/. Was in diesem Zusammenhang wesentlich ist, unterliegt individuellen Vorgehensweisen und Erfahrungen. Der Erfolg entscheidet letztendlich über sinnvolle Planungsstrategien.

Für die Montageplanung kann u.a. die Situations- und die Operatorabstraktion /11/ eingesetzt werden, da einer Montageanlage sowohl statische Eigenschaften als auch Operationen zuzuordnen sind. Die Operatorabstraktion eignet sich, wie in /11/

vorgeschlagen, zur Strukturierung eines Planungsverlaufes. In der Montage wird sie aber auch zur Beschreibung der Operationen herangezogen, die von der zu planenden Anlage ausführbar sind. Diese Problemstellung hängt mit der geringen Standardisierung der Montagesysteme und deren Komponenten, bzw. mit dem hohen Freiheitsgrad bestimmter Teilfunktionen (z.B. Bewegungsablauf frei programmierbarer Handhabungssysteme), zusammen.

Einer Abstraktionsebene kann ein modellhafter Beschreibungsformalismus zugeordnet werden, der die relevanten Informationen einer konkreten Problemstellung dokumentiert. In der Montage werden z.B. Vorranggraphen, Funktionssymbole, 2D- und 3D-Layouts zur systematischen Planung verwendet. Diese Unterlagen repräsentieren den Planungszustand und -fortschritt und bilden eine wesentliche Kommunikations- und Diskussionsgrundlage. Beziehungen und Zusammenhänge werden allerdings nur zum Teil dokumentiert. Der Planungsexperte stellt Assoziationen durch Beschäftigung mit der Problemstellung und Interpretation der Unterlagen dynamisch her und entwickelt zusätzlich individuelle Gedankenmodelle.

2D-Anlagenmodelle, die ausschließlich die räumliche Anordnung der Maschinen abbilden, sind Beispiele durch Situationsabstraktion entstandener Planungsunterlagen. Steuerungsprogramme und Funktionsablaufpläne entstehen durch Operatorabstraktion. Es werden aber auch gemischte Unterlagen eingesetzt, wie z.B. ein Layout mit Funktionsbeschreibung oder Kennzahlen eines Montagesystems.

Die verwendeten Abstraktionsebenen bzw. die Planungsdokumente können zwar auch zur systematischen Detaillierung hierarchisch geordnet sein, was aber in der Regel nicht der Fall ist. Meist werden mehrere Abstraktionshierarchien verwendet, deren Ebenen bzw. Objekte auch untereinander in Beziehung stehen. Dies läßt sich am Beispiel der Fertigungs- und Funktionsstruktur eines Produktes verdeutlichen. Diese Beschreibungen sind zumindest formal auf der gleichen oder einer sehr ähnlichen Ebene anzusiedeln. Die Konstruktion wird ein Produkt nach funktionalen und konstruktiven Gesichtspunkten, die Arbeitsplanung nach Fertigungs- und Materialflußgesichtspunkten darstellen und strukturieren. Die Aufgabe der Arbeitsplanung ist es, aus der vorgegebenen Konstruktionsstruktur eine zweckmäßige Fertigungsstruktur abzuleiten. Beide Strukturmodelle sind abstrakte Beschreibungen desselben realen Produkts, dem Konstruktions- und Funktionsmerkmale aber auch Fertigungseigenschaften zugeordnet werden können.

2.1.3 Wechselwirkung zwischen Planung und Programmierung

Zwischen Anlagenplanung und -programmierung existieren vielfältige Wechselwirkungen (Abb. 4) /10/. Die zu planenden operativen Funktionen der Montageanlage sind auch von statischen Systemeigenschaften abhängig. Die ausgewählte Kinematik des Handhabungssystems bestimmt die Freiheitsgrade der Bewegungsbahn.

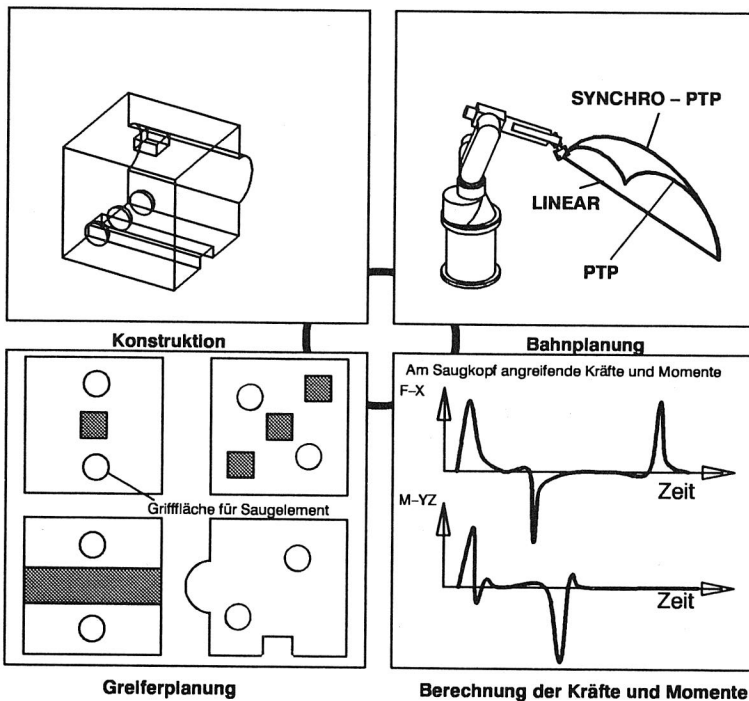


Abb. 4: Wechselwirkungen Greiferplanung und Programmierung /10/

Das Layout legt den Kollisionsraum sowie den Ort der Teilebereitstellung und des Fügevorgangs fest, die im Bewegungsprogramm berücksichtigt werden müssen. Die eingeplanten Betriebsmittel definieren die Aufgaben des Handhabungssystems. Die Bewegungen des Handhabungssystems beeinflussen die am Handhabungsobjekt

auf tretenden Kräfte und Momente, die wiederum vom ausgewählten Greifersystem und den geplanten Greifpunkten abhängen (Abb. 4).

Umfassende analytische und systematische Ansätze zur Auflösung dieser Wechselwirkungen sind aufgrund der Komplexität der möglichen Zusammenhänge und der spezifischen Randbedingungen nicht wirtschaftlich anwendbar. Das schließt aber den erfolgreichen Einsatz von systematischen und analytischen Verfahren in Teilbereichen nicht aus.

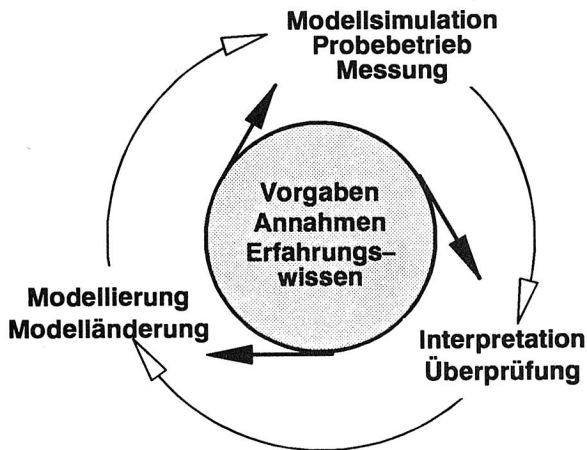


Abb. 5: Iterationsschritte zur Systemoptimierung

Bei der Montageplanung muß deshalb auf Erfahrungswissen zurückgegriffen werden, um von groben zu detaillierten Systemmodellen zu gelangen. Dies ergibt sich aus dem Fehlen exakter Information bei diesem Übergang, bei gleichzeitiger Einschränkung der weiter zu betrachtenden Systemlösungen. Einschränkungen sind notwendig, da Überprüfung und Vergleich detaillierter Lösungsalternativen bei komplexen Systemen aus Aufwandsgründen nicht realisierbar sind.

Das Montagesystem und seine tatsächlichen Leistungsmerkmale werden im Rahmen der Planung entwickelt und sind bei frühen Planungsentscheidungen noch nicht

vollständig bekannt. Diese Entscheidungen basieren deshalb zum Teil auf “vermuteten” bzw. “vorausgesetzten” Eigenschaften des fertig geplanten Montagesystems.

Entscheidungen in der Montageplanung müssen daher überprüft werden, um einen Fehlschluß auszuschließen. Der Nachweis, daß ein geplantes System die geforderten Leistungsmerkmale tatsächlich aufweist, kann zum Teil erst beim Vorliegen höherer Detaillierungsgrade erfolgen. Beispielsweise lassen sich durch Simulation rechnergestützter Modelle auch Eigenschaften eines Montagesystems aus dem Verhalten seiner Komponenten ermitteln, die ansonsten nur durch Messung am realen System gewonnen werden können. Aus diesem Grund ist gerade die Simulation ein wichtiges und hilfreiches Werkzeug für die Montageplanung.

Der Aufbau der Simulationsmodelle und die Interpretation der Simulationsergebnisse erfordern in der Regel Erfahrungswissen. Werden bei der Planung getroffene Annahmen durch analytische Verfahren, Messungen oder Simulationsuntersuchungen nicht bestätigt, so ist das Planungsmodell wiederum mit Hilfe von Erfahrungswissen zu verändern.

Dieser Modellierungs-, Überprüfungs- und Änderungszyklus wird für Modelle unterschiedlicher Abstraktionsebenen durchlaufen (Abb. 5). Dabei entsteht neues Erfahrungswissen, das auch durch Rückkopplungen und Erfahrungen aus dem Betrieb realisierter Anlagen ergänzt wird (vergl. Abb. 3).

2.2 Systematische Montageplanung

Für die Planung von Montagesystemen werden z.B. in /12, 13, 14, 15/ systematische Vorgehensweisen beschrieben, die sich nicht grundlegend unterscheiden /16, 17/. Dabei werden mehrere Phasen mit zunehmendem Detaillierungsgrad verwendet.

Es existieren zwar mehrere, aber bislang keine durchgängigen, praxistauglichen, rechnergestützten Lösungen /18/. Ansätze behandeln einzelne Funktionen oder Phasen der Montageplanung, wie die Montageplanerstellung /19/, die Austaktung von Montagelinien /20, 21/, die Betriebsmittelauswahl /22, 23, 24/ und die Simulation des Einsatzverhaltens /25/ meist relativ isoliert.

2.2.1 Einteilung rechnergestützter Planungswerkzeuge

Rechnergestützte Hilfsmittel zur Montageplanung können grob in *nicht wissensbasierte* und *wissensbasierte* sowie in *dialog-* und *batchorientierte* Systeme untergliedert werden (Abb. 6). Einzelne Planungswerkzeuge lassen sich auch mehreren Kategorien zuordnen.

Batchorientierte, nicht wissensbasierte Planungssysteme erfordern zum Teil hohen Eingabeaufwand. Die notwendigen Eingaben können vollständig erfaßt und ohne weitere Eingriffe verarbeitet werden. Die Abarbeitung ist im Stapelbetrieb (Batch-Betrieb) möglich. Die Verarbeitungsmechanismen werden bei der Programmierung festgelegt und können vom Anwender nicht verändert werden. Die Planungsexperten haben in der Regel keinen direkten Einfluß auf das exakt vorgeschriebene Planungsverfahren, das vom Rechner abgearbeitet wird.

	batch-orientiert	dialog-orientiert
nicht wissensbasiert	Abtaktung nach dem Rangwert-verfahren	CAD, DB-SQL
wissensbasiert	Rokon 1 Moplan	wissensbasierte Arbeitsumgebung

Abb. 6: Einteilung von Planungswerkzeugen

Dialogorientierte, nicht wissensbasierte Planungswerkzeuge stellen im wesentlichen Grundfunktionen zur Erzeugung, Manipulation, Verwaltung und Darstellung von Objekten zur Verfügung. Das Planungsergebnis ergibt sich aus einer vom Anwender definierten und im Dialog aktivierten Folge von Operationen. Dabei kontrolliert der Anwender die Auswirkungen seiner Handlungen durch Beobachtung symbolischer oder graphischer externer Darstellungen der manipulierten Objekte am Bildschirm. Um für ein breites Einsatzfeld zu sorgen, werden die ausführbaren Dialogfunktionen möglichst anwendungsunabhängig gewählt.

Bei einem *batchorientierten, wissensbasierten* Planungssystem können die Randbedingungen vor Beginn der Verarbeitung vollständig eingegeben werden. Das wissensbasierte Planungsverfahren liefert dazu entsprechende Ergebnisse. Der Anwender "programmiert" den Verarbeitungsmechanismus durch Änderung der Wissensbasis. So können auf individuellen Erfahrungen basierende Planungsverfahren entwickelt und eingesetzt werden. Die Problemlösung selbst erfolgt ohne das aktive Eingreifen des Anwenders, der im wesentlichen die Grunddaten bereitstellt. Diese Planungswerkzeuge ersetzen die Qualifikation eines Experten mehr, als daß sie ihn unterstützen.

Dialogorientierte, wissensbasierte Planungssysteme beziehen den Anwender aktiv in den Planungsablauf ein. Randbedingungen werden zum Teil vorgegeben, aber auch während der Problemlösung nach Bedarf erfragt. Von größerer Bedeutung jedoch ist die aktive Beteiligung des Anwenders an den Entscheidungsprozessen. Er übernimmt Planungshandlungen und –entscheidungen, die nicht von der Wissensbasis unterstützt werden. Voraussetzung dafür ist, daß er Anwender über Zielsetzung und Systemzustand ausreichend informiert ist und entsprechende Eingriffsmöglichkeiten bestehen /26/. Im Vergleich zu *batchorientierten, wissensbasierten* Planungssystemen werden deutlich höhere Anforderungen an Benutzerschnittstellen, externe Repräsentationen und Erklärungsfähigkeit gestellt.

2.2.2 Rechnergestützte Werkzeuge für die Montageplanung

Die rechnergestützte Abtaktung bzw. Leistungsabstimmung von Montagelinien, wie sie z.B. in /27, 20, 21/ dargestellt wird, zählt zu den *batchorientierten, nicht wissensbasierten* Hilfsmitteln. Der Bediener legt Vorranggraph mit Ausführungszeiten fest und aktiviert einen Optimierungsalgorithmus, der eine Stationsaufteilung ermittelt. Diese Verfahren bieten in ihrem algorithmischen Kern zum Teil interessante Lösungs- und Optimierungsansätze. Sie können aber nur unter Berücksichtigung zusätzlicher Einschränkungen und Randbedingungen eingesetzt werden. Wie individuelle Randbedingungen berücksichtigt, welche Bedienstrategien eingesetzt und wie diese Werkzeuge in ein konkretes betriebliches Umfeld integriert werden sollten, wird nicht diskutiert.

Den *dialogorientierten, nicht wissensbasierten* Planungssystemen sind z.B. CAD-gestützte, graphisch interaktive Layoutplanungs- und Bewegungssimulationssysteme /6, 28, 29/ zuzuordnen. Mit Hilfe von Bewegungssimulationssystemen werden Geometrie-

oder Kinematikmodelle graphisch dargestellt, manipuliert, interpretiert und bewertet. In /29/ werden dazu Einsatzgebiete und Anforderungen an graphische Dialogsysteme zur Feinplanung von Montagezellen aufgezeigt. Auch interaktive Datenbank Anwendungen, wie **SQL** oder **Query by Forms** und Ablaufsimulationssysteme /30/, gehören zur Kategorie der *dialogorientierten, nicht wissensbasierten* Werkzeuge. Datenbank Anwendungen unterstützen die Verarbeitung und den zentralen Zugriff auf relevante, symbolische Beschreibungen realer Objekte. Bei Ablaufsimulationssystemen stehen dynamische oder statistische Systemmodelle im Mittelpunkt der Untersuchungen.

Planerische Entscheidungen und komplexe Informationsverarbeitungsprozesse werden bei *dialogorientierter* Vorgehensweise vom Anwender übernommen, der aktiv als Entscheidungsträger und Informationsverarbeiter eingreift. Die Planungsqualität ist von der Kompetenz des bedienenden Experten abhängig.

Die Möglichkeiten durch den Einsatz wissensbasierte Systeme in der Produktionstechnik werden z.B. in /16, 19, 31, 32/ aufgegriffen. Eine ausführliche Aufstellung von "Expertensystemen in der Produktion" im deutschsprachigen Raum ist in /33/ dokumentiert. Erfolgversprechende und relativ weitentwickelte Einsatzgebiete sind Diagnose und Konfigurationsprobleme /34/. Aber auch für die Teilekonstruktion werden entscheidende Impulse von der Wissensverarbeitung erwartet /4, 35, 36/. Das Rationalisierungspotential durch wissensbasierte Systeme für die Arbeitsplanung gilt als allgemein anerkannt /5/. /16, 18/ gehen spezieller auf Randbedingungen, Probleme und Vorteile wissensbasierter Systeme der Montageplanung ein.

In /37/ wird ein regelbasiertes Verfahren zur Ableitung von Vorranggraphen aus dem Geometriemodell beschreiben. Dieses Verfahren ist in ein Programmiersystem integriert, das die Abarbeitungsreihenfolge der Montagevorgänge flexibel steuert. Die rechnergestützte Generierung von Vorranggraphen und Explosionszeichnungen aus einem geometrischen Produktmodell wird in /17/ dargestellt. Die Erzeugung von Roboterprogrammen für Handhabungs- und Montageaufgaben der *Blocks-World* geht auf /38/ zurück und wird z.B. in /18/ aufgegriffen.

MOPLAN /16/ zur Grobplanung von automatisierten Montagezellen und **ROKON1** /22/ zur Greiferauswahl sind Beispiele für *batchorientierte, wissensbasierte* Planungssysteme. Mit **MOPLAN** wird versucht, die Ermittlung eines Automatisierungskonzeptes, die Betriebsmittelauswahl und die Groblayoutplanung zu integrieren. Randbedingungen,

wie z.B. die Montagereihenfolge, Montageoperationen und geforderte Taktzeit, werden zunächst von einer Dialogkomponente vollständig erfaßt. **MOPLAN** ermittelt daraus als Endergebnis ein Groblayout und übergibt es an ein 3D-CAD-System.

Batchorientiertes Vorgehen ist dann möglich, wenn die zur Problemlösung notwendigen Randbedingungen weitgehend problemunabhängig und vollständig vorgegeben werden können. Alle Planungsentscheidungen müssen durch Anwendung der Wissensbasis korrekt getroffen werden. Bei komplexen und langwierigen Planungsprozessen ist dieser Ansatz nicht geeignet.

In /19/ wird ein mit Einschränkungen *dialogorientiertes* System zur *wissensbasierten* Generierung von Montage-Arbeitsplänen beschrieben, das sich seit 1988 erfolgreich im betrieblichen Einsatz befindet. In der Dialogphase überarbeitet der Bediener die bereitgestellten Grunddaten. Die *wissensbasierte* Abarbeitung verläuft im wesentlichen *batchorientiert*. Das System wurde für den Bereich der Einzel- und Kleinserienfertigung mit ungetakteten Montageabläufen entwickelt und in **Prolog** implementiert.

Ein *dialogorientierter*, zum Teil *wissensbasierter* Ansatz für die Layoutplanung von Montagezellen wird in /39/ beschrieben. Räumliche Szenen zur Layoutplanung werden durch geometrische Relationen graphisch-interaktiv definiert und mit Hilfe eines Inferenzmechanismus ausgewertet. Die verwendeten geometrischen Relationen sind im wesentlichen vorgegeben und werden vom Bediener kombiniert. Anwendungsgebiet dieses Ansatzes ist die interaktive Layoutplanung von Montagezellen und die Programmierung von Handhabungssystemen.

Simulationswerkzeuge dienen zur Untersuchung komplexer Systeme. Kinematik-Simulatoren werden im Rahmen der Feinplanung zur Layout-Erstellung oder zur Erzeugung und Kontrolle von Steuerungsprogrammen eingesetzt /29/. Materialfluß-Simulationssysteme unterstützen die Überprüfung und Optimierung der Montagestruktur, Pufferauslegung oder Steuerungsstrategie (Abb. 7).

Für die Integration einzelner Planungssysteme ist der Datenbank-Einsatz von besonderer Bedeutung /40/. Mit Hilfe einer Datenbank können z.B. Produkt-, und Betriebsmittelmodelle sowie Planungsunterlagen zentral verwaltet werden. In /41/ wird darauf hingewiesen, daß Strukturdatenbanksysteme eine wichtige Voraussetzung für die rechnerintegrierte Fabrikplanung und damit Baustein eines CIM-Konzepts sind. Nicht alle Informationen können mit heute gebräuchlichen relationalen Datenbanksystemen

verwaltet und verarbeitet werden. Deshalb erfolgt in der Regel eine Datenverteilung auf Spezialsysteme, wie z.B. Anwenderprogramme, CAD- und Simulationssysteme.

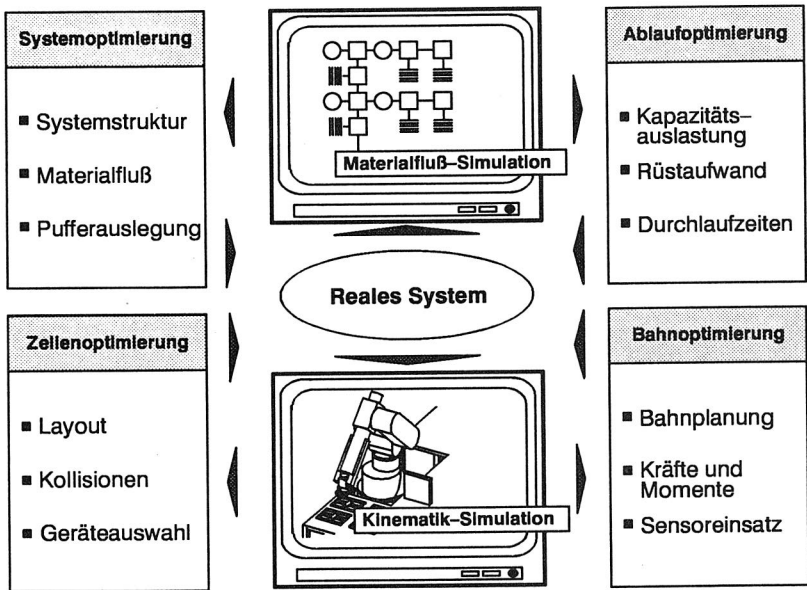


Abb. 7: Simulationssysteme in der Montageplanung

2.3 Defizite und Möglichkeiten rechnergestützter Montageplanung

Die beschriebenen rechnergestützten Verfahren gehen nur bedingt auf das kreative und intuitive Potential der Planungsexperten ein. Der Planer ist vorwiegend für die Datenaufnahme zuständig und beeinflusst den Planungsablauf nur durch die Bereitstellung der Grunddaten. In der Regel handelt es sich hier um *batchorientierte* Systeme.

Um allgemein anwendbar zu sein, wird bewußt vom konkreten Einsatzbereich oder betrieblichen Umfeld abstrahiert. Wissen über produkt- oder betriebsspezifische

Automatisierungskonzepte wird nicht explizit berücksichtigt. Dies ist auch notwendig, um Wissen allgemeingültig darzustellen. Aufgrund dieser angestrebten Kontextunabhängigkeit ist die Integration dieser Verfahren in ein konkretes betriebliches Umfeld problematisch. Es wird kein methodisches Vorgehen vorgeschlagen, und es wird auch nicht diskutiert, wie eine Integration durchzuführen oder zu unterstützen ist.

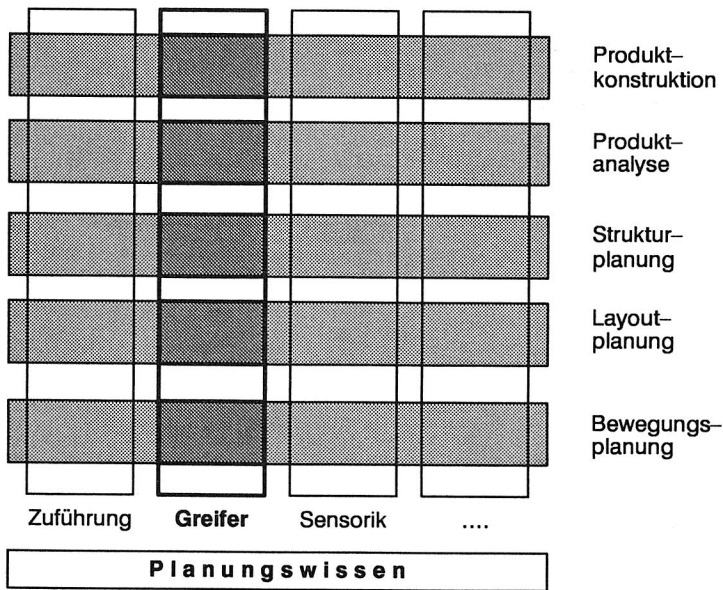


Abb. 8: *Horizontale und vertikale Ansätze zur Montageplanung*

Ein Teil der rechnergestützten Ansätze der Montageplanung behandelt einzelne Planungsphasen, die im folgenden als *horizontal* bezeichnet werden, da sie sich ausschließlich auf einer Planungsebene bewegen. Bei einem *horizontalen* Ansatz werden Entscheidungen und deren Wechselwirkungen betrachtet, die gegebenenfalls unterschiedlichen Wissensbereichen zuzuordnen sind, aber derselben Planungsebene angehören (Abb. 8).

Planungsentscheidungen stehen aber auch in enger Wechselwirkung mit anderen Planungsebenen. In einem *vertikalen* Ansatz wird versucht, Auswirkungen einer

Entscheidung auf andere Planungsebenen und –entscheidungen darzustellen und aufzulösen. Diese Vorgehensweise setzt ein System bestehender Planungsebenen voraus. Bei einem *vertikalen* Ansatz stehen die Wechselwirkungen zwischen den Planungsebenen im Vordergrund.

Bei der Planung von Montagesystemen werden abwechselnd *horizontale* und *vertikale* Vorgehensweisen verwendet. Die meisten rechnergestützten Planungssysteme basieren auf *horizontalen* Ansätzen oder behandeln abgegrenzte Bereiche, wie z.B. die Greiferauswahl, ohne auf Wechselwirkungen mit anderen Wissensbereichen und Planungsebenen einzugehen.

Die Kritik an bestehenden rechnergestützten Ansätzen zur Montageplanung kann wie folgt zusammengefaßt werden:

- Betriebsspezifische Randbedingungen, die zur Vereinfachung der Problemlösung führen, und das kreative Potential der Planungsexperten werden methodisch nicht ausreichend berücksichtigt.
- Es werden in der Regel keine Verfahrensketten gebildet, sondern Teilprobleme isoliert behandelt.

Durch den Einsatz wissensbasierter Programmiertechniken kann das konkrete betriebliche Umfeld – wie z.B. Produktspektrum und betriebsspezifische Automatisierungskonzepte – bei der Entwicklung rechnergestützter Planungsverfahren methodisch mitberücksichtigt werden. *Dialogorientierte* Planungswerkzeuge beziehen die Fähigkeiten des Planers ein. Weiterhin ist die Leistungsfähigkeit *nicht wissensbasierter DV*-Systeme zu nutzen, die bei der Verarbeitung großer Datenmengen, numerischen Berechnungsmethoden sowie graphischen Darstellungen ihre Stärken haben /35/.

Durch Entwicklung und Simulation rechnergestützter Modelle können Planungsentscheidungen auf unterschiedlichen Ebenen detailliert untersucht und besser bewertet werden. Es lassen sich Eigenschaften des Gesamtsystems ermitteln, die bei isolierter Betrachtung nur geschätzt werden können. Ein Qualitätsaspekt der Planung besteht darin, daß die geplanten Montageanlagen – möglichst ohne Anpassungen – die geforderten Leistungsmerkmale erreichen oder daß Anpassungen in einem zeitlich und wirtschaftlich kalkulierbaren Rahmen durchführbar sind.

Daraus läßt sich zwar kein allgemeingültiges, optimales Verfahren zur Montageplanung in einem konkreten betrieblichen Umfeld ableiten. Im Rahmen dieser Arbeit sollen aber Möglichkeiten und Entwicklungspotentiale des Rechnereinsatzes aufgezeigt und für Teilprobleme der Montageplanung, unter Berücksichtigung spezifischer Randbedingungen, *dialogorientierte, wissensbasierte* Planungswerkzeuge exemplarisch realisiert werden. Eine Einschränkung der zu betrachtenden Randbedingungen und Problemstellungen ist unabdingbar, um eine gewisse Automatisierung einzelner Planungsfunktionen zu erreichen. Dem methodischen Ansatz dieser Arbeit zufolge, werden nicht die erforderlichen Planungsverfahren vorgeschrieben, sondern die Entwicklung *problemspezifischer Verfahrensketten bzw. Planungswerkzeuge* durch die Experten selbst unterstützt.

3. Eine Arbeitsumgebung für die Montageplanung

Im Rahmen dieser Arbeit werden *problemspezifische Verfahrensketten* für die Montage vorgeschlagen (Abb.9). Eine Verfahrenskette besteht aus einer Reihe von Planungswerkzeugen, die über eine zentrale Datenbasis integriert werden. Die Funktionalität der einzelnen Planungswerkzeuge ist von betriebs-, und personenspezifischen Randbedingungen abhängig. Um dennoch eine gewisse Problemunabhängigkeit und Flexibilität zu gewährleisten, passen die Planungsexperten Verfahrensketten und Planungswerkzeuge selbst an. Eine *wissensbasierte Arbeitsumgebung* soll sie bei dieser Aufgabe unterstützen.

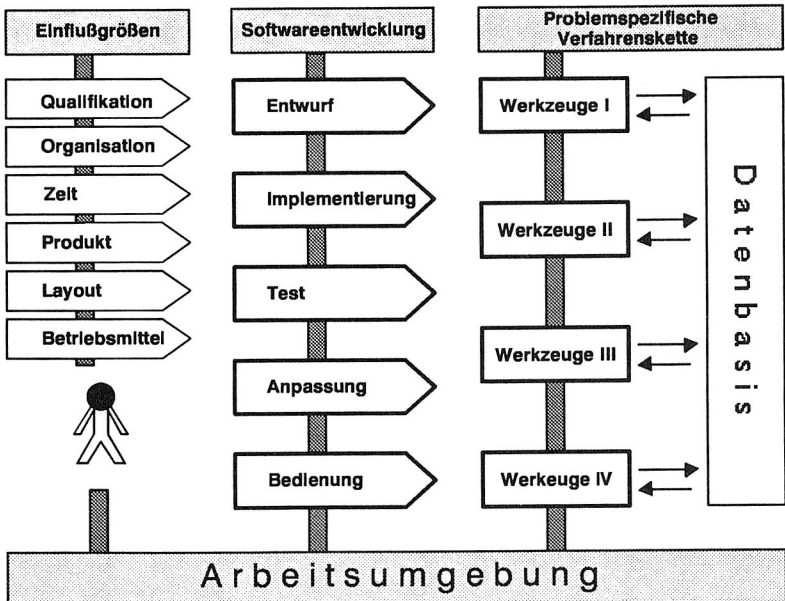


Abb. 9: Arbeitsumgebung zur Entwicklung problemspezifischer Verfahrensketten in der Montage

Eine Arbeitsumgebung für die Montageplanung basiert auf einem *rechnerintegrierten Planungsarbeitsplatz*, dessen globale Leistungsmerkmale in /42/ charakterisiert werden. Dabei handelt es sich nicht um eine konkrete "Planungssoftware", sondern um generelle

Anforderungen. Weitere Merkmale ergeben sich aus den Aufgaben und Randbedingungen der Montageplanung.

Eine *wissensbasierte Arbeitsumgebung* für die Montageplanung sollte den Experten insbesondere von Routinearbeiten oder Wiederholtätigkeiten entlasten und in seiner Kreativität, Sachkenntnis und Fähigkeit zur situationsabhängigen Problemlösung unterstützen (vergl. /4/). Hilfsmittel orientieren sich dabei an den Aufgaben und am individuellen Vorgehen des Planers. Eine Standardisierung der verfügbaren Funktionalität darf nicht zur Eingrenzung der notwendigen Handlungsfreiräume führen.

Die Einführung rechnergestützter Planungstechniken ist mit hohen Kosten und Risiken verbunden. Neben Faktoren, wie z.B. Planungshäufigkeit, Planungsqualität, Rationalisierungspotential und Qualifikationsanforderungen sowie Innovationszyklen und Automatisierbarkeit der Planungsverfahren, ist auch das historisch gewachsene betriebliche Umfeld konventioneller Hilfsmittel zu berücksichtigen. Ein vollständiger konzeptioneller Neuanfang, selbst wenn er wünschenswert wäre, läßt sich im betrieblichen Rahmen in der Regel nicht durchsetzen und ist zudem sehr riskant. Deshalb müssen die formulierten Anforderungen an eine Arbeitsumgebung als Entwicklungsziele oder Optionen verstanden werden.

3.1 Problemspezifische Verfahrensketten

In rechnergeführten Montagesystemen werden vielfältige Informationsverarbeitungsprozesse von unterschiedlichen Rechnersystemen, wie z.B. SPS, Robotersteuerungen und Zellenrechner, ausgeführt. Dies ist für die Montageplanung mit einem zunehmenden Programmieraufwand verbunden. Die Aufgaben reichen von der Installation und Anpassung fertiger Softwaremodule bis hin zur Neuprogrammierung individueller Teilfunktionen und deren informationstechnischen Integration. Bei dem Forschungs- und Entwicklungsziel *automatisierte Verfahrensketten für die Montageplanung* handelt es sich zudem darum, Planungsfunktionen durch geeignete Softwaresysteme zu unterstützen und einen durchgängigen Informationsfluß zu gewährleisten. Die dabei durch Softwaresysteme abzubildenden Funktionen sind wie in Kapitel 2. dargestellt durch individuelle, betriebsspezifische Vorgehensweisen und Randbedingungen geprägt. Daraus resultiert die Notwendigkeit, Softwaresysteme, die

eine Verfahrenskette für die Montageplanung bilden, problemspezifische anzupassen bzw. zu programmieren.

Zur Entwicklung weitgehend automatisierter Verfahrensketten ist es erforderlich, sich auf einen Teilbereich der Montage, z.B. Motorenmontage oder Elektronikbestückung, zu beschränken. Eine weitere Reduktion der Komplexität resultiert aus der Berücksichtigung betriebs- oder personenbezogener Vorgehensweisen und Randbedingungen. Durch diese Einschränkungen verliert die Verfahrenskette eine "allgemeine Kompetenz". Es entstehen *problemspezifische Verfahrensketten*, z.B. zur Leiterplattenbestückung oder Tastaturmontage. Derartige Verfahrensketten können aber in der Regel nur im betrieblichen und problemspezifischen Kontext eingesetzt werden und bleiben funktionstüchtig, solange sich Änderungen am Produkt, an der verfügbaren Montagetechnologie oder am grundsätzlichen Planungsverfahren nicht auf die festgelegten Verfahren auswirken.

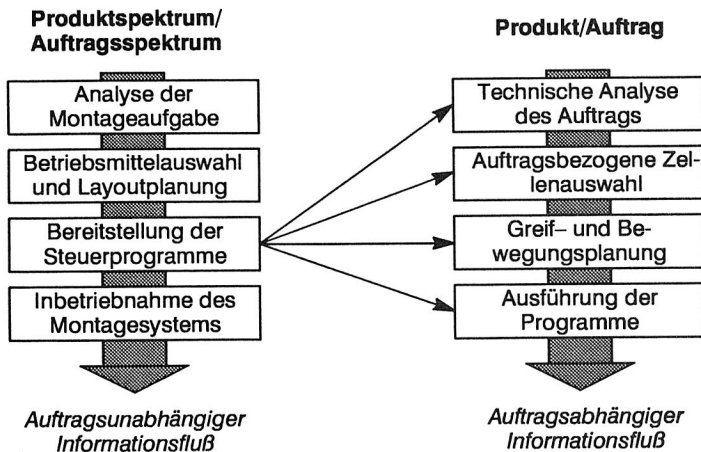


Abb. 10: *Auftragsabhängiger und auftragsunabhängiger Informationsfluß in der Montageplanung*

Die Informationsflüsse der Montageplanung, die automatisiert werden sollen, können grob in *auftragsunabhängige* und in *auftragsabhängige* Anteile untergliedert werden (Abb.10). Bei einer starren Automatisierung liegt der Schwerpunkt bei der *auftragsunabhängigen* Planung. Die *auftragsabhängigen* Planungsfunktionen können sich

z.B. auf eine einfache Zuordnung der vorgesehenen Produktvarianten zu "Schalterstellungen des Montagesystems" beschränken.

Bei zunehmender Flexibilität der in einem Montagesystem ausführbaren Handhabungs- und Montagevorgänge erhöht sich auch Komplexität und Aufwand der *auftragsabhängigen* Planungsfunktionen. Diese können, wie in Abb. 10 angedeutet, einen mehrstufigen Planungsprozeß erfordern. Dabei werden die Bewegungsvorgänge und Prozesse zur Montage auftragsbezogen festgelegt. Um einen automatisierten Informationsfluß der technischen Auftragsabwicklung sicherzustellen, müssen diese Planungsfunktionen automatisiert ablaufen. Damit ergibt sich bei hoher Produktflexibilität für die *auftragsunabhängige* Montageplanung als zusätzliche Problemstellung, Softwaresysteme bereitzustellen, die eben diese *auftragsabhängigen* Planungsaufgaben automatisieren (Abb. 10).

Für die Planung flexibel automatisierter Montagesysteme fehlen bisher geeignete Ansätze zur Unterstützung der *auftragsunabhängigen* Montageplanung, die insbesondere auch die Entwicklung und Implementierung einer Steuerungslogik zur automatisierten Abwicklung *auftragsabhängiger* Planungsaktivitäten berücksichtigen.

3.2 Anforderungen an Planungswerkzeuge

Kommerzielle Planungswerkzeuge, wie z.B. CAD-Systeme, automatisieren in der Regel nur relativ aufgabenunabhängige, vollständig algorithmisierbare Tätigkeiten. Zur Definition spezifischer, algorithmisierbarer Verfahren werden Programmierschnittstellen oder primitive Macro-Programmiersprachen angeboten. Beispielsweise können CAD-Befehle durch Macro-Programmiersprachen angepaßt und erweitert werden. Der Schwerpunkt liegt aber auf der Bereitstellung fest programmierter Funktionalität. Die verfügbaren Funktionen werden von "Systementwicklern" bzw. "Programmierern" und nicht von den Anwendern definiert. Die zur Weiterverarbeitung der Ergebnisse notwendigen Schnittstellen werden zum Teil bewußt nicht offengelegt, um Programme und "Know-How" zu schützen. "Freiprogrammierbar" ist der Computer nur für die Systementwickler.

Der Anwender wird zum Bediener eines "fest verdrahteten Automaten". "Fest verdrahtete Programme" haben sich insbesondere im betriebswirtschaftlichen Bereich

bewährt. Hier ändern sich vorwiegend die Daten und nicht die Verfahren, mit denen Daten verarbeitet werden. Die Datenverarbeitung ist sogar zum Teil normativ durch Gesetze und Vorschriften festgelegt (Mahnverfahren, Buchhaltung, Bilanzen). In der Montageplanung würde das normative Festschreiben der Verfahren den technischen Fortschritt be- oder sogar verhindern.

Frei programmierbare Rechner sind flexible und leistungsfähige informationsverarbeitende Hilfsmittel und sollten den Vorteil haben, einfach und schnell an neue Anforderungen bzw. Aufgaben anpaßbar zu sein. Das Verhalten rechnergestützter Planungswerkzeuge könnte weit mehr vom Anwender festgelegt werden, als dies bisher üblich ist. Neben einer entsprechenden Qualifikation und Ausbildung der Bediener müssen dazu auch die Programmier- und Planungswerkzeuge weiter entwickelt werden. Dies ist als konsequente Fortführung des zunehmenden Einsatzes rechnergestützter, dialogorientierter Planungswerkzeuge großer Funktionalität zu sehen, die den Planer als wichtige Entscheidungsinstanz und Erfahrungsträger mit in ihre Planungsabläufe einbeziehen. Die Bedienung und insbesondere die Anpassung dieser Softwaresysteme ist teilweise einer Programmentwicklung sehr ähnlich.

Die Weiterentwicklung der Rechnertechnik, Algorithmen und Programmiermethoden erschließt immer neue Problemfelder für einen Rechnereinsatz (Abb. 11). Lösungsverfahren sind zum Teil generalisier- und formalisierbar (physikalische Gesetze, Gleichungssysteme, Optimierungsverfahren, Geometrieverarbeitung) und haben ein breites Einsatzfeld. Diese Verfahren können auch mit hohem Entwicklungsaufwand wirtschaftlich programmiert werden. Der Aufwand verteilt sich auf alle Anwender. Die so entstehenden Planungswerkzeuge sind eher "Generalisten" als "Spezialisten". Ein Anwender muß sein Denken, sein planerisches und konstruktives Handeln an die verfügbare Funktionalität anpassen. In Planungsabteilungen ist zunehmend ein hochqualifizierter und lernfähiger Personenkreis betroffen. Gerade im Ingenieurbereich sind sowohl die Bereitschaft als auch die Voraussetzung vorhanden, Problemlösungsverfahren selbst zu strukturieren und Anpassungen durchzuführen. Damit könnte das Verhalten von Planungswerkzeugen individuell festgelegt werden.

Durch Einsatz und Weiterentwicklung von Programmierwerkzeugen, Programm-bibliotheken und wissensbasierten Programmiermethoden lassen sich auch individuelle, automatisierbare Verfahren zunehmend wirtschaftlich realisieren. Bei den heute verfügbaren, kommerziellen, im Bereich der Montageplanung einsetzbaren

Planungswerkzeugen, wie z.B. CAD-Systemen, fehlen geeignete Programmierhilfsmittel, die in einer Programmier- bzw. Arbeitsumgebung zusammengefaßt werden können.

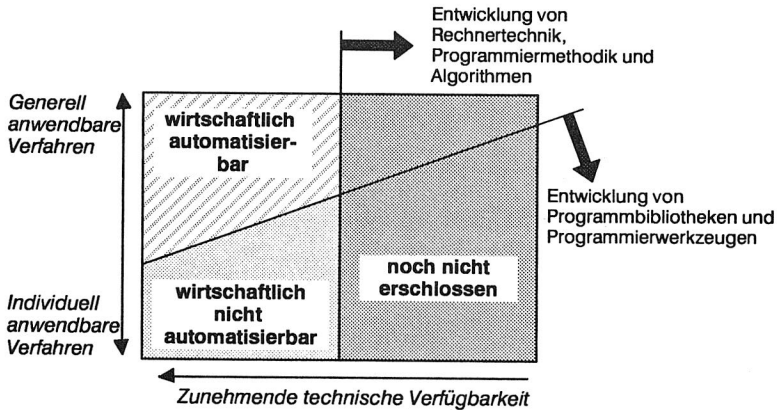


Abb. 11: Automatisierbarkeit von Verfahren der Montageplanung

Neben den in Abb. 11 aufgeführten, existieren u.a. auch Problemstellungen, deren Lösung vom aktuellen Stand der Technik, von betriebs- und personenbezogenen Erfahrungen abhängt sowie Kreativität und Intuition erfordert. Sie entziehen sich damit, zumindest beim heutigen Stand der Technik, generell einer Automatisierung.

Die Montageplanung ist in vielen Bereichen dem letztern Problemtyp zuzuordnen. Die Entwicklung rechnergestützter Hilfsmittel für die Montageplanung scheitert aber nicht immer an der Algorithmisierbarkeit, wie dies beispielsweise heute in weiten Bereichen der Bildverarbeitung und -interpretation der Fall ist. Unter Algorithmisierbarkeit soll in diesem Zusammenhang die Möglichkeit der Bereitstellung eines effektiven und effizienten rechnergestützten Verfahrens verstanden werden. Ohne den Einsatz entsprechender rechnergestützter Programmierwerkzeuge stehen die Entwicklungskosten für spezifische, individuelle Verfahren in keinem wirtschaftlichen Verhältnis zu deren Nutzen und können nicht schnell genug entwickelt sowie an die sich verändernden Randbedingungen angepaßt werden.

Batchorientierte Ansätze sind für eine umfassende Unterstützung der Montageplanung nicht geeignet. Der Planer muß eine "entscheidende Rolle" übernehmen. Deshalb

sollten Planungs- und Zwischenergebnisse sowie der Planungsablauf und -fortschritt transparent dargestellt werden. Ein Eingreifen des Planers ist bei komplexen Entscheidungsabläufen in allen Planungsphasen zu unterstützen.

3.2.1 Dialogorientierte Entwicklung von Planungsdokumenten

Der Planungsexperte mit seinen Erfahrungen und vielfältigen Fähigkeiten zur Erfassung, Strukturierung und Verarbeitung von Information, ist von zentraler Bedeutung. Er kann z.B. durch Hilfsmittel zur Verwaltung, Auswertung und Darstellung von Daten geeignet unterstützt werden. Information über Stand der Planung und Technik, frühere Planungsvorhaben sowie Leistungsdaten laufender Anlagen sind Voraussetzung für eine gute Planung.

Probleme, zu deren Lösung Kreativität, Intuition oder nicht effizient algorithmisierbare Informationsverarbeitungsprozesse notwendig sind, werden von den Planungsexperten selbst ausgeführt. Es müssen interaktive Planungswerkzeuge bereitgestellt werden, um z.B. Dokumente inkrementell rechnergestützt zu entwickeln, zu visualisieren, zu erfassen und zu verwalten. Programmierwerkzeuge, wissensbasierte Programmiermethoden und angepasste Benutzerschnittstellen können diese Aufgaben erleichtern.

Dokumente wie Vorranggraphen, Grob- und Feinlayouts spiegeln die Begriffswelt der Experten wider, dienen zur Kommunikation und sind Grundlage weiterer Planungsschritte. Die verwendeten Planungsdokumente können betriebs-, personen- und aufgabenspezifisch sein. Für deren rechnergestützte Erstellung, Verwaltung, Manipulation, Modellierung, Simulation und Visualisierung können speziell angepasste Planungswerkzeuge bereitgestellt werden. CAD-Systeme sind in diesem Sinn Planungswerkzeuge zur Entwicklung allgemeiner, geometrischer Produktmodelle.

3.2.2 Verwaltung von Versionen und Alternativen

Die Planung eines automatisierten Montagesystems erfolgt über einen Zeitraum, der mehrere Monate betragen kann. Randbedingungen, wie Produktstückzahlen, Lebensdauer und Varianten sind nicht vollständig planbar, sondern unterliegen u.a. marktseitigen Einflüssen. Die während des Planungszeitraums zu berücksichtigenden

Randbedingungen und Zielsetzungen sind also nicht festgeschrieben. Die Ursache einer Anpassung kann auch in der Montageplanung selbst liegen. So können Anforderungen einer automatisierungsgerechten Produktgestaltung formuliert und in der Konstruktion umgesetzt werden. Da Änderungen erst mit Verzögerung in alle Planungsmodelle eingearbeitet werden, ergibt sich die Notwendigkeit, verschiedene Versionen zu verwalten.

Andererseits ist die Ausarbeitung und vergleichende Bewertung von Planungsalternativen eine Methode zur Verbesserung der Planungsqualität. Bei der manuellen Planung komplexer, automatisierter Montagesysteme werden aus Aufwands- und Termingründen nur bedingt Alternativen berücksichtigt.

Durch die kritischen Zeitanforderungen gewinnt die gleichzeitige Produkt- und Produktionsmittelplanung an Bedeutung /6/. Rechnergestützte Planungsmodelle und Werkzeuge können dabei besonders wirkungsvoll eingesetzt werden /18/. Sie unterstützen schnelle und kostengünstige Änderungszyklen sowie die Überprüfung und Bewertung von Planungsmodellen, z.B. mit Hilfe von Simulations- oder Berechnungsmethoden.

3.2.3 Wissensverarbeitung

In diesem Abschnitt werden Anforderungen an die wissensverarbeitenden Anteile von Planungswerkzeugen formuliert. Die gleichzeitige Geometrie- und Technologieverarbeitung auf unterschiedlichen Abstraktionsebenen und die automatisierte Ableitung von Planungsdokumenten erfordert den Einsatz wissensbasierter Techniken. Dabei wird vorausgesetzt, daß wissensbasierte Werkzeuge für die Montageplanung zum Teil auch anweisungsorientiert programmiert werden. Es müssen Schnittstellen definiert, Aufgaben verteilt und die Kommunikation geregelt werden.

Der Lernprozeß (vergl. Abb. 4), der bei der Montageplanung durchlaufen wird, steuert den Aufbau von Wissen und ist ein wesentliches Kriterium für die Problemlösungsfähigkeit (vergl. /4/). Wissen muß deshalb vom Planungsexperten strukturiert gespeichert und bei Bedarf zur Verfügung gestellt werden. Die Speicherung, Verwaltung und Verarbeitung von Erfahrungswissen ist in diesem Zusammenhang eine spezielle Form der Programmierung. Die direkte Eingabe von Erfahrungswissen und die

Programmierung individueller Algorithmen eröffnen neue Möglichkeiten in der Montageplanung. Damit werden nicht nur betriebs- oder personenspezifische passive Daten, sondern auch begrenzt betriebs- oder personenspezifische Handlungsweisen gespeichert, verwaltet und verarbeitet.

Die Entwicklung wissensbasierter Systeme beruht auf der Annahme, daß Unterschiede zwischen den einzelnen Wissensbereichen hauptsächlich in den Wissensinhalten liegen (Abb. 12); die jeweiligen Wissensrepräsentationsformen und Problemlösungsstrategien weisen dagegen viele Ähnlichkeiten auf /34/.

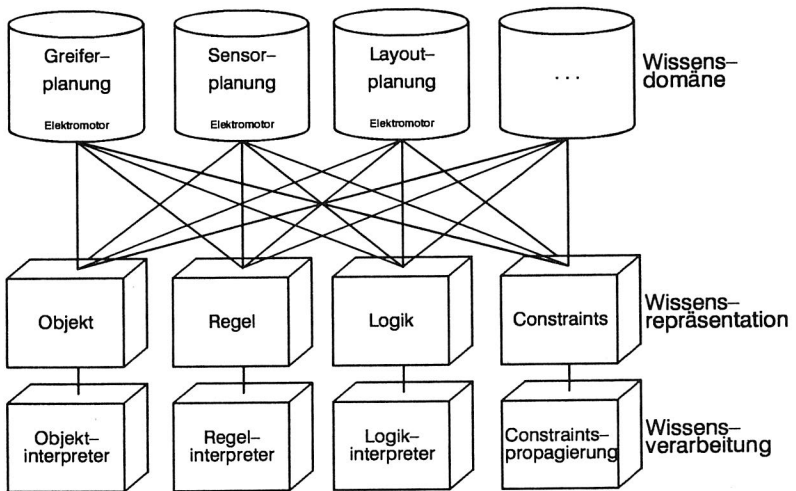


Abb. 12: Wissensverarbeitung in unterschiedlichen Domänen

Die Klassifikation von Problembereichen /34/ und deren Zuordnung zu geeigneten Wissensrepräsentationsformen sind für die methodische Entwicklung wissensbasierter Systeme entscheidend.

In /34/ wird zu diesem Zweck eine Einteilung von Problemstellungen in die Problemtypen *Diagnostik*, *Konfiguration* und *Simulation* vorgeschlagen (Abb. 13) :

- Bei einem *Diagnostikproblem* wird aus einer Menge vorgegebener Alternativen eine Lösung ausgewählt. Die Betriebsmittelauswahl ist beispielsweise ein Diagnostikproblem in der Montageplanung.
- Bei der *Konfiguration* werden Lösungen aus gegebenen Bausteinen zusammengesetzt. Die Konfiguration läßt sich weiter in *Zuordnungsprobleme* und *Transformationsprobleme* untergliedern. Bei einem *Zuordnungsproblem* stehen die Basiselemente fest und müssen richtig verknüpft werden. Beispiele dafür sind die Greifpunktermittlung bei gegebenem Greifersystem und Handhabungsobjekt oder die Zuordnung von Montageetätigkeiten zu Montagestationen. Die Roboterprogrammierung kann als *Transformationsproblem* eingeordnet werden. Es wird nach einer Reihenfolge von Bewegungsanweisungen gesucht, die aus dem Ausgangszustand den Zielzustand herbeiführen.
- Die *Simulation* kann beispielsweise zur Pufferoptimierung eingesetzt werden. Spezialisierte Simulationswerkzeuge haben sich als leistungsfähige Hilfsmittel für die Montage erwiesen /30/. Es fehlen aber bislang umfassende und erfolgversprechende Ansätze für eine notwendige Unterstützung bei Simulationsexperimenten. Die Modellbildung, der Modellauf, die Interpretation der Ergebnisse und die Systemoptimierung sollten durch wissensbasierte Planungswerkzeuge unterstützt werden.

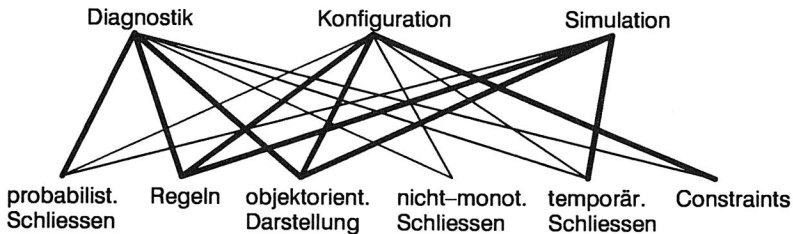


Abb. 13: Zuordnung von Problemtypen und Wissensrepräsentationsformen /34/

Im Rahmen der Montageplanung treten demnach alle in /34/ genannten Problemtypen auf (Abb. 14). Ein konkretes Problem kann mehreren Problemlösungstypen zugeordnet

werden. Ob z.B. die Greiferauswahl als *Zuordnungs-* oder *Diagnostikproblem* einzuordnen ist, hängt vom Vorgehen des Experten ab, der simuliert werden soll.

Für analytische Aufgaben, wie z.B. die Diagnose, gibt es weit entwickelte Vorstellungen über erfolgreiches Problemlösungsverhalten. Für synthetische Probleme, wie Planung und Konfiguration, die auch in der Montageplanung anzutreffen sind, fehlen bisher ausgereifte Modelle /43/. In /34, 44, 45, 46/ werden grundlegende Programmiermethoden und Problemlösungsstrategien dargestellt. Eine Einführung in die derzeitigen Planerstellungsmethoden der Künstlichen Intelligenz ist in /11, 44/ zu finden.

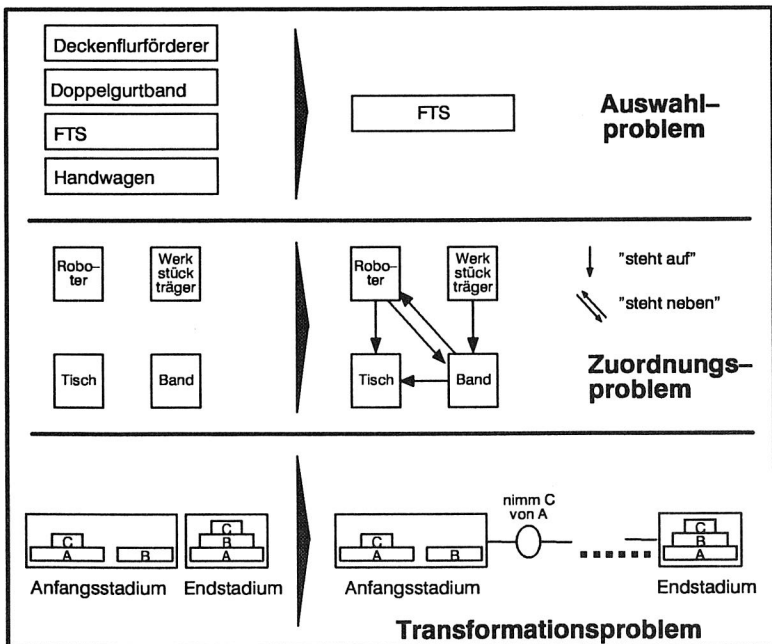


Abb. 14: Problemlösungstypen und Planungsaufgaben in der Montage

Bei der Planung komplexer, automatisierter Montagesysteme erarbeiten mehrere Experten Planungsdokumente für unterschiedliche Teilsysteme. Die geplanten Teilsysteme montieren wiederum gemeinsam ein Produkt. Dabei können auch

Konstruktion und Qualitätssicherung als integrale Bestandteile dieses Prozesses betrachtet werden.

Dieser Fall der Plan-Generierung wird in /11/ als *verteilter Planen verteilter Problemlösungen* bezeichnet. Mehrere Planungswerkzeuge arbeiten an Planungsunterlagen für unterschiedliche Akteure (Montagezellen, Roboter, Steuerungen). Dabei wird vorausgesetzt, daß es sich um automatisierte Werkzeuge handelt. Als geeigneter Kontroll- und Kommunikationsmechanismus wird in /11/ eine Blackboard-Architektur vorgeschlagen, wobei aber zu berücksichtigen ist, daß die Gebiet *verteilter Planen* und das *Planen verteilter Problemlösungen* noch weiterentwickelt werden müssen /11/.

Seit Newell /47/ wurde eine Vielzahl von Blackboard-Systemen entwickelt /48, 49, 50, 51/. Die diesen Systemen zugrundeliegende Architektur ist in Abb. 15 grob dargestellt. Das Blackboard-Modell ist ein hochstrukturierter Spezialfall eines opportunistischen Planungsmodells. Es beinhaltet aber zusätzlich eine Strategie zur Organisation des Domänenwissens und aller Zwischenstadien sowie partieller Ergebnisse, die zur Lösung des Problems generiert werden /11/.

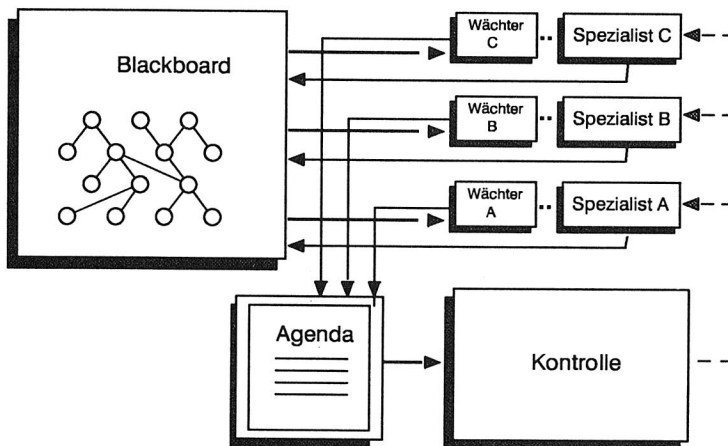


Abb. 15: Struktur einer Blackboard-Architektur

Eine Standard-Blackboard-Architektur besteht aus *Spezialisten*, einem *Kommunikationsspeicher* und einer *Kontrolle*. Die *Spezialisten* beinhalten das zur Lösung

eines Teilproblems benötigte Wissen. Sie kommunizieren über einen speziellen Speicher, der *Blackboard* genannt wird. Objekte sind im Speicher hierarchisch durch Relationen in Ebenen angeordnet. Jeder Ebene ist eine Menge von *Spezialisten* zugeordnet. Relationen zwischen den Objekten kennzeichnen semantische Abhängigkeiten. Die *Kontrolle* entscheidet, welcher *Spezialist* einen Problemlösungsschritt ausführen darf. Bei der Wahl wird nicht nur ein *Spezialist*, sondern auch Objekt und Ebene bestimmt /48/.

Die Selektion eines *Spezialisten* kann auf unterschiedliche Weise erfolgen. In einigen Systemen synchronisieren sich die *Spezialisten* untereinander, ohne daß es einer Kontrolleinheit bedarf /52, 53/. In anderen Architekturen wird die Aktivität der *Spezialisten* durch Ereignisse gesteuert /51/. Jede Änderung im *Kommunikationsspeicher* bringt ein bestimmtes Ereignis hervor, welches die Bedingungssteile, die *Wächter der Spezialisten* aktiviert. Ist ein *Wächter* aktiviert, so erfolgt der Eintrag einer Aktions-Akte in die *Agenda* (Aktionsliste). Aufgabe der *Kontrolle* ist es dann, aus dieser Liste die günstigste Aktions-Akte auszuwählen.

Die Architektur der Objektstrukturen eines Blackboard-Systems korrespondiert mit der horizontalen und vertikalen Zerlegung der Montageplanung in mehrere abhängige Teilprobleme auf unterschiedlichen Planungsebenen (vergl. Abb. 8). Eine Planungsebene wird von mehreren Wissensdomänen beherrscht. Die Blackboard-Architektur unterstützt dazu das zentrale Kontrollproblem:

“Welches Teilproblem wird zu welchem Zeitpunkt mit welchen Methoden bearbeitet?”.

Damit sind eine gemischt hierarchische Konstruktion, die Verwendung einer Inselstrategie und auch die Kombination von domänenunabhängigen Strategien möglich. Die Architektur ist sehr flexibel, so daß sich unterschiedliche Anwendungen realisieren lassen /11/.

Aufgrund der möglichen vielfältigen Randbedingungen und Wechselwirkungen sind generelle, vollständig automatisierte Planer für die *auftragsunabhängige Montageplanung* kaum denkbar. Die Entwicklung weitgehend automatisierter Verfahrensketten für bestimmte Klassen von Montagezellen und Problembereichen, insbesondere für *auftragsabhängige Planungsaufgaben*, ist aber möglich. Dabei ist zu

berücksichtigen, daß einige Planer auch interaktiv oder teilautomatisiert arbeiten können. Bei einer Kooperation interaktiver und automatisierter Planungsprozesse müssen die Aufgabenstrukturen der bedienenden Experten besonders beachtet werden.

3.2.4 Explizite Speicherung und Verwaltung von Relationen

Die Planung automatisierter Montagesysteme erfolgt in mehreren Phasen auf unterschiedlichen Abstraktionsebenen. Ergebnisse einer Planungsphase können intern, durch Objektbeschreibungen und Relationen, und extern, durch symbolische zwei- und dreidimensionale graphische und gemischt symbolisch-graphische Darstellungen, repräsentiert werden (vgl. Kapitel 2.1.2). Beispiele für Relationen zwischen Objekten der Montageplanung sind /10/:

- *“steht auf”*,
- *“führt Funktion aus”*,
- *“liegt im Arbeitsbereich”*,
- *“besteht aus”*.

Derartige Relationen werden bei der Aufgabenstellung definiert und breiten sich beispielsweise als Restriktionen für sinnvolle Konfigurationen bis hin zu geometrischen Randbedingungen aus. Aus Relationen können andere Relationen zum Teil abgeleitet werden, z.B.:

“Wirkeinrichtung” steht auf “Arbeitstisch” →
“Z-Koordinate der Wirkeinrichtung im 3D-Modell” ergibt sich aus
“Z-Koordinate des Arbeitstisches” + “Arbeitshöhe des Tisches”.

Die explizite Speicherung, Verwaltung und Verarbeitung derartiger Relationen ist insbesondere bei Änderungen von Vorteil. Sie enthalten Hinweise auf die Entstehung eines Planungsdokuments und Abhängigkeiten zu anderen Planungsebenen. Um Redundanz bei wiederholten Planungen oder Änderungen zu vermeiden, sollte möglichst viel Information über die Entstehung eines Planungsmodells explizit gespeichert werden. Deren explizite Kenntnis ist für eine weitgehende Rechnerunterstützung notwendig.

Planungsobjekte, Relationen zwischen Objekten und Planungswissen existieren teilweise nur in der Vorstellung der Experten. Damit entziehen sie sich einer

systematischen rechnergestützten Aufbereitung. Beispielhaft sei das Wissen über den Stand der Montagetechnik genannt, das von Experten nur unvollständig formuliert werden kann und ständigen Änderungen unterworfen ist.

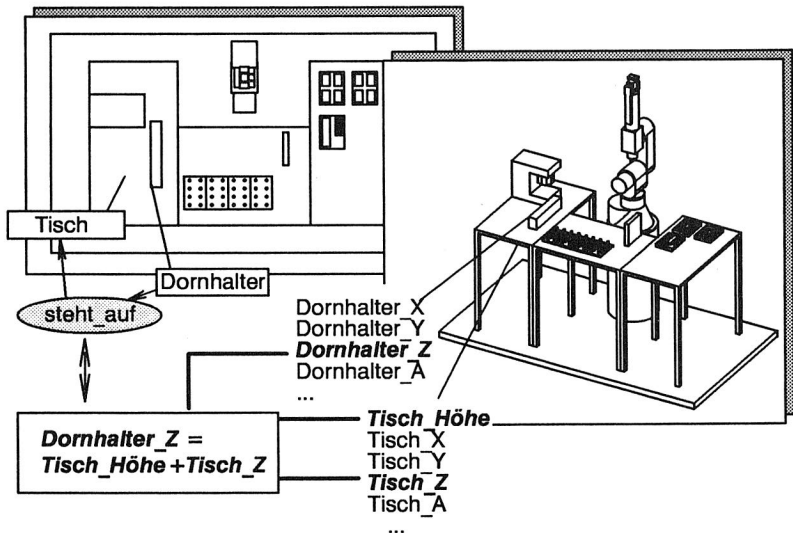


Abb. 16: Ableitung geometrischer Restriktionen

Es wäre vorteilhaft, alle Relationen zwischen Planungsobjekten explizit zu verwalten und daraus Konsequenzen automatisch abzuleiten. Aufgrund der sich ändernden Montagetechnik und der vielfältig möglichen Randbedingungen ist eine vollständige Erfassung aller relevanten Objekte und Relationen des gesamten Montagebereichs und der Vorstellungswelten der Planungsexperten nicht möglich. Für definierte Planungsebenen und -modellschemata können aber Relationen gefunden werden, deren Konsequenzen zum Teil automatisiert ableitbar sind (Abb. 16).

3.3 Entwicklungsphasen dialogorientierter, wissensbasierter Planungswerkzeuge

Zur Bereitstellung symbolischer, für die Wissensverarbeitung brauchbarer, Datenstrukturen aus graphischen oder räumlichen Darstellungen bzw. als Repräsentation realer Systeme und Zusammenhänge sind komplexe Informationsverarbeitungsprozesse notwendig. Diese lassen sich nicht durch einfache Algorithmen oder Verfahren unterstützen. Beispiele dafür sind die Formklassifikation, die Programmierung einer Montagezelle, die Entwicklung von Simulationsmodellen oder die Interpretation von Simulationsergebnissen. Die Leistungsdaten produzierender Montagesysteme müssen erfaßt und interpretiert werden. Erst anhand dieser Ergebnisse kann die Planungsqualität überprüft werden. Aus dieser Rückkopplung ergeben sich Änderungen bei laufenden oder zukünftigen Planungen. Die Probleme können heute nur durch die aktive Einflußnahme eines Planungsexperten bewältigt werden.

Zur Entwicklung *problemspezifischer Verfahrensketten* wird deshalb folgendes methodisches Vorgehen vorgeschlagen (Abb. 17):

- In einem ersten Schritt wird das Problemlösungsverhalten erfolgreicher Bereichsexperten untersucht.
- Anschließend werden die von den Experten verwendeten Dokumente analysiert, rekonstruiert und dadurch Abstraktionsebenen bzw. Planungsphasen definiert. Planungsdokumente einer Abstraktionsebene sind durch Objekte und Relationen zwischen Objekten dieser – aber auch anderer – Ebenen gekennzeichnet. Objekte und Relationen werden durch Attribute beschrieben. In einem Dokument werden Objekte und Relationen einer Abstraktionsebene zusammengefaßt und dargestellt. Diese Analyse kann und sollte zur Rekonstruktion der Dokumente und im weiteren zu einer Rekonstruktion des Problemlösungsverhaltens führen (vergl. /9/). Der rekonstruierte Aufbau der Planungsdokumente einer Abstraktionsebene wird als konzeptionelles Planungsmodellschemata bezeichnet. Dabei wird u.a. festgelegt, welche graphischen oder symbolischen Repräsentationen den Objekten, Relationen, Attributen und Attributwerten zugeordnet werden.
- Für jede definierte Abstraktionsebene wird ein Werkzeug zur interaktiven Generierung der rekonstruierten Dokumente spezifiziert und realisiert. Jedes Planungswerkzeug verfügt über einen Modelleditor mit primitiven Erzeugungs- und Verwaltungsfunktionen. Typische Funktionen sind: *Erzeugen, Löschen, Speichern,*

Laden und *Manipulieren* von Objekten, Relationen, Attributen und Attributwerten sowie deren externer graphischer oder interner symbolischer Repräsentation. Durch dieses Werkzeug werden interne symbolische und externe graphische oder symbolische Repräsentationen festgelegt. Der Planer sollte durch die *Arbeitsumgebung* auf diese Datenstrukturen Zugriff haben. Die dabei entstehenden Planungswerkzeuge unterscheiden sich von graphisch-interaktiven Systemen – wie CAD-Systemen – durch die individuellen Gestaltungsmöglichkeiten der erzeugbaren Objekte und den frei programmierbaren Zugriff auf die verwalteten Strukturen.

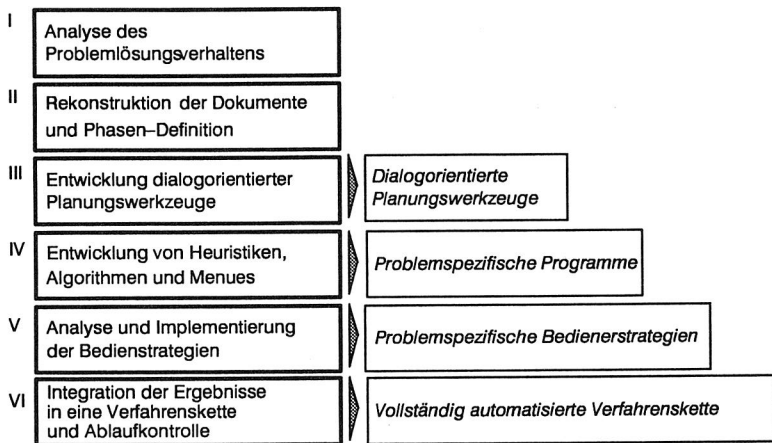


Abb. 17: Entwicklungsphasen dialogorientierter wissensbasierter Planungswerkzeuge

- In einem weiteren Schritt werden Befehle und Menue-Funktionen an die konkrete Vorgehensweise des Planers angepaßt. Dazu werden Algorithmen und Informationsverarbeitungsprozesse mit den Möglichkeiten der Arbeitsumgebung realisiert und modifiziert. Dies kann auch zu einer Erweiterung und Anpassung des ursprünglichen Planungsmodellschemas führen.
- Danach wird die Planungsstrategie des Anwenders selbst automatisiert. Hierbei lassen sich systematische Bewertungsverfahren sowie Mechanismen zur Verwaltung und Verarbeitung von Erfahrungswissen einsetzen. Denkbar ist auch die Verwendung von Neuronalen Netzen zum Erlernen von Befehlssequenzen.

- Schließlich erfolgt die Integration bzw. die inhaltliche Verknüpfung verschiedener Planungsmodelle unterschiedlicher Abstraktionsebenen.

Man muß aber davon ausgehen, daß eine vollständige Automatisierung aller Vorgänge nicht erreichbar ist. Deshalb können sowohl Handlungen innerhalb einer Planungsphase als auch Abhängigkeiten zwischen Phasen ein interaktives Eingreifen des Planungsexperten erfordern.

Um bei dieser Vorgehensweise Rationalisierungseffekte und Hilfestellung bei der Planung von Montageanlagen zu erreichen, müssen nicht für alle Planungsaufgaben alle Entwicklungsphasen vollständig durchlaufen werden. Ein Planungswerkzeug kann bestimmte Aufgaben ausschließlich interaktiv, andere algorithmisch oder wissensbasiert unterstützen. Neben der Verwaltung und Speicherung der Planungsergebnisse sollten auch die Verarbeitungsschritte, die zu den Ergebnissen führen, strukturiert verwaltet und gespeichert werden. Bei interaktivem Vorgehen sind beispielsweise die angestoßenen Operationssequenzen und bei automatisierten Verarbeitungsschritten die beteiligten Ausgangsdaten, Algorithmen und Wissensbasen zu protokollieren.

4. Programmierumgebung als Grundlage eines rechner-integrierten Arbeitsplatzes für die Montageplanung

Insbesondere bei der Planung flexibler, rechnergeführter Montagesysteme werden zunehmend Programme entwickelt und implementiert, um eine Automatisierung der *auftragsabhängigen* Planungsaufgaben zu gewährleisten (vergl. Kap. 3.1). Planungswerkzeuge zur Unterstützung der *auftragsunabhängigen* Montageplanung und Verfahrensketten müssen zudem an betriebs- und personenspezifische Vorgehensweisen angepaßt werden.

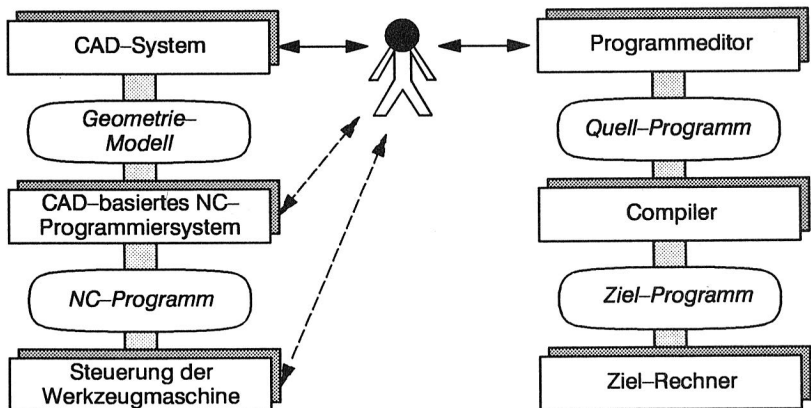


Abb. 18: Gegenüberstellung Verfahrenskette und Programmierumgebung

Die Interaktion mit einer Verfahrenskette für automatisierte Montage- und Fertigungssysteme ist mit einer Programmentwicklung vergleichbar (Abb. 18). Beispielsweise leiten Verfahrensketten zur Teilefertigung Steuerprogramme für Fertigungsmaschinen aus CAD-Geometriemodellen ab. Die Teilekonstruktion kann damit als problemorientierte, maschinenunabhängige Programmierung aufgefaßt werden. Ein NC-Programmiersystem ist mit einem Compiler vergleichbar, der Geometriemodelle (Programme einer höheren Programmiersprache) in konkrete Steuerungsanweisungen übersetzt. Die Bedienerinteraktion mit einem CAD-System und Verfahrenskette kann damit als Programmier Tätigkeit aufgefaßt werden. Eine Verfahrenskette stellt aus dieser Perspektive eine Art Programmierumgebung dar.

Damit können Anforderungen und Leistungsmerkmale moderner Programmierumgebungen sinnvoll auf Verfahrensketten übertragen werden. Eine wirtschaftliche Anpassung und Entwicklung betriebs- oder sogar personenspezifischer Verfahrensketten ist in der Regel nur mit Hilfe moderner, leistungsfähiger, rechnergestützter Software-Entwicklungswerkzeuge möglich. Dies ist eine über die eigentliche Planungsfunktionalität der Verfahrenskette hinausgehende Anforderung. Es ist also neben der Funktionsweise eines Planungswerkzeugs auch zu berücksichtigen, wie diese Funktion programmiert und realisiert wurde. Zusätzlich sollte die Erfassung, Verwaltung und Verarbeitung von Erfahrungswissen unterstützt werden. Damit werden die verfügbaren Hilfsmittel zur Entwicklung, Erweiterung und Anpassung der Planungswerkzeuge bzw. Verfahrensketten zu zusätzlichen, entscheidenden Einsatzkriterien.

In der Montageplanung kommen unterschiedliche Werkzeuge, z.B. auf Basis von CAD-, Simulations-, Datenbank- und Dokumentationssystemen zum Einsatz /1/. Der Einarbeitungsaufwand für diese Werkzeuge läßt sich in den Aufwand zum Einarbeiten in die eigentliche Systemfunktionalität und in den Aufwand zum Erlernen der grundlegenden Dialog- und Anpassungstechniken untergliedern. Um die Bedienung und Anpassung mehrerer, gegebenenfalls wissensbasierter Planungswerkzeuge zu vereinfachen, sind einheitliche Dialog-, Programmier-, Schnittstellen- und Wissensverarbeitungstechniken eine wesentliche Voraussetzung. Dies gilt insbesondere dann, wenn die Bedienung und Anpassung mehrerer, *dialogorientierter* Werkzeuge von einem Planungsexperten beherrscht werden soll.

Schnittstellen zu eingeführten Planungswerkzeugen sind erforderlich, um einen transparenten Zugriff und die Integration in eine bestehende Infrastruktur sicherzustellen. Datenbankgestützte Betriebsmittel-, Anlagen-, Produkt- und Planungsmodelle sind zwar grundsätzlich anzustreben, ob und in welchem Umfang Informationen datenbankbasiert verwaltet werden, ist jedoch von betrieblichen Rahmenbedingungen abhängig. Falls entsprechende Datenmodelle vorliegen, sind Schnittstellen zu definieren.

4.1 Wissensbasierte Programmierumgebungen

Bei der Anpassung und Erweiterung von Planungswerkzeugen handelt es sich nicht um eine "Neukonzeption" oder vollständige "Neuprogrammierung". Vorhandene funktionsfähige Module müssen genutzt, erweitert, verändert und neue Module integriert werden. Dabei ist der Planungsexperte durch entsprechende Programmierwerkzeuge und Programmstrukturen zu unterstützen.

Insbesondere auf **LISP**-Basis existieren leistungsfähige Programmierumgebungen (Programmiersysteme, Software-Entwicklungsumgebungen), die den Anwender auf dem Weg von der Programmidee bis hin zur konkreten Implementierung und effizienten Programmausführung unterstützen /54/. Sie vereinfachen den Programmentwurf und ermöglichen ein exploratives, inkrementelles Programmieren /55/. Als Programmierumgebung wird in /54/ eine modulare und schnittstellenkompatible Menge von Programmierwerkzeugen verstanden, also Programme, die auf anderen Programmen als Objekte arbeiten. Darin sind grundlegende – und deshalb anwendungsneutrale – Werkzeuge, wie z.B. Programmverwaltung, Windowtechnik, Editoren, Graphik, Wissensrepräsentationsformen und Debugger, zusammengefaßt. Zum Einsatz einer Programmierumgebung als *Arbeitsumgebung für die Montageplanung* sind u.a. angepaßte Schnittstellen, Wissensrepräsentationsformen, Datenmodelle, Berechnungsverfahren und Dialogtechniken erforderlich.

Auf Basis der Software-Entwicklungsumgebung **KEE** (Knowledge Engineering Environment) werden im Rahmen dieser Arbeit exemplarisch Planungswerkzeuge realisiert. **KEE** zeichnet sich im Vergleich zu anderen Systemen ähnlicher Leistungsfähigkeit besonders durch die 2D-Graphik und den objektorientierten Systemaufbau aus (Abb. 19). Im folgenden werden die Auswahlkriterien dargestellt.

LISP, das zur Methodendefinition verwendet wird, ist eine der wenigen Programmiersprachen, in denen eine Programmierung unter Verfolgung von Leitideen verschiedener Programmierstile möglich ist /54/. Über das *Foreign-Language-Interface* werden Operationen des Betriebssystems und "fremde Programme" eingebunden. Erfahrungswissen und Assoziationen können in **KEE** u.a. durch Regeln repräsentiert werden. Das "*Truth Maintenance System*" überwacht vom Anwender definierte Konsistenzbedingungen.

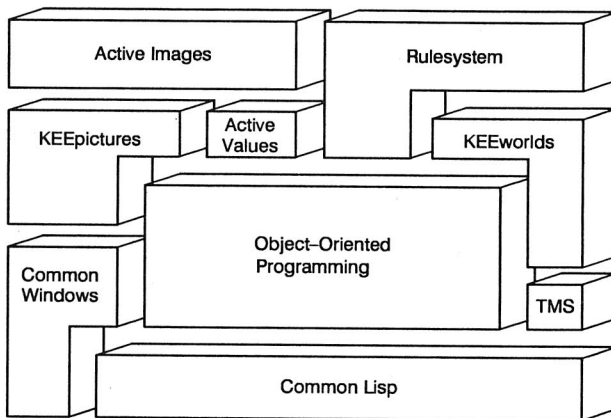


Abb. 19: Bestandteile des KEE-Systems /57/

Für diese Arbeit steht die Version **KEE 3.0** auf einer **Apollo-Workstation** mit 16 MB Hauptspeicher unter dem Betriebssystem **AEGIS** zur Verfügung. Dabei sind Leistungsgrenzen bei großen Wissensbasen und graphischen Anwendungen festzustellen. Die Fehlersuche in regelbasierten Programmen bereitet – trotz der Hilfsmittel – Schwierigkeiten.

Keine der anhand der Auswahlkriterien aus Abb. 20 untersuchten kommerziellen Expertensystem-Entwicklungsumgebungen verfügt über ausreichende CAD- und Simulationstechniken für die Montageplanung. Es werden auch keine Schnittstellen zu CAD- und Simulationssystemen bereitgestellt.

Für die Auswahl von KEE waren Offenheit, Zugänglichkeit und insbesondere die graphischen Möglichkeiten entscheidend. Andere hybride Entwicklungsumgebungen weisen zum Teil ähnliche Merkmale auf, so daß letztendlich die Verfügbarkeit auf der vorhandenen Hardware ausschlaggebend war. Eine detaillierte Beschreibung des Sprachumfangs ist in den Benutzerhandbüchern /57/ zu finden. Die grundsätzlichen Möglichkeiten unterschiedlicher Programmiermethoden (Programmierstile, Wissensrepräsentationsformen) werden z.B. in /45, 46/ diskutiert. /34, 44/ stellen Programmier- und Problemlösungsmethoden dar und vermitteln den Bezug zur Expertensystem-Technik.

Benutzeroberflächen	Wissensrepräsentationsformen	Debugging-möglichkeiten
2-D Graphik	Simulationstechniken	Erweiterungsmöglichkeiten
3-D Graphik	Programmierungswerkzeuge	Schnittstellen

Arbeitsumgebung für die Montageplanung
--

Abb. 20: Auswahlkriterien für eine Programmierumgebung in der Montageplanung (vgl. [56])

4.2 Heterogene Systemstruktur und Kommunikation

Da KEE keine ausreichenden CAD- und Simulationstechniken und in der verwendeten Version 3.0 keine Datenbankschnittstelle unterstützt, werden Spezialsysteme eingesetzt und Schnittstellen implementiert. So lassen sich die Vorteile ausgereifter Programme mit den Möglichkeiten einer wissensbasierten Programmierumgebung kombinieren. Langfristig ist allerdings die Integration der Funktionalität von CAD-, Simulations- und Datenbanksystemen in einer Programmierumgebung anzustreben. Darüber hinaus werden die Möglichkeiten zum Wissenserwerb, zur externen und internen Repräsentation von Objekten und Wissen der Montageplanung erweitert .

Das graphische Simulations- und Offline-Programmiersystem CARo [28, 29] wird zur Entwicklung und Kontrolle von Steuerungsprogrammen sowie für Kollisionsuntersuchungen eingesetzt. Es verarbeitet über ein Schnittstellenprogramm Romulus-Datenstrukturen und beinhaltet ein Modell der Robotersteuerung RCM-3. CARo wurde ausgewählt, da das Quell-Programm vorhanden ist und damit Änderungen möglich sind.

Das verwendete CAD-Systeme Sigraph-3D basiert auf einem Romulus-Modellierer, was für den Einsatz von CARo erforderlich ist, und kann über eine Programmier-

schnittstelle angesteuert werden. **Sigraph-3D** eignet sich zur Modellierung, Manipulation, Visualisierung und Verwaltung komplexer dreidimensionaler geometrischer Objekte, wie z.B. Greifer, Handhabungsobjekte, Greif-Situationen und Zellenlayouts.

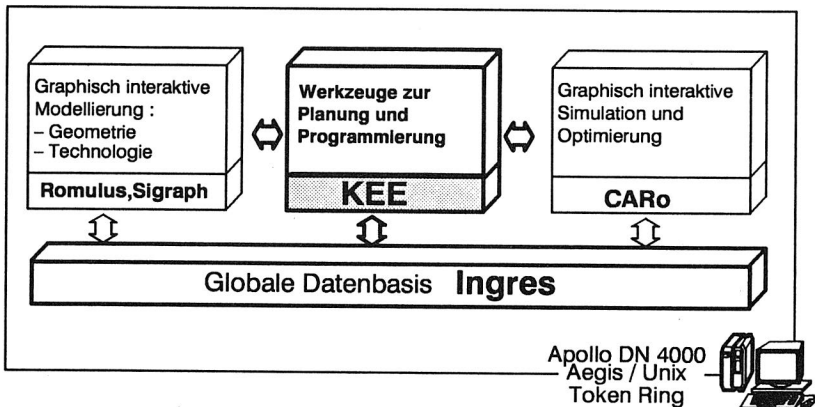


Abb. 21: Heterogene Systemstruktur zur Entwicklung von Planungswerkzeugen für die Montage [10]

Das relationale Datenbanksystem **INGRES** wird eingesetzt, um symbolische und numerische Informationen der Anlagen- und Produktmodelle zentral zu verwalten [40]. Dazu existiert auch eine spezielle Datenbasis für die Montageplanung [40, 58]. **INGRES** unterstützt die langfristige, zentrale Verwaltung und den gezielten Zugriff auf relativ schwach strukturierte Daten. Hochstrukturierte Geometriemodelle und Wissensbasen werden nicht direkt mit **INGRES** verwaltet. Eine datenbankgestützte Bereitstellung relevanter symbolischer Informationen fördert die Planungsqualität, ohne Kreativität und Handlungsspielraum des Planers zu beeinträchtigen. Dazu müssen aber u.a. folgende Randbedingungen erfüllt werden:

- Information muß verfügbar, einfach und flexibel erfragbar sein.
- Information muß aktuell, möglichst vollständig und widerspruchsfrei sein.
- Information muß problemgerecht strukturiert, präsentiert und aktualisiert werden.
- Information muß einfach weiterverarbeitet werden können.

INGRES und **Sigraph-3D** werden in der betrieblichen Praxis eingesetzt. Durch die angestrebte Kopplung bzw. Integration mit einer wissensbasierten Programmierumgebung können grundlegende Möglichkeiten, aber auch Defizite und Probleme aufgezeigt werden. Das gleiche gilt für **CARo**, das in seiner Funktionalität und Architektur mit kommerziellen Systemen vergleichbar ist.

Damit ergibt sich eine heterogene Systemkonfiguration, wie sie in Abb. 21 dargestellt ist, die aber keine vollständige *wissensbasierte Arbeitsumgebung für die Montageplanung* bildet.

4.3 Schnittstelle zum Datenbanksystem INGRES

Eine Datenbank stellt eine gemeinsame, speicherunabhängige Datenbasis für mehrere unterschiedliche Anwender und Verfahren zur Verfügung. Anforderungen an eine Datenbank für die Montageplanung, Möglichkeiten und Bedeutung für eine Systemintegration werden in /40/ beschrieben.

Datenbankschnittstellen lassen sich nach ihrer Anwendergruppe in *interne System-* und *Anwenderschnittstellen* einteilen. Die *internen Systemschnittstellen* zur Entwicklung des Datenbankmanagementsystems sind z.B. in /59, 60/ dargestellt und werden hier nicht weiter diskutiert. *Anwenderschnittstellen* können in *Dialog-* und *Programmierschnittstellen* untergliedert werden. Als *Dialogschnittstelle* steht systemseitig bei **INGRES** u.a. ein **SQL**-Interpreter zur Verfügung als *Programmierschnittstelle* **ESQL**.

Der **SQL**-Interpreter ist flexibel zu bedienen. Die aktuelle Datenbasis kann vom Anwender mit dem verfügbaren Sprachumfang interaktiv untersucht, ausgewertet und manipuliert werden. Dieses Konzept eignet sich deshalb besonders für "ad-hoc"-Anfragen unbekannter Struktur. Die Dialogergebnisse können aber nicht problemlos rechnergestützt weiterverarbeitet werden. Außerdem fehlen Programmierwerkzeuge zur Entwicklung und Verwaltung komplexer **SQL**-Programme.

Mit der Programmierschnittstelle **ESQL** werden Anwenderprogramme realisiert. Dazu wird eine Programmiersprache um die Konstrukte der Datenbank-Anfragesprache erweitert. Anfrageergebnisse können dann mit den Möglichkeiten der Wirtssprache weiterverarbeitet werden. Ein Nachteil von **ESQL** bei **INGRES** ist die beschränkte Flexibilität. Nicht explizit vorgesehene Anfragemuster können bei der späteren

Programmausführung nicht angestoßen werden. Wird z.B. eine neue Datenbank-Tabelle eingetragen, kann ein Anwenderprogramm ohne Anpassung nicht auf die neue Tabelle zugreifen. Ursache ist die Übersetzung der Anwenderprogramme vor der eigentlichen Abarbeitung. Neben dem Wegfall einzelner Übersetzungsschritte zur Laufzeit kann so eine Zugriffsoptimierung und Abstimmung mit anderen Transaktionen erfolgen. Übliche Wirtsprachen, wie PASCAL und C, werden kompiliert und unterstützen keine interaktive, inkrementelle Programmentwicklung. Deshalb können sie eine weitergehende Anfrageflexibilität nicht nutzen.

4.3.1 Datenbankbasierte Expertensysteme

Bei der Kopplung von Datenbanken mit wissensbasierten Systemen werden *Top-Down-* und *Bottom-Up-Verfahren* unterschieden /61/:

- Beim *Top-Down-Ansatz* geht man von einem wissensbasierten Verarbeitungsmodell aus und überprüft, wie die Datenbank eingebettet werden kann (vgl. **TWACE** /62/). Diese Möglichkeit beinhaltet das *Master-Slave-Verhältnis* zwischen der Programmierungsumgebung (*Master*) und dem Datenbanksystem (*Slave*).
- Beim *Bottom-Up* geht man von einem konventionellen Datenbanksystem aus. Dieses wird als eine in seiner Funktionalität und Inferenzmöglichkeit beschränkte Expertensystem-Shell aufgefaßt, welche dann durch mehrstufige Erweiterung die geforderten Eigenschaften erfüllt /61/.

4.3.2 Entwurf der Schnittstelle KEE-INGRES

Die Datenbank-Schnittstelle zu **KEE** sollte die Flexibilität des systemeigenen interaktiven **SQL**-Interpreters aufweisen und die rechnergestützte Weiterverarbeitung der Anfrageergebnisse ermöglichen. Die Entwurfsentscheidungen und Freiheitsgrade werden an dieser Stelle nur kurz behandelt, um generelle Probleme aufzuzeigen. Es wurde ein *Top-Down-Ansatz* gewählt (vergl. /61, 62/). Wie bei der Expertensystem-Shell **TWACE** ist in das Datenbanksystem **INGRES** kein Eingriff vorgesehen. **KEE** ist *Master* und kann jederzeit an den *Slave* **INGRES** Anfragen senden. Eine Datenbankanfrage wird ohne besondere syntaktische Kennzeichnung ausgeführt. Anfrageergebnisse werden in Listen (alternativ in *Units, Slots, Values*)

zurückgeschrieben. Als Anfragesprache wurde aufgrund der höheren Flexibilität **SQL** und nicht **ESQL** gewählt. Das Ergebnis einer Query wird mit Hilfe der **SQL**-Protokollfunktion in Dateien geschrieben, die in **KEE** synchron (optional asynchron) analysiert und ausgewertet werden. Damit sind leistungsfähige, flexible, dialogorientierte Benutzerschnittstellen für die Datenbank mit Hilfe der Werkzeuge in **KEE** realisierbar.

Zur Konzeption werden die logischen Schichten zwei, drei, und vier mit entsprechenden Schnittstellen eingeführt (Abb. 22). Die vierte Schicht stellt als Programmierschnittstelle **SQL**-Funktionen bereit, die vom **LISP**-Interpreter in einen für den **SQL**-Interpreter lesbaren String übersetzt werden. Der **SQL**-Interpreter führt die entsprechenden Befehle aus und schreibt Anfrageergebnisse in eine Protokolldatei.

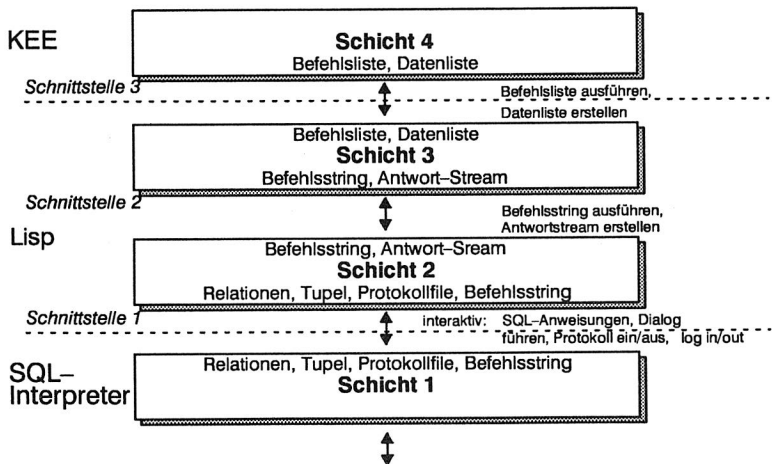


Abb. 22: Schichtenmodell der realisierten Schnittstelle **KEE-INGRES**

Die Datei wird in der zweiten Schicht in einen "Antwort-Stream" transformiert, durch den in der dritten Schicht eine Liste erzeugt wird. In der vierten Schicht können entsprechende *Units*, *Slots* und *Values* generiert werden. Eine mögliche syntaktische Umsetzung der Datenbank-Tupel in eine **KEE**-Wissensrepräsentationsform ist in Abb. 23 dargestellt. Unterstützt wird u.a. die Wahl des Primärschlüssels als *Unit-Name*. Eine Systemintegration beinhaltet vielfältige Entwurfs- und Effizienzprobleme (siehe

/63/). Die Zuordnung von Attributen, Tupeln und Tabellen zu KEE-Datenstrukturen ist nicht fest vorgegeben. Tupel einer relationalen Datenbank haben zu ihrer Identifikation Primärschlüssel, *Units* als mögliche äquivalente Systemnamen. *Units* werden in multiplen oder hierarchischen Vererbungsrelationen strukturiert. Tupel sind flach in Relationen organisiert.

KEE Wissensrepräsentationen	INGRES Relationen
UNIT	RELATION
UNIT (member)	TUPEL
SLOT	ATTRIBUT
SLOT-VALUE	ATTRIBUTWERT

Abb. 23: Mögliche Zuordnung der Datenstrukturen INGRES-KEE

Neben Problemen des Mehrbenutzerbetriebs, die teilweise durch Sperren geregelt werden, sind auch Datenverteilungs- und Integritätsprobleme zu berücksichtigen. "Asynchrone Querys" bieten insbesondere in Verbindung mit Regeln interessante, aber problematische Möglichkeiten der Parallelverarbeitung.

4.4 Schnittstelle zum CAD-System

Die Programmierschnittstelle des CAD-Systems **Sigraph-3D**, die "**Kernel-Interface-Funktionen**", bieten ausschließlich Zugriff auf die Funktionen des Modellierers (Abb. 24). Die internen Systemschnittstellen für graphische Ausgabe und Dialogführung sind nicht offengelegt. Eine Macro-Programmiersprache erlaubt dem Benutzer die Kombination und Parameterisierung der CAD-Befehle und stellt primitive Konstrukte zur Ablaufsteuerung sowie zur Definition eigener Menues bereit. Frei definierbare Datenstrukturen oder -typen und nennenswerte Programmierwerkzeuge sind nicht vorgesehen.

Diese Unzulänglichkeiten erschweren eine Integration der CAD-Funktionen. Eine Alternative zu der Kopplung des kommerziellen CAD-Systems **Sigraph-3D** ist die Entwicklung und Integration eines eigenen Systems auf Basis der **Kernel-Interface-Funktionen**. Dieser Weg wurde aus Aufwandsgründen nicht gewählt, wäre konzeptionell aber die beste Lösung. Allerdings bestehen auch mit einer relativ losen Kopplung zwischen **Sigraph-3D** und **KEE** Entwicklungspotentiale. Deshalb wurde eine zweistufige Systemkopplung ausgeführt. Mit dieser Lösung kann eine relativ weitgehende Integration mit vertretbarem Aufwand erreicht werden. Bestehen bleibt aber die Forderung, eine vollständige Integration von CAD-Funktionen und Programmierungsumgebungen vorzusehen.

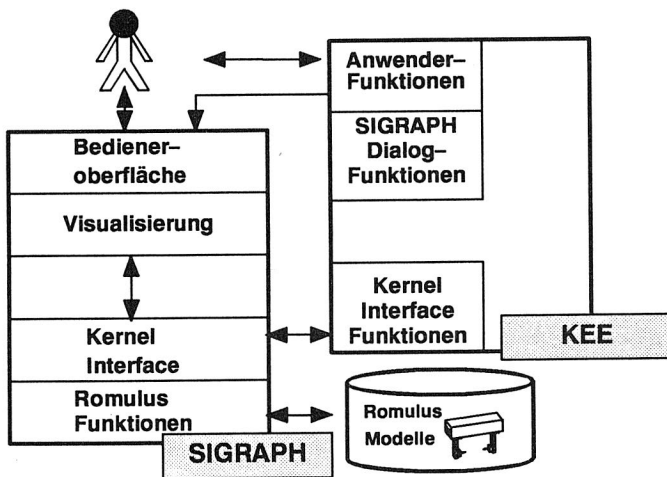


Abb. 24: Aufbau des Graphiksystems Sigraph-3D und KEE-Kopplung

Basierend auf den **Kernel-Interface-Funktionen** ist ein Anwenderprogramm vorgesehen, das als eigenständiger Prozeß abläuft, den Modellierer startet, Nachrichten anderer Prozesse empfängt und interpretiert sowie Nachrichten an andere Prozesse sendet. In empfangenen Nachrichten enthaltene Modellierer-Befehle werden von diesem Programm ausgewertet und ausgeführt (Abb. 24). Mit dieser Schnittstelle

4.5 Schnittstelle zum graphischen Simulationssystem CARo

Das graphischen Simulationssystem **CARo** /28/ unterstützt die Visualisierung und Optimierung von Layoutvarianten und Bewegungsprogrammen sowie die Durchführung von Kollisions-, Erreichbarkeits- und Taktzeituntersuchungen. Zur Definition der kinematischen Modelle existiert ein eigenes Modul. Durch die Schnittstelle zwischen **Sigraph-3D** und **KEE** besteht direkter Zugriff auf die grundlegenden Geometriemodelle von **CARo**. Auf eine direkte Integration der Simulatorfunktionen wurde verzichtet, da dazu erhebliche Eingriffe erforderlich sind. Es sind lediglich File-Schnittstellen zur Übertragen von Bewegungsprogrammen und Ablaufprotokollen vorgesehen (Abb. 26).

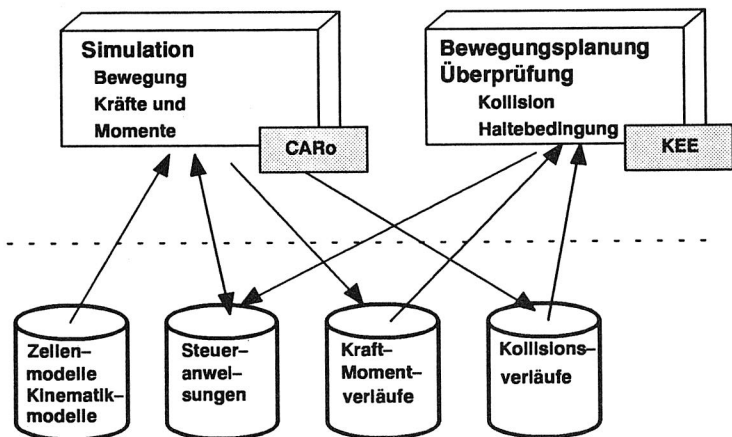


Abb. 26: Schnittstelle zum Simulationssystem: **CARo** – **KEE**

4.6 Hilfsmittel zum Wissenserwerb

Selbstlernende oder -adaptierende Werkzeuge für die Montageplanung mit automatischem Wissenserwerb sind zwar grundsätzlich anzustreben, aufgrund der multiplen Randbedingungen, einer fehlenden Rückkopplung und den beschränkten Möglichkeiten der Wissensverarbeitung ist deren Entwicklung heute aber nicht möglich.

Die Anpassung eines Planungswerkzeugs an individuelle Bedürfnisse und Vorgehensweisen durch den Planer muß also mehr oder weniger explizit programmiert werden. Deshalb ist es ein Anliegen, den direkten Wissenserwerb mit Methoden und Hilfsmitteln zu unterstützen.

4.6.1 Einteilung von Wissenserwerbswerkzeugen

Der Wissenserwerb umfaßt Identifikation und Formalisierung des Wissens, das für die Problemlösung benötigt wird. Zur systematischen Durchführung des Wissenserwerbs gibt es unterschiedliche methodische Ansätze und Phasenmodelle /34, 64, 65/, auf die hier nur kurz eingegangen werden soll.

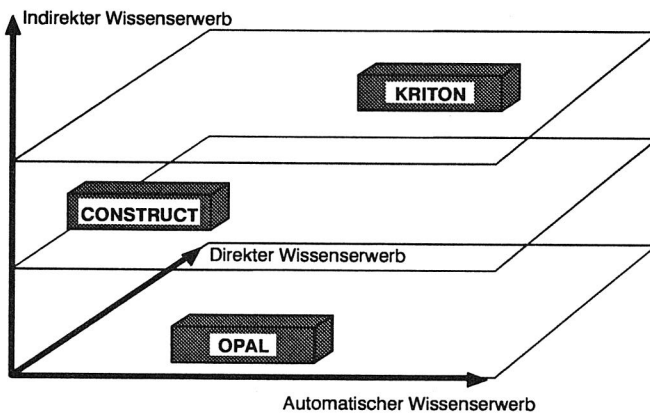


Abb. 27: Einteilung von Werkzeugen zum Wissenserwerb

In /34/ wird in die drei Grundarten: *Indirekter*, *direkter* und *automatischer Wissenserwerb* unterschieden (Abb. 27). Beim *indirekten Wissenserwerb* befragt ein Wissensingenieur den Experten und formalisiert die Ergebnisse. Hierbei stehen als Hilfsmittel Interviewtechniken im Vordergrund. Der *direkte Wissenserwerb* erfordert komfortable Erwerbssysteme, um den Experten bei der selbständigen Formalisierung seines Wissens zu unterstützen. Der *automatische Wissenserwerb* ist durch ein Expertensystem gekennzeichnet, das sein Wissen selbständig aus der verfügbaren Literatur oder anhand von Fallbeispielen extrahiert.

Globale Wissenserwerbssysteme, wie **KRITON** /66/, betonen den Aspekt der Modellierung eines Wissensbereichs. Sie stellen Werkzeuge zur Verfügung, um für unterschiedliche Anwendungen eine Akquisition auf der Beschreibungsebene des Experten zu ermöglichen. Kernstück ist Aufbau und Verwendung von Interpretationsmodellen, die den Wissenserwerb für ein Anwendungsfeld leiten und kontrollieren. In **KRITON** werden Interview, Protokollanalyse und Textanalyse miteinander kombiniert, um auch von natürlichsprachlichen Texten Wissen abzuleiten. Die Benutzung des komplexen Werkzeuges, insbesondere die semiautomatische Generierung der endgültigen Wissensbasis muß durch einen Wissensingenieur erfolgen. Die Anwendung der Protokollanalyse erfordert zudem psychologische Kompetenz.

CONSTRUCT /67/ ist eine Expertensystem-Shell für Konfigurationsprobleme. Dessen Wissenserwerbskomponente besteht aus spezialisierten Browsern (graphischen Objekt-Editoren) zur Definition der Objekttaxonomien und aus dedizierten Editoren zur Spezifikation der Objekteigenschaften. Die Wissensakquisition ist auf den Erwerb von Wissen über Aspekte, Relationen, Schnittstellentypen, Komponenten und deren Merkmale beschränkt. Die direkte Erfassung von Regeln und funktionalen Abhängigkeiten ist nicht vorgesehen.

OPAL /68/ ist die Akquisitionskomponente von **ONCONCIN**, einem Expertensystem zur Spezifikation von Therapieprotokollen bei der Tumorbehandlung. **OPAL** ist ausschließlich für die Wissensakquisition in diesem Aufgabenbereich einsetzbar und besteht aus einem graphikorientierten Programmeditor, bei dem der Experte Ikonen auswählt und durch Pfeile vernetzt. Die Erfassung von Kontrollwissen erfolgt mit Hilfe eines Formulars am Bildschirm.

4.6.2 Darstellung von Erfahrungswissen in der Montage

In technischen Gebieten wird teilweise versucht, Erfahrungswissen systematisch darzustellen und zu dokumentieren. Dabei handelt es sich z.B. um Tabellen oder Diagramme unterschiedlicher Ausprägung (Abb.28), die im Rahmen einer Problemlösung interpretiert werden.

Es kann versucht werden, diese Darstellungen aufzunehmen und sie inhaltlich in entsprechende Verfahren zu integrieren. Verständliche und bekannte Darstellungsformen haben den Vorteil, daß sie zur Erklärung der Entscheidungsprozesse sowie zur Dokumentation und Erfassung des Wissens geeignet sind. Ein Wissenserwerbswerkzeug für die Montageplanung auf dieser Grundlage wäre mit OPAL-System /68/ (siehe Kapitel 4.6.1) vergleichbar. Neben textuellen symbolischen Aussagen spielen aber auch graphische und räumliche Zusammenhänge eine wesentliche Rolle. Für diese Problemstellung fehlen bisher geeignete Ansätze.

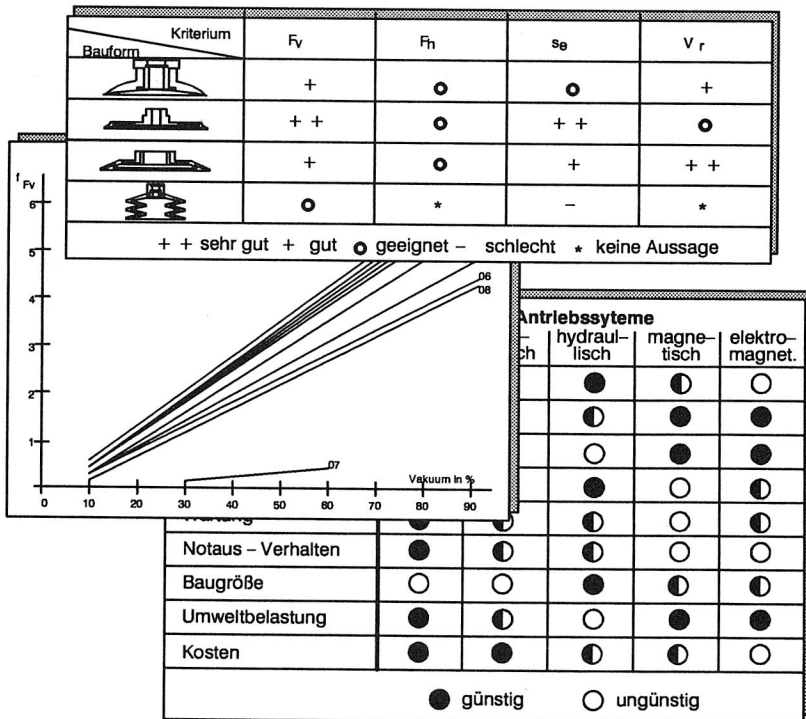


Abb. 28: Strukturierte Darstellung von Erfahrungswissen in der Montage

4.6.3 Werkzeug zur Erfassung von Objektstrukturen

Aufgrund der hohen Kosten, der Übertragungs- und Zeitverluste ist ein direkter Wissenserwerb anzustreben. Dies bedingt den Einsatz und die Entwicklung komfortabler Wissenserwerbskomponenten. Zur grundlegenden Charakterisierung und Strukturierung einer Problemlösung können Kreativität, Intuition und Erfahrung erforderlich sein. Entsprechendes gilt für die Auswahl einer geeigneten Wissensrepräsentationsform und die nachfolgende Umsetzung der Wissens Elemente. Diese Aufgaben lassen sich nur schwer automatisieren. Direkter Wissenserwerb ist jedoch möglich, wenn die Wissensbasis vorstrukturiert ist und vorhandenes Wissen nur verfeinert und erweitert wird. Der Knowledge-Engineer muß dazu vorher die grundlegenden Systemstrukturen, Schnittstellen und Planungswerkzeuge entwickeln.

Die Planung automatisierter Montageanlagen erfolgt auf unterschiedlichen Abstraktionsebenen. Es werden Objekte ausgewählt, spezifiziert und durch Relationen verbunden (vergl. Kap. 2.1.2). Dies setzt Wissen über Objekte, deren Eigenschaften und Relationen voraus. Durch die direkte Erfassung von Objektstrukturen können z.B. Betriebsmittel- und Anlagenstrukturmodelle von Planungsexperten selbständig erfaßt werden. Dies entspricht auch der Zielsetzung von CONSTCUT /67/ (vgl. Kapitel 4.6.1). Der im folgenden beschriebene Ansatz versucht, durch den Einsatz eines Neuronalen Netzes zusätzlich die Dialogstrategien der Bediener zu modellieren.

Die Umsetzung des Wissens in ein mathematisches Modell ist ein *Transformationsproblem* (siehe Kap. 3.2.3). Das Wissen eines Problembereichs wird in ein Objekt-Modell übertragen. Der Planungsprozeß besteht in der richtigen Anordnung der Aktionen für die Erstellung der Wissensbasis. Typische Aktionen für die Integration eines Objekts in eine objektorientierte Wissensbasis sind:

- *Erzeugen und Benennen des Objekts*: Es wird ein eindeutiger Objektname vergeben.
- *Objektklassifikation*: Die Objektklassifikation verankert das Objekt in den Vererbungsstrukturen der Wissensbasis.
- *Objektbeschreibung*: Objekte werden durch Merkmale charakterisiert.
- *Bestimmung von Abhängigkeiten*: Dieser Schritt ermöglicht die Erfassung von Abhängigkeiten zu vorhandenen Objekten. Abhängigkeiten können durch Relationen repräsentiert werden.

- *Externe Repräsentation*: Die Benutzerschnittstelle des Objekts wird beschrieben.
- *Löschen*: Objekte und Merkmale können aus der Wissensbasis entfernt werden.

Die Reihenfolge, in der diese Aktionen ausgelöst werden, unterliegt der individuellen Vorgehensweise des Planers. Dabei ist aber auch der Zustand der Wissensbasis zu berücksichtigen. Akquisitionsschritte ergeben sich z.B. aufgrund des Fehlens bestimmter Wissensaspekte oder aufgrund von Widersprüchen.

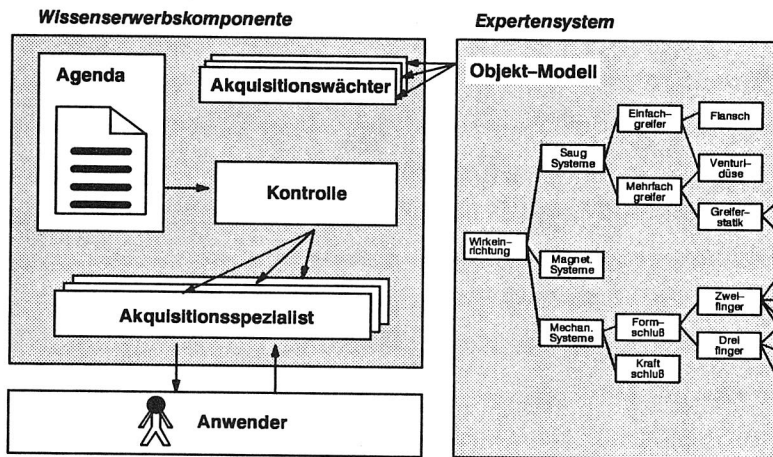


Abb. 29: Expertensystem zur Erfassung von Objektstrukturen

Zur Erfassung von Objektstrukturen durch den Planungsexperten wurde ein eigenständiges Expertensystem als Blackboard-System (vergl. Kap. 3.2.3) realisiert (Abb. 29). Die Steuerung erfolgt durch einen Agenda-Mechanismus, so daß eine opportunistische Vorgehensweise möglich ist. *Wächterprozesse* ermitteln die Priorität der einzelnen Akquisitionsschritte. Die *Kontrolle* steuert deren Ausführung oder macht dem Bediener Vorschläge. Dabei wird der Zyklus *Agenda berechnen*, *Akquisitionsschritt auswählen* und *Akquisitionsschritt ausführen* abgearbeitet.

Die *Wächter* zeigen fehlendes bzw. fehlerhaftes Wissen an. Jedem *Wächter* ist dabei ein Akquisitionsschritt zugeordnet. *Löschen* und *Benennen* können nur vom Anwender

aktiviert werden und besitzen keine eigenen *Wächterprozesse*. Wächter können z.B. Wertebereiche abprüfen und eine unvollständige Spezifikation eines Objekts anzeigen.

Die *Kontrolle* bewertet die Ergebnisse der *Wächter* und schlägt dem Anwender weitere Akquisitionsschritte vor. Um diesen Vorgang zu flexibilisieren, wird die *Kontrolle* zunächst vom Anwender geführt. Dann wird versucht, sein Verhalten zu simulieren. Die Kontrolle lernt die Auswahl-Strategie des Anwenders. Softwaretechnisch wird dies mit Hilfe eines Neuronalen Netzes realisiert.

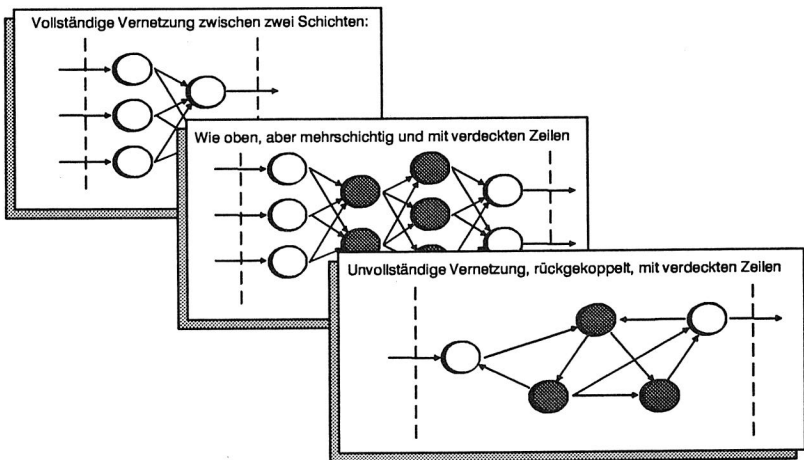


Abb. 30: Topologie Neuronaler Netze

In Abb. 30 sind unterschiedliche Netzwerktopologien dargestellt. Allgemeiner Aufbau und Funktionsweise unterschiedlicher Neuronaler Netze werden z.B. in /69, 70/ beschrieben. Im folgenden wird ausschließlich auf die realisierte Anwendung eingegangen.

Jedem Akquisitionsschritt ist genau eine Eingangszelle des implementierten Neuronalen Netzes zugeordnet (Abb. 31). Diese Zellen sind immer dann aktiv, wenn der korrespondierende Akquisitionsschritt zuletzt durchgeführt wurde. Das Netz kann damit eine Ausführungsreihenfolge der Erwerbsschritte erlernen.

Weiterhin wird jedem Anwender eine Eingangszelle zugeordnet, um anwenderbezogene Vorgehensweisen zu berücksichtigen. Den Objektmodellen ist ebenfalls ein

Eingangsknoten zugeordnet, so daß modelltypische Vorgehensweisen erfaßt werden. Um auch die Ergebnisse der *Wächter* zu berücksichtigen, werden von weiteren Eingangszellen die Agenda-Einträge geprüft. Diese Zellen sind immer dann aktiv, wenn der korrespondierende *Wächter* eine Akquisitionsmöglichkeit erkennt. Der *Null-Wächterknoten* ist ein weiterer Eingangsknoten. Dieser ist immer dann aktiv, wenn keiner der anderen *Wächter* aktiv ist.

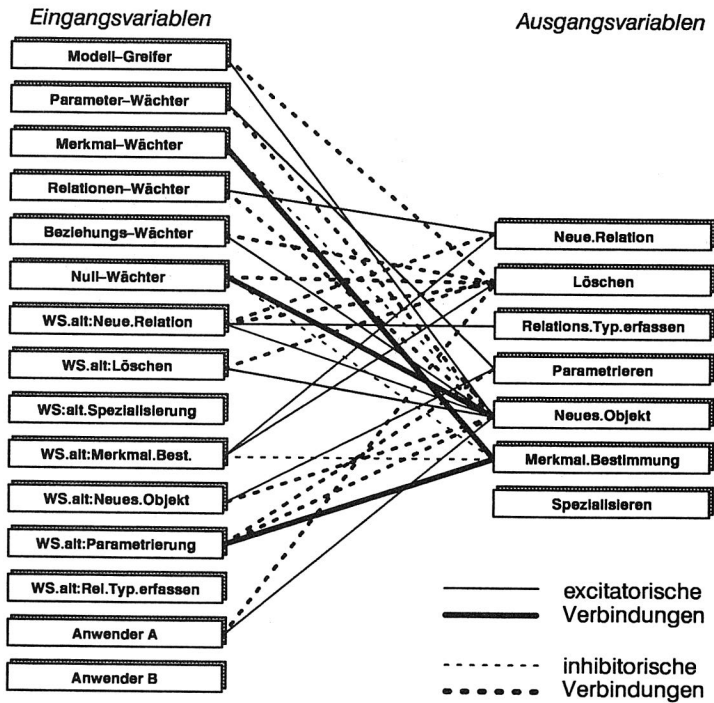


Abb. 31: Neuronales Netz nach ca. 10 Lernzyklen

Der Schwellwert der Ausgangszellen zur Bestimmung des Aktivierungszustandes ergibt sich aus der maximalen Eingangsimpulssumme. Dies hat zur Folge, daß nur die Ausgangszelle mit höchster Summe aktiv ist. Der Anwender bestätigt den Vorschlag des Netzes oder wählt einen alternativen Akquisitionsschritt aus und übernimmt so die Funktion eines Lehrers (vergl. /69/).

In Abb. 31 ist das realisierte Netzwerk nach einer kurzen Lernphase von etwa 10 Akquisitionszyklen dargestellt. Die Kantengewichte sind durch die Strichstärke gekennzeichnet. Ist beispielsweise der *Merkmal-Wächter* aktiv und wurde zuletzt eine *Parametrierung* durchgeführt, wird vom Netz eine *Merkmalsbestimmung* vorgeschlagen. Ist der *Null-Wächter* aktiv, wird ein neues Objekt erfaßt und keine *Merkmalsbestimmung* durchgeführt. Weitere Gesetzmäßigkeiten ergeben sich aus der Summierung der gewichteten inhibitorischen und excitatorischen Einflüsse.

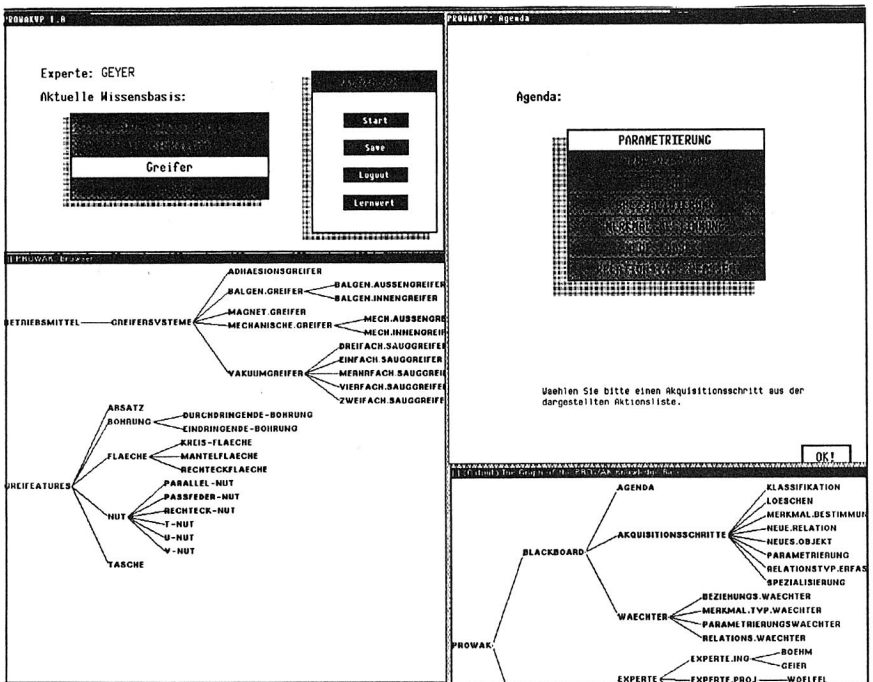


Abb. 32: Benutzeroberfläche zur Erfassung von Objektstrukturen

Das hier beschriebene und implementierte Neuronale Netz ist einschichtig. In einem mehrschichtigen Netz könnten auch komplexere Benutzerstrategien gespeichert

werden. Insofern kann diese Realisierung nur Möglichkeiten eines derartigen Lösungsansatzes andeuten.

Die realisierte Wissenserwerbskomponente nimmt auf zweierlei Art Wissen auf. Zum einen werden Objekte als wichtiger Bestandteil symbolischer Strukturmodelle erfaßt. Auf der anderen Seite kann durch den Einsatz eines Neuronalen Netzes die Ausführung von Benutzeraktionen überwacht, modelliert und reproduziert werden (Abb. 32).

Der Einsatz Neuronaler Netze zum Erlernen der Anwenderstrategie ist nicht auf die Erfassung von Objektstrukturen beschränkt. Planungswerkzeuge können generell mit einer derartigen Benutzerführung ausgestattet werden. Dadurch können der Dialogaufwand reduziert und die Benutzerführung vereinfacht werden. Häufige Befehlssequenzen werden erkannt und automatisch weitergeführt. Um komplexere Strategien zu verarbeiten, sind aber mehrschichtige Netze und entsprechende Variablen einzubeziehen von deren Belegung die Aktionen abhängen. Daraus können aber, wie dies sich schon bei der realisierten Komponente andeutet, Rechenzeiten resultieren, die eine interaktive Bedienung behindern. Durch die zunehmende Leistungsfähigkeit konventioneller Rechner bzw. durch die Entwicklung spezieller Hardwarearchitekturen werden aber in Zukunft auch komplexere Netze im Dialogbetrieb eingesetzt werden können. Vorteile dieser Vorgehensweise liegen in einer direkten Unterstützung der Bedienerinteraktion bei großer Flexibilität. Mit Neuronalen Netzen lassen sich auch Strategien und Vorgehensweisen abbilden, die mit Hilfe symbolischer Verarbeitungsmechanismen nur unzureichend umsetzbar sind. Die beschriebene Benutzerschnittstelle bleibt auch bei Änderung der Bedienerstrategie funktionsfähig, leistet aber dann zunächst keine Hilfestellung.

5. Wissensbereich Greiferplanung

Die Entwicklung weitgehend automatisierter Verfahrensketten und Planungswerkzeuge erfordert, wie in Kapitel 2. dargestellt, die Reduktion der Problemkomplexität durch Beschränkung auf Teilbereiche der Montage und Einbeziehung spezifischer Planungsstrategien. Die Greiferplanung wird im Rahmen dieser Arbeit als exemplarischer Wissensbereich einer *problemspezifischen Verfahrenskette* herangezogen, da Wissen und Erfahrungen über Greifersysteme auf unterschiedliche Phasen der Montageplanung Einfluß nehmen (Abb. 33). Die in diesem Abschnitt dargestellten Entscheidungsprozesse und Randbedingungen der Greiferplanung bilden die inhaltliche Grundlage für die in den folgenden Kapiteln konzipierten Planungswerkzeuge.

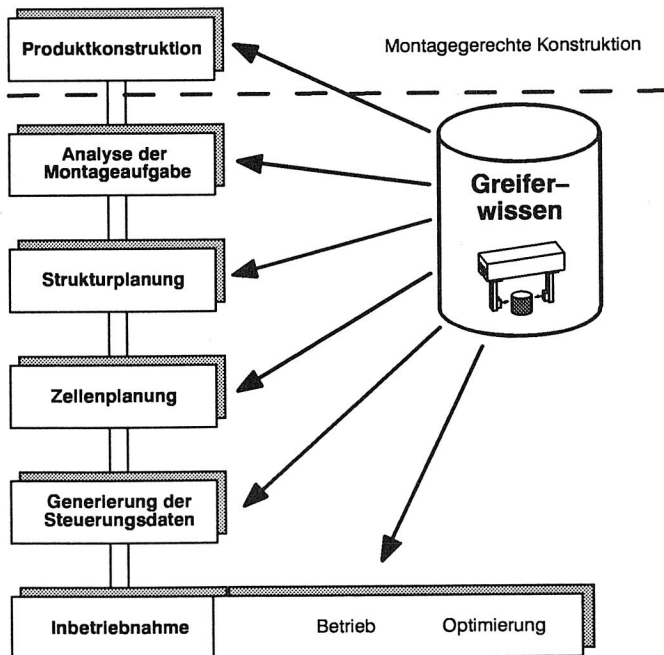


Abb. 33: Einfluß von Greiferwissen auf die Montageplanung

Die Spezifizierung und Auswahl von Greifersystemen ist eine wichtige Teilaufgabe bei der Planung automatisierter Handhabungs- und Montagezellen. Das Teilsystem Greifer sichert nach /71/ die Position und Orientierung des Werkstücks relativ zum Handhabungsgerät. Seine wesentliche Funktion besteht in der Aufnahme statischer und dynamischer Kräfte und Momente, die durch das Werkstück, den Handhabungsvorgang und den Prozeß hervorgerufen werden. Greifen ist Bestandteil fast jeder Bewegungsaufgabe. Die erfolgreiche Durchführung hängt entscheidend vom eingesetzten Greifer und der Stabilität des Griffes ab /72/.

Zur Vermeidung eines umfangreichen Greiferbestandes sollten bereits in der Teilekonstruktion entsprechende Maßnahmen ergriffen werden. Beispielsweise können normierte Flächen am Handhabungsobjekt für den Greifereinsatz als Beitrag einer automatisierungsgerechten Produktkonstruktion definiert werden.

Die Entscheidung für einen Greiferwechsel oder Mehrfachgreifer beeinflusst u.a. die Montagezeiten und sollte damit schon bei der Strukturplanung berücksichtigt werden. Bei der Auswahl geeigneter Handhabungsgeräte sind Greifergewicht, Zugänglichkeiten und Toleranzen zu beachten. Durch die Bahn- und Bewegungsplanung werden Kraft- und Momentverläufe am Handhabungsobjekt festgelegt, die vom ausgewählten Greifersystem aufgenommen werden müssen. Bei der Planung zulässiger Montage-reihenfolgen sind Greiferkollisionen zu beachten (Abb. 34).

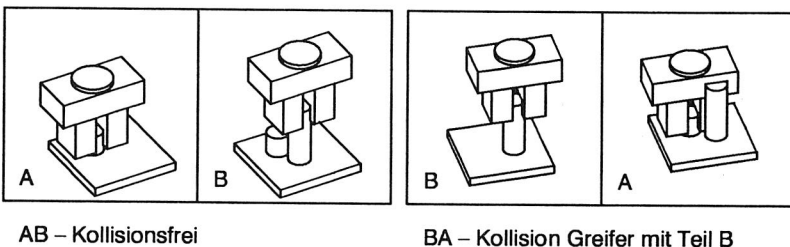


Abb. 34: Durch Greiferkollision bedingte Vorrangbeziehungen
(vergl. /37/)

Durch das Greifersystem wird unmittelbar beeinflusst, welche Handhabungsobjekte gegriffen und welche Arbeitsoperationen durchgeführt werden können /22/. Im Rahmen der Teilefertigung erlauben flexible Verfahrensketten die kostengünstige Herstellung

komplexer Teilegeometrien in geringer Stückzahl. Zur flexiblen und automatisierten Handhabung dieser Teilevielfalt fehlen aber Hilfsmittel. Die zunehmende Komplexität der Teile erfordert die Planung werkstückbezogener Greifersysteme.

5.1 Aufgaben der Greiferplanung

Ziel der Greiferplanung ist es, ausgehend von einem vorgegebenen Handhabungskonzept und einer konkreten Handhabungsaufgabe, unter Berücksichtigung aller wesentlichen Einflußfaktoren, eine optimale Greiferlösung zu entwickeln (Abb. 35). Zu einer Greiferlösung gehört die Auswahl eines oder mehrerer konkreter Greifersysteme. Für jedes zu greifende Objekt muß die *Greif-Situation* beschrieben werden. Unter *Greif-Situation* werden Parameter zusammengefaßt, die die Verbindung "Handhabungsobjekt – Greifer" beschreiben und die nicht dem einen oder anderen Teilsystem direkt zugeordnet werden können.

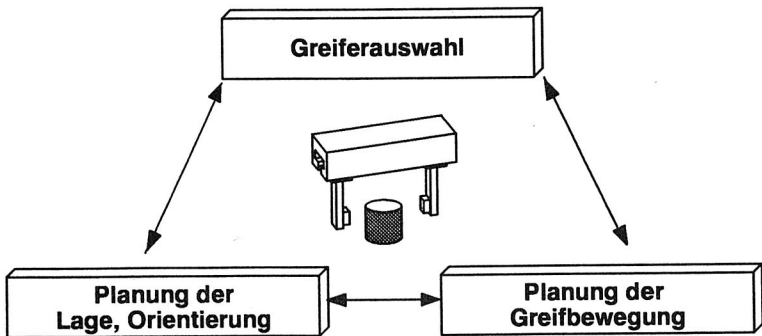


Abb. 35: Aufgaben der Greiferplanung

Beispiele sind Greifkräfte, Art des Griffes oder Lage und Orientierung des Greifers relativ zum Handhabungsobjekt. Zusätzlich muß definiert werden, wie eine Greifsituation mit einem konkreten Greifersystem herbeigeführt werden kann. Diese Problembereiche stehen in enger Wechselwirkung. Im folgenden werden zunächst allgemeine Anforderungen an Greifer beschrieben. Anschließend werden *Greif-Situationen*, Aufgaben der Bewegungsplanung und wesentliche Einflußfaktoren der Greiferplanung charakterisiert.

5.1.1 Aufbau von Greifersystemen

Die Vielfalt der möglichen Greifersysteme und deren Eigenschaften sind letztendlich im Aufbau begründet. In Abb. 36 ist eine funktionsorientierte Sicht, insbesondere des Kraft- und Energieübertragungssystems eines Greifers und entsprechende Lösungsfelder dargestellt (vergl. /73/). Der Flansch stellt die Kopplung des Greifers an das Handhabungsgerät her. Dabei müssen mechanische, energie- und informationstechnische Anbindungen sichergestellt werden. Desweiteren können Elemente zum passiven Ausgleich von Lagefehlern eingebunden sein.

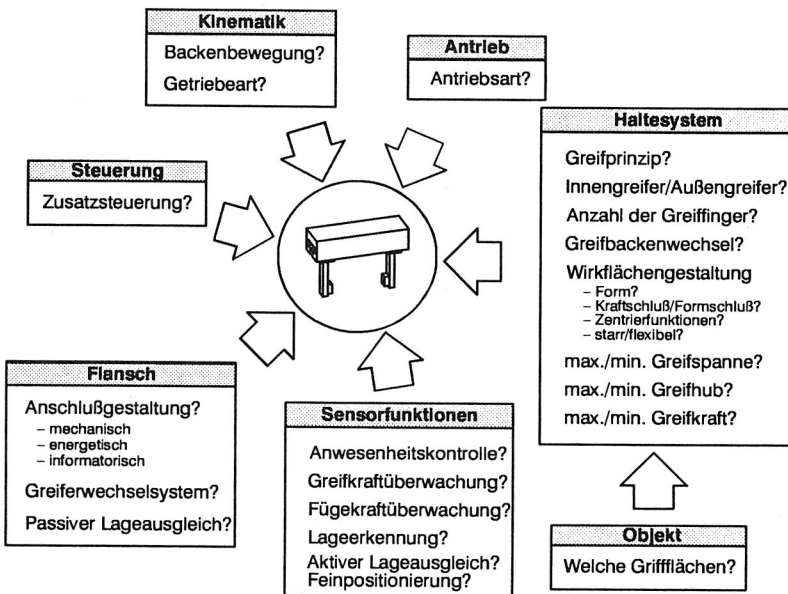


Abb. 36: Entscheidungsfelder der Greiferplanung

Der Antrieb hat die Aufgabe, die ihm zugeführte Energie in Bewegungsenergie umzuwandeln. Diese wird mittels einer geeigneten Kinematik auf das Haltesystem übertragen. Gegebenenfalls setzt die Kinematik lineare oder rotatorische Antriebsenergie in eine lineare, rotatorische oder krummlinige Backenbewegung um. In vielen Fällen werden dazu aufgrund ihres einfachen Aufbaus Kniehebelgetriebe verwendet.

Diese liefern aber eine von der Backenstellung abhängige Schließkraft. Lineare Backenbewegungen weisen i.a.: einen geringen Greifhub auf, sind aber beim Greifen verschieden großer Teile mittelpunktkonstant.

Das Haltesystem besteht aus einem oder mehreren Greiffingern, die mit gleichen oder unterschiedlichen, starren oder flexiblen Wirkflächen ausgerüstet sind. Diese stellen den eigentlichen Kontakt zum Handhabungsobjekt her.

Neben diesen Baugruppen können die Steuerung und die Einbindung von Sensorfunktionen berücksichtigt werden. Bei der Prozeßüberwachung werden Sensoren der unterschiedlichsten Wirkprinzipien zur Meßdatenerfassung verwendet. Anwendungsfelder sind u.a Anwesenheitskontrolle, Greif- und Fügekraftüberwachung, Lageerkennung von Teilen und der aktive Lageausgleich. Sensoren können eine notwendige Voraussetzung zur Automatisierung eines Montageprozesses sein.

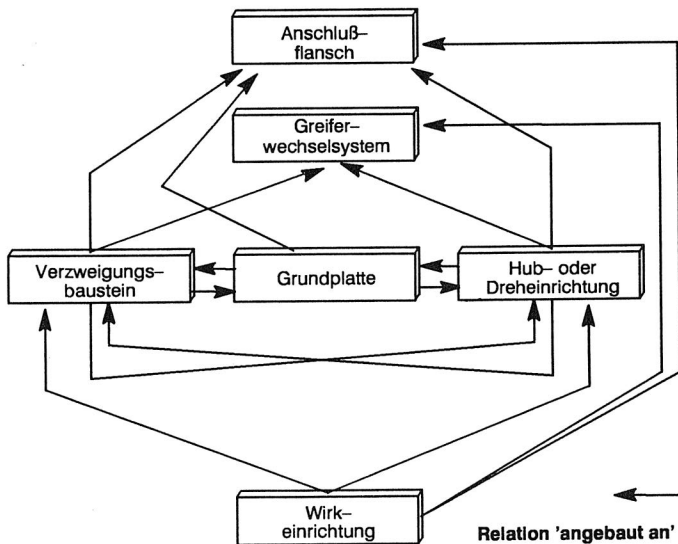


Abb. 37: Aufbau von Greifersystemen mit Standardmodulen

Nicht immer sind alle genannten Teilsysteme notwendig. So genügen im einfachsten Fall, wie z.B. bei Saug- oder Magnetgreifern, die elementaren Baugruppen Flansch und

Haltesystem /73/. Bei der Realisierung von Greiferlösungen werden häufig Standardmodule eingesetzt. Diese Module integrieren Antrieb und Kinematiksystem. Sie stellen so verschiedenste Backenbewegungen, Greifkräfte und Greifhübe zur Verfügung. An diesen Grundmodulen können spezielle Greiffinger angebracht werden. In bezug auf verfügbare Standardmodule lassen sich deshalb Greifersysteme aufbauorientiert strukturieren. Die Funktionen Antrieb, Kinematik und Haltesystem werden in eine Wirkeinrichtung integriert. Zusätzlich können Hub- und Dreheinrichtungen die Kinematik des Handhabungssystems erweitern. Diese Unterteilung ist insbesondere für Auswahl und Aufbau von Greifersystemen aus vorgefertigten Modulen relevant (Abb. 37). Zur Erzeugung kraft- oder formschlüssiger Verbindungen können mechanische, pneumatische oder elektrische Systeme verwendet werden. Für die Auswahl von Greifersystemen ist eine Unterscheidung nach Greifprinzipien von besonderer Bedeutung /23/.

5.1.2 Anforderungen an Greifersysteme

Aufgrund technischer und wirtschaftlicher Faktoren muß der Greifer grundlegenden Anforderungen gerecht werden (Abb. 38) /71,73/.

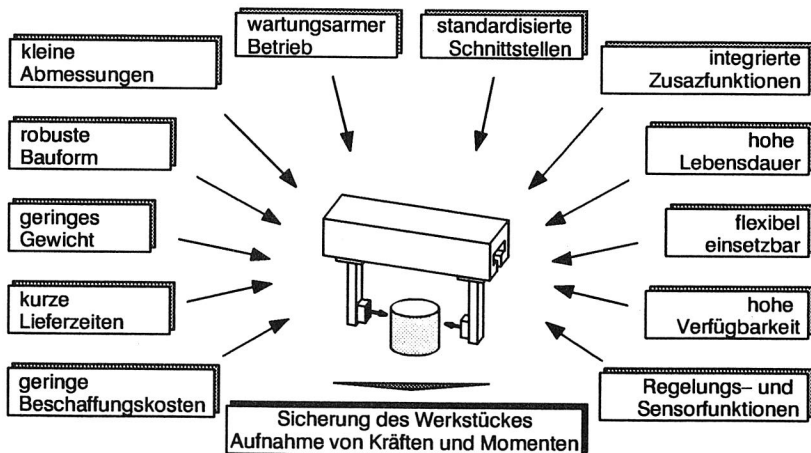


Abb. 38: Anforderungen an Greifersysteme (vergl. /73/)

Neben dem eigentlichen Greifersystem können zusätzlich Sensorfunktionen, Regelungen der Greifbewegung, selbstzentrierende Wirkorgane und Lagefehlerkorrekturen vorgesehen werden. Die Zielkriterien aus Abb. 38 sind zum Teil schwer quantitativ und qualitativ faßbar und zudem voneinander abhängig. Mit ausschließlich algorithmischen Methoden kann die Greiferplanung deshalb nicht ausreichend unterstützt werden. Um trotzdem schnell und einfach zu planen, setzen Experten Erfahrungswissen ein.

5.1.3 Greif-Situationen

Ein wichtiges Problem bei der Planung von Robotern ist die Ermittlung der richtigen Greifposition und der entsprechenden Greifkräfte, um die geforderte Greifleistung zu erreichen /74/. Durch die Auswahl eines Greifersystems – bei gegebener Handhabungsaufgabe – ist der Griff noch nicht ausreichend spezifiziert (Abb. 39).

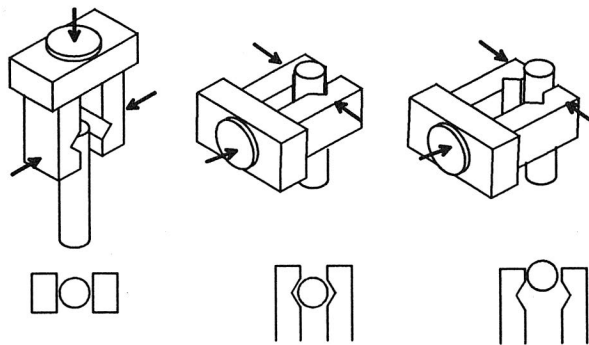


Abb. 39: Unterschiedliche Greif-Situationen

Mit Griffflächen werden im folgenden Flächen am Werkstück, mit Greifflächen, Flächen an den Greiferfingern bezeichnet, die jeweils an einem Greifvorgang beteiligt sind (vergl. /23/). Für ein sicheres Greifen ist neben dem Aufbau des Greifersystems dessen konkreter Einsatz zu beschreiben. Es müssen Griffflächen am Handhabungsobjekt und Greifflächen an den Greiffingern festgelegt werden. Lage und Orientierung des Greifersystems relativ zum Handhabungsobjekt sind zu definieren. Dabei sind

Kollisionen zu beachten. Die notwendigen Greifkräfte bzw. die entsprechenden Stellgrößen müssen ermittelt werden. Je flexibler ein Greifer ist, desto größer sind die Freiheitsgrade. Dementsprechend besteht eine wesentliche Aufgabe darin, die Einsatzbedingungen festzulegen. Umgekehrt schränken die gewünschten oder notwendigen Eigenschaften einer Greif-Situation mögliche oder einsetzbare Greifersysteme ein und bilden die Zielsituation für die Planung der Greiferfeinbewegung. Zur Lagefixierung werden im wesentlichen die Wirkprinzipien, Form- und Kraftschluß eingesetzt und kombiniert, d.h. es werden Reib- und Normalkräfte benutzt (Abb. 40). /71, 73, 23/

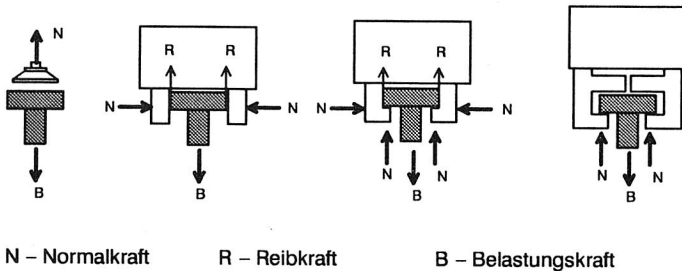


Abb. 40: Reib- und Normalkräfte zur Lagefixierung

Es müssen am Handhabungsobjekt Flächen ausgewählt werden, die zur Übertragung der entsprechenden Kräfte geeignet sind. Die konkreten Kontaktzonen zwischen Greiffinger und Handhabungsobjekt ergeben sich aber erst, wenn Lage und Orientierung des Greifersystems und der Greiffinger relativ zum Handhabungsobjekt festgelegt sind.

5.1.4 Feinplanung der Greifbewegung

Bei der Festlegung der Greif-Situation muß auch berücksichtigt werden, daß diese mit Hilfe des Handhabungssystems und seinen kinematischen, sensorischen und steuerungstechnischen Möglichkeiten erreichbar ist. Dabei sind u.a. die Zugänglichkeit der Griffflächen sowie Lage und Orientierung des Handhabungsobjektes bei der Teilbereitstellung zu optimieren und die Bewegungen der Greiffinger bei der

Herstellung des definierten Griffs sowie beim Öffnen in der Zielposition zu planen. Die entsprechenden Informationen werden zur Generierung von Steuerungsprogrammen benötigt. Zu diesem Problembereich existieren zahlreiche Ansätze, insbesondere mit hochflexiblen, sensorgesteuerten Greifern /75/. Deren Einsatz ist mit erheblichen Kosten verbunden. Die komplexen Systeme sind relativ stör anfällig und für einen industriellen Einsatz noch nicht geeignet.

5.1.5 Einflußfaktoren der Greiferplanung

Die Greiferplanung erfolgt unter Berücksichtigung zahlreicher möglicher Einflußfaktoren. Diese Randbedingungen können in Form von Zeichnungen, Tabellen, Marktkennntnissen und Katalogen symbolisch bzw. graphisch dokumentiert sein oder nur in den Köpfen der Planer vorliegen.

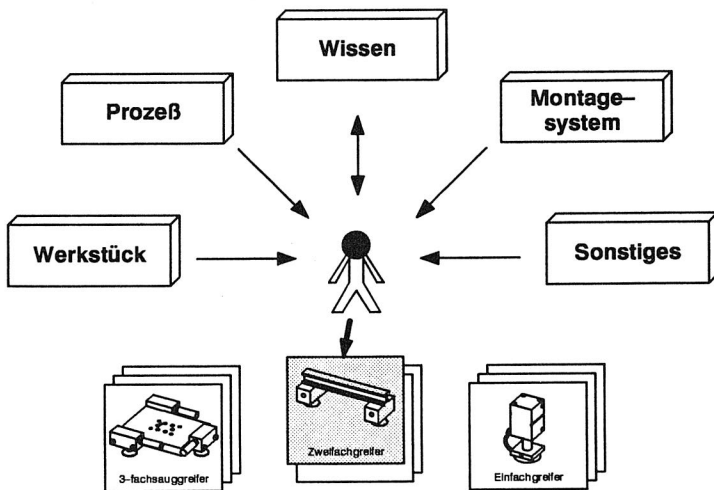


Abb. 41: Einflußgrößen bei der Greiferplanung

Sie lassen sich z.B. in werkstück-, prozeß- und montagesystembezogene Parameter sowie in sonstige Einflußgrößen aufteilen (Abb. 41) /73/. Eine wesentliche Rolle kommt den geometrischen und physikalischen Eigenschaften der Handhabungsobjekte zu. Bei

den geometrischen Eigenschaften sind insbesondere die Hauptabmessungen der Handhabungsobjekte von Bedeutung. Von ihnen hängt die geforderte Greiferflexibilität in entscheidender Weise ab. Die Form eines Handhabungsobjektes, die sich aus der Geometrie ergibt, liefert auch Hinweise für geeignete Greifersysteme (Abb. 42).

Wesentliche Werkstoffeigenschaften sind z.B. Reibwert, Druck- und Stoßempfindlichkeit. Bei der Oberflächenbeschaffenheit fällt die Rauheit ins Gewicht. Bei den prozeßbezogenen Parametern beeinflussen z.B. die einzuhaltenden Toleranzen maßgeblich die geforderte Positioniergenauigkeit. Als montagesystembezogene Einflußgrößen sind u.a. die Positioniergenauigkeit des Handhabungsgerätes aber auch die der Teilebereitstellung zu nennen. Der Entnahmezustand in einer Bereitstellungseinrichtung ist vom Werkstückverhalten geprägt. Unter sonstige Einflußgrößen fallen z.B. Temperatur und Luftfeuchtigkeit. Für den eigentlichen Auswahlprozeß eines Greifersystems ist aber neben den genannten Faktoren auch das Erfahrungswissen des Planers ausschlaggebend.

	Außengreifer	Innengreifer	Sauggreifer	Magnetgreifer	Balngreifer
Blockteil,voll	X	–	X	X	X
Blockteil,hohl	X	X	X	X	X
Kegelteil, Pyramidenteil	O	–	O	O	X
Kugelteil	O	–	–	–	X
Wellenteil	O	–	O	O	X
Scheibe	X	–	X	X	O
Flachteil,eben	O	–	X	X	O
Flachteil, räumlich	X	X	X	X	O
Drahtteil, eben	O	X	–	X	–
Drahtteil, räumlich	O	X	–	X	–

X : gut geeignet O : mittel geeignet – : nicht geeignet

Abb. 42: Form von Handhabungsobjekten und geeignete Greifersysteme [23]

5.1.6 Sensoren und Steuerungen für Greifersysteme

Konstruktive, sensorische und steuerungstechnische Entwicklungen beeinflussen die Greiferplanung (Abb. 43). Würde eine Roboterzelle den Befehl *“greife Werkstück auf dem Arbeitstisch”* direkt umsetzen, hat dies Auswirkungen auf Verlauf und Randbedingungen der Greiferplanung. Ein Teil der Probleme würde sich auf den Steuerungs- und Regelungsentwurf mit Sensorintegration und Objekterkennung verlagern.

Das Ziel derartiger Ansätze ist die Nachbildung des menschliche Greifvermögens. Eine Einführung und Übersicht über den Stand der Forschung auf diesem Gebiet wird in /75/ gegeben. Werden die gleichen Bewegungsabläufe bzw. Greifvorgänge mehrfach ausgeführt, dann sind einfache, schnelle und problemangepaßte Greifersysteme den universellen überlegen. Wann sich der Entwicklungs-, Umrüst- oder Auswahlaufwand lohnt, muß in einer wirtschaftlichen Analyse entschieden werden. Dabei ist im industriellen Einsatz die manuelle Montage eine kostengünstige Alternative.

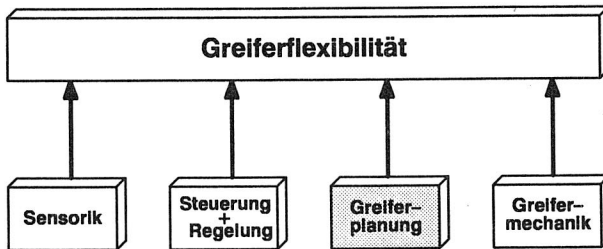


Abb. 43: Flexibilisierung der automatisierten Montage durch Greifertechnik

Heute zumindest stehen die universellen, hochflexiblen, sensorgeführten Greifersysteme noch nicht im Wettbewerb mit den einfachen Systemen, deren Einsatz dafür detailliert geplant werden muß. Eine verbesserte Planungsqualität bei reduziertem Planungsaufwand durch rechnergestützte Werkzeuge und die Weiterentwicklung von Sensor-, Steuerungs-, und Greiftechnik sind gleichermaßen notwendige Beiträge zur Flexibilisierung der automatisierten Montage.

5.2 Ansätze zur systematischen Greiferplanung

Die allgemeine Montageplanung (Kap. 2) beinhaltet grundsätzlich auch die Aufgaben der Greiferplanung. Da Greiferwissen in allen Phasen der Montageplanung von Bedeutung sein kann, ist sie weder Teilaufgabe noch isolierter Bestandteil. Greiferplanung ist in diesem Sinn Montageplanung unter Berücksichtigung der Aspekte des Greifereinsatzes in allen Planungsphasen. Dies wird von den bekannten, im folgenden kurz dargestellten, systematischen und rechnergestützten Ansätzen zur Greiferplanung nicht beachtet.

5.2.1 Methodische Greiferplanung

Die Greiferplanung sollte nach /73/ in die vier Phasen Analyse der Greifaufgabe, Integration des Greifers in das Gesamtsystem, Auswahl der Greiferfunktionssysteme und Auswahl des optimalen Greifers unterteilt werden (Abb. 44). Bei jeder dieser Phasen werden einzelne Planungsschritte, anzuwendende Hilfsmittel und Ergebnisbereiche angegeben.

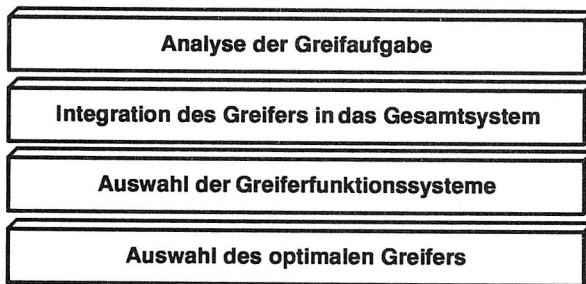


Abb. 44: Systematische Greiferplanung (vergl. /73/)

Ausgehend von Griffflächen werden mit Hilfe eines Entscheidungsbaumes anwendbare Greifprinzipien ermittelt. Für jedes mögliche Greifprinzip sind Greiferkonzepte zu erarbeiten. Schließlich wird das beste Greiferkonzept mit Nutzwertanalyse und Wirtschaftlichkeitsrechnung ausgewählt /73/. Damit steht dem Planer eine sinnvoll

geordnete, aber aufwendig zu handhabende Systematik zur Verfügung. Konkrete Entscheidungshilfen im Detail fehlen jedoch. Zum Beispiel werden zur optimalen Auswahl aus den möglichen Griffflächen keinerlei Anregungen vermittelt.

Greiferlösungen werden in /76/ nach bestimmten Leistungsmerkmalen beschrieben, um sie, nach einer Analyse der geforderten Funktionsinhalte, den entsprechenden Handhabungsaufgaben zuzuordnen. Greifer werden dabei nach der Art des Griffes am Werkstück, der Greifkraft, der Greifweite und der verschiedenen Sonderfunktionen in einen maximal 35-stelligen lesbaren Kennzeichenschlüssel klassifiziert. Eine vollständige Klassifikation von Greifern in der notwendigen Feinheit ist umfangreich und unübersichtlich. Möglichkeiten durch Kombination von Greifermodulen oder Anpassung von Greiffingern bleiben unberücksichtigt.

In /77/ wird speziell auf die Auslegung von Sauggreifersystemen eingegangen. Insbesondere werden konkrete Kräfteemodelle für ausgewählte Greifersysteme dargestellt und die Verwendung von Auslegungsdiagrammen zur Auswahl geeigneter Saugelemente vorgeschlagen. Dabei wird von einem gegebenen Sauggreiferkonzept ausgegangen und ein methodisches Verfahren zur Überprüfung der Eignung für eine vorgegebene Handhabungsaufgabe erarbeitet. Die Auswahl des Greiferkonzeptes sowie mögliche Probleme bei der Integration in ein Verfahren zur Greif- bzw. Montageplanung werden nicht detailliert behandelt.

5.2.2 Nicht wissensbasierte Planungswerkzeuge zur Greiferplanung

Es existieren verschiedene Ansätze zur rechnergestützten Auswahl und Auslegung von Greifersystemen mit der Zielsetzung, dem Planer Kenndaten für deren Konzeption bereitzustellen. Eine Detaillierung bleibt dem Planer überlassen. In /78/ wird versucht, für ein beliebiges Handhabungsobjekt einen genau an diese Aufgabe angepassten Greifer zu entwickeln. Die Lösungsfindung für die Handhabung mehrerer Teile wird nicht unterstützt. Die Auswahl eines geeigneten Griffflächenpaares läßt sich mit dem in /78/ bereitgestellten Instrumentarium nicht lösen /23/.

Beim Verfahren in /79/ wird ein gegebenes Teilespektrum betrachtet. Die Untersuchung ist jedoch auf rotationssymmetrische Teile und mechanische Außengreifer beschränkt. In einem ersten Schritt werden sämtliche relevanten Werkstückdaten und

organisatorische Informationen in einer Werkstückdatei erfaßt und in Form von Häufigkeitsverteilungen dargestellt. Anschließend wird durch systematischen Vergleich dieser Daten mit den Parametern Greiferspannweite, Greifflächenbreite, Greifkraft und Greifbackenausführung ermittelt, wieviel Prozent der Teile bei bestimmten Parameterkombinationen gegriffen werden können. Das Ergebnis läßt sich durch Variation der Parameter optimieren, wobei, falls nötig, auch mehrere Greifer vorgesehen werden.

Bei dem weiterführenden Ansatz in /23/ werden nicht nur Auslegungsdaten, sondern auch konkrete Greiferabmessungen ermittelt. Das Verfahren wird auf ein Teilespektrum angewendet und kommt ohne Einschränkung von möglichen Teilegeometrien und Greifprinzipien aus. Mit Hilfe von Entscheidungsbäumen und Daten über Teilegeometrie, Bereitstellungs- und Fügepositionen werden geeignete Griffflächen und anschließend Greifprinzipien für jedes Teil bestimmt. Daraus werden Greifprinzipien zur Handhabung aller Teile anhand der Häufigkeiten ausgewählt. Den ausgewählten Greifprinzipien wird ein zu handhabendes Teilespektrum zugewiesen. Eine Cluster-Analyse bildet aus dem Teilespektrum, unter Berücksichtigung unterschiedlicher Anfahrrichtungen, geeignete Anforderungsgruppen. Für diese werden jeweils Greiferabmessungen vorgeschlagen. Die Kriterien für die Clusterung hängen von den Greifprinzipien ab. Im Fall des mechanischen Außengreifers sind dies im wesentlichen Handhabungsgewichte und Griffflächenabstände. Ein wesentlicher Nachteil der Cluster-Analyse besteht darin, daß die Montageaufgabe und der Montageverlauf nicht in den Lösungsansatz eingehen. Somit können häufige Greiferwechsel nicht ausgeschlossen werden. Notwendige Anpassungen aufgrund betrieblicher Anforderungen werden methodisch nicht berücksichtigt.

5.2.3 Wissensbasierte Planungswerkzeuge zur Greiferplanung

Ein wissensbasierter Ansatz zur Auswahl von Greifersystemen und Sensoren liegt in /22/ vor (Abb. 45). Es wird ein Expertensystem vorgestellt, das aus 30 mechanischen Greiferkomponenten und 8 Sensoren für eine vorgegebene Handhabungsaufgabe geeignete Greifer-Sensorsysteme zusammenstellt. Ausgehend von einem Datenerhebungsbogen bzw. Fragenkatalog, der die Aufgabenstellung eindeutig beschreibt, überprüft das System grob die Aufgabenstellung. Danach wird eine Leistungscharak-

teristik für Greifer und Sensoren erstellt. Anschließend werden alle Greifer- und Sensorkomponenten ermittelt, die der geforderten Leistungscharakteristik genügen. Im nächsten Schritt werden die einzelnen Komponenten unter technischen Randbedingungen auf ihre Kombinationsfähigkeit überprüft und zusammengestellt, nach wirtschaftlichen und organisatorischen Gesichtspunkten bewertet und maximal drei Lösungen ausgewählt.

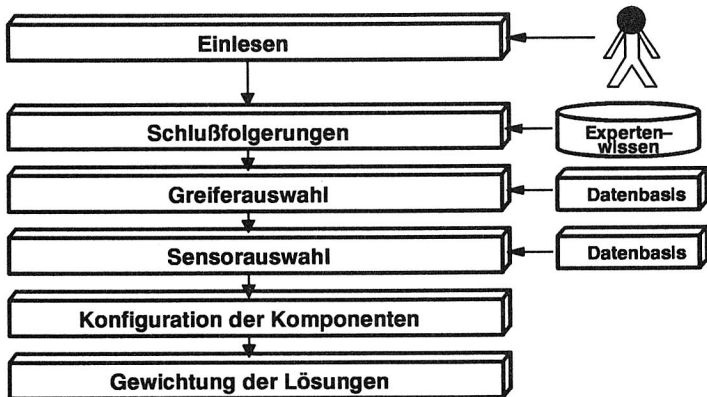


Abb. 45: Expertensystem zur Greifer- und Sensorauswahl [22/

Dieses System ist eine typische wissensbasierte Insellösung. Vernachlässigt werden dabei sowohl der Planer als möglicher und wichtiger Entscheidungsträger als auch die Integration in eine Verfahrenskette zur Montageplanung. CAD-basierte Kollisionsuntersuchungen werden nicht durchgeführt. Der *batchorientierte* Ansatz unterstützt damit nur die elementare Verarbeitung von Erfahrungswissen, ohne auf Möglichkeiten und Probleme der rechnergestützten Montageplanung einzugehen.

In /80/ sollen langfristig Neuronale Netze eingesetzt werden, um einen komplexen Greiferplanungs- und Kontrollzyklus zu simulieren. Da aber Neuronale Netze noch nicht weit genug entwickelt sind, wird statt dessen ein hierarchisch wissensbasierter Ansatz beschrieben. Dieser, wie zahlreiche andere Ansätze /75,81/, zielt auf die Entwicklung hochflexibler Greifersysteme und hat die menschliche Hand zum Vorbild. Randbedingungen und Anforderungen der industriellen Produktion werden so gut wie nicht berücksichtigt.

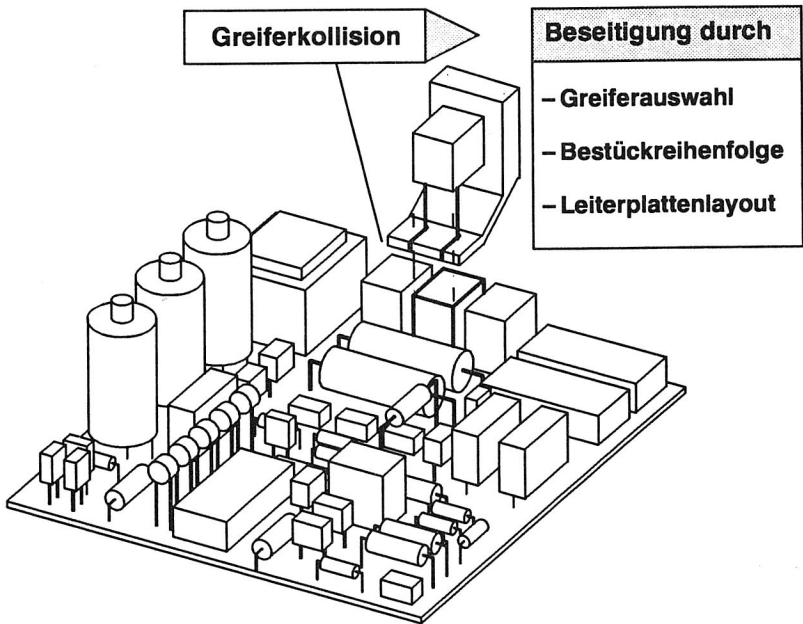
5.3 Defizite und Möglichkeiten rechnergestützter Greiferplanung

Für die methodischen und rechnergestützten Verfahren zur Greiferplanung treffen auch die in Kapitel 2.3 genannten Defizite und Möglichkeiten der allgemeinen Montageplanung zu. Die Ansätze liefern zahlreiche mögliche Einflußgrößen und Entscheidungsfelder für die Greiferauswahl, die inhaltlich weitgehend übereinstimmen.

Alle hier vorgestellten Verfahren zur industriellen Montage- und Greiferplanung bieten keine nennenswerten Integrationsmöglichkeiten. Im Rahmen der Greiferplanung werden weder rechnergestützte Produktmodelle analysiert, noch CAD-Systeme genutzt, um z.B. Griffflächen interaktiv zu definieren. Die konsequente Weiterverarbeitung von Zwischenergebnissen zur Roboterprogrammierung oder Kollisionskontrolle ist nicht vorgesehen. Aus- und Wechselwirkungen der Greiferplanung auf andere Planungsphasen, wie z.B. auf die Strukturplanung, werden nicht berücksichtigt. Ebenfalls nicht beachtet werden Daten zur Ansteuerung der Greifer sowie Verfahren zur Ermittlung der am Handhabungsobjekt angreifenden Kräfte und Momente.

Für die Unterstützung eines einfachen Greiferauswahl- oder Zuordnungsprozesses kann z.B. eine Assoziationsliste ausreichend sein, die in einer Datenbank verwaltet wird und Handhabungsobjekte mit Greiferplanungsdaten verknüpft. Der Planer ermittelt beim Auftreten eines bisher unbekannten Handhabungsobjektes die entsprechenden Greiferdaten und erweitert diese Liste. Ein derartiges Vorgehen ist z.B. bei der automatisierten Bestückung von Leiterplatten mit Bauelementen anzutreffen und aufgrund der hohen Standardisierung auch gerechtfertigt (Abb. 46). Bei entsprechender Bauteiledichte können Greifer Kollisionen verursachen (Bestückschatten). Lösungsansätze für diese Problemstellung ergeben sich durch die Auswahl alternativer Greiferkonzepte und Bestückreihenfolgen sowie durch die Optimierung des Leiterplattenlayouts.

Andererseits erfordert die erstmalige Konzeption eines Greifers für Papierstapel /82/ ein hohes Maß an Kreativität. Bei innovativen Aufgabenstellungen nähert sich die Greiferplanung somit der Konstruktion an (Abb. 47). Diese wiederum sollte, wie in /4/ gefordert, durch eine wissensbasierte Arbeitsumgebung unterstützt werden.



*Abb. 46: Kollisionsuntersuchung am CAD (BRep-Geometriemodelle)
zur Greiferauswahl für Bauelemente*

Zwischen diesen beiden Fällen sind problemspezifische Planungswerkzeuge denkbar, die mehrstufige, wissensbasierte Entscheidungsmechanismen zur Zuordnung von Produkten zu Greifersystemen beinhalten und Planungsergebnisse zur Weiterverarbeitung bereitstellen. Die Greiferplanung kann dabei ein zentraler Bestandteil von Verfahrensketten in der Montage sein.

Um eine methodische Vorgehensweise zu erarbeiten, kann die Greiferplanung systematisch dargestellt und strukturiert werden. Unabhängig vom konkreten Einsatzfeld können allerdings nur mögliche Anforderungen bzw. mögliche Wechselwirkungen und Problemstellungen behandelt und dargestellt werden. Bei einer systematischen Berücksichtigung aller Möglichkeiten entstehen komplexe Regelkreise, die sich aus technischen und wirtschaftlichen Gründen nicht mehr ausreichend genau modellieren lassen.

Ein konkreter, betriebsspezifischer Greiferplanungsprozeß wird aber nur Teilbereiche der allgemeinen Wechselwirkungen beinhalten. Wenn diese nicht zu komplex sind, besteht die Möglichkeit, insbesondere mit wissensbasierten Ansätzen, Planungsprozesse weitgehend zu unterstützen. Daraus folgt auch der exemplarische und nicht normative Charakter der zu entwickelnden Werkzeuge.

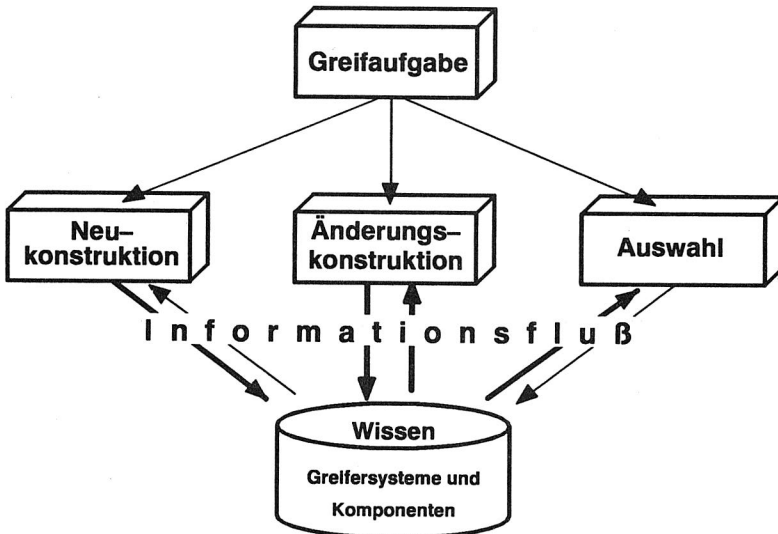


Abb. 47: Informationsfluß bei der Greiferplanung

Es sollen und können nur beispielhafte Lösungsansätze demonstriert werden, die bedingt Anspruch auf Allgemeingültigkeit beinhalten. Es werden rudimentäre Systemkomponenten, wie Schnittstellen, Datenhaltungskonzepte, Wissensrepräsentationsformen und Verarbeitungsverfahren erarbeitet, die für bestimmte Greiferplanungsprozesse notwendig sind. Diese Hilfsmittel können als begrenzter Prototyp einer *Arbeitsumgebung für die Montageplanung* aufgefaßt werden.

6. Verfahrenskette zur Greiferplanung

Allgemeines Greiferwissen und systematische Vorgehensweisen bei der Greiferplanung lassen sich ableiten oder fordern. Für eine wirkungsvolle Greiferplanung im betrieblichen Kontext sind sie in der Regel allein nicht geeignet. Damit können sie auch nicht als ausschließliche Grundlage eines rechnergestützten Planungssystems dienen. Allgemeingültige, systematische Vorgehensweisen beinhalten aber Anregungen zum Überdenken der eingesetzten betriebsspezifischen Konzepte. Die kritische Analyse des individuellen Vorgehens ist ein kreativer und intuitiver Prozeß, der sich nur sehr bedingt bzw. so gut wie nicht direkt mit einem Rechner unterstützen läßt. Entsprechend werden systematische Verfahren zur Greifer- und Montageplanung exemplarisch aufgegriffen und mit Hilfe der Programmierungsumgebung implementiert, durch wissensbasierte Elemente angereichert und zu einer Verfahrenskette integriert.

6.1 Werkzeuge zur greiftechnischen Montageplanung

Im folgenden werden zunächst Gesichtspunkte und Randbedingungen dargestellt, die bei der Konzeption und Integration der exemplarischen Planungswerkzeuge berücksichtigt werden. Ziel ist die prototypische Implementierung und Integration von Wissen über den Einsatz von Greifersystemen in ein Umfeld zur rechnergestützten Montageplanung.

6.1.1 Anforderungen an ein Greiferplanungssystem

Bei der Strukturplanung automatisierter Montagesysteme müssen auch greiftechnische Randbedingungen berücksichtigt werden (Abb. 48). Die Kombination der in einer Zelle zu handhabenden Werkstücke beeinflusst die Flexibilitätsanforderungen an das zu planende Greiferkonzept und damit die Auswahlentscheidung wesentlich. Dabei wird u.a. festgelegt, ob ein Greiferwechsel zu erwarten oder vorgesehen ist.

Die Ausführungszeiten für Greiferwechsel können die erreichbare Taktzeit bei gegebenen Montagestationen erheblich beeinflussen und wirken damit unmittelbar auf die Strukturplanung ein. Diesen Anforderungen entsprechend, soll ein Planungswerkzeug die Strukturplanung unter greiftechnischen Gesichtspunkten unterstützen.

Im Rahmen der Feinplanung sind für alle Handhabungs- und Montagetätigkeiten einer Montagezelle konkrete Greifersysteme auszuwählen und die Greiferparameter festzulegen. Wesentliche Greiferparameter sind Greif- und Griffflächen, Lage und Orientierung des Greifers relativ zum Handhabungsobjekt, Greifkräfte und Ansteuerung des Greifers. Für Auswahl und Planung des Greifereinsatzes bieten sich auch CAD-Techniken an (Abb. 49).

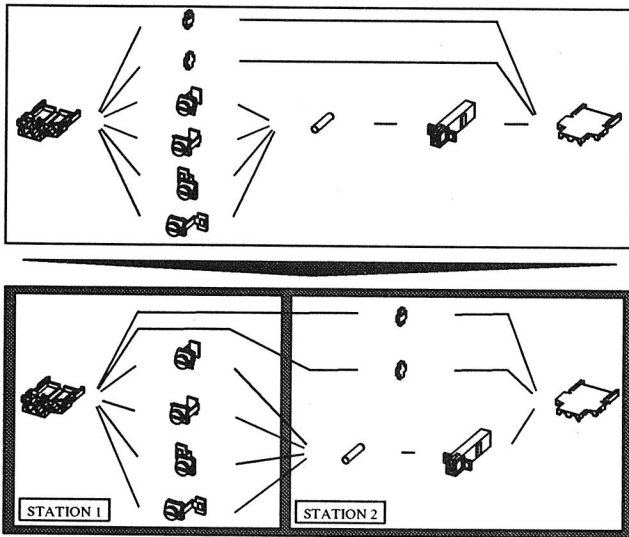


Abb. 48: Zuordnung von Montagetätigkeiten zu Montagezellen

Ob ein konkreter Greifer und die Greiferparameter richtig geplant wurden, läßt sich letztendlich erst bei einem Probetrieb des Montagesystems feststellen. Dies gilt besonders bei kritischen Problemstellungen. Beispielsweise müssen bei der Handhabung von Blechteilen mit relativ großen Abmessungen und niedrigen Taktzeiten dynamische (Schwingungen) und zusätzlich aerodynamische Effekte beachtet werden. Durch den Einsatz von Simulations- und Berechnungsverfahren lassen sich Überprüfungen und Optimierungsschritte, bis zu einem gewissen Detaillierungsgrad, schon in der Planung einleiten, wodurch grobe Planungsfehler vermieden werden. Ob und welche Untersuchungen notwendig sind, hängt von der konkreten Aufgabenstellung ab. Die realisierten Werkzeuge sollten deshalb exemplarisch Planungsergebnisse

an Simulations- bzw. Berechnungsprogramme weiterleiten und bzw. deren Ergebnisse verarbeiten.

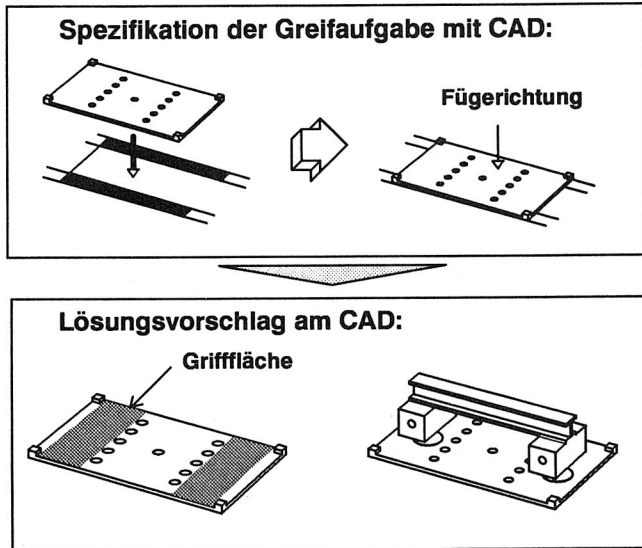


Abb. 49: CAD-gestützte Greiferplanung

Das Systemkonzept zur rechnergestützten Greiferplanung beinhaltet die Visualisierung, Interpretation und Verarbeitung dreidimensionaler Geometriemodelle und berücksichtigt Handhabungsobjekte, Greifersysteme und Kollisionsräume.

6.1.2 Grobkonzept einer exemplarischen Verfahrenskette

Aus diesen Anforderungen läßt sich ein grober Planungsablauf definieren, der durch die realisierten Greiferplanungswerkzeuge abgedeckt wird (Abb. 50). Durch Eigenschaften der Handhabungsobjekte und anhand globaler Randbedingungen lassen sich schon vor der eigentlichen Strukturplanung mögliche grobe Greiferkonzepte und Konzeptalternativen für jedes Handhabungsobjekt finden. Dieses Wissen soll während der Strukturplanung umgesetzt werden, um greiftechnisch günstige Montagezellen zu

erarbeiten. Eine grobe Entscheidung, ob Greiferwechsel, Mehrfach- oder Einfachgreifer vorzusehen sind, soll in diesem Planungsabschnitt getroffen werden.

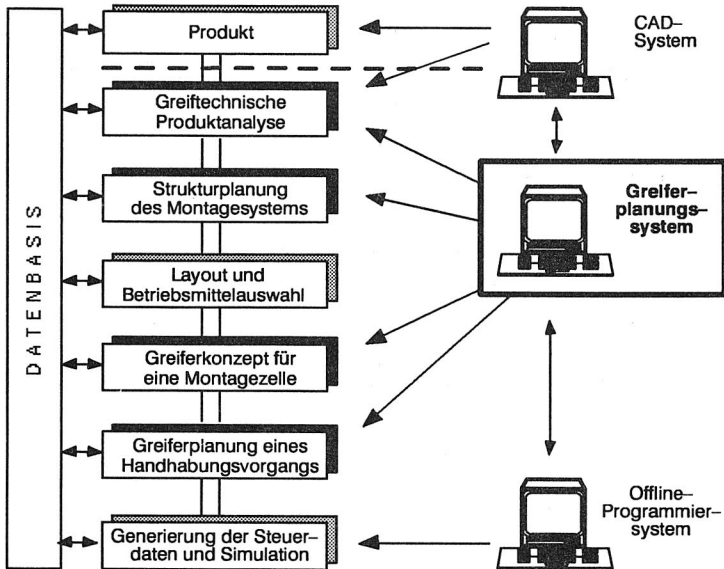


Abb. 50: Grober Planungsablauf

Die Montagezellen werden im Rahmen der Montageplanung weiter spezifiziert, die Planungsergebnisse den Modulen zur Greiferfeinplanung über die zentral verwalteten Anlagen- und Produktmodelle zur Verfügung gestellt.

Im Rahmen der Greiferfeinplanung werden zunächst konkrete Greifersysteme für jeden Handhabungsvorgang wissensbasiert ausgewählt. Dabei sind insbesondere Kontaktzonen am Handhabungsobjekt, die aufzunehmenden Kräfte und Momente sowie eine kollisionsfreie Lage und Orientierung der Greiferfinger zu berücksichtigen. Bei der Ermittlung konkreter Kontaktzonen (Greifpunkte) auf einer ausgewählten Grifffläche werden systematische Such- und Optimierungsverfahren eingesetzt. Diese Verfahren sind jedoch vom ausgewählten Greiferkonzept abhängig. Es muß also im Rahmen einer allgemeinen Greiferplanung für jedes Greiferkonzept ein eigenes Greifpunktplanungsmodul und ein Griffflächenauswahlmodul realisiert werden. Dies ist

notwendig, da Greifersysteme auf geometrisch und kinematisch unterschiedlichen Wirkeinrichtungen und unterschiedlichen physikalischen Effekten basieren. Deren Einsatzverhalten muß geeignet modelliert werden.

Die vom Greifersystem aufzunehmenden Kräfte und Momente hängen nicht nur von der Greiferplanung, sondern auch wesentlich von der Bewegungs- und Bahnplanung ab und lassen sich somit nur in diesem Kontext konkret ermitteln und optimieren. Das Greifer-Feinkonzept beeinflusst die Kinematik des Gesamtsystems aus Roboter, Greifer und Handhabungsobjekt. Erst für dieses System können eine konkrete Bahnplanung und Programmierung, z.B. mit Hilfe eines Offline-Programmiersystems, durchgeführt und so unvermeidbare Greiferkollisionen festgestellt werden. Die Bewegungssimulation ermöglicht auch die Berechnung der vom Greifer aufzunehmenden Kräfte und Momente. Anhand eines Kräfte Modells des ausgewählten Greifersystems wird überprüft, ob die Planungen den konkreten Anforderungen entsprechen. Das Offline-Programmiersystem übernimmt bei diesem Konzept die Funktion eines Teststandes, an dem der Greifvorgang hinsichtlich Kollision und "sicheres Halten" untersucht wird.

Diese Problembereiche werden zunächst sequentiell behandelt, um notwendige Grunddaten und Annahmen für die jeweils folgenden Planungsschritte bereitzustellen. Aufgrund der festen Abarbeitungsreihenfolge sind die erzielten Planungsergebnisse nicht optimal oder besitzen nicht die geforderten bzw. erwarteten Eigenschaften. Deshalb muß der Planungsablauf beim Auftreten von Widersprüchen wiederholt durchlaufen werden. Systematische Verfahren werden dazu mit neuen Parametern gestartet. Wissensbasierte Entscheidungsprozesse, bei denen der Planer interaktiv mitwirkt, sollten nicht neu initialisiert werden. Der Planer soll den Planungsverlauf unter Berücksichtigung des Planungszustandes und der aufgetretenen Widersprüche beeinflussen und so eine optimierte Lösung finden.

Findet der Experte keine Lösung, die alle Restriktionen erfüllt, optimiert er andere Aspekte der allgemeinen Montageplanung, wie z.B. Betriebsmittelauswahl, Teilebereitstellung oder Produktkonstruktion. Aufgrund der zahlreichen Freiheitsgrade und Optimierungsmöglichkeiten können nicht alle möglichen Regelkreise automatisiert werden. Deshalb sind Eingriffsmöglichkeiten durch den Benutzer vorzusehen und die möglichen Problemstellungen einzugrenzen.

Die Entwicklung und Implementierung von Kräftenmodellen und Verfahren zur Ermittlung konkreter Greifpunkte ist vom Funktionsprinzip der Greifer und der angestrebten Greif-Situation abhängig. Die vielfältigen Kombinationsmöglichkeiten verhindern einen vollständigen Lösungsansatz. Im Rahmen der Greiferfeinplanung werden deshalb vornehmlich Sauggreifersysteme detailliert geplant. Konzeptionell sind auch andere Greiferkonzepte, wie z.B. Außen- und Magnetgreifer integrierbar. Es wurden aber für diese Greiferarten keine weiteren Planungsmodule zur Greifpunktplanung und zur Überprüfung der aufnehmbaren Greifkräfte realisiert.

Entsprechendes gilt für den Einsatz von Berechnungs- und Simulationsverfahren zur Ermittlung der am Handhabungsobjekt auftretenden Kräfte und Momente. Ausgegangen wird von einem idealisierten Roboter ohne dynamische und kinematische Fehler; aerodynamische Effekte oder Fügekräfte werden nicht modelliert. Ergebnisse leistungsfähiger Berechnungs- und Simulationsverfahren lassen sich aber grundsätzlich in den Planungsablauf integrieren.

Bei den implementierten Planungswerkzeugen, handelt es sich um Prototypen, die für einen Einsatz in der Praxis noch nicht geeignet sind. Aus einer kritischen Analyse der erarbeiteten Datenstrukturen, externen Repräsentationen, Benutzeroberflächen, Schnittstellen und Wissensrepräsentationstechniken lassen sich aber Anforderungen an eine *Arbeitsumgebung für die Montageplanung* ableiten.

6.2 Verwaltung der Greifersystemparameter

Zum Entwurf eines rechnergestützten Hilfsmittels zur Auswahl von Greifersystemen und deren Komponenten müssen deren Leistungsmerkmale und Eigenschaften im Rechner verwaltet werden. Da auf diese Daten auch andere Bereiche, wie die Betriebsmittelkonstruktion oder die Layoutplanung, zugreifen, ist eine zentrale Datenhaltung vorzusehen. Die für die Greiferplanung relevanten Eigenschaften der Greifersysteme wurden untersucht und strukturiert. Sie können grob in organisatorische, technologische, Einsatzverhalten beschreibende, topologische, kinematische und geometrische Daten unterteilt werden (Abb. 51).

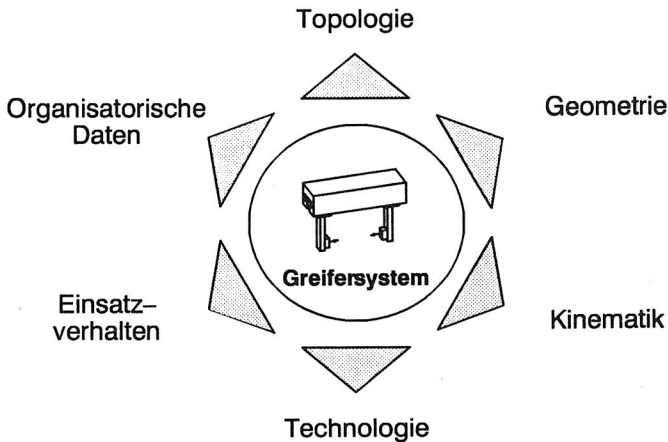


Abb. 51: Einteilung von Greifersystemdaten

6.2.1 Datenbank für Greifersysteme

Grundsätzlich können alle Greifersystemparameter mit einem relationalen Datenbanksystem verwaltet werden. Komplex strukturierte Daten, wie z.B. Geometriemodelle, bedingen aber lange Zugriffs- und Operationszeiten. Ein interaktiver Betrieb ist kaum möglich. Hochstrukturierte Zusammenhänge können in den flachen, ungeordneten Tupeln der Relationen nicht mit entsprechend hoher Lokalität abgebildet werden. Lokalität ist in diesem Zusammenhang die speicher- oder zugriffstechnische Nachbarschaft inhaltlich benachbarter oder verknüpfter Elemente. Für diese Problemstellungen existieren Datenbank-Ansätze für sogenannte "Non-Standardanwendungen". Derartige Systeme haben sich kommerziell noch nicht durchgesetzt. Ihnen wird aber in Zukunft im technisch-wissenschaftlichen Bereich große Bedeutung beigemessen.

Um die Leistungsmerkmale der speziellen unabhängigen Speichersysteme zu verbinden, werden Greiferdaten auf Datenbank-, Graphik- und Kinematikdateien sowie KEE-Wissensbasen verteilt. Die Datenhaltung in den unterschiedlichen Speichersystemen erfolgt zum Teil redundant; es existieren syntaktische und inhaltliche Abhängigkeiten. Auf mögliche Konfliktsituationen wird in Abb. 52 hingewiesen.

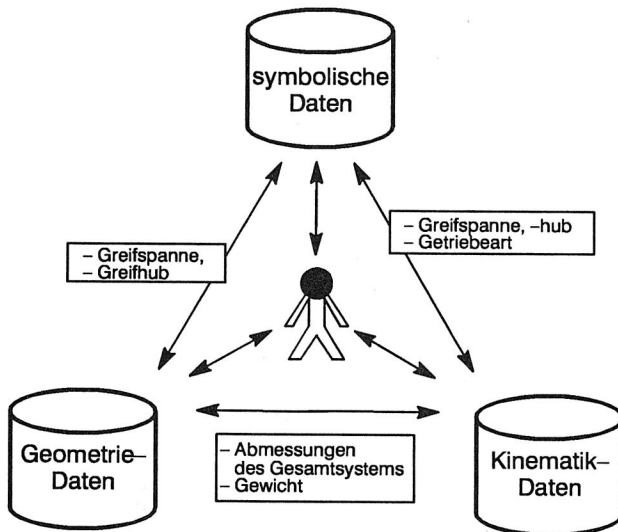


Abb. 52: Konsistenzprobleme bei einer verteilten Datenhaltung von Greifsystemparametern

Im weiteren wird auf das Konzept zur Speicherung derjenigen Informationen eingegangen, die mit der Datenbank **INGRES** verwaltet werden. Beim Entwurf des konzeptionellen Datenbank-Schemas wurde auf Flexibilität und Anpassungsfähigkeit geachtet. Die Planungswerkzeuge können über die realisierte Datenbank-Schnittstelle auf diese Daten zugreifen. Mit **INGRES** werden passive, technologische, organisatorische und das Einsatzverhalten beschreibende Parameter verwaltet. Zusätzlich wird die Aufbaustruktur der Greifsysteme aus Standardmodulen (z.B. Wirkeinrichtung, Greiffinger, Wechseleinrichtung) in die Datenbank aufgenommen. Um den Bezug zur konkreten Greifergeometrie und Kinematik herzustellen, werden Verweise auf die entsprechenden Modelldateien von **Sigraph-3D** bzw. **CARo** abgelegt. Um eine gewisse "vom System erzwungene" Datenkonsistenz zu gewährleisten, sollte die gesamte Datenhaltung über eine Verwaltungskomponente kontrolliert werden (Abb. 53).

Greifsysteme sind strukturell unterschiedlich und basieren somit auf unterschiedlichen Parametersätzen. Sie können durch vielfältige symbolische und numerische Parameter beschrieben werden. Sollen Parameter eines Greifsystems durch Attribute einer Relation dargestellt werden, sind alle möglichen Eigenschaften, die irgendwann

von Bedeutung sein können, zu deklarieren. Zusätzlich müssen für abgespeicherte Greifersystem- und Komponentenarten jeweils eigene Tabellen festgelegt werden. Parameter-Änderungen sind mit Schema-Änderungen verbunden. Die wissensbasierte, dialogorientierte Unterstützung der Greiferauswahl ermöglicht und erfordert die Definition von Greiferparametern durch den Planungsexperten. Bei inkrementeller Erweiterung vom ersten Prototypen bis zum einsatzfähigen wissensbasierten System und bei der Systempflege müßte damit das Datenbankschema mehrfach angepaßt werden. Deshalb sollten Erweiterungen und Anpassungen einfach und ohne großen Aufwand möglich sein.

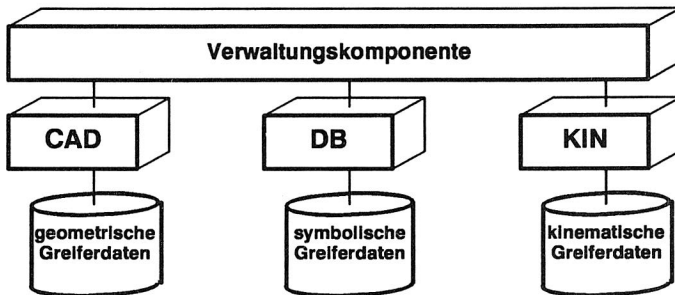


Abb. 53: Verwaltungskomponente zur Konsistenzüberwachung

Um diese Probleme zu umgehen, wird für einen Greifersystemparameter ein Tupel in der Relation „Greiferinformation“ angelegt (Abb. 54). Der Name des Parameters, der in diesem Tupel abgelegt werden soll, wird zum Wert des Attributs „Infotyp“. Der konkrete Wert des abzulegenden Parameters wird im Attribut „Information“ gespeichert. Im Attribut „Einheit“ kann eine Kennung der Einheit des Wertes (z.B. mm) hinterlegt werden. Mit dem Attribut „Wertebereich“ werden Integritätskontrollen unterstützt. Der Schlüssel wird aus den Attributen „Greifernummer“ und „Infotyp“ gebildet. Die „Greifernummer“ ist eine eindeutige Identitätsnummer, die den Greifer bezeichnet, zu der der jeweilige Datensatz gehört. Über diesen Schlüssel kann auf organisatorische Informationen wie Name, Lieferant, Preis, Bestellnummer und Kosten des Greifers zugegriffen werden. Organisatorische Daten sind schon in der zugrundeliegenden Montagedatenbank definiert und werden deshalb nicht weiter dargestellt (vergl. /40,

58/). Neben “Greiferinformation” ist auch eine entsprechende Relation “Komponenteninformation” vorgesehen.

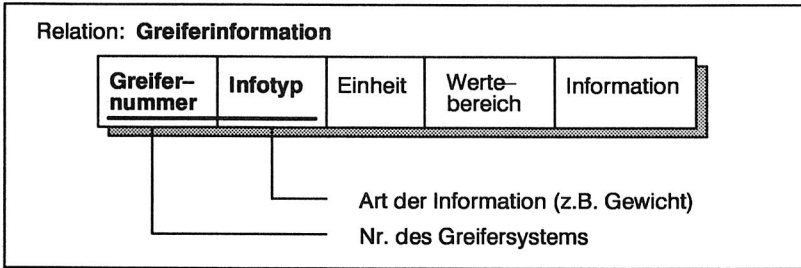


Abb. 54: Die Relation “Information” zur Speicherung von Greifersystemparametern

Im vorgeschlagenen Schema muß für jeden “technologischen Parameter” eines Greifers oder eines Bauteils ein ganzes Datenbanktupel aus fünf Attributwerten gespeichert werden. Außerdem ist die dabei entstehende Tabelle nicht weiter strukturiert. Diese Tabelle wird aus vielen Tupeln bestehen. Um ein effizientes Zugriffs- und Suchverhalten zu erreichen, sind Indexstrukturen und Anwenderprogramme vorgesehen.

Diese Nachteile werden aufgrund der hohen Flexibilität, die besonders bei der Entwicklung wissensbasierter Planungswerkzeuge wichtig ist, in Kauf genommen. Das Zusammenwirken der Datenbank mit den Planungswerkzeugen kann schon während der Entwicklung berücksichtigt und erprobt werden. Datenbankanfragen sind in den Greiferauswahlprozeß integriert.

Die Aufbau- oder Montagestruktur eines Greifersystems ist für die Konfiguration aus Komponenten und bei Änderungen von Bedeutung. Die Aufbaustruktur (Topologie der Standardkomponenten) wird in der Relation “Struktur” hinterlegt (Abb. 55).

Der Schlüssel dieser Relation setzt sich aus den Attributen “Greifernummer”, “Bauteilnummer_A”, “Bauteilnummer_B” und “Anschluß” zusammen. Die “Greifernummer” identifiziert eindeutig ein Greifersystem. Das Greifersystem besteht u.a. aus den Bauteilen mit den aufgeführten Bauteilnummern. Das Bauteil mit Schlüssel “Bauteilnummer_A” ist über eine Schnittstelle mit dem Bauteil “Bauteilnummer_B”

verbunden. Das Attribut “Anzahl” kennzeichnet die Anzahl der Bauteile mit Schlüssel “Bauteilnummer_B”, die in diese Verbindung eingehen. Die Verbindung selbst wird durch das Attribut “Anschluß” charakterisiert.

Relation: **Struktur**

Greifer-Nr.	Bauteil-Nr. A	Bauteil-Nr. B	Anschluß	Anzahl von Bauteil B
8999	1234	3333	DIN xyz	1
8999	3333	1000	DIN abc	1
8999	1000	0815	—	1
8999	0815	2468	DIN opq	1
8999	0815	8765	DIN opq	1
8999	8765	2573	DIN def	2

Greifer Nr. 8999

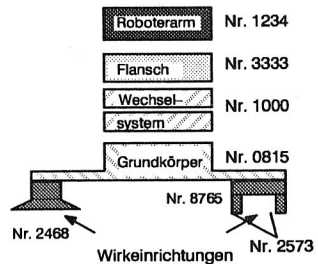


Abb. 55: Die Relation “Struktur” zur Darstellung des Aufbaus von Greifersystemen aus Standardkomponenten

6.2.2 Greiferdatenbasis aus CAD-Modellen

Zur interaktiven Überwachung möglicher Kollisionen wurden Greifersysteme geometrisch und kinematisch mit dem CAD-System modelliert (Abb. 56). Zu den geometrischen Greifermodellen wurden auch symbolische Parameter in die Greiferdatenbank aufgenommen. Bei dem Aufbau der Modelle wurde auf eine einheitliche Struktur geachtet. Bewegbare und greiftechnisch vergleichbare Teile wie z.B. der “erste” Greiffinger eines zwei Finger Parallelgreifers können mit einem definierten Namen identifiziert werden. Lage und Orientierung der Greiffinger zu den Bewegungsachsen wurden festgelegt.

Auf der Basis dieser Modellstrukturen (Abb. 56) wurden Prozeduren zur Simulation der Greiferbewegung im Volumenmodell für das CAD-System entwickelt. Die realisierten Prozeduren unterstützen das Öffnen und Schließen der Greiferfinger und die Feinpositionierung des Greifersystems am Handhabungsobjekt und sind den entsprechenden Greifermodellen der Greiferwissensbasis zugeordnet.

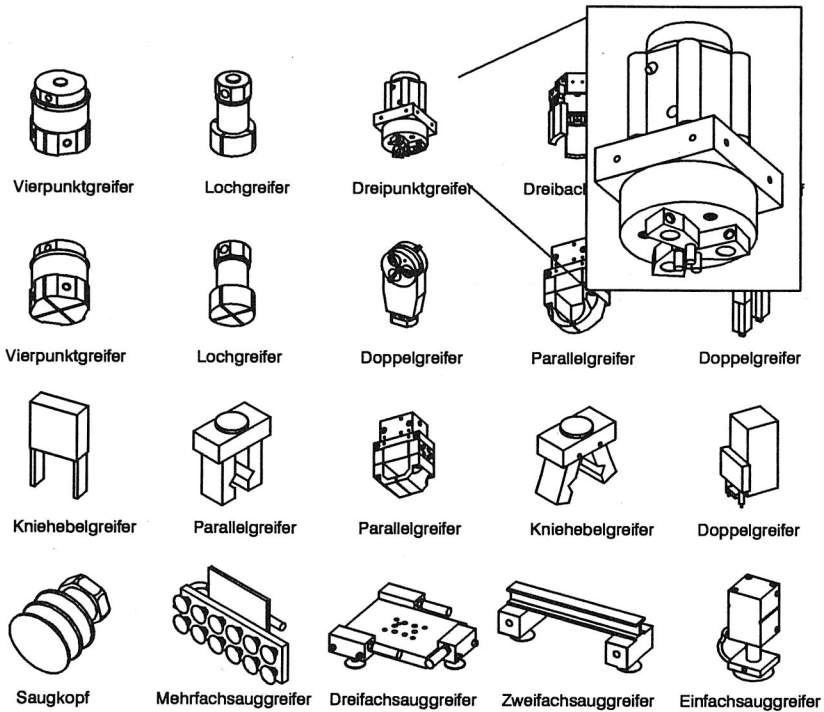


Abb. 56: Bibliothek aus CAD-Modellen von Greifersystemen

In Abb.57 sind graphische Seiteneffekte der Prozedur *schliesse_parallel!* und *schliesse_zirkular!* dargestellt, wie sie am CAD-System beobachtet werden können. Weiterhin sind Prozeduren zur Feinpositionierung des Greifersystems vorgesehen, die beispielsweise Befehle wie *greife_zylinder_von_oben!* und *greife_zylinder_von_der_seite!* repräsentieren.

Diese Befehle können mit Hilfe der Programmierwerkzeuge in **KEE** objektorientiert erweitert, kombiniert und über eine Benutzerschnittstelle aktiviert werden. Die von den Prozeduren erzeugten CAD-Befehle werden über die realisierte CAD-Schnittstelle übertragen. Aufgabe dieser Prozeduren ist es, die interaktive Positionierung eines Greifers am Handhabungsobjekt zu erleichtern. Damit werden graphisch-interaktive Kollisionsuntersuchungen und die graphisch-interaktive Definition von Greif-

situationen bei gegebenem Greifersystem und Handhabungsobjekt unterstützt. Die Verwendung koordinatenbasierter geometrischer Transformationen kann so eingeschränkt werden. Die Positionierung eines Greifers erfordert Kenngrößen des Handhabungsobjektes wie Hauptform, Hauptabmessung, Lage- und Orientierung. Diese Informationen werden vom CAD-System bzw. vom datenbankgestützten Produktmodell bereitgestellt.

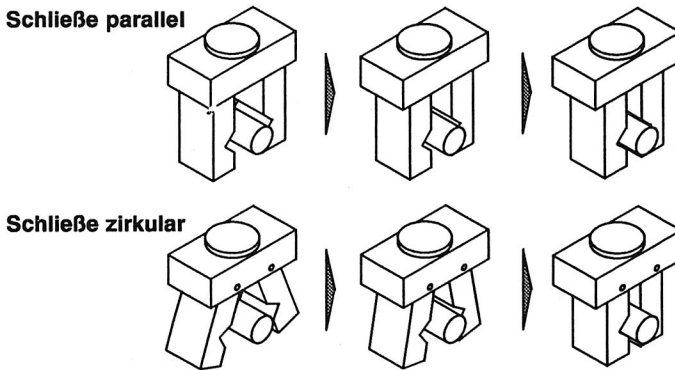


Abb. 57: *Prozeduren zur Simulation der Greifbewegung*

Ziel einer Griffflächenauswahl ist es, ein sicheres Greifen und einen übersichtlichen Handhabungsablauf zu gewährleisten. Neben der Größe und Lage der entstehenden Kontaktzonen auf den Griffflächen ist auch die Orientierung des Greifers zum Handhabungsobjekt und die Greiferanfahrtrichtung sowohl bei der Teileaufnahme als auch beim Fügevorgang zu beachten. Durch die Ausprägungen der verfügbaren Griff- und Wirkflächen werden die ursprünglich vorhandenen sechs Freiheitsgrade teilweise eingeschränkt.

In Abb. 58 sind für ein ebenes Griffflächenpaar mit zwei parallelen ebenen Wirkflächen und einem prismatischen Griff an einer zylindrischen Grifffläche die festgelegten und verfügbaren Freiheitsgrade dargestellt. Außerdem wurde die Klasse der bedingten und verfügbaren Freiheitsgrade eingeführt. Zu den verfügbaren Freiheitsgraden gehören im ersten Fall die translatorische Bewegungsrichtung parallel zu den Griffflächen und die

Rotation um die Schließrichtung der Greiferbacken. Festgelegt ist in diesem Fall die Translation in Backenschließrichtung, da der Greifer mittig zum Objekt platziert werden muß. Verfügbar ist im zweiten Fall lediglich die Translation in Richtung der Zylinderachse und die Rotation um dieselbe.

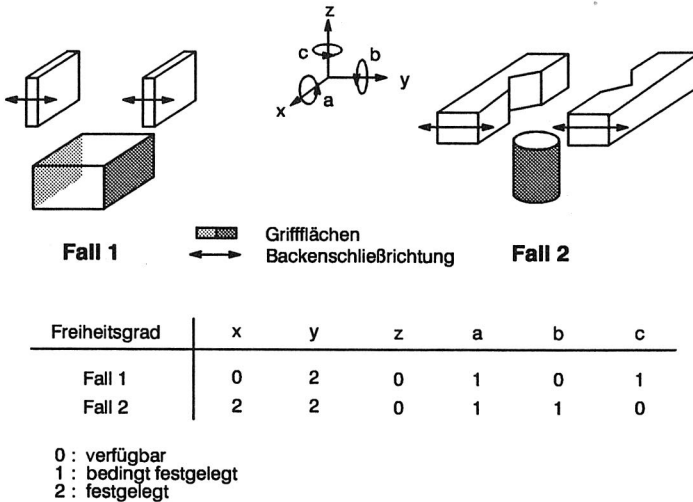


Abb. 58: Verfügbare und festgelegte Freiheitsgrade bei Wirk- und Griffflächenkombinationen mechanischer Greifer

Die übrigen Translationsrichtungen sind festgelegt, da der Greifer in beide Richtungen mittig platziert werden muß. Bei den Rotationen treten in beiden Fällen lediglich bedingte Festlegungen auf. Dies bedeutet, daß die Lage des Greifers in diese Bewegungsrichtungen zwar aufgrund der Forderung nach einem sauberen flächigen Kontakt zwischen Wirk- und Grifffläche im wesentlichen festgelegt ist, die Orientierung jedoch um 180° gedreht werden kann. Diese Zusammenhänge können in die Entwicklung von Prozeduren zur Positionierung des Greifers am Handhabungsobjekt eingehen.

6.3 Bereitstellung einer Testumgebung

Die Greiferplanung erfolgt im betrieblichen Kontext und geht von einer konkreten Handhabungsaufgabe aus. Da kein konkretes Auswahlssystem für einen speziellen Anwender entstehen soll, werden Möglichkeiten durch wissensbasierte Greiferplanungssysteme aufgezeigt und ihre Entwicklung dargestellt.

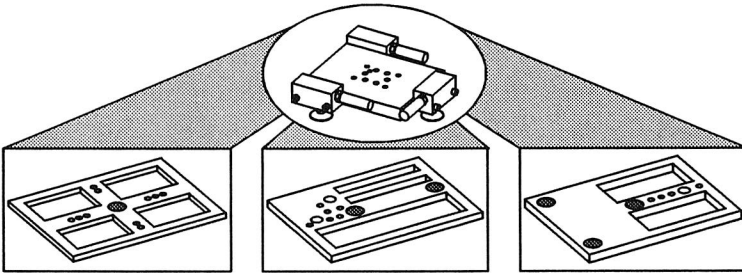


Abb. 59: Flachteile zur Untersuchung von Sauggreifersystemen

Konkrete Montageaufgaben sind aber als Diskussionsgrundlage erforderlich. Planungsentscheidungen der Experten können so besser nachvollzogen werden. Konkrete Montageaufgaben bilden außerdem eine Testumgebung, um die Funktion der Planungswerkzeuge, der zu realisierenden Verfahren und deren Integration in eine Verfahrenskette zu erproben und zu überprüfen.

Mehrere Handhabungs- und Montageaufgaben wurden ausgewählt, um konkrete Greiferplanungsprozesse durchzuführen und nachzuvollziehen. Für diese Aufgaben wurden Greiferlösungen unter definierten wirtschaftlichen und organisatorischen Randbedingungen erarbeitet und die ausgeführten Entscheidungsprozesse zunächst schriftlich festgehalten. Anschließend konnten daraus konkrete Planungsabläufe abgeleitet und formale Wissens Elemente erarbeitet werden.

Grundlage einer Aufgabenstellung sind Handhabungsobjekte bzw. Produkte, die montiert werden sollen. Diese liegen im Rahmen einer rechnergestützten Montageplanung zunächst als CAD-Produktmodelle vor. Dementsprechend wurden CAD-Produktmodelle für die Beispielaufgaben entwickelt.

Die ausgewählten und zu untersuchenden Objekte decken hinsichtlich wesentlicher Einflußgrößen der Greifergestaltung – nämlich Abmessung, Form, Gewicht und Griffflächen – eine gewisse Bandbreite ab. Flachteile unterschiedlicher Geometrie dienen speziell zur Untersuchung der Entscheidungsprozesse bei Auswahl und Einsatz von Sauggreifersystemen (Abb. 59).

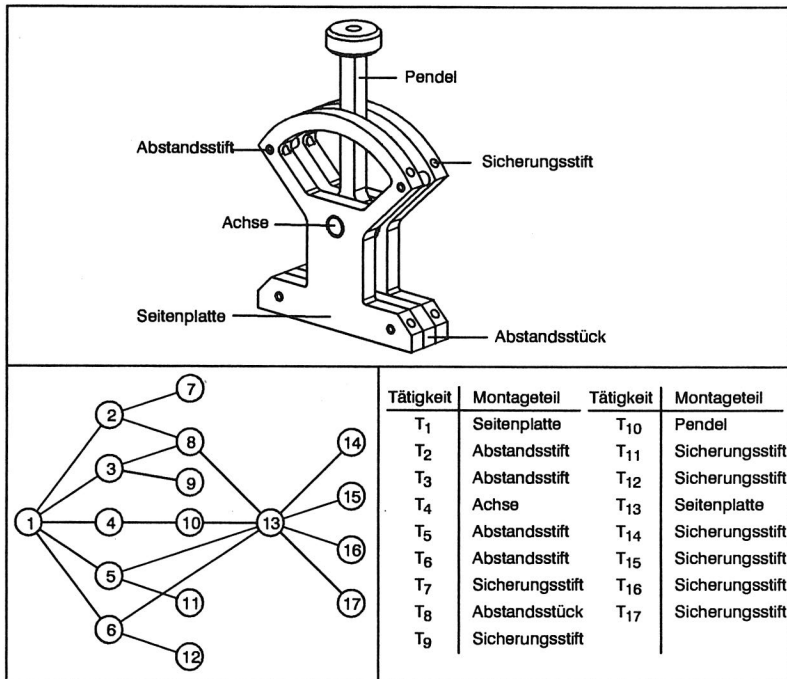


Abb. 60: Cranfield Montage-Benchmark mit Vorranggraph

Für ausgewählte Sauggreifersysteme werden konkrete Verfahren zur Ermittlung von Kontaktzonen und Kräftenmodelle erarbeitet und implementiert. Die realisierte Verfahrenskette generiert daraus konkrete Bewegungsprogramme zur flexiblen Handhabung dieser Flachteile. Der Planer überprüft die Ergebnisse mit dem

Simulationssystem **CARo** bevor sie in der Roboterzelle ausgeführt werden. Um den Planungsablauf bzw. die Planungsergebnisse insgesamt zu überprüfen, wurde eine reale Roboterzelle aufgebaut und in Betrieb genommen (siehe Abb. 16).

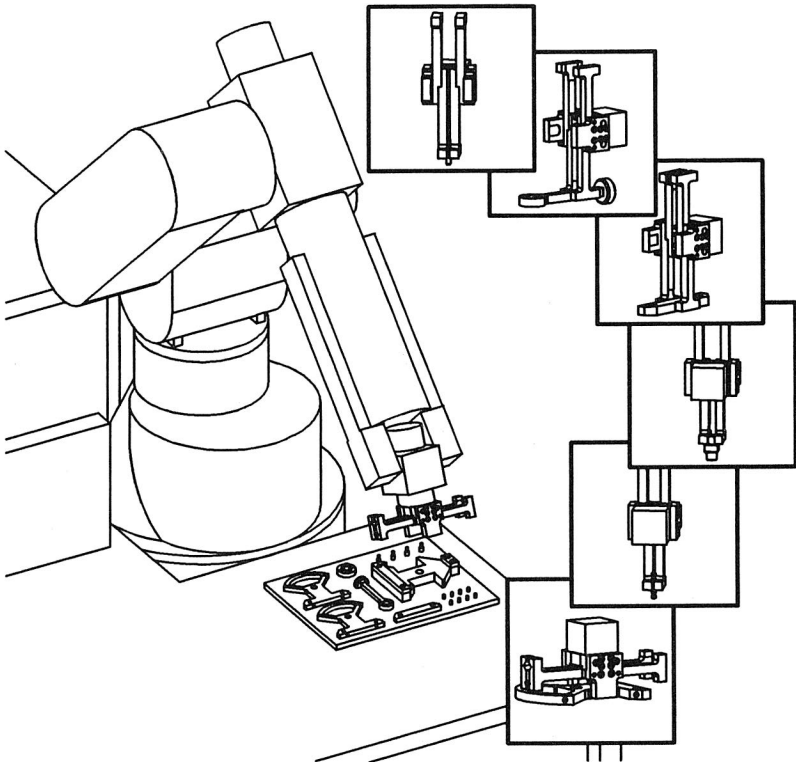


Abb. 61: CAD-gestützte Greiferplanung für den Cranfield Montage-Benchmark

Als weitere Handhabungsaufgabe ist der "Cranfield Montage-Benchmark" /83/ vorgesehen, der aus sechs verschiedenen und insgesamt 17 Teilen besteht, die auf einer Grundplatte positioniert sind. Dieser hat vor allem den Vorteil, daß die

Teilebereitstellung und der Montageort definiert sind (Abb. 60). Für den Benchmark wurden zur Wissensakquisition eine Greiferplanung durchgeführt, der entwickelte Greifer realisiert und eine reale Montagezelle zu Überprüfung der Ergebnisse in Betrieb genommen (Abb. 61).

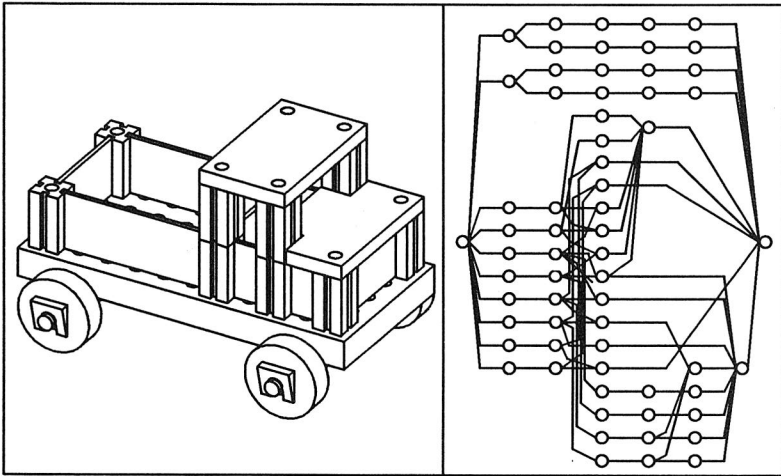


Abb. 62: Modellprodukt zur greiftechnischen Strukturplanung mit Vorranggraph

Modellprodukte in unterschiedlichen Varianten, aus 11 verschiedenen Einzelteilen (Beispiel Abb. 62) sind insbesondere für die Untersuchung der Strukturplanung unter Berücksichtigung greiftechnischer Gesichtspunkte konzipiert worden. Die quader- und plattenförmigen sowie die unterschiedlichen zylindrischen Elemente und der Keil bieten eine gewisse Variationsbreite für die Greiferauswahl-Problematik.

Neben diesen modellhaften Produkten wurden die Planungsvorgänge auch anhand industrieller Produkte entwickelt und überprüft. Dazu diente die Leiterplattenbestückung sowie die Montage von Schaltern (Abb. 63), Elektromotoren und Kleingetrieben. Neben den CAD-Produktmodelle und Vorranggraphen wurden dazu auch weitere Randbedingungen, wie Stückzahlen, Lebensdauer und Taktzeiten erfaßt.

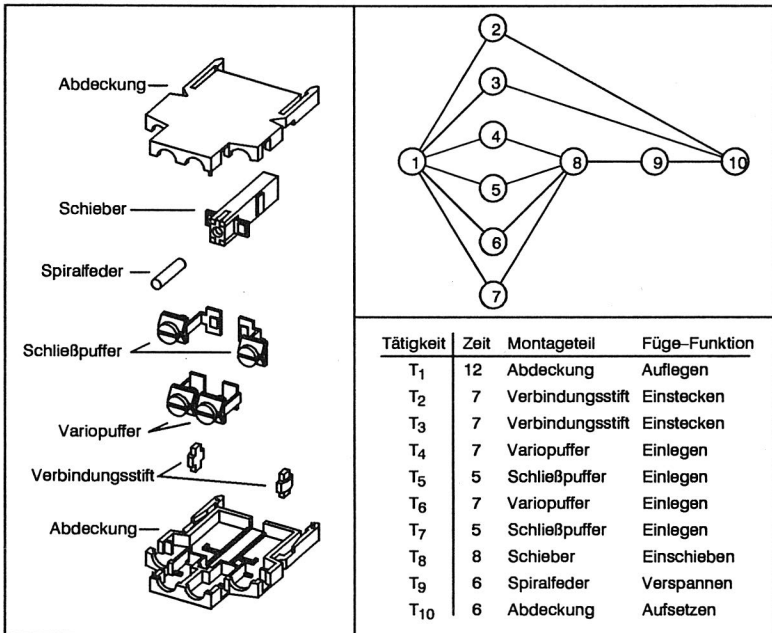


Abb. 63: Schaltermontage mit Vorranggraph

7. Greiftechnische Produktanalyse

Bei der greiftechnischen Produktanalyse werden erste alternative Greifergrobkonzepte für die jeweiligen Teilverrichtungen bzw. Handhabungsobjekte entwickelt. Dazu werden Parameter, die im Produktmodell rechnergestützt verwaltet werden oder sich ableiten lassen, integriert (Abb. 64). Bei der Auslegung und Auswahl von Greifersystemen sind u.a. die möglichen Griffflächen am Handhabungsobjekt und deren Parameter zu beachten.

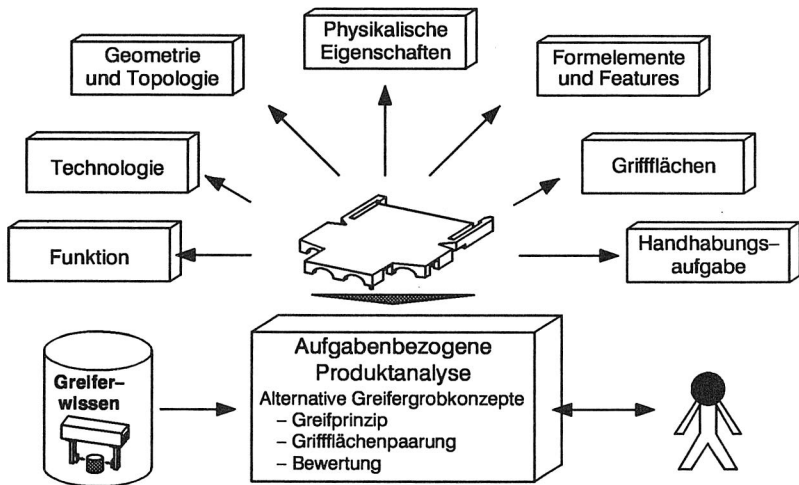


Abb. 64: Greiftechnische Produktanalyse

Griffflächen können dazu interaktiv am CAD-System definiert und visualisiert werden. Dabei erfolgt eine Zuordnung assoziativer Information zu den geometrischen oder topologischen Elementen des Handhabungsobjekts. Die dabei festlegbaren Griffflächen sind aber auf vorhandene geometrische oder topologische Elemente des Produktmodells beschränkt. Eine weitergehende Möglichkeit ist die interaktive Ergänzung des geometrischen Produktmodells um explizit definierte Griffflächen (im 3D Griffflächenkörper) als eigenständige, geometrische Strukturen.

Griffflächen können problemunabhängig definiert werden. Es lassen sich aber auch Vorgangsspezifische Restriktionen formulieren:

- “Grifffläche für den Einsetzvorgang” und
- “Grifffläche für den Meßvorgang”.

Diese Charakterisierung des Planungskontextes ist insbesondere für die Wiederverwendung der Planungsergebnisse von Bedeutung. In Abb. 65 sind Wechselwirkungen zwischen den Produktmodellen der Konstruktion, der Fertigungs- und der Montageplanung dargestellt.

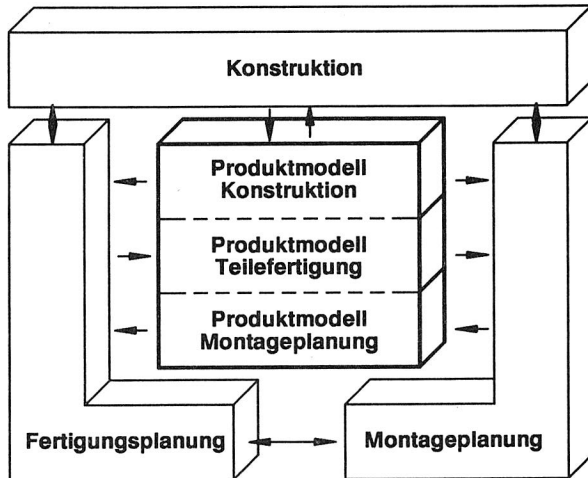


Abb. 65: Wechselwirkungen der Produktmodelle aus Konstruktion, Fertigungs- und Montageplanung

7.1 Features zur Greiferplanung

Eine einheitliche Definition des Begriffs *Fertigungsfeature* gibt es derzeit noch nicht. Man versteht beispielsweise darunter die für die Fertigung relevanten geometrischen Bereiche eines Werkstücks /84/ oder die Menge miteinander verknüpfter Flächen, die zu

einem bestimmten Fertigungsprozeß gehören /85/. Sie werden auch als informationstechnische Objekte bezeichnet, denen statische, relationale und algorithmische Attribute zugeordnet werden können /86/. Statische Attribute enthalten feste Daten. Durch relationale Attribute werden Beziehungen zwischen Features abgebildet. Regeln oder Metaregeln geben den geometrischen Bereichen ein spezifisches Eigenverhalten /86/. In /87/ werden *Fertigungsfeatures* als erfolgversprechender Ansatz zur Gewinnung prozeßrelevanter Produktdaten bezeichnet.

Für die Teilefertigung existieren fortgeschrittene Methoden zur automatischen Ableitung der Fertigungsverfahren, Fertigungsreihenfolgen und Steuerprogramme für Werkzeugmaschinen aus den CAD-gestützten Produktmodellen der Konstruktion. Kommerzielle rechnergestützte Prozeßplanungssysteme benutzen bereits *Fertigungsfeatures*. Deren Ableitung erfordert aber nach wie vor das aktive Eingreifen des Bedieners. In integrierten CAD/CAM Systemen sollte dieser Dialog durch entsprechende Verfahren reduziert werden; die im Geometriemodell enthaltenen Informationen sollten nach Möglichkeit ohne Benutzerinterpretation extrahiert werden können /88/.

Fertigungsfeatures lassen sich im wesentlichen aus der Geometrie eines Produkts ableiten. Beispiele für derartige Features sind *Bohrung*, *Nut* und *Tasche*. Neben *Fertigungsfeatures* werden aber auch funktions- bzw. konstruktionsorientierte Features verwendet. Diese Featurearten stehen oft in Beziehung zueinander, müssen jedoch nicht übereinstimmen /89/.

Für die Montageplanung stehen keine vergleichbaren Verfahren und Methoden zur Verfügung. Beispielsweise wird die Greiferplanung, wie die Fertigungsplanung, wesentlich durch die Objektgeometrie und -form sowie vorhandene Formelemente beeinflusst. Deshalb ist es sinnvoll Produktmodelle und automatisierte Arbeitsplanungsverfahren der Teilefertigung und insbesondere *Fertigungsfeatures* dahingehend zu untersuchen, inwieweit sie für die Greiferplanung einsetzbar und erweiterbar sind.

7.2 Produktmodell für die Greiferplanung

Die Greiferplanung benötigt u.a. Informationen über die geometrische Gestalt des zu handhabenden Objekts. Diese werden im Produktmodell für die Greiferplanung bereitgestellt. Greiftechnisch relevante geometrische Bereiche am Werkstück können z.B. *parallele Innen- und Außengriffflächen*, *zylindrische Mantelflächen* und *ebene*

Oberflächen sein. Diesen Bereichen lassen sich Anforderungen an Wirkeinrichtungen oder geeignete Greiferkonzepte zuordnen. Eine automatische oder teilautomatische Ableitung dieser Features kann sowohl aus dem Produktmodell der Konstruktion als auch aus dem Produktmodell der Fertigungsplanung erfolgen.

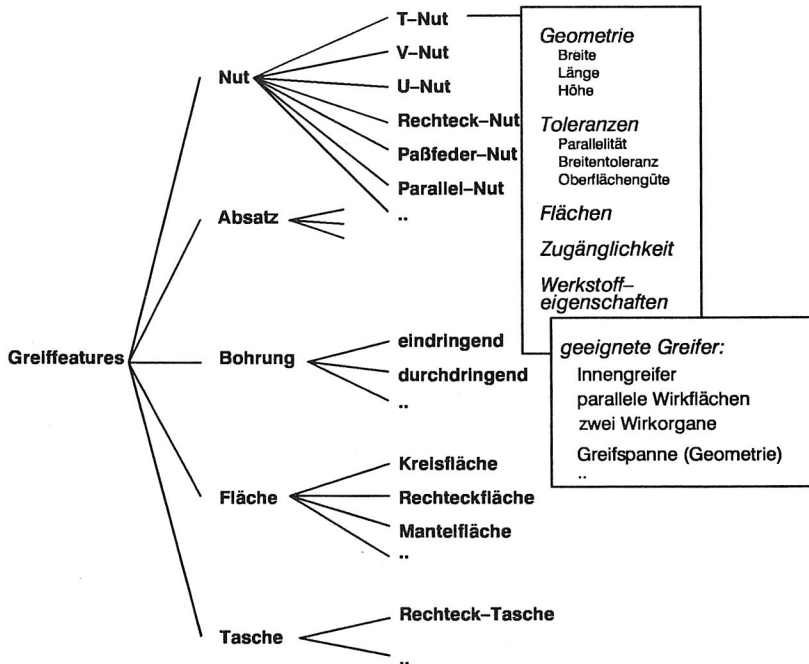


Abb. 66: Baumstruktur von Greiffeatures

Für die Greiferplanung werden Features mit sekundärer funktionsorientierter Bedeutung gefordert. Die Greifbarkeit eines Werkstücks ist keine primäre Funktion des späteren Produkts, sondern eine Hilfsfunktion, die kurzfristig zur Handhabung und Montage benötigt wird. *Greiffeatures* sind geometrische Bereiche, denen Greifprozesse mit bestimmten Greifern oder Greiferklassen zugeordnet werden (Abb. 66). Dementsprechend ist die Menge der *Greiffeatures*, die einem Handhabungsobjekt zugeordnet werden, von den zu betrachtenden Greifersystemen oder -konzepten abhängig. Ein Unterschied von *Greiffeatures* gegenüber *Fertigungsfeatures* ist, daß Teile

der Objektoberfläche (*transparente Flächen*) oder Kombinationen mehrere *Fertigungsfeatures* sinnvoll als *Greiffeatures* definiert werden können.

Bei der Definition und Suche nach *Greiffeatures* an einem Handhabungsobjekt kann wie folgt vorgegangen werden: Jedem verfügbaren Greiferkonzept werden bestimmte Klassen geometrischer Bereiche zugeordnet und als *Greiffeature* bezeichnet. Ein Handhabungsobjekt wird auf die Existenz dieser *Greiffeatures* untersucht. Besitzt ein Objekt ein oder mehrere Features, besteht die Möglichkeit, daß es mit den zugeordneten Greiferkonzepten gegriffen werden kann. Je komplexer die Anordnung der Wirkflächen eines Greiferkonzeptes ist, um so komplexer sind die zugeordneten *Greiffeatures*.

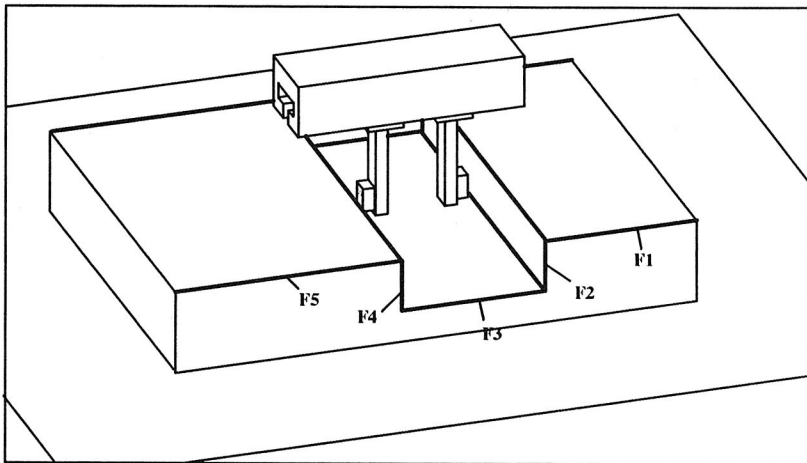


Abb. 67: Exemplarisches Greiffeature

Durch einen Innengreifer mit parallelen, gegenüberliegenden Wirkflächen können beispielsweise Objekte gegriffen werden, die eine Nut besitzen. Diese Nut muß allerdings innerhalb bestimmter, vorgegebener Abmessungen liegen. Zusätzlich muß das Handhabungsobjekt weitere Restriktionen, die z.B. das Gewicht oder Hauptabmessungen betreffen, erfüllen. Um zu entscheiden, ob ein Objekt mit einem Greifer gegriffen werden kann, wird es u.a. auf die Existenz der zugeordneten *Greiffeatures* untersucht. Die Flächen F1, F2, F3, F4 und F5 in Abb. 67 bilden eine Nut.

Liegen die Abmessungen der Nut innerhalb des geforderten Bereiches, wird ein entsprechendes *Greiffeature* erkannt.

Aus *Greiffeatures* lassen sich neben Informationen über mögliche Greiferkonzepte, Backenformen auch zum Teil Informationen über Lage und Orientierung des Greifersystems relativ zum Handhabungsobjekt ableiten. Außerdem werden Aussagen über Stabilität eines möglichen Griffs, Zugänglichkeit (vergl. /85/) und fertigungsgerechte Konstruktion gewonnen. Features eignen sich generell für Aufgaben, die wesentlich von der Teileform und -geometrie abhängen, wie z.B. auch zur Planung der Teilebereitstellung.

7.3 Ableitung und Übertragung von *Greiffeatures*

Eine graphisch interaktive Definition von *Greiffeatures* sollte, um den Dialogaufwand zu begrenzen, durch automatisierte Verfahren ergänzt werden. Automatisierte Verfahren, die Features aus Geometriemodellen ableiten, lassen sich grundsätzlich auch für *Greiffeatures* anwenden. Bekannte Verfahren sind die *Volumenzerlegung durch Hüllbildung* /89/, die *Verwendung von Hauptachsen* (principal axes) /90/, das *Attributed-Adjacency-Graph-Konzept* /91/ und *Flächenmuster* /85/. Eine zusätzliche interaktive Kontrolle der Ergebnisse ist aber in der Regel erforderlich. *Greiffeatures* können direkt aus dem geometrischen Produktmodell, aber auch aus *Fertigungs-*, *Konstruktions-* und *Funktionsfeatures* abgeleitet werden.

Im Rahmen einer rechnerintegrierten Produktion werden unterschiedliche Produktmodelle erarbeitet, die von weiteren Planungswerkzeugen übernommen und verarbeitet werden müssen. Der Austausch der Modelldaten spielt dabei eine zentrale Rolle. Die zur Realisierung eines effizienten Austausches notwendigen Vereinbarungen zwischen verschiedenen Systemen werden als Schnittstelle bezeichnet /88/. Der Austausch von Produktmodellen ist sowohl unternehmensintern wie unternehmensextern von Bedeutung. Interner Datenaustausch zielt auf die informationstechnische Verknüpfung und Integration der Bereiche Konstruktion, Arbeitsplanung, Produktionsplanung und -steuerung, Fertigung, Montage sowie Qualitätssicherung. Der externe Datenaustausch dient der Übertragung zwischen Hersteller und Zulieferer /92/.

Die *VDA-Flächenschnittstelle (VDA-FS)* und *Initial Graphics Exchange Specification (IGES)* sind nicht zur Übertragung von *Greiffeatures* geeignet. Die sich in Entwicklung

befindliche Schnittstelle *Standard for the Exchange of Product Model Data (STEP)* /92, 93/ eignet sich dagegen auch für *Greiffeatures*. Im *STEP Partialmodell Form Features* können Teilbereiche eines Objektes aus einer bestimmten, z.B. fertigungstechnischen Sicht durch die Beschreibung eines Gestaltmusters oder einer Vorschrift zur Erzeugung eines Formelements definiert werden. Aus greiftechnischer Sicht können Teilbereiche durch mögliche Greifersysteme und –konzepte, Zugänglichkeit und Stabilität charakterisiert werden.

8. Wissensbasierte Strukturplanung von Montagesystemen

Durch Arbeitsteilung kann die Bearbeitung eines Produktes in den verschiedenen Stadien des Zusammenbaus gleichzeitig an verschiedenen Arbeitsstationen durchgeführt werden. Eine günstige Verteilung der Arbeitsinhalte soll dabei eine möglichst hohe und gleichmäßige Auslastung bewirken und den Kapitaleinsatz minimieren. Bei der Zuordnung der Tätigkeiten zu einzelnen Arbeitsstationen und bei der Festlegung einer endgültigen Montagesequenz müssen Reihenfolgebeziehungen, Ausführungszeiten sowie technologische, wirtschaftliche und organisatorische Restriktionen berücksichtigt werden. Bei der Planung automatisierter Montagestationen werden durch die Stationsbildung Flexibilitätsanforderungen u.a. an das Greifersystem festgelegt. Deshalb sollte schon bei der Strukturplanung Greiferwissen berücksichtigt werden (Abb. 68).

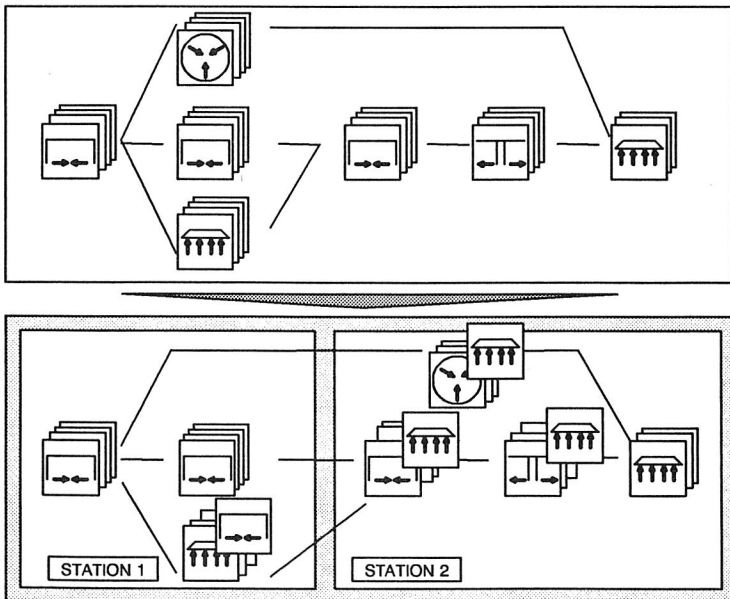


Abb. 68: Greifertechnische Strukturplanung von Montagesystemen

8.1 Konventionelle Abtaktungsverfahren

Die Strukturplanung kann, z.B. basierend auf Montage-Vorranggraphen und Ausführungszeiten, systematisch durchgeführt werden /27/. Vorrangbeziehungen legen zulässige Montagereihenfolgen fest (Abb. 68). Unter Abtaktung wird ein Rechenvorgang verstanden, der die zur Montage eines Produktes notwendigen Tätigkeiten entsprechenden Arbeitsstationen zuordnet. Dabei steht die gleichmäßige Auslastung der Stationen bzw. eine Minimierung der Gesamtverlustzeit unter gegebenen Grenzwerten und Randbedingungen im Vordergrund. Die Auslastung einer Station erfüllt nicht nur den Zweck, mit geringeren Verlustzeiten zu produzieren, sondern kann auch in der teilmanuellen Montage die Entlohnung beeinflussen /27/. Es existieren verschiedene Methoden, die sich grob in empirische, heuristische und exakte Verfahren untergliedern lassen (Abb. 69) /27, 20/. In /20, 94/ werden heuristische Verfahren verglichen. Nolting /27/ schlägt aufgrund der gestiegenen Rechnerleistung die Verwendung exakter Verfahren vor.

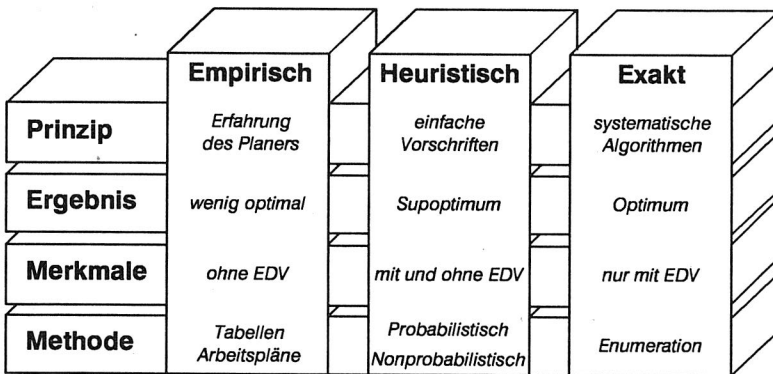


Abb. 69: Einteilung der Abtaktungsverfahren nach /27/

Empirische Verfahren basieren auf bereichsabhängigen Erfahrungswerten. Deshalb sind konkrete empirische Verfahren als allgemeine Hilfsmittel nicht anwendbar. Wird ausschließlich die Gesamtverlustzeit beachtet, liefern empirische Verfahren wenig optimale Ergebnisse. Sie können aber neben reinen Zeitbedingungen auch andere,

weniger allgemein und exakt faßbare Zusammenhänge, wie z.B. technologische Verträglichkeiten oder betriebsspezifische Automatisierungskonzepte, berücksichtigten. Durch Wissensverarbeitung lassen sich auch empirische Verfahren direkt mit einem Rechner unterstützen.

Bei heuristischen Verfahren wird meist in zwei Schritten vorgegangen. Im ersten Schritt wird einer Tätigkeit nach einem fest definierten Schema ein Wert zugewiesen. Dieser Wert entscheidet im zweiten Schritt über die Zuweisung der Tätigkeit an eine Station. Beim häufig verwendeten Rangwertverfahren /27, 20, 95/ wird durch den Rangwert eine lineare Ordnung zwischen den Tätigkeiten hergestellt. Anhand dieser Ordnung können den Stationen die entsprechenden Tätigkeiten der Reihe nach zugeordnet werden.

Exakte Verfahren minimieren die Gesamtverlustzeit. Für große Graphen bedeutet die vollständige Enumeration und Bewertung aller möglichen Pfade einen erheblichen Aufwand. Das in /27/ dargestellte exakte Verfahren ist ausschließlich zeitbasiert. Restriktionen, die nicht in Vorrangbeziehungen formulierbar sind, werden nicht berücksichtigt.

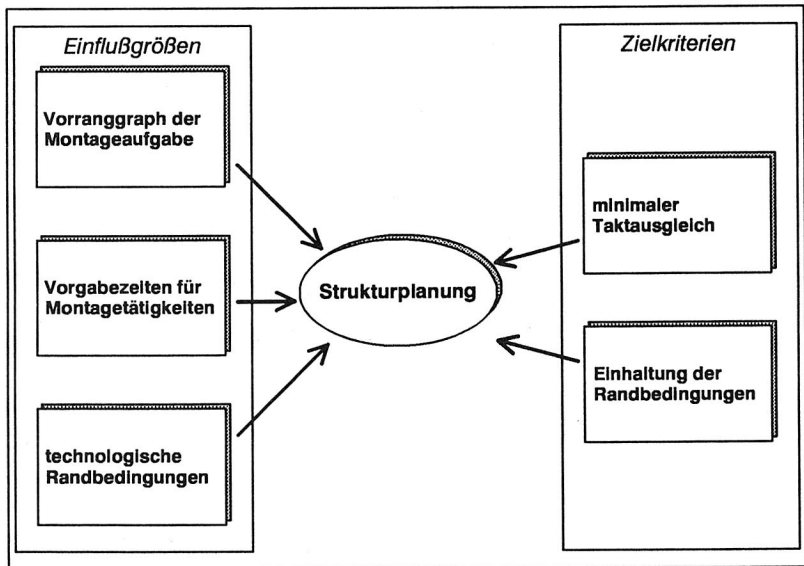


Abb. 70: Einflussgrößen und Zielkriterien bei der Strukturplanung

Zu dieser Problemstellung wurden auch in den letzten Jahren mehrere rechnergestützte Planungshilfsmittel realisiert, wie z.B. /17, 27/. Die meisten Werkzeuge beschränken sich jedoch darauf, die bereits in frühen Jahren entwickelten heuristischen Verfahren, wie z.B. /97, 97, 98, 99/, unter den Aspekten Rechenzeit, Speicherbedarf und Benutzerfreundlichkeit zu verbessern. Die Strukturplanung wird dabei nur durch Vorrangbeziehungen und Planzeiten beeinflusst. Weitere Randbedingungen bleiben unberücksichtigt. Diese Ansätze sind für eine Entwicklung technologisch und wirtschaftlich sinnvoller Montagestrukturen alleine nicht ausreichend. Ein einfaches Beispiel dafür sind Montagetätigkeiten, die verschiedene Handhabungsgeräte erfordern. Bei der Abtaktung sollten diese Tätigkeiten verschiedenen Stationen zugeordnet werden. Analog dazu kann es sinnvoll sein, zwei Tätigkeiten der selben Station zuzuteilen, da sie das gleiche Betriebsmittel erfordern. Sollen in einer flexiblen Montagezelle von einem Roboter mehrere Handhabungsoperationen sequentiell ausgeführt werden, dann sind deren "greiftechnische Ähnlichkeit" und "Verträglichkeit" von entscheidender Bedeutung.

Bei der Planung automatisierter und manueller Montagesysteme müssen demnach auch technologische, organisatorische und ergonomische Restriktionen beachtet werden, die sich nicht in Vorrangbeziehungen ausdrücken lassen (Abb. 70). Auf Vorranggraphen basierende, verlustzeitoptimierende Abtaktungsverfahren leisten dies nicht.

8.2 Verlauf der Strukturplanung

Zur Unterstützung der Strukturplanung als Bestandteil der problemspezifischen Verfahrenskette aus Abb. 50 wurde ein wissensbasiertes, dialogorientiertes Planungswerkzeug konzipiert und realisiert. Das Werkzeug unterstützt die Erarbeitung einer Stationsaufteilung, die auch stations- und systembezogene Restriktionen berücksichtigt. Basierend auf einem erweiterten Vorranggraphen generiert der Planungsmechanismus automatisiert eine Montagesystemstruktur. Der Planer greift dabei interaktiv korrigierend ein, um auch bei unvollständiger Spezifikation der Randbedingungen, Restriktionen und Strategien Ergebnisse zu erzielen. Daraus ergibt sich die zusätzliche Aufgabenstellung für den Planungsexperten, Randbedingungen, Entscheidungskriterien und Planungsstrategien so weit als möglich zu strukturieren und rechnergestützt zu verwalten.

8.2.1 Problemlösungskonzept und Entwurfsentscheidungen

Die bekannten rechnergestützten Verfahren zur Verlustzeitoptimierung sind leistungsfähige Hilfsmittel, berücksichtigen aber keine zellen- und systembezogenen Restriktionen. Diese Restriktionen lassen sich nicht durch Vorrangbeziehungen ausdrücken, basieren auf Erfahrungswissen und werden vom Planer mit Erfahrungswissen aufgelöst. Ein Strukturplanungswerkzeug sollte beispielsweise folgende informell beschriebene Bedingung berücksichtigen:

“In einer automatisierten Montagezelle sollten die Handhabungsobjekte nach Möglichkeit ein ähnliches Gewicht aufweisen”,

Für die Konzeption eines Planungswerkzeuges wird deshalb ein leistungsfähiges systematisches Abtaktungsverfahren (heuristisch oder exakte) mit empirischen Methoden angereichert. Dazu erscheinen folgende Ansätze denkbar:

- Die systematische Suche nach einer optimalen Lösung unter gleichzeitiger Berücksichtigung zellen- und systembezogener Restriktionen.
- Die systematische Suche nach einer zeitoptimierten Lösung mit einem konventionellen Abtaktungsverfahren und die anschließende Berücksichtigung der zellen- und systembezogenen Restriktionen.

Die erste Alternative erfordert einen Suchprozeß unter Einhaltung aller Restriktionen. Dazu ist ein komplexes Verfahren erforderlich, dessen Verlauf vom Planer nicht mehr überschaut werden kann. Eine derartige Strategie kann deshalb nicht vom Planer beeinflußt werden.

Zusätzliche Restriktionen erfordern eine vollständig neue Suche. Dadurch können sprunghafte Änderungen der ermittelten Montagestruktur auftreten. Im Rahmen dieser Arbeit wurde die zweite Methode angewandt, die auf einer als *“buck fixing”* bekannten Strategie /100/ basiert.

Es wird davon ausgegangen, daß mit einem systematischen konventionellen Abtaktungsverfahren unter ausschließlicher Berücksichtigung von Vorrangbeziehungen und Ausführungszeiten relativ brauchbar aufgeteilte Montagestationen gefunden werden können. Die ermittelten Stationsaufteilungen beinhalten aber noch Verstöße gegen zellen- und systembezogene Restriktionen (*“bucks”*). Diese werden in einer nachfolgenden Optimierungsphase beseitigt.

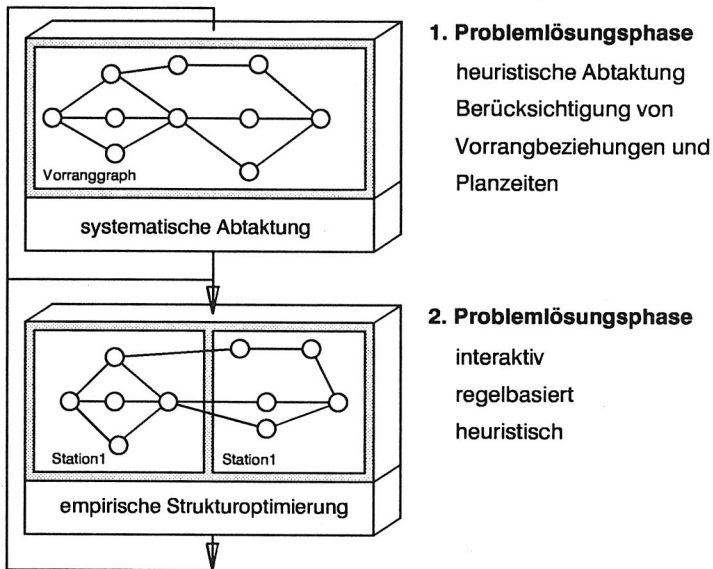


Abb. 71: Problemlösungsphasen des realisierten Planungswerkzeuges

Die Optimierung kann im realisierten Planungswerkzeug interaktiv, durch empirische Regeln und durch ein zufallsgesteuertes Suchverfahren kontrolliert werden. Die Kontrollverfahren lassen sich auch kombinieren. Das Planungsproblem wird somit in eine systematische und eine empirische Phase untergliedert (Abb. 71). In der ersten Planungsphase, in der aufgrund von Vorrangbeziehungen und Planzeiten eine erste Stationsaufteilung gefunden wird, kommt die Leistungsfähigkeit des Rechners zur Optimierung von Enumerationsproblemen zum Tragen.

In der zweiten Planungsphase können empirisches Vorgehen durch den Rechner simuliert und die Problemlösungsfähigkeit des Planers genutzt werden. Dabei werden schrittweise Fehler der vorläufigen Stationszuteilung (erste Phase) beseitigt und so eine optimierte Zuteilung gefunden. Als eine quantitative Kenn- und Richtgröße zur Bewertung des erzielten Ergebnisses kann die Gesamtverlustzeit dienen, die in der ersten Planungsphase ohne weitere Restriktionen ermittelt wurde.

8.2.2 Dialogfunktionen und Planungsverlauf

Das Planungswerkzeug stellt dem Anwender Dialogfunktionen zur Verfügung. Diese können grob zwei Dialogphasen zugeordnet werden (Abb. 72). In einer ersten Dialogphase werden die Grunddaten, die zur Strukturplanung erforderlich sind, interaktiv definiert. Die Daten können aber auch ganz oder teilweise aus der Montagedatenbank /40/ eingelesen werden. Dabei handelt es sich um einen erweiterten Vorranggraphen der Montageaufgabe (Abb. 73).

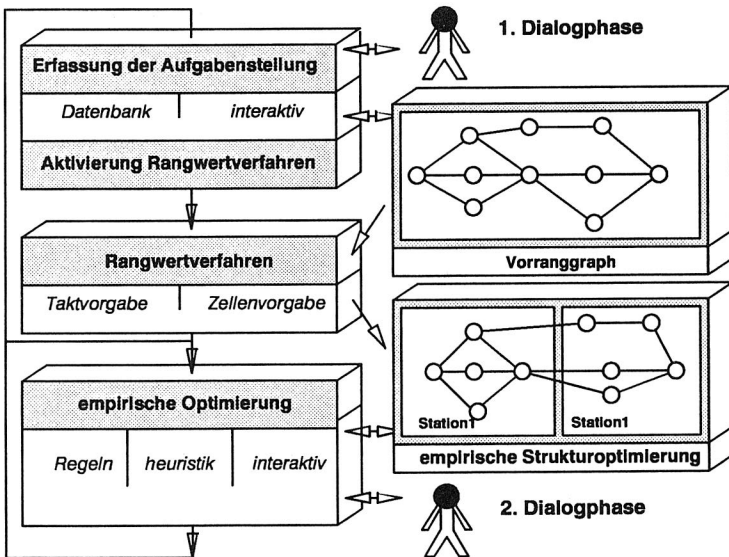


Abb. 72: Dialogphasen bei der Strukturplanung

Jedem Tätigkeitsknoten des Vorranggraphen sollte eine Planzeit zugeordnet sein. Zusätzlich können Tätigkeitsknoten durch weitere Attribute näher beschrieben werden. Beispiele solcher Attribute sind Montagefunktion, Zuführteil, Basisteil, Handhabungsgewicht und mögliche Greifprinzipien mit entsprechenden Parametern. Weiterhin können Restriktionen interaktiv eingegeben oder eingelesen werden. Bei einer rein zeitbasierten Abtaktung sind nur die Ausführungszeiten, Tätigkeitsknoten und Vorrangbeziehungen erforderlich. Durch die Aktivierung einer Funktion zur

Abtaktung nach der Rangwertregel werden erste Montagestationen gebildet. Gleichzeitig erfolgt ein Übergang in die zweite Dialogphase der empirischen Strukturoptimierung. Der Benutzer kann hier interaktiv Montagetätigkeiten Stationen zuordnen sowie Attribute und Bedingungen formulieren oder einlesen. Die Auslastung der Stationen, die Gesamtverlustzeit, die Verstöße gegen Bedingungen, eine Gesamtbewertung der aktuellen Situation und symbolische sowie unterschiedliche graphische Repräsentationen der Attribute und Attributwerte können angezeigt werden. Dem Bediener stehen Menue-Funktionen zur Aktivierung zufallsgesteuerter, regelbasierter oder gemischter Optimierungsverfahren zur Verfügung. Erreichte Situationen können bewertet, protokolliert und rekonstruiert werden.




Vorranggraph Grunddaten	symbolische Attribute	graphische Attribute	Restriktionen Konfliktpräd.	Regeln
Identifikation der Tätigkeit	Bezeichnung der Tätigkeit		produkt- abhängig	Bedien- strategien
Ausführungs- zeit	Zuführteil		betriebs- abhängig	Vorwärts verkettete Regeln
Vorrang- beziehung	Greifprinzip		system- bezogen	

Abb. 73: Daten des erweiterten Vorranggraphen

Ein Rücksprung in die erste Dialogphase setzt die getroffenen Stationszuteilungen und Protokolle aus dem Arbeitsspeicher zurück. Alle Aktionen können auch regelbasiert aktiviert werden.

8.2.3 Bereitstellung der Grunddaten

Die grundlegende Datenstruktur zur Beschreibung der Montageaufgabe des realisierten Planungswerkzeugs ist ein erweiterter Montagevorranggraph. Statt der internen Repräsentation in Vorrangmatrizen (vergl. /27/) wird in dieser Arbeit eine doppelt verkettete Liste verwendet, die einen schnellen Zugriff auf die durch Vorrangbeziehungen verknüpften Elemente bietet. Als externe Repräsentation und als Grundlage eines graphisch interaktiven Modelleditors für Vorranggraphen wird die

Metra Potential-Methode /101/ eingesetzt. Der Vorranggraph besteht aus Kanten und Knoten. Jeder Knoten beschreibt eine Montagetätigkeit. Eine Vorrangbeziehung wird durch eine die beiden betroffenen Knoten verbindende Kante beschrieben. Festgelegte Eingangs- und Ausgangspunkte an den Knoten definieren die Vorrangrichtung. Einem Tätigkeitsknoten werden Planzeit (Ausführungszeitdauer) und weitere problem-spezifische Attribute zugeordnet. Attribute bzw. Attributwerte lassen sich auch als Ikonen darstellen (Abb. 74).

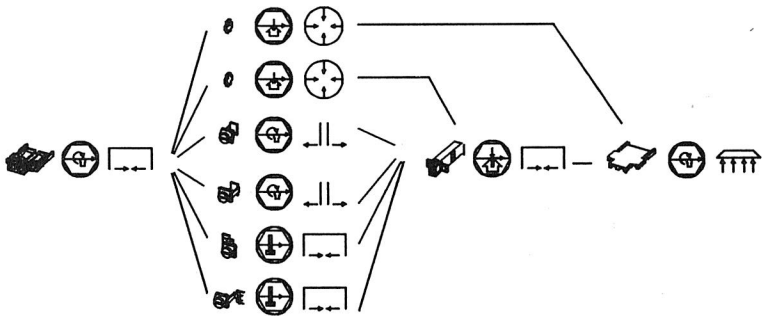


Abb. 74: Graphische Repräsentation eines Vorranggraphen im Editor

Mit dem realisierten Werkzeug zur Erfassung von Objektstrukturen (Kap. 4.7) erzeugt, spezifiziert und strukturiert der Planungsexperte Tätigkeitsklassen (Knotenklassen). Instanzen der so definierten Klassen werden zum Aufbau eines konkreten, erweiterten Vorranggraphen eingesetzt. Wesentliche Funktionen des graphisch interaktiven Modelleditors sind das Verwalten, Speichern, Erzeugen und Löschen von Tätigkeiten, Vorrangbeziehungen und Vorranggraphen (Abb. 75).

Attributwerte der Tätigkeitsknoten können interaktiv, regelbasiert, vererbungstechnisch oder methodengesteuert manipuliert werden. Den Tätigkeitsknoten können dynamisch unterschiedliche symbolische oder graphische externe Repräsentationen sowie Methoden und Menues zugeordnet werden. Weiterhin sind Funktionen zur interaktiven Platzierung von Tätigkeitsknoten, Zoom- und Scrolltechniken sowie Methoden zur graphischen Entflechtung und strukturierten Darstellung des

Vorranggraphen verfügbar. Diese Funktionen können in allen Dialogphasen aktiviert werden.

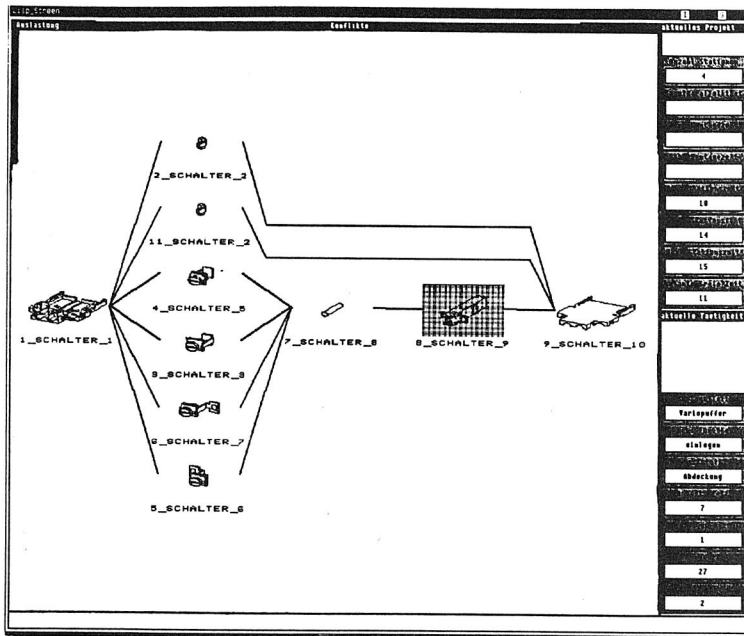


Abb. 75: Der graphisch-interaktive Vorranggraph-Editor
(Bildschirmkopie)

Informationen, die über Dialogschnittstellen eingelesen und vom Planungswerkzeug verarbeitet werden, lassen sich nach deren Verwendung grob in fünf Teilbereiche untergliedern (vergl. Abb. 73). Diesen Teilbereichen werden in Abb. 76 die entsprechenden Problemlösungsverfahren zugeordnet. Für die wirtschaftliche Auslegung eines Montagesystems sind u.a. die erreichbare Taktzeit und Minimierung der Gesamtverlustzeit von zentraler Bedeutung. Die Taktzeit wird durch die Zeiten der einzelnen Tätigkeiten und deren Zuordnung zu Montagezellen bestimmt. Wesentliche Einflußgrößen, die die Ausführungszeiten der einzelnen Montagetätigkeiten bestimmen, wie z.B. Betriebsmittel und Layout, sind aber in der Regel bei einer

Strukturplanung noch nicht festgelegt. Deshalb müssen die Zeiten geschätzt oder geplant werden.

Rechnergestützte Zeitermittlungsverfahren werden z.B. in /102, 103/ vorgestellt. Um eine erste Stationsaufteilung festzulegen, ist ein grobes Schätzverfahren ausreichend. Liegen Automatisierungskonzept, Layout- bzw. Betriebsmitteldaten vor, können genauere Aussagen getroffen, geschätzte Zeitwerte abgesichert und weitere Optimierungsschritte gezielt angestoßen werden. Dazu eignen sich wissensbasierte Verfahren, analytische Methoden und Messungen an Simulationsmodellen oder realen Systemen. Anhand vorgegebener Taktzeit und Stationszuordnung lassen sich aber auch Vorgabezeiten für die einzelnen Montagetätigkeiten ableiten. Dies wiederum kann z.B. die Betriebsmittelauswahl oder die Layoutplanung beeinflussen.

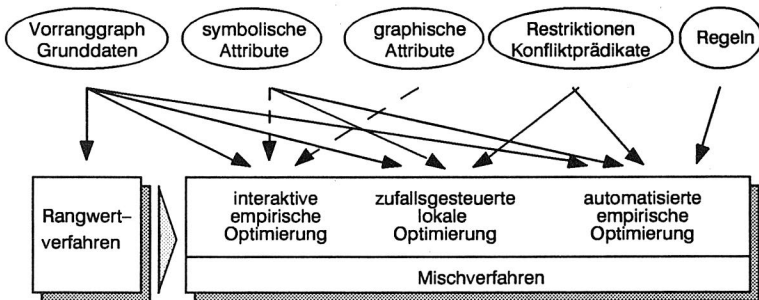


Abb. 76: Informationen und deren Verarbeitung im Rahmen der Strukturplanung

Zur Ermittlung der Planzeiten einzelner Montagetätigkeiten stehen die grundlegenden Programmiertechniken und –werkzeuge der Entwicklungsumgebung zur Verfügung. Montagezeiten können regelbasiert, datenbankgestützt, interaktiv oder algorithmisch ermittelt werden. Damit lassen sich einfache Voreinstellungen, wie z.B. „Das Aufsetzen eines Deckels dauert etwa 1,5 sec.“, und komplexere Zusammenhänge, wie z.B. „Die Schraubzeit in Abhängigkeit von Gewindeart, Windungszahl und Schraubwerkzeug“ abbilden.

8.2.4 Zeitbasierte Abtaktung nach der Rangwertregel

In der ersten Problemlösungsphase (Abb. 71) wird mit einem systematischen Abtaktungsverfahren eine erste, zeitoptimierte Stationsaufteilung ermittelt. Grundlage des dabei verwendeten Rangwertverfahrens sind Planzeiten und Vorrangbeziehungen. Im Anschluß erfolgt eine empirische Optimierung unter Berücksichtigung weiterer zellen- und systembezogener Restriktionen. Deshalb wird auf Einsatz und Implementierung eines exakten Verfahrens verzichtet. Grundsätzlich können aber an dieser Stelle auch andere heuristische oder exakte Verfahren verwendet und integriert werden.

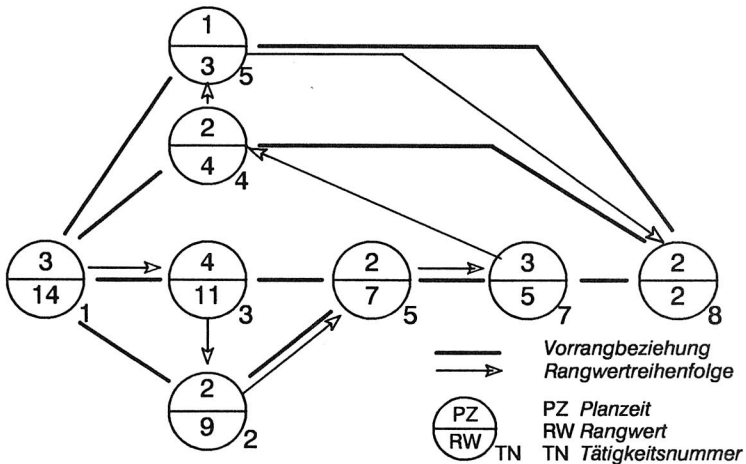


Abb. 77: Vollständige Ordnung durch den Rangwert

Als Ordnungs- und Bewertungskriterium wird beim Rangwertverfahren jedem Tätigkeitsknoten sein Rangwert zugeordnet /20/ (Abb. 77). Der Rangwert einer Tätigkeit drückt den letztmöglichen Beginnzeitpunkt aus, um eine endterminorientierte Ausführung zu gewährleisten. Der Rangwert einer Tätigkeit ergibt sich aus der Summe ihrer eigenen Planzeit und aus dem höchsten Rangwert der direkten Nachfolger-Tätigkeiten. Endknoten erhalten als Rangwert die eigene Planzeit. Für diese vollständige Ordnung wurden zwei Verfahren zur Stationsaufteilung realisiert (vergl. /20/). Bei der *taktabhängigen Stationsaufteilung* wird eine feste Taktzeit vorgegeben (Abb. 78). Das

Verfahren beginnt mit der ersten Station. Die Tätigkeit mit dem höchsten Rangwert wird jeweils der aktuellen Station zugeordnet, falls dadurch die vorgegebene Taktzeit nicht überschritten wird. Im zweiten Fall wird die nächste Station zur aktuellen, und die verbleibenden Tätigkeiten werden dieser Station zugeordnet. Dies wird solange durchgeführt, bis alle Tätigkeiten zugeordnet sind.

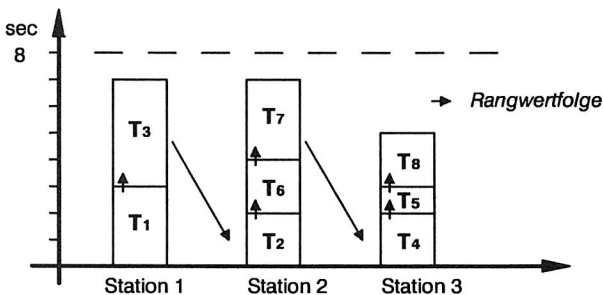


Abb. 78: Taktabhängige Stationszuteilung nach der Rangwertregel

Bei der *ortsabhängigen Stationsaufteilung* ist die Anzahl der Stationen vorgegeben. Die Tätigkeiten werden nach ihrem Rangwert auf die einzelnen Stationen verteilt. Die dabei erreichbare Taktzeit liegt zwischen der durchschnittlichen Taktzeit und der durchschnittlichen Taktzeit plus der maximalen Planzeit. Die durchschnittliche Taktzeit ergibt sich aus der Summe der Planzeiten dividiert durch die vorgegebene Stationszahl. Das Verfahren zur taktabhängigen Stationsaufteilung wird beginnend mit der durchschnittlichen Taktzeit als vorgegebene feste Taktzeit mehrfach durchlaufen, bis die Anzahl der Stationen kleiner oder gleich der Anzahl der vorgegebenen Stationen ist (vergl. /20/). Bei jedem Durchlauf wird die vorgegebene feste Taktzeit nach einem bestimmten Schema bis zur Obergrenze erhöht.

Bei einer *taktabhängigen Stationsaufteilung* wird die letzte Arbeitsstation häufig nicht ausreichend ausgelastet. Deshalb sollten die *taktabhängige* und die *ortsabhängige Stationsaufteilung* im Wechsel aktiviert werden. Durch geringfügiges Verschieben der Taktzeit und durch die Hinzu- oder Wegnahme von Arbeitsstationen lässt sich schnell eine gleichmäßige Auslastung ermitteln. Entsprechende Strategien können mit Planungsregeln implementiert werden.

8.3 Empirische Optimierung

Das beschriebene Rangwertverfahren der ersten Problemlösungsphase verarbeitet ausschließlich Vorrangbeziehungen und Ausführungszeiten. Ergebnis ist eine erste, anhand der Gesamtverlustzeit optimierte Stationszuteilung. In der zweiten Phase werden auch zellen- oder montagesystembezogene Restriktionen berücksichtigt.

Beispiele zellenbezogener Restriktionen sind, daß die Handhabungsobjekte einer Zelle

- ähnliches Gewicht,
- ähnliche Toleranzen,
- ähnliche Fügeoperationen,
- ähnliche Bauformen und Abmessungen aufweisen sollten.

Zur Formulierung entsprechender Restriktionen wurde ein Sprachumfang definiert, der von einem Interpreter verarbeitet wird. Die Konfliktbeseitigung erfolgt im Dialog, oder durch ein zufallsgesteuertes Suchverfahren bzw. durch Bedienregeln. Die vom Planungswerkzeug verarbeiteten Bedingungen oder Konflikte werden in sechs Kategorien eingeteilt, die im folgenden informell beschrieben sind:

- Typ1:* Zwei Tätigkeiten sollen einer Station zugeteilt werden.
- Typ2:* Zwei Tätigkeiten sollen verschiedenen Stationen zugeteilt werden.
- Typ3:* Alle Tätigkeiten, die eine bestimmte *Eigenschaft* erfüllen, sollen einer Station zugeteilt werden.
- Typ4:* Alle Tätigkeiten, die einer Station zugeteilt sind und eine bestimmte *Eigenschaft* erfüllen, sollen für ein bestimmtes *Attribut* den gleichen Wert haben.
- Typ5:* Alle Tätigkeiten, die einer Station zugeteilt sind und eine bestimmte *Eigenschaft* erfüllen, sollen einer *Funtion* genügen.
- Typ6:* Station überschreitet die vorgegebene Taktzeit.

Mit dem Prädikat *Eigenschaft* können Teilmengen der Tätigkeiten, charakterisiert und mit boolschen Operationen verknüpft werden. Neben Tätigkeiten können aber auch andere Objekte der Wissensbasis, wie z.B. Betriebsmittel, referenziert werden. Den Konflikten sind vom Bediener Gewichte zuzuordnen.

Abb. 79 zeigt das Beispiel einer Konfliktbedingung mit Oberfläche und internen Objektstrukturen. Es kann auch der Fall eintreten, daß sich die Vorgabezeit einer Tätigkeit unter bestimmten Voraussetzungen ändert. Beispielsweise werden durch geschickte Zuteilungen Greiferwechselzeiten eingespart.

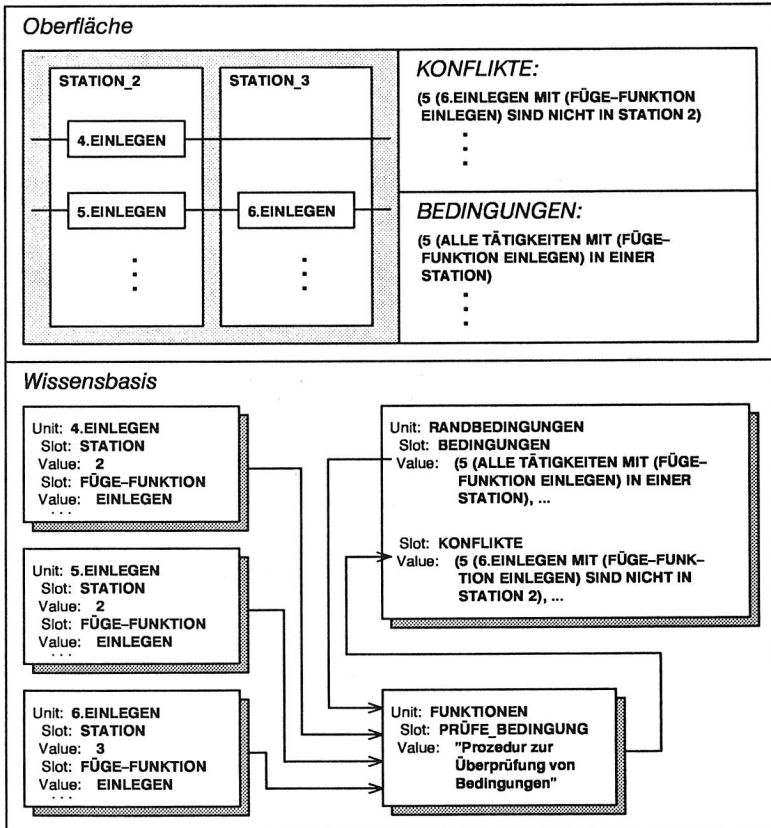


Abb. 79: Konflikt mit Wissensbasis und Oberfläche

Durch Regeln werden derartige Zusammenhänge im Planungssystem abgebildet. Der Planungsexperte erfaßt, formalisiert, gewichtet und verwaltet Konfliktbedingungen (Konfliktprädikate). Bedingungen können einzelnen Produkten, Produktklassen oder

auch Montagesystemen zugeordnet werden. Bei der Planung ist ein geeigneter Satz vordefinierter Bedingungen zusammenzustellen und gegebenenfalls durch produktspezifische zu erweitern. Die geeignete Wahl und Gewichtung ist von der Erfahrung des Planers abhängig und für die darauf basierenden Werkzeugfunktionen entscheidend.

8.3.1 Interaktive Optimierung

Nicht erfüllte Randbedingungen werden dem Benutzer angezeigt. Die bisher beschriebenen Hilfsmittel unterstützen den Planer bei der Suche nach einer optimalen Stationszuteilung. Er kann einen, seiner Meinung nach, sinnvollen Schritt anstoßen und wird sofort über die Qualität der neuen Abtaktung informiert. Abb. 80 zeigt diesen Zyklus von Aktion und Information.

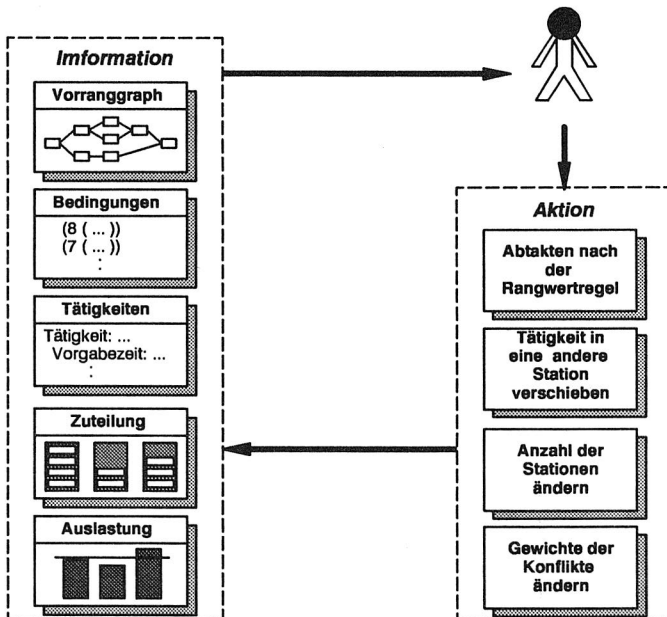


Abb. 80: Interaktive Planung

8.3.2 Konfliktprädikate und -interpreter

Unter Situation wird im folgenden eine vollständige Zuordnung der Tätigkeiten zu entsprechenden Montagestationen verstanden. Eine Situation repräsentiert ein zu planendes Montagesystem mit Tätigkeiten, Montagezellen und Betriebsmitteln. Der implementierte und erweiterbare Sprachumfang zur Formulierung von Konfliktprädikaten dient der Beschreibung und Bewertung einer Situation.

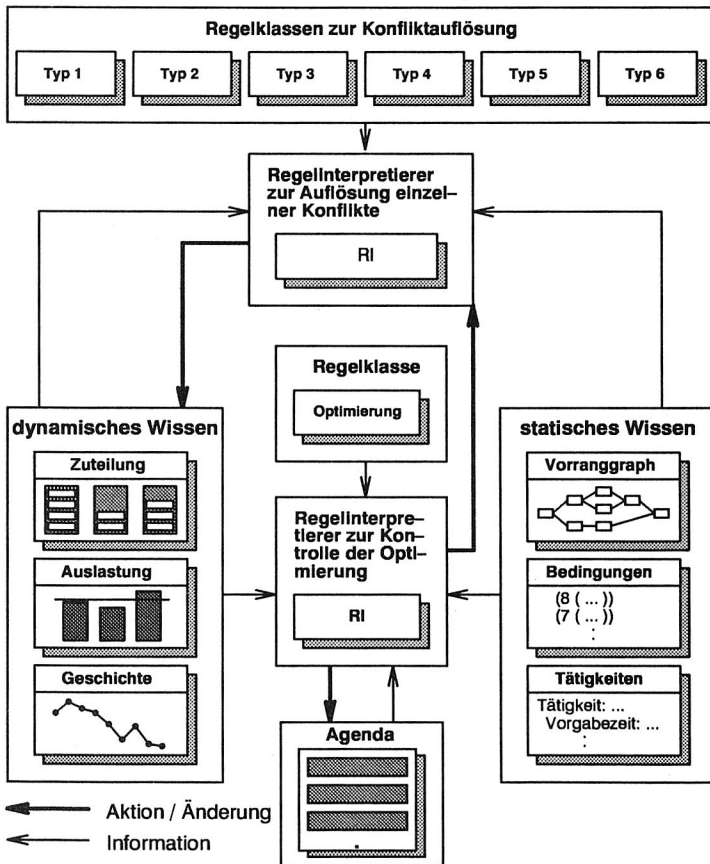


Abb. 81: Konfliktinterpretier

Neben Vorrangbeziehungen können zellen- und systembezogene Konfliktprädikate definiert und gewichtet werden. Konfliktprädikate beschreiben unerwünschte Eigenschaften einer Situation. Wird ein Prädikat erfüllt, liegt ein Konflikt vor. Da bestimmte Konfigurationen technisch möglich aber aufwendig oder ungünstig sind, werden Konflikte bewertet.

Die Konfliktprädikate werden von einem Interpreter ausgewertet (Abb. 81). Dieser arbeitet auf der Menge der definierten Prädikate und einer konkreten Situation (Zuteilung). Er ermittelt die aktuellen Konflikte der Zuteilung und trägt sie in eine Agenda, nach Gewichten sortiert, ein. Auf diese Agenda können der Benutzer, das Regelsystem und das zufallsgesteuerte Suchverfahren zugreifen. Gewichte können im Bereich von 1 bis 100 gewählt werden. Schwerwiegenden Konflikten sind hohe Gewichte zuzuordnen. Die Bewertung einer Situation ergibt sich aus der Summe der Gewichte der ermittelten Konflikte. Eine Situation mit der Bewertung 0 ist konfliktfrei. Verstöße gegen Vorrangbeziehungen werden vom System nicht zugelassen. Taktzeitüberschreitungen können z.B. durch das folgende Konfliktprädikat behandelt und bewertet werden:

- Die Summe aller Planzeiten der in einer Montagezelle auszuführenden Tätigkeiten sollte die vorgegebene Taktzeit nicht überschreiten.

Damit können auch Situationen gefunden werden, die Taktzeitüberschreitungen bewerten aber nicht generell ausschließen. Durch frei definierbare Funktionen, die in den Konfliktprädikaten ausgewertet werden können, lassen sich z.B. auch Verfahren zur Wirtschaftlichkeitsrechnung integrieren.

8.3.3 Suchverfahren zur Konfliktbeseitigung

Das realisierte heuristische Verfahren zur Optimierung der Stationszuteilung der zweiten Dialogphase (Abb. 72) basiert auf der zufälligen Auswahl eines erfolgversprechenden Optimierungsschrittes. Für die unterschiedlichen Konfliktarten existieren jeweils Mengen von Regeln deren Anwendung zur Beseitigung des betreffenden Konfliktes führen können (Abb. 81).

Innerhalb einer Regelmenge können unterschiedliche Regelaktionen den zugeordneten Konflikt auflösen oder zur Auflösung beitragen. Wird beispielsweise das

Verschieben oder Vertauschen einer Tätigkeit durch eine Vorrangbeziehung blockiert, dann wird auch die blockierende Tätigkeit durch die Regeln des jeweiligen Konflikts verschoben.

In Abb. 82 sind Untergrenzen der Suchraumgröße für den Vorranggraphen einer Kleinbildkamera aus /20/ dargestellt. Es zeigt sich, daß der Zustandsraum bei realen Anwendungen so stark wächst, daß ein systematisches Durchprobieren aller Zuteilungsmöglichkeiten keine geeignete Strategie zur Optimierung einer Abtaktung darstellt. Deshalb ist eine Breitensuche auszuschließen.

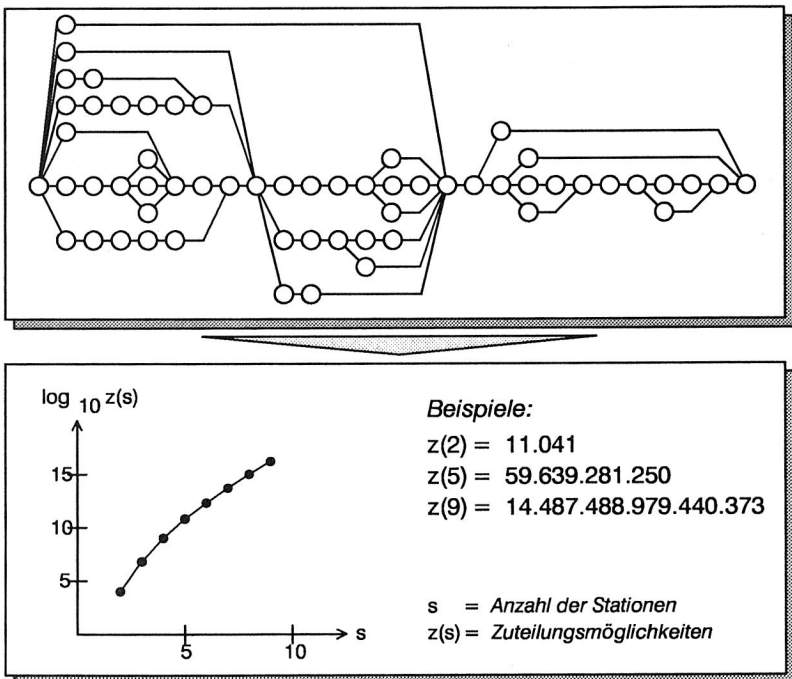


Abb. 82: Vereinfachter Vorranggraph zur Montage einer Kleinbildkamera aus /20/ und Zuteilungsmöglichkeiten

Aufgrund der möglichen Komplexität des Suchraums bzw. der Vielfalt möglicher Konfliktauflösungsstrategien kann eine deterministische Entscheidung über die

Auswahl der richtigen Regel, die zu einer optimalen Zuteilung führt – ähnlich wie bei einem Labyrinth – nicht getroffen werden. Als problemunabhängige Heuristik wurde zur Lösung dieser Auswahlentscheidung eine *deterministische Tiefensuche mit Backtracking* und eine *nicht deterministische Tiefensuche* erprobt und verglichen. Das deterministischen Suchverfahren erfordert eine aufwendige Kontrolle des Suchraums, um Schleifen zu vermeiden. Das ausgewählte nicht deterministische Suchverfahren verzichtet auf eine Kontrolle des Suchweges, nimmt also gegebenenfalls das mehrmalige Erreichen des selben Zustandes in Kauf. Dieses Vorgehen ist möglich, da es sich beim Zustandsraum nicht um einen Baum sondern um einen Graphen ohne Endknoten handelt. Der daraus resultierende geringere Kontrollaufwand konnte diesen Zeitverlußt, bei den durchgeführten Tests, ausgleichen, da es sowohl etliche Zielzustände, als auch viele verschiedene Wege zu diesen Zielzuständen gibt. Daraus läßt sich aber keine generelle Überlegenheit ableiten. Ausschlaggebend für die Wahl des Verfahrens waren weiterhin der geringere Implementierungsaufwand und Speicherbedarf sowie die einfachere Anpaßbarkeit an mögliche Änderungen des Suchraums. Das Verfahren kann auf jeder beliebigen Zuteilung operieren. Es sind keinerlei Annahmen über den Suchraum erforderlich, der durch die formulierten Konfliktprädikate und Vorrangbeziehungen bestimmt wird. Es kann theoretisch nachgewiesen werden, daß zumindest bei unbegrenzter Rechenzeit eine optimale und bei begrenzter Rechenzeit eine suboptimal Zuteilungen entsteht.

Ein einzelner Optimierungsschritt, der durch eine Regelmenge aktiviert wird, betrifft immer nur zwei benachbarte Montagezellen, wie z.B. das Verschieben einer Tätigkeit aus einer Montagezelle in die vorhergehende oder nachfolgende Zelle. Diese Aktionen werden auch intuitiv bei einer interaktiven Optimierung eingesetzt. Durch die Anwendung einer Regelmenge eines Konfliktes wird eine neue Situation mit neuer Gesamtbewertung erzeugt. Eine Verschlechterung der Gesamtbewertung durch neu entstandene Konflikte wird zunächst in Kauf genommen. Erst nach einer Folge von Schritten können gegebenenfalls Situationen mit lokal minimaler Gesamtbewertung gefunden werden. Ziel des Verfahrens ist es, mehrere Situationen mit lokal minimaler Bewertung zu finden.

In Abb. 83 sind mehrere Bewertungsverläufe dargestellt. Die Optimierungsläufe beginnen mit derselben Startkonfiguration und führen zufallsgesteuert über Sequenzen unterschiedlicher Optimierungsaktionen jeweils zu einer konfliktfreien Situation. Die

Suche bricht nach einer definierbaren Anzahl auszuführender Aktionen ab, wenn diese zu keiner Verbesserung der letzten Bewertung führen. Erreichte Situationen können graphisch und symbolisch mit unterschiedlichen Funktionen "getraced", bewertet, protokolliert und rekonstruiert werden. Das Verfahren kann interaktiv oder regelgesteuert aktiviert werden.

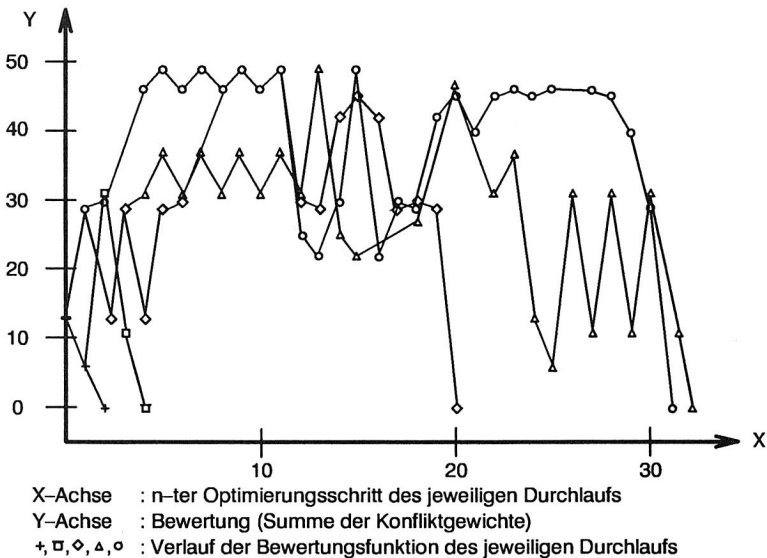


Abb. 83: Bewertungsverläufe des zufallsgesteuerten Suchverfahrens

8.3.4 Regeln zur Optimierung einer Situation

Die in Kapitel 6.3.2 vorgestellte Suchstrategie erfordert ein Verfahren zur Bildung der Teilmenge der erfolgversprechenden Folgesituationen. Die Menge der möglichen Folgesituationen sind alle Situationen, die durch das Verschieben einer Tätigkeit erreicht werden können. Die Teilmenge der erfolgversprechenden Folgezustände wird durch Produktionsregeln ermittelt.

In Abb. 84 ist eine Regel dargestellt, die zur Auflösung von Konflikten dient. Da beim **KEE Version 3.0-Regelinterpretier** die Abarbeitungsreihenfolge der Regeln nicht

ausreichend kontrolliert werden konnte, wurde ein eigener, vorwärtsverkettender Interpreter entwickelt und eingesetzt. Dieser verfügt zwar über etwas andere Leistungsmerkmale als der vorwärtsverkettende **KEE-Regelinterpreter**; die grundsätzlichen Mechanismen und Ausdrucksmöglichkeiten sind diesem aber sehr ähnlich. Deshalb wird auf Aufbau, Funktionsweise und Sprachumfang nicht weiter eingegangen, sondern auf die Benutzerhandbücher /57/ verwiesen. Im folgenden werden die Möglichkeiten zur Formulierung von Bedienstrategien dargestellt.

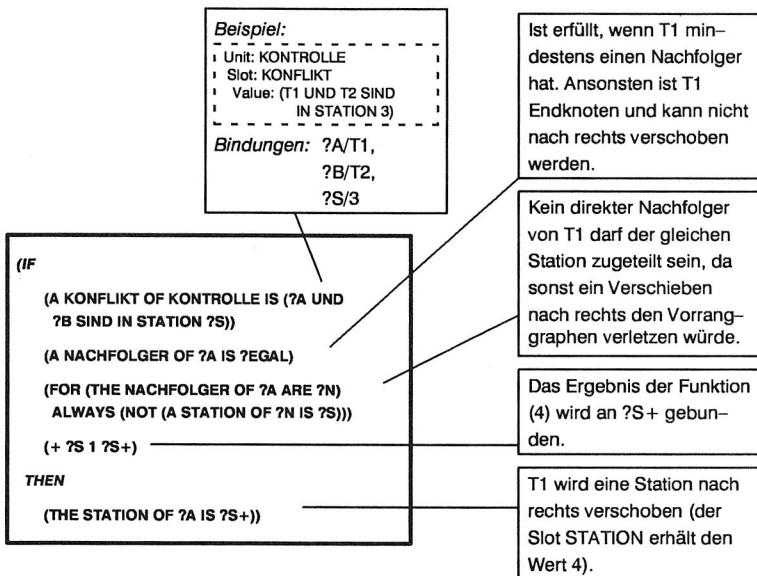


Abb. 84: Regeln zur Konfliktauflösung

Bedienstrategien können zur Meta-Kontrolle des gesamten Planungsverlaufes durch Regeln formuliert und abgearbeitet werden (Abb. 85). Regeln werden in Klassen organisiert. Eine Regelklasse kann interaktiv, von einer Methode oder einer Regelaktion aktiviert werden. Im Bedingungsteil einer Regel werden Prädikate über Situationen und andere Bereiche der Wissensbasis definiert. Insbesondere in den Attributen der Tätigkeiten werden Verweise auf andere Strukturen, die Produkte oder

auch Betriebsmittel repräsentieren, hinterlegt. Beispielsweise ist im Attribut *Zuführteil* ein Verweis auf ein entsprechendes Datenobjekt gespeichert. Weiterhin werden Prädikate über die Situationsprotokolle und die Konfliktagenda unterstützt. Prädikate im Bedingungsteil werden mit *AND*, *OR*, *NOT* und mit frei definierbaren Funktionen, die Wahrheitswerte zurückliefern, verknüpft.

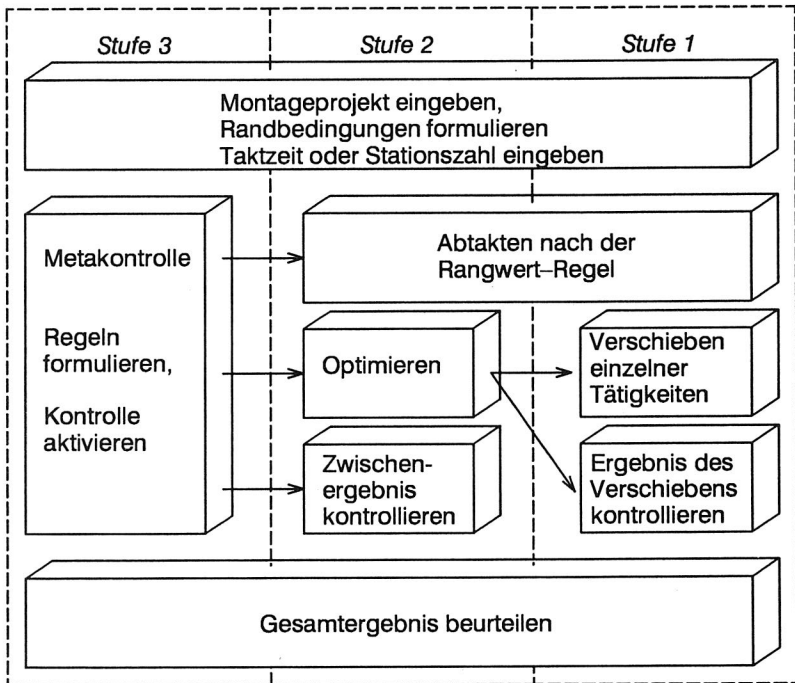


Abb. 85: Metakontrolle

Als Aktionen können alle Methoden und Funktionen der Programmierungsumgebung und des Planungswerkzeugs verwendet werden. Beispielsweise lassen sich die Rangwertverfahren und das zufallsgesteuerte Suchverfahren aktivieren. Montagezellen können erzeugt und gelöscht, Tätigkeiten verschoben, vertauscht und den Zellen zugordnet werden. Mit diesen Möglichkeiten lassen sich betriebs- und personenbezogene Bedienstrategien formulieren und verwalten. Regelbasierte Bedienstrategien können

Teilbereiche der Planungsaufgabe automatisieren und durch interaktive Planungsschritte ergänzt werden.

In Abb. 86 ist die Bedieneroberfläche mit der externen Repräsentation einer Stationszuteilung dargestellt. Die Pfeile dienen zur Markierung vorhandener Konflikte der Agenda.

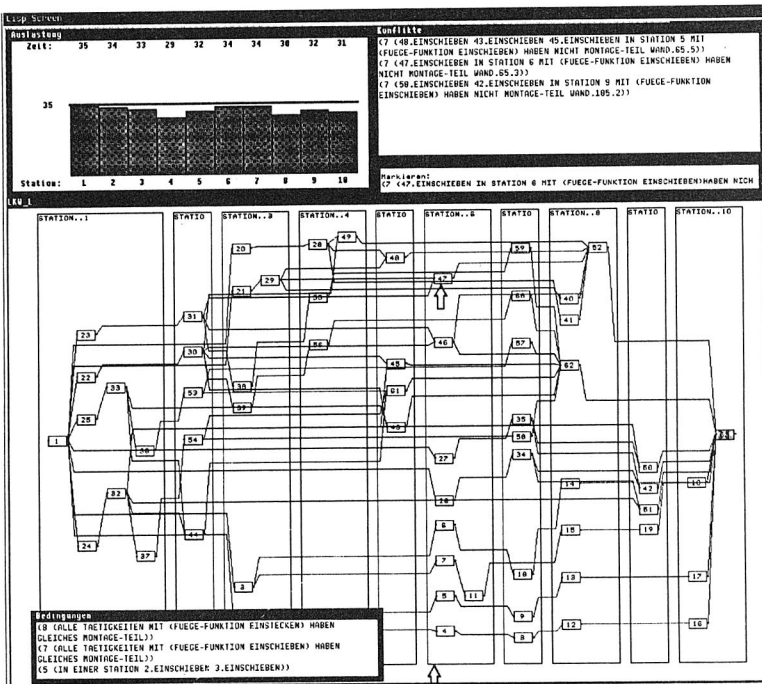


Abb. 86: Planungsergebnis Stationszuteilung für das Beispielprodukt aus Abb. 62 (Bildschirmkopie)

Neben einer Zuordnung von Montagetätigkeiten zu Zellen können mit Regeln auch weitergehende Planungsschritte wie die Betriebsmittelzuordnung automatisiert werden /16/. Allerdings fehlen dazu Benutzerschnittstellen, die ein interaktives Vorgehen unterstützen, sowie Planungs- und Zwischenergebnisse problembezogen darstellen. Entsprechende Schnittstellen und weitere problemspezifische Verfahren wurden im

Rahmen dieser Arbeit nur für das Teilgebiet der Greiferauswahl und -planung exemplarisch realisiert.

8.4 Integration in ein betriebliches Umfeld

Zur Entwicklung personen- oder betriebsspezifischer Bedienstrategien sollte das Planungswerkzeug in ein konkretes betriebliches Umfeld integriert werden. Dabei sind Schnittstellen zu vorhandenen rechnergestützten Datenbeständen und anderen Planungswerkzeugen zu berücksichtigen. Aus den daraus ableitbaren Anforderungen werden Benutzerschnittstellen, interne und externe Repräsentation der Situationen und Tätigkeiten sowie die ausführbaren Aktionen angepaßt. Dabei kann die in Kap 4.7 beschriebene Komponente zur Erfassung von Objektstrukturen zum Einsatz kommen.

Das Strukturplanungswerkzeug sollte von den Planungsexperten zunächst interaktiv ohne Planungsregeln, Konfliktprädikaten und Suchverfahren bedient werden. Dabei können erste Erfahrungen gesammelt und weitere Anpassungen mit Hilfe der Programmierungsumgebung durchgeführt werden. Die interaktive Planung sollte bereits gegenüber einer konventionellen, manuellen Planung Vorteile aufweisen. Die Dokumentation, Entwicklung, Änderung, Anpassung und Verwaltung von Planungsergebnissen sollte sich vereinfachen (Abb. 87).

In einem nächsten Schritt sollten Restriktionen formuliert und so bewertet werden, wie dies die bedienenden Planungsexperten vornehmen würden. Restriktionen können betriebs-, personen-, produktklassen- und produktspezifisch sein. Sie können vom Automatisierungskonzept oder technologischen und organisatorischen Randbedingungen abhängen. Entsprechend muß ein System von Restriktionen aufgestellt und verwaltet werden. Für eine Planungsaufgabe wird ein konkreter Satz von Restriktionen zusammengestellt, der gegebenenfalls interaktiv erweitert werden muß. Basierend auf diesen Bewertungen kann das zufallsgesteuerte Suchverfahren Situationen mit lokal minimaler Bewertung (Suboptima) ermitteln. Ist keine Übereinstimmung zwischen der Systembewertung und der Einschätzung der Planungsexperten erzielbar, müssen Bewertungen oder Restriktionen erweitert und angepaßt werden. Bei unzureichender Übereinstimmung kann nur interaktiv sinnvoll geplant werden.

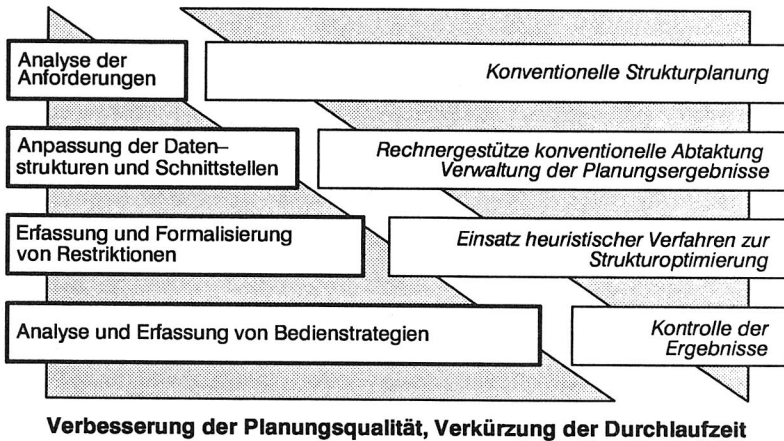


Abb. 87: Integrationsphasen des Strukturplanungswerkzeugs in ein konkretes betriebliches Umfeld

Durch eine Analyse der interaktiven Planungssitzungen kann versucht werden, das Vorgehen der Experten bei der Problemlösung durch Bedienregeln zu beschreiben. Dazu können alle vom Planer aktivierten rechnergestützten Handlungen protokolliert werden. Diese Protokolle spiegeln den Planungsverlauf wieder, der gegebenenfalls durch Abarbeitung eines Regelsystems simuliert werden kann. Die Protokolle können als Diskussionsgrundlage zur Rekonstruktion der Planungsstrategie herangezogen werden und so die Wissensakquisition wesentlich unterstützen. Bei einer regelbasierten automatisierten Strukturplanung sollten die entscheidungsbestimmenden Parameter weitgehend rechnergestützt verwaltet werden, um den Dialogaufwand zu reduzieren. Gelingt es ganz oder teilweise, die Planungsstrategien in Regeln zu fassen, kann die Strukturplanung weitgehend automatisiert ablaufen.

Der Einsatz des wissensbasierten Strukturplanungswerkzeugs soll und kann den Planungsexperten nicht ersetzen. Eine konkrete Strukturplanung wird durch den Rechnereinsatz qualitativ verbessert und schneller durchgeführt. Im Vergleich zur personellen Planung sollten Alternativen mit weniger Aufwand entwickelt und bewertet werden können. Zu den Aufgaben eines Planungsexperten gehört die Durchführung,

Kontrolle und das aktive Eingreifen in konkrete Planungsabläufe. Zusätzlich muß er Planungswissen, das in Konfliktprädikaten, Zeitermittlungs- und Strategieregeln formuliert werden kann, optimieren, anpassen, erweitern und aktiv verwalten. Insbesondere stellt er den Regelkreis zwischen geplanten und realisierten Montagesystemen her und paßt die Wissensbasen entsprechend an. Außerdem muß er Entwicklungen der Montagetechnik beobachten und in das Planungssystem einarbeiten.

Daraus ergibt sich insgesamt eine Verlagerung der Anforderungen und Aufgaben. Es stehen nicht mehr die mit der konkreten Planung eines Montagesystems verbundenen Aufgaben im Vordergrund. Es müssen zusätzliche Kontrollaufgaben und eine explizite Erarbeitung, Formalisierung und Verwaltung von Planungswissen und –methodik bewältigt werden. Dies setzt neben der aktiven Beherrschung der rechnergestützten Planungsabläufe auch deren Abstraktion und Umsetzung in die verfügbaren Formalismen voraus.

Falls ein Mehrfachgreifer oder ein Greiferwechsel vorgesehen ist, werden Gruppen aus Montagetätigkeiten gebildet. Einer Gruppe (Cluster) wird ein Greifersystem zugeordnet. Die Bildung von Tätigkeitsgruppen und die Auswahl eines Greifersystems kann durch ein dialogorientiertes, wissensbasiertes Planungswerkzeug unterstützt werden (Abb. 88). Um gegebenenfalls einen Greiferwechsel zu vermeiden, sind dabei Varianten, Losgrößen, zulässige Montagereihenfolgen und die vorgegebene Ausführungszeit besonders zu berücksichtigen. Grundlage des wissensbasierten Ansatzes ist ein dialogorientiertes Planungswerkzeug. Basierend auf den Ergebnissen der Strukturplanung und der greiftechnischen Produktanalyse werden die Tätigkeiten einer Montagezelle Greifersystemen eindeutig zugeordnet. Die Tätigkeiten einer Variante sind jeweils durch einen Reihenfolgegraphen repräsentiert. Planungsaufgabe ist zunächst die vollständige Zuordnung der Tätigkeiten zu Greiferprofilen unter Berücksichtigung unterschiedlicher Restriktionen. Eine vollständige Zuordnung wird als Situation bezeichnet. Eine Situation kann durch Konfliktprädikate bewertet und durch Aktionen verändert werden. Elementare Aktionen sind die Auswahl konkreter Griffflächen und Greifergrobkonzepte des Handhabungsobjekts, die eindeutige Zuordnung einer Tätigkeit zu einem Greiferprofil sowie das Erzeugen und Löschen von Greiferprofilen. Weiterhin werden Greiferprofile eindeutig Greifersystemprofilen zugeordnet. Ein Greiferprofil repräsentiert eine Wirkeinrichtung, ein Greifersystemprofil repräsentiert ein vollständiges Greifersystem, gegebenenfalls mit Wechseleinrichtung und mehreren Wirkeinrichtungen.

Dieser Planungsprozeß basiert auf den alternativen Greifergrobkonzepten einer Montagetätigkeit, die im Rahmen der greiftechnischen Produktanalyse ermittelt werden. Als grundlegendes Strukturierungsverfahren kann eine Clusteranalyse durchgeführt werden, wie dies beispielsweise in /23/ beschrieben wird. Die ermittelten Cluster der Montagetätigkeiten werden in einer ersten Phase Greiferprofilen zugeordnet. Daraus ergeben sich Flexibilitätsanforderungen an die Wirkeinrichtungen der auszuwählenden Greifersysteme. Durch elementare Aktionen kann versucht werden, zunächst interaktiv günstigere Situation zu erreichen. Anhand der Greiferprofile und -systemprofile werden konkrete Greifersysteme ausgewählt. Dazu wird auch die Greiferdatenbank eingesetzt. Aus den Profilen werden Datenbankabfragen generiert. Sind keine passenden Greifer verfügbar, müssen neue Profile erzeugt und die Zuordnung der Montagetätigkeiten abgeändert werden. Nach einer Analyse der interaktiven Arbeitsweise der Planungsexperten und der Definition

geeigneter Konfliktprädikate kann versucht werden, die Planungsstrategie in Regeln zu fassen. In Abb. 89 ist exemplarisch eine Planungssystematik zur Greifereinsatzplanung dargestellt, die durch entsprechende rechnergestützte Planungswerkzeuge und Planungsregeln realisiert werden kann.

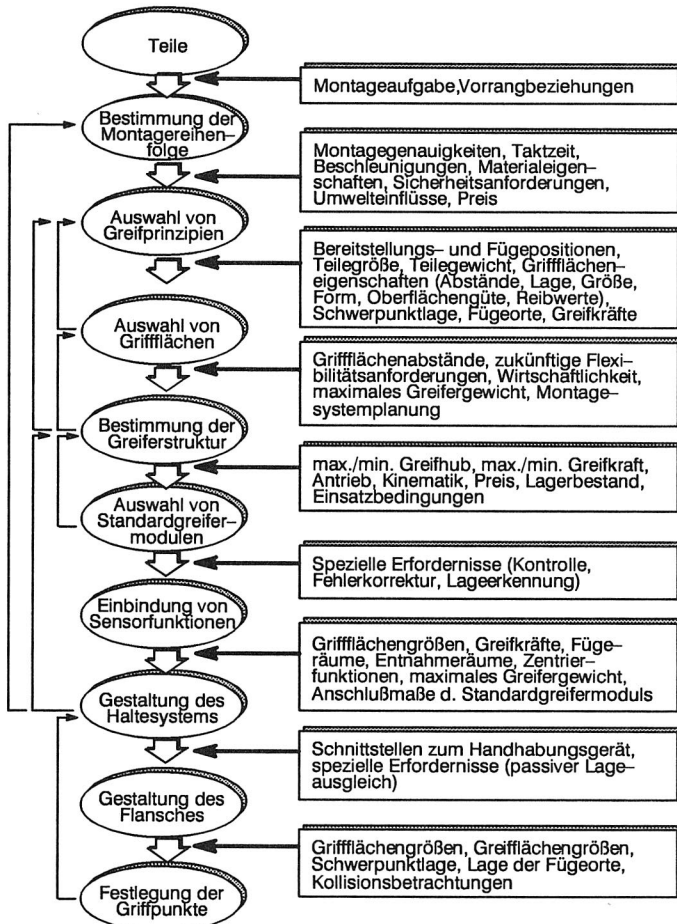


Abb. 89: Mögliche Planungsphasen bei der Greiferauswahl

9.2 Problemlösungskonzept für die Sauggreiferauswahl

Die einer Greifverbindung zugrunde liegenden physikalischen Effekte können zur Unterstützung einer Entscheidungsfindung modelliert werden.

Die dabei entwickelbaren Modelle und Verfahren sind aber von konkreten Greiferkonzepten und Wirkprinzipien abhängig. Deren Implementierung und Integration ist relativ aufwendig. Für ausgewählte Sauggreifersysteme wurden im Rahmen dieser Arbeit exemplarisch rechnergestützte Modelle und Verfahren entwickelt und realisiert.

Die Greiferauswahl lässt sich, wie in Abb. 90 dargestellt, in mehrere Verfeinerungsschritte zerlegen. Schrittweise wird ein detaillierteres Greiferprofil erstellt, bis ein Sauggreifersystem mit der Anzahl der Saugelemente, Saugelementabstand und Saugelementtyp (Durchmesser der Saugelemente, Bauform, Werkstoff, Hersteller) feststeht. Es handelt sich um einen Pfad innerhalb des gesamten Greiferauswahlprozesses.

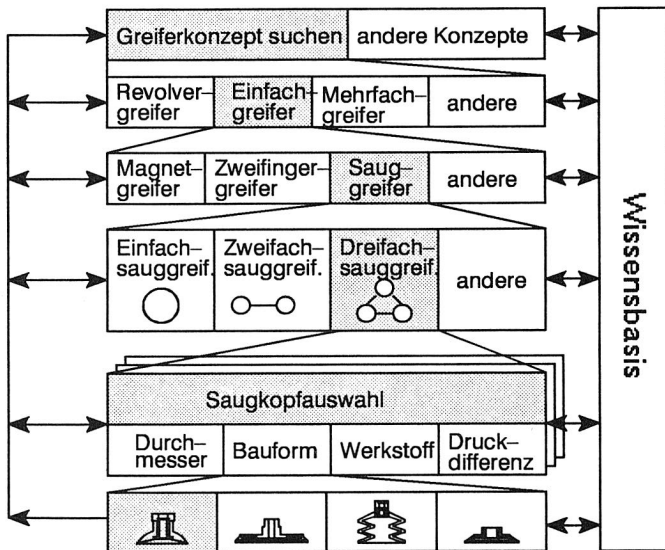


Abb. 90: Schrittweise Detaillierung eines Greiferprofils

Im folgenden wird, basierend auf den technologischen Grundlagen zur Auslegung von pneumatischen Flächengreifern nach /77/ ein konkretes rechnergestütztes Problemlösungskonzept beschrieben. Dazu werden einzelnen Planungsphasen konkrete Problemlösungstypen und damit geeignete Wissensrepräsentationsformen bzw. Implementierungstechniken zugeordnet (vergl. /34/).

9.2.1 Auswahl eines Sauggreifersystems für ein Teil

Zunächst wird ausschließlich die Ermittlung eines Sauggreiferprofils für eine Tätigkeit betrachtet. Dieses Problem läßt sich in zwei Phasen zerlegen. Zuerst findet die Auswahl eines Sauggreifergrobkonzepts statt. In der zweiten Phase werden die wesentlichen Parameter der Saugelemente, wie z.B. Durchmesser, Bauform und Material festgelegt.

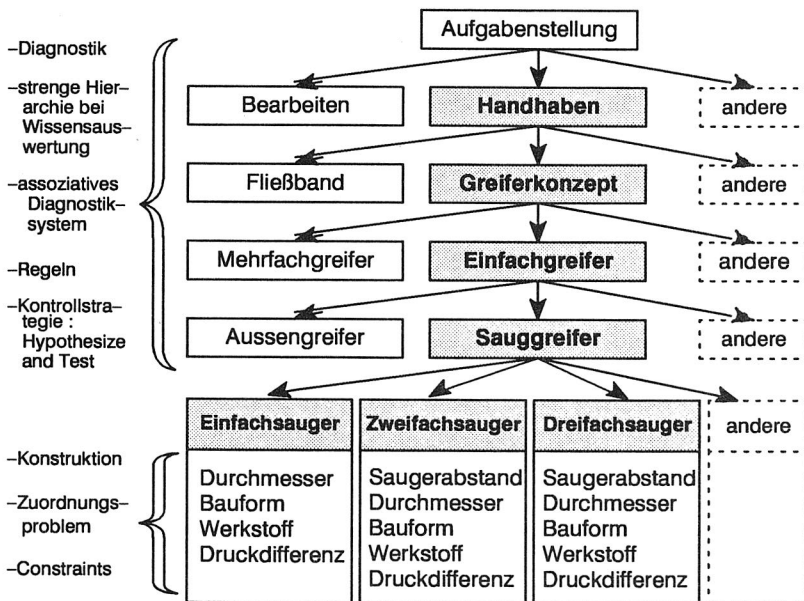


Abb. 91: Problemlösungskonzept für die Sauggreiferauswahl

Die Auswahl eines Sauggreifergrobkonzepts kann als Diagnostikproblem eingeordnet werden. Es kann eine Unterteilung in Problemmerkmale (Symptome) und

Problemlösungen (Diagnosen) erfolgen. Problemmerkmale sind die Anforderungen, Auswahlkriterien und Randbedingungen der Greiferplanung. Die Problemlösungen sind die beim Auswahlvorgang zu durchlaufenden Schritte, bis ein konkretes Greifergrobkonzept feststeht. Insgesamt handelt es sich also um eine diagnostische Auswertung mit Zwischendiagnosen (Abb. 91). Dabei kommt vorwiegend assoziatives Expertenwissen zum Tragen. Ein statistischer oder heuristischer Ansatz ist nicht erforderlich, da die Entscheidungsdaten qualitativ relativ sicher sind. Neben einer objektorientierten Darstellung ist die für das Problem anzuwendende Grundtechnik die diagnostische Auswahl mit strukturierten Regeln.

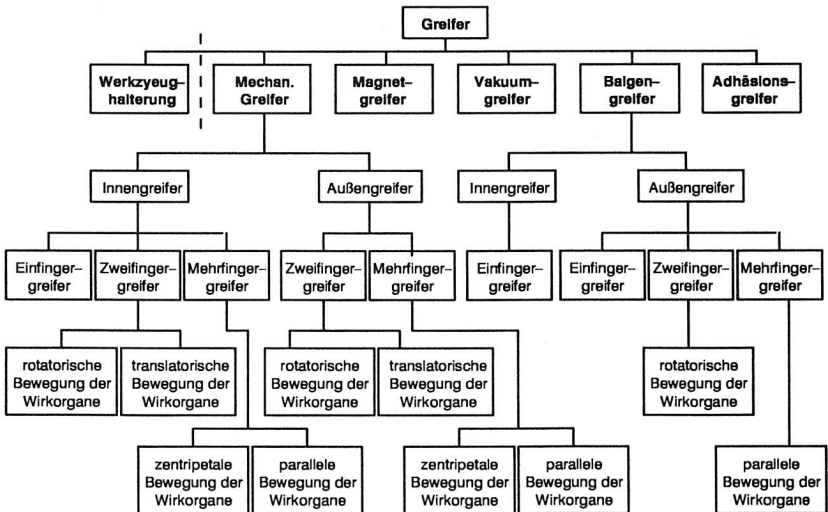


Abb. 92: Diagnoseklassen bei der Auswahl eines Greiferkonzepts (vergl. [23])

Die Wissensverarbeitung kann streng hierarchisch strukturiert werden (Abb. 92). Als Kontrollstrategie empfiehlt sich deshalb *Establish-Refine*. Eine Diagnoseklasse wird zunächst durch Rückwärtsverkettung bestätigt und dann verfeinert, indem versucht wird, eine Nachfolgerklasse zu bestätigen [34]. Da vorausgesetzt wird, daß die wichtigsten Entscheidungsdaten bereits in der Wissensbasis vorhanden sind, wird eine *Hypothesize-and-Test* Strategie vorgeschlagen. Dabei werden zunächst mit den vorhandenen Daten Verdachtshypothesen durch Vorwärtsverkettung generiert und

anschließend durch Rückwärtsverkettung überprüft. Der Bediener wird nur zu Hypothesen gefragt, die bereits eine Vorauswahl durchlaufen haben.

Die Auswahl eines bestimmten Saugelements kann als Konstruktionsproblem eingeordnet werden (Abb. 93). Bei der Konstruktion wird die Lösung aus kleinen Bausteinen zusammengesetzt. Die kleinen Bausteine sind in diesem Fall *Durchmesser*, *Bauform*, *Werkstoff* und *Unterdruck* eines Saugelements. Die Basiselemente und deren mögliche Werte stehen fest und müssen richtig verknüpft werden. Für dieses Zuordnungsproblem sind *Constraints-Systeme* angemessen.

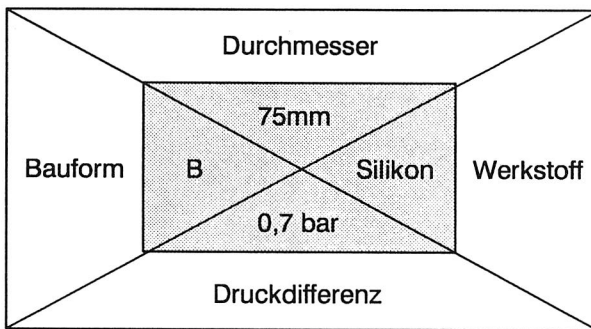


Abb. 93: Saugelementauswahl als Zuordnungsproblem

9.2.2 Auswahl eines Sauggreifersystems für mehrere Teile

Grundsätzlich ist das Problemlösungskonzept bei der Auswahl eines Sauggreifersystems für mehrere Montagetätigkeiten mit dem vorhergehenden vergleichbar. Im Diagnostikteil durchlaufen die verschiedenen Montagetätigkeiten das System. Dabei muß jede Tätigkeit eine Zwischendiagnose "erreicht" haben, bevor Hypothesen der folgenden Diagnoseklassen generiert werden. Im Konstruktionsteil sind bei der Verwendung eines Constraints-Systems weitere Einschränkungen nötig. Für jede Tätigkeit muß ein eigenes Constraints-System generiert werden (Abb. 94).

Entsprechende Variablen der Sauggreifersysteme werden identifiziert. Variablen der Handhabungsobjekte bzw. Tätigkeiten müssen getrennt implementiert werden. Die Greifervariablen werden durch die Propagierung von allen *Constraints* der betroffenen

Tätigkeiten bzw. Handhabungsobjekte eingeschränkt. Die Variablen der Tätigkeiten bzw. Handhabungsobjekte beeinflussen sich nicht gegenseitig. Ein so gefundener Greifer wird allen an der Propagierung teilnehmenden Handhabungsobjekten und Tätigkeiten gerecht.

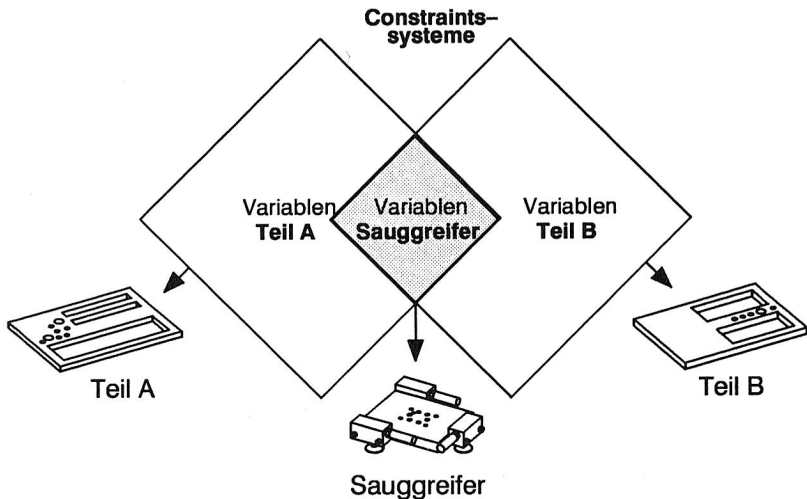


Abb. 94: Verknüpfung der Greifersystemvariablen bei der Handhabung mehrerer (hier zweier) Werkstücke mit einem Greifer

9.2.3 Wissensrepräsentation zur Sauggreiferauswahl

Die diagnostische Auswahl eines Greifergrobkonzeptes erfolgt vorwiegend mit Hilfe von assoziativem Erfahrungswissen. Dieses Wissen wird zum Teil systematisch in Bewertungs- und Auswahltabellen bereitgestellt. Mit Hilfe eines Regelgenerators können aus Tabellen Regeln zur Bewertung oder Erzeugung von Lösungsalternativen direkt abgeleitet werden. Eine Tabelle wird einer Regelklasse zugeordnet. Zu jeder Kombination von Objekteigenschaften wird, abhängig von der Art der Tabelle, eine Regel formuliert. Durch den Diagnostikteil sollte die Anzahl der möglichen Greifergrobkonzepte reduziert werden.

Im Konstruktionsteil können mehrere Greiferkonzepte parallel verfolgt werden. In Abb. 95 werden wesentliche Zusammenhänge bei der Sauggreiferauswahl dargestellt.

Zur Auflösung dieser Wechselwirkungen werden Constraints-Systeme vorgeschlagen. Zur Speicherung der zulässigen Zusammenhänge zwischen den einzelnen Variablen werden analytisch und empirisch ermittelte Funktionen sowie Tabellen aus [77] verwendet. Durch den Propagierungsalgorithmus werden Lösungen gefunden, die alle Constraints erfüllen.

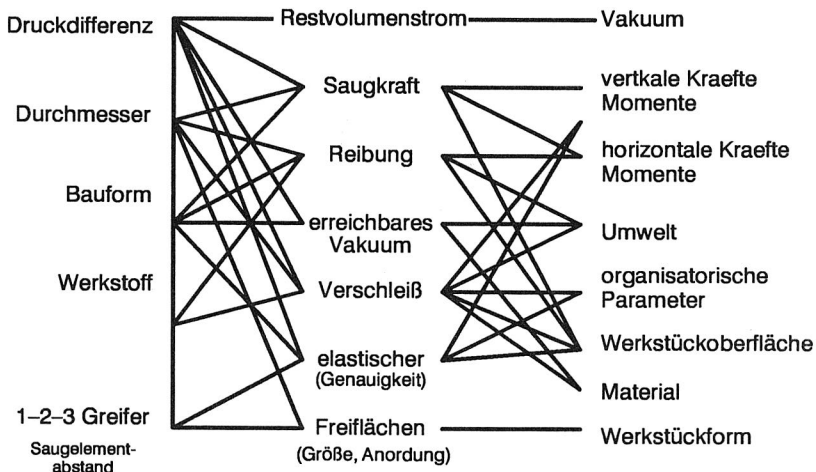


Abb. 95: Zusammenhänge bei der Auswahl von Saugelementen

9.3 Wechselwirkungen Sauggreiferauswahl, Saugpunktermittlung und Bewegungsplanung

Ob ein Saugelement sicher greift, hängt wesentlich von den aufzunehmenden horizontalen und vertikalen Kräften ab. Die an einem Saugelement angreifenden Kräfte werden von der Position dieses und gegebenenfalls weiterer Saugelemente am Handhabungsobjekt und von den am Handhabungsobjekt selbst angreifenden Kräften und Momenten bestimmt. Die dabei auftretenden Wechselwirkungen können z.B. durch mehrfaches Durchlaufen entsprechender Planungsschritte aufgelöst werden (Abb. 96).

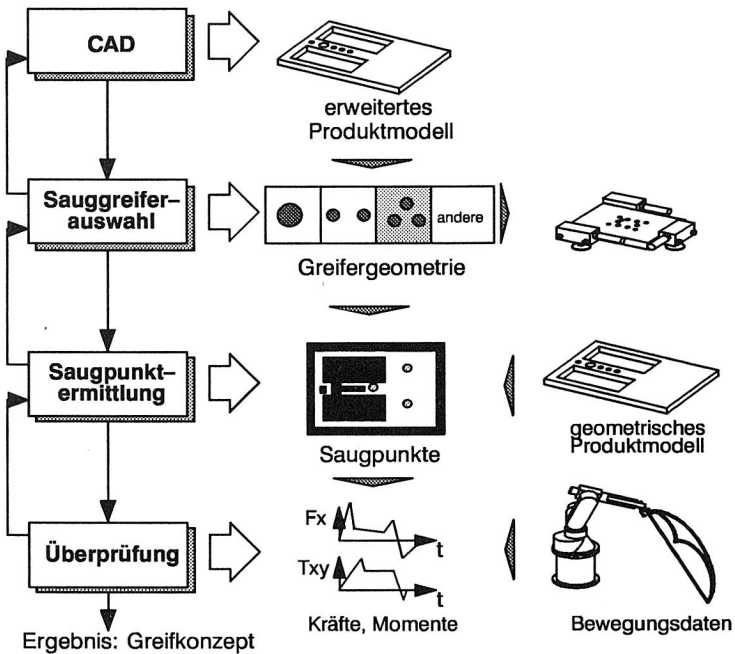


Abb. 96: Mögliche Iterationsschritte zur Auflösung der Wechselwirkungen aus Abb. 4

Zur vorläufigen Auswahl des Greifergrobkonzepts und der einzelnen Saugelemente werden die auftretenden Kräfte und Momente geschätzt. Anhand dieser Schätzgrößen werden durch das Constraints-System ein konkretes Greifersystem ausgewählt und die Positionen der Saugelemente am Handhabungsobjekt bestimmt. Nach einer Analyse des Bewegungsablaufs erfolgt eine Überprüfung des ausgewählten Greiferkonzepts. Erfüllt ein Saugelement nicht die "Haltebedingung", werden die Planungsschritte mit den ermittelten Kräften erneut durchlaufen.

9.4 Greifpunktplanung

Bei der Auswahl eines Sauggreifers müssen auch geometrische Restriktionen des Handhabungsobjekts bei der Platzierung der Saugelemente berücksichtigt werden. Die Aufgabe des Greifpunktplanungswerkzeugs ist es, zu einer Montagetätigkeit Lage und

Orientierung des Greifersystems bzw. der Saugelemente am Handhabungsobjekt festzulegen (vergl. /74/). Das realisierte Werkzeug zur Greifpunktplanung unterstützt eine graphisch-interactive und automatisierte Vorgehensweise. Beide Verfahren sind von den planbaren Greiferkonzepten abhängig. Das Planungswerkzeug eignet sich zur Ermittlung der Saugelementpositionen für Greifersysteme mit bis zu drei Saugelementen (Abb. 97). Für andere Greiferbauformen oder Wirkeinrichtungen sind eigene Werkzeuge und Verfahren zu entwickeln.

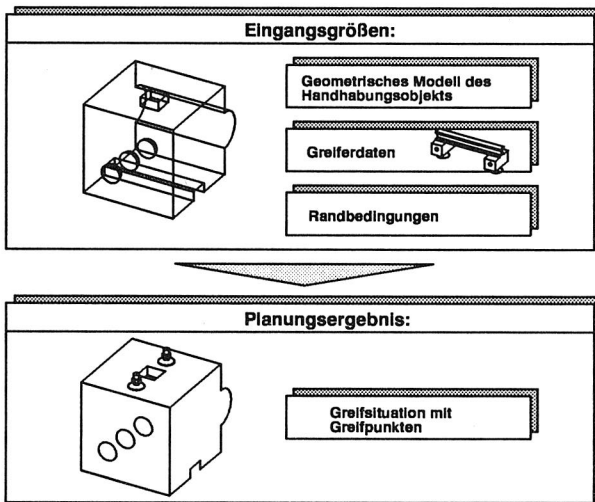


Abb. 97: Planungsschritte zur Ermittlung der Greifpunkte für Zweifachsauggreifersysteme

9.4.1 Verfahren zur Positionierung von Saugelementen

Das Planungswerkzeug verarbeitet Ein-, Zwei- und Dreifachsauggreifersysteme, deren Saugelemente auf einer Ebene liegen. Das Auffinden von Saugelementpositionen erfolgt über ein mehrstufiges Suchverfahren auf den Lauflängenelementen der codierten Grifffläche. Im folgenden wird grob die Funktionsweise des Planungswerkzeuges dargestellt. Das BREP-Geometriemodell des Handhabungsobjektes wird aus dem CAD-System in das Planungswerkzeug vollständig übertragen.

Diesem Modell sind zusätzlich assoziative Informationen über Füge- und Schwerkraftrichtung zugeordnet. Weiterhin werden Volumen und Schwerpunktlage des Handhabungsobjektes vom CAD-System berechnet (Abb. 98).

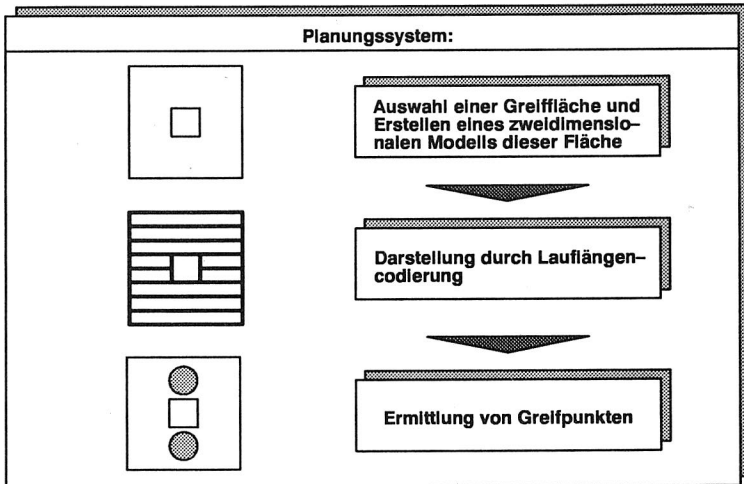


Abb. 98: Funktionsweise des implementierten Moduls zur Ermittlung der Greifpunkte

Der erste Planungsschritt beinhaltet die Auswahl einer Grifffläche am Handhabungsobjekt. Diese kann interaktiv festgelegt oder automatisiert, anhand der Füge- und Schwerkraftrichtung, ermittelt werden. Die ausgewählte Fläche wird mit den untergeordneten Elementen aus dem Geometriemodell übernommen und codiert.

Zur Codierung und Verarbeitung der Fläche wurden Methoden und Verfahren der Bildverarbeitung untersucht und eingesetzt. Die codierte Repräsentation ist mit einer Approximation der Fläche durch Rechtecke vergleichbar.

Beim letzten Schritt werden konkrete kollisionsfreie Positionen der Saugelemente auf der Grifffläche ausgewählt. Dabei sollen möglichst "gute" Positionen für die einzelnen Saugelemente auf der verfügbaren Fläche gefunden werden. Die geometrischen Restriktionen des Handhabungsobjektes sind dabei ebenso zu beachten wie die

vorgegebenen Restriktionen der Greiferbauform. Ob Saugelementpositionen besser als andere sind, wird durch eine Zielfunktion ermittelt. Im realisierten Planungswerkzeug ist diese Zielfunktion der Abstand eines ausgewählten Punktes der Grifffläche zum Mittelpunkt des Sauggreifersystems. Der ausgewählte Punkt kann u.a. als der auf die Grifffläche projizierte Schwerpunkt des Handhabungsobjektes gewählt werden. Der Mittelpunkt des Sauggreifersystems wird durch den Saugflächenschwerpunkt definiert. Es wird von gleichen Saugelementen und -bedingungen ausgegangen. Wird der Wert der Zielfunktion zu groß und überschreitet er einen Schwellwert, sind die entsprechenden Saugelementpositionen ungeeignet (Abb. 99).

Zielfunktion	Grobkriterium
<pre>(DEFUN GUETE.2 (Y1 X1 Y2 X2 SX SY) (SQRT (+ (EXPT (- SX (/ (+ X1 X2) 2)) 2) (EXPT (- SY (/ (+ Y1 Y2) 2)) 2))))</pre>	<pre>(DEFUN GUETE.GROB.2 (BEREICH1 BEREICH2 SCHWERPUNKT ABST.VON ABST.BIS MAX_ABST) (AND (< (ABS (- (/ (+ (CAR BEREICH1) (CAR BEREICH2)) 2) (CADR SCHWERPUNKT))) MAX_ABST) (< (- (/ (+ (CADR BEREICH1) (CADR BEREICH2)) 2) MAX_ABST) (CAR SCHWERPUNKT) (+ (/ (+ (CADR BEREICH1) (CADR BEREICH2)) 2) MAX_ABST))))</pre>

Abb. 99: Zielfunktion des Greifpunktplanungsmoduls

Als Planungsergebnis werden Kontaktzonen für die einzelnen Saugelemente vorgeschlagen. Die codierten Griffflächen werden als Schwarzweißbilder und Greifpunkte durch Kreise graphisch ausgegeben (Abb.100). Weiße Flächen repräsentieren zulässige Kontaktzonen, schwarze Flächen verbotene Zonen. Die symbolischen Ergebnisse werden in Objekten gespeichert, die Greifsituationen repräsentieren.

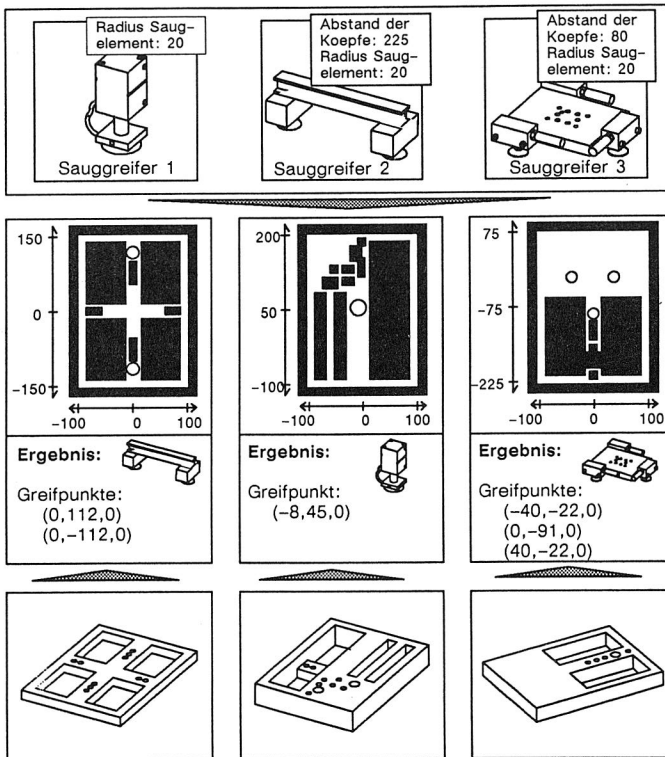


Abb. 100: Planungsergebnisse des Greifpunktplanungsmoduls

9.4.2 Planungsergebnisse des Greifpunktplanungsmoduls

In Abb. 100 sind Saugelementpositionen dargestellt, die mit Hilfe des Planungswerkzeugs (Abb. 101) ermittelt wurden. Die Flachteile wurden mit dem CAD-System modelliert und deren BREP-Datenstruktur über die CAD-KEE Schnittstelle in das Planungswerkzeug übertragen. Als mögliches Greifergrobkonzept wurde je ein Ein-, Zwei- und Dreifachsauggreifersystem vorgegeben. Wesentliche Kenngrößen der zu untersuchenden Sauggreifersysteme werden vom Constraints-System ermittelt. Dabei handelt es sich um Anzahl der Saugelemente, Saugelementdurchmesser, Material und Bauform. Als Planungsergebnis werden konkrete Positionen der Saugelemente am Handhabungsobjekt zurückgeliefert.

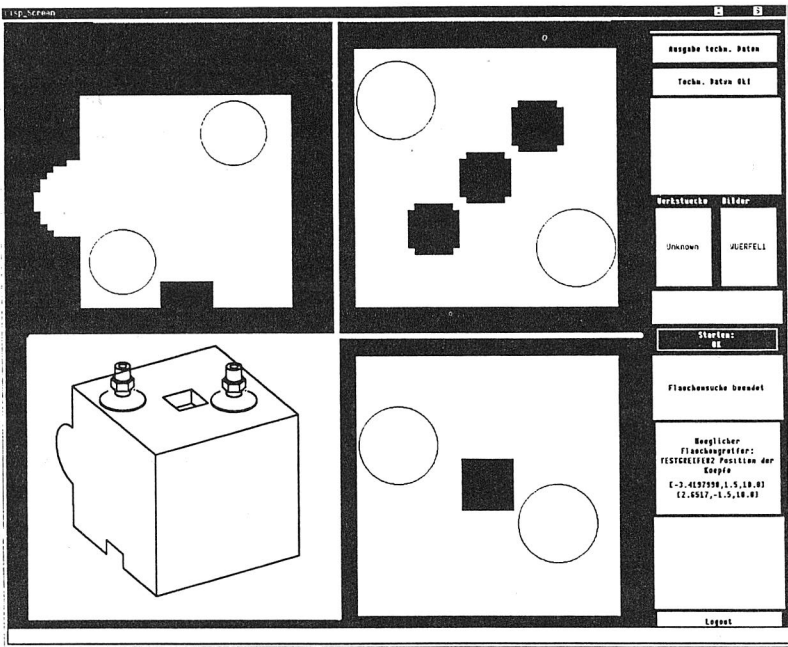


Abb. 101: Bedieneroberfläche mit Planungsergebnissen zur Greifpunktplanung (Bildschirmkopie)

Diese genügen den geometrischen Restriktionen des Handhabungsobjekts. Durch die Positionen der Saugelemente auf der Grifffläche wird die Lage des Greifersystems relativ zum Handhabungsobjekt eingeschränkt. Für Dreifachsauggreifersysteme ergeben sich drei, für Zweifachsauggreifersysteme zwei mögliche Greifsituationen. Lage und Orientierung eines Einfachsauggreifersystems werden bis auf einen Drehwinkel festgelegt. Die gefundenen Lösungen werden direkt zur Programmierung des Handhabungssystems eingesetzt.

Die Greiferplanung kann im Planungsbereich, basierend auf CAD- Produktmodellen, oder integriert in der Zelle, basierend auf Sensor-Informationen, durchgeführt werden. Beispielsweise können die geometrischen Grunddaten zur Platzierung der Saugelemente

von einem Bildverarbeitungssystem übernommen werden. Beim realisierten Verfahren ist dies ohne größere Anpassungen möglich.

Für eine konkrete Zelle mit definiertem Spektrum an Greifersystemen und vorgegebenen Handhabungsaufgaben können Verfahren zur Greiferauswahl und Greifpunktplanung entwickelt werden, die das CAD-Produktmodell der Konstruktion auswerten. Die erzielbaren Planungsergebnisse bilden wesentliche Grunddaten für die Erzeugung von Steuerungsanweisungen der Handhabungssysteme und sind zentraler Bestandteil von Verfahrensketten der Montageplanung.

Verfahren zur Greifpunktplanung und auch zur modellbasierten Greiferauswahl hängen wesentlich von den Möglichkeiten und Randbedingungen der einzusetzenden Betriebsmittel und der vorgesehenen Montageaufgabe ab. Dabei müssen insbesondere die planbaren Greifersysteme, Sensoren, Steuerung, das Handhabungsgerät und das Teilespektrum beachtet werden. Deshalb basieren weitreichende Ansätze zur impliziten Programmierung von Robotern meist auf einem konkreten System aus Greifern, Sensoren, Roboter und Steuerung. Der Austausch einzelner Komponenten ist in der Regel mit Verfahrensänderungen verbunden.

Um die Einsatzplanung für flexibel automatisierte Handhabungs- und Montagezellen zu automatisieren, können für unterschiedliche Zellenaufbauten eigenständige, rechnergestützte Planungsverfahren entwickelt werden. Ob die Planungsintelligenz in der Zelle selbst oder in einer übergeordneten Planungsabteilung liegt, hängt von den verfügbaren Informationen und der damit verbundenen grundsätzlichen Planbarkeit von Handlungen ab. Weiterhin müssen organisatorische und wirtschaftliche Randbedingungen sowie die technologischen Möglichkeiten der Betriebsmittel berücksichtigt werden. Die erreichbare Flexibilität einer Montageeinrichtung wird durch die eingesetzten Betriebsmittel absolut begrenzt. Eine weitere Grenze bildet die verfügbare Planungslogik. Die Automatisierung der Planungslogik ist mit Kosten verbunden. Die Wirtschaftlichkeit einer problemspezifischen Planungslogik setzt deren häufigen Einsatz und geringe Entwicklungskosten voraus. Durch geeignete Programmierwerkzeuge kann versucht werden, die Kosten bei Entwicklung und Anpassung der Planungslogik zu reduzieren.

10. Bewegungsplanung und Überprüfung der Greifkräfte

Die Lage und Orientierung der Kontaktzonen am Handhabungsobjekt und die zugrundeliegenden Wirkprinzipien sind für ein sicheres Greifen entscheidend. Bei Kenntnis dieser Randbedingungen und bei gegebenem Bewegungsablauf kann eine Überwachung auf sicheres Greifen und Kollisionsfreiheit erfolgen. Bei der Auswahl von Sauggreifersystemen sind die aufzunehmenden Kräfte und Momente von besonderer Bedeutung. Sauggreifsysteme stellen kraftschlüssige Verbindungen durch Unterdruck her. Die so aufnehmbaren Kräfte und Momente sind im Vergleich zu formschlüssigen Verbindungen relativ gering.

Um ein sicheres Halten durch eine geeignete Auslegung bzw. Auswahl von Sauggreifersystemen zu gewährleisten, müssen die am Handhabungsobjekt auftretenden Kräfte und Momente berücksichtigt werden. Diese können geschätzt, basierend auf Modellen berechnet oder gemessen werden. Die Bewegungsbahn und damit die auftretenden Kräfte und Momente werden von den kinematischen und dynamischen Eigenschaften des Systems Roboter – Greifer – Handhabungsobjekt, der Steuerung, den Sensoren und den abzuarbeitenden Steuerungsanweisungen bestimmt. Mit Hilfe eines Offline-Programmier- und Simulationssystems kann das Zusammenwirken dieser Randbedingungen schon in der Planung untersucht werden. Dazu werden für modellierte Zellen mit Roboter, Steuerung, Greifer, Handhabungsaufgaben und Peripherie Steuerungsanweisungen erzeugt und abgearbeitet. Die daraus ableitbaren Bewegungsbahnen können zur Ermittlung der am Handhabungsobjekt angreifenden Kräfte und Momente herangezogen werden. Die erstellten Steuerprogramme können im Sinn einer Verfahrenskette auch in realen Roboterzellen eingesetzt werden.

10.1 Generierung von Steuerungsanweisungen für Roboterzellen

Im folgenden wird ein Planungswerkzeug zur automatischen Generierung von Steuerungsanweisungen für einen eingeschränkten Problembereich dargestellt. Dieses Werkzeug verarbeitet Planungsergebnisse aus den Bereichen Greiferauswahl und Greifpunktplanung. Anhand der generierten Steueranweisungen werden im Rahmen einer Bewegungssimulation am Handhabungsobjekt angreifende Kräfte und Momente ermittelt und zur Verifikation sowie zur optimierten Greiferauslegung eingesetzt.

10.1.1 Ein problemspezifisches Programmiersystem

Kommerzielle Robotersteuerungen verarbeiten bewegungsorientierte Befehle. Sollen aus Handhabungs- und Montageanweisungen automatisch Bewegungssätze abgeleitet werden, müssen zusätzliche Informationen bekannt sein. Zur Verarbeitung der Anweisung 'Lege Teil_1 auf Teil_2' müssen beispielsweise die Lage der beiden Teile, Greiferbefehle, Griffpositionen und die Vorgehensweise bei der Umsetzung des Befehls 'Lege auf' in bewegungsorientierte Anweisungen bekannt sein. Unterschiedliche Restriktionen, wie z.B. Greifkräfte und Hindernisse, müssen dabei, wie in /105/ dargestellt, bei der Bewegungsplanung berücksichtigt werden.

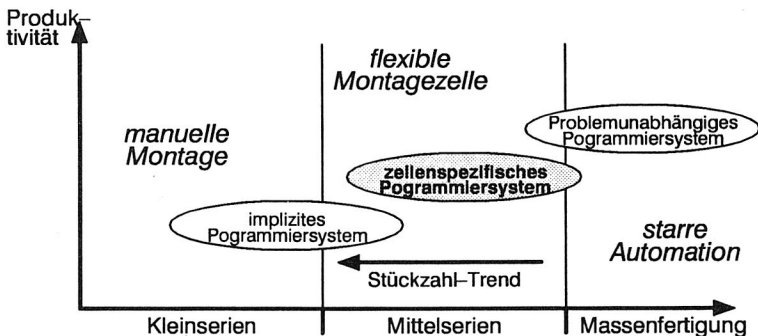


Abb. 102: Häufigkeit der Anwendung eines Roboterprogramms und wirtschaftliche Programmierertechnik

Zellenspezifische Programmiersysteme sind auf spezielle Montage- bzw. Handhabungszellen abgestimmt und nur für eingeschränkte Aufgabengebiete, wie z.B. das Palettieren, einsetzbar. Für Problembereiche mit niedrigeren Flexibilitätsanforderungen können parametrisierte oder mehrere Steuerprogramme entwickelt werden. Ein im wesentlichen problemunabhängiges, aufgabenorientiertes bzw. implizites Programmiersystem hat dagegen die Zielrichtung, allgemeine Sprachkonstrukte bereitzustellen und so mehrere Problembereiche abzudecken. Ein **zellenspezifisches Programmiersystem** wird mit problemspezifische Bedieneroberflächen ausgestattet und kann Handhabungsanweisungen direkt in konkrete Steuerungsprogramme umsetzen. Änderungen der Problemstellung, des Zellenlayouts oder einzelner Betriebsmittel können bei

zellenspezifischen, im Gegensatz zu *impliziten Programmiersystemen*, zu Änderungen des Programmiersystems selbst führen. Um dennoch eine gewisse Problemunabhängigkeit und Flexibilität zu gewährleisten, sollte die Entwicklung *zellenspezifischer Programmiersysteme* durch die Arbeitsumgebung unterstützt werden (Abb. 102).

Es werden zunächst Anforderungen definiert, die bei der Entwicklung eines *zellenspezifischen Programmiersystems* zu beachten sind. Die wesentlichen Randbedingungen der Aufgabenstellungen, wie z.B. der Roboter, mögliche Greifer, Steuerung, Sensoren, Steuerungssprache und Layout müssen bekannt sein. Der Kontext der Aufgabenstellungen, das Spektrum der Handhabungsobjekte und die auszuführenden Handhabungsoperationen sollten definiert sein. Es müssen Erfahrungen über Vorgehensweisen und Probleme vorliegen, die bei einer konventionellen, manuellen Programmierung der Aufgabenstellungen auftreten. Darunter fallen Erreichbarkeit des Arbeitsraums, Genauigkeit, Sensoreinsatz, dynamisches Verhalten des Roboters und die Handhabbarkeit der Objekte. Das Prinzip, wie aus einer konkreten Aufgabenstellung des Problemfeldes eine Lösung in Form von Bewegungsanweisungen der Steuersprache gewonnen werden kann, muß vollständig nachvollziehbar sein. Es sollte weiterhin bekannt sein, was eine 'gute Lösung' ist. Die Zielsetzung, unter der ein Programm generiert wird, sollte klar und einfach definiert sein. Mögliche unterschiedliche, zum Teil komplexe und deshalb problematische Zielkriterien, sind eine gleichmäßige schwingungsfreie Bewegung des TCP's, minimale Taktzeit und niedrige Greifkräfte. Die genannten Voraussetzungen sollten den Problembereich nicht zu sehr einschränken. Nur wenn genügend viele, unterschiedliche, konkrete Aufgaben und Lösungen programmiert werden sollen, ist die wirtschaftliche Entwicklung eines zellenspezifischen Programmiersystems möglich.

10.1.2 Ein zellenspezifisches Programmiersystem zum Stapeln von Flachteilen

Im folgenden wird ein Programmiersystem zur flexiblen Handhabung von Flachteilen vorgestellt (Abb. 103). Das Programmiersystem wurde speziell für das Umstapeln von Flachteilen in einer vorgegebenen Roboterzelle realisiert.

Soll es auf andere Anwendungen, wie z.B. die Bestückung von Leiterplatten übertragen werden, sind entsprechende Anpassungen der Verfahren, Bedieneroberflächen und Schnittstellen vorzunehmen. Eine Stapelaufgabe ist durch eine Ausgangs- und eine

Zielsituation definiert (Abb. 103). Eine Situation beschreibt jeweils eindeutig die Lage und Orientierung aller handhabbaren Objekte auf dem Arbeitstisch der Roboterzelle. Aufgabenstellung ist es, eine Sequenz von Steuerungsanweisungen zu ermitteln, die von der Robotersteuerung interpretiert und abgearbeitet werden kann. Der Roboter soll die Ausgangssituation in die Zielsituation überführen.

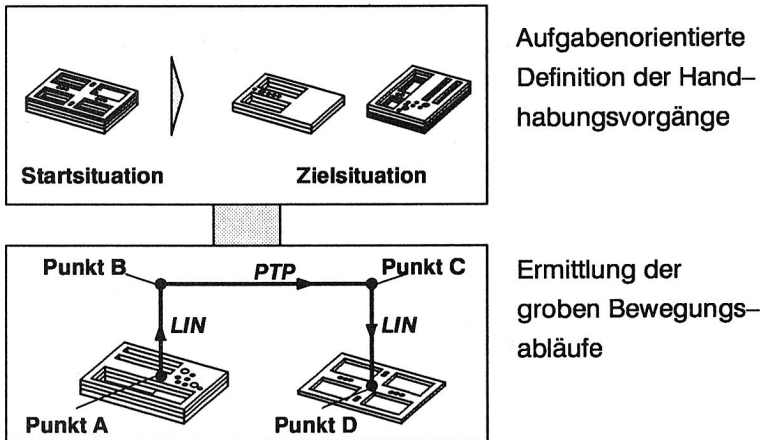


Abb. 103: Beispielproblem Stapeln von Flachteilen

Die Stapelaufgabe erfüllt im wesentlichen die Anforderungen des vorherigen Abschnitts. Es lassen sich vielfältige, anschauliche Aufgabenstellungen mit geringem Dialogaufwand definieren. Ergebnisse der Greifer- und Greifpunktauswahl können direkt integriert werden. Die produktionstechnische Bedeutung des Stapelns ergibt sich beim Verpacken oder Palettieren von Produkten unterschiedlicher Abmessungen. Vergleichbare Probleme sind *Türme von Hanoi* oder auch die Ermittlung einer Montagereihenfolge aus den geometrischen Produktdaten. Auf eine Umsetzung eines konkreten Fertigungsproblems wurde aufgrund des exemplarischen Charakters der Implementierung verzichtet. Anhand der prototypischen Realisierung soll dargestellt werden, wie für spezielle und geeignete Handhabungsaufgaben Programmiersysteme entwickelt und in eine rechnergestützte Verfahrenskette integriert werden können.

10.1.3 Bereitstellung der Ausgangsdaten

Das realisierte Programmiersystem stellt Benutzerschnittstellen zur Beschreibung der eigentlichen Aufgabenstellung und zur Modellierung der Roboterzelle bereit.

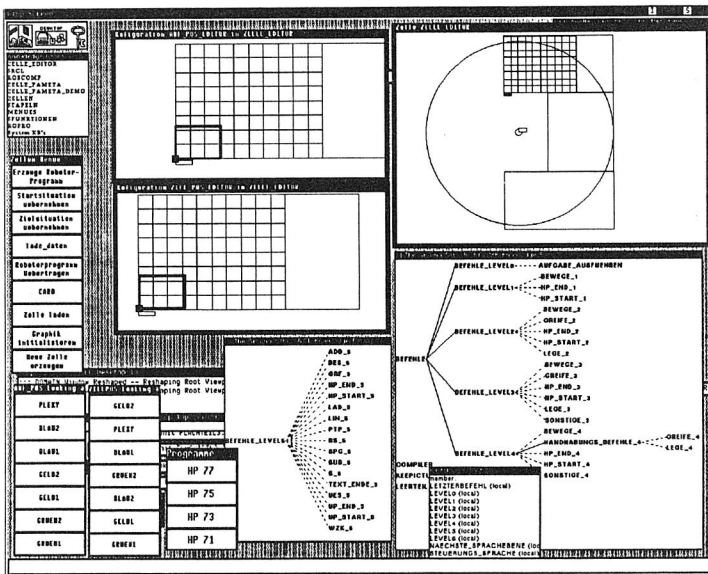


Abb. 104: Bedieneroberfläche des Programmiersystems zum Umstapeln von Flachteilen (Bildschirmkopie)

Die erzeugten Steuerbefehle werden im Offline-Programmieresystem CARo oder in der realen Roboterzelle ausgeführt. Ein Teil der Randbedingungen hat die Entwicklung des Programmiersystems selbst beeinflusst. Deren Änderung ist mit einer Anpassung des Programmiersystems verbunden. Für die interaktive Eingabe der eigentlichen Aufgabenstellung sind Benutzerschnittstellen verfügbar. Die Ausgangs- und Zielpositionen der bewegbaren Objekte und deren Eigenschaften (Geometrie, mögliche Greifsituationen) definieren das eigentliche Stapelproblem. Weitere Daten beschreiben die Roboterzelle mit den verfügbaren Greifersystemen, Arbeitstischen und

Hindernissen (Abb. 104). Einflußgrößen der Aufgabenstellung werden interaktiv eingegeben oder aus der Datenbank eingelesen. Die Lage des Arbeitstisches relativ zum Weltkoordinatensystem des Roboters wird durch *teach-in* ermittelt. Die Lage der Objekte relativ zum Koordinatensystem des Arbeitstisches wird interaktiv vorgegeben.

10.1.4 Generierung von Steuerungsprogrammen

Die Entwicklung des Programmiersystems wurde durch die Möglichkeiten der Roboterzelle (Steuerung RCM-3, Roboterprogrammiersprache SRCL, Robotersystem Manutec R3), durch die Beschränkung der Objekte auf Blockteile und nicht zuletzt durch den Problembereich Stapeln beeinflusst. Die Bewegungsplanung des Greifvorgangs ist auf Sauggreifersysteme beschränkt. Zur Entwicklung des Programmiersystems wurden Situationen und Randbedingungen strukturiert und repräsentiert sowie Verfahren realisiert. Verfahren und die von ihnen verwendeten Datenstrukturen zur Repräsentation der Aufgabenstellung, Randbedingungen und Zwischenergebnisse beeinflussen sich wechselseitig. Im weiteren werden die getroffenen Entwurfsentscheidungen grob dargestellt. Die zu erzeugenden Roboterprogramme sollen bei ihrer Ausführung die bewegbaren Objekte auf dem Arbeitstisch manipulieren (Abb. 105). Beginnend bei der Ausgangssituation wird dabei über mehrere Zwischensituationen die Zielsituation erreicht. Das Stapelproblem wurde grob in zwei Aufgabenbereiche zerlegt:

In einer ersten Phase wird von der Strategiekomponente geplant, wie die Ausgangssituation unter Verwendung abstrakter Bewegungsoperationen in die Zielsituation überführt werden kann. Es werden die Zwischenzustände festgelegt und Aktionen geplant, die diese Zwischenzustände ineinander überführen. Die Strategiekomponente ermittelt zulässige Ablageflächen auf dem Arbeitstisch und führt Kollisionsprüfungen beim Ablegen der Objekte sowie bei deren Bewegung durch. Um die Qualität der generierten Programme zu erhöhen oder technologische Einflußfaktoren flexibler zu berücksichtigen, kann die Strategiekomponente auch ganz oder teilweise als regelbasiertes System realisiert werden. Ergebnis der Strategiekomponente ist eine Sequenz abstrakter Operationen der ersten Sprachebene.

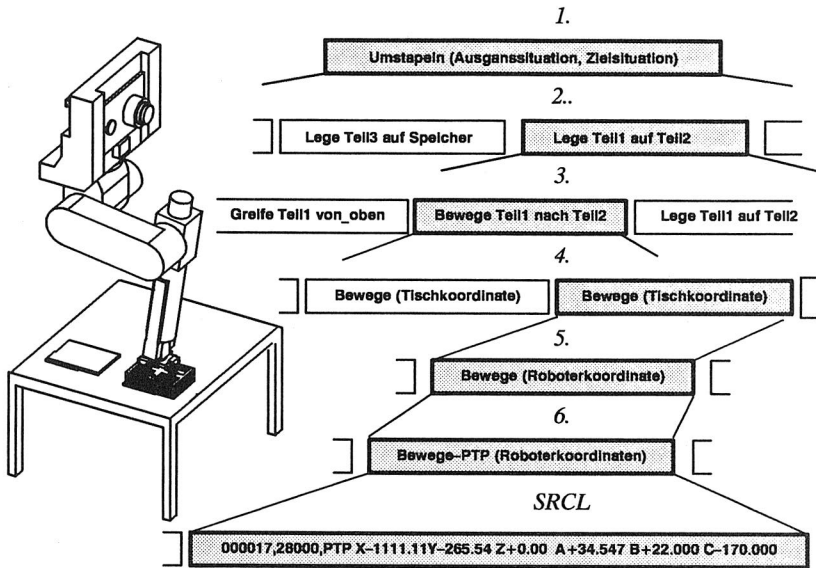


Abb. 105: Die verwendeten Sprachebenen bei der Erzeugung von Steueranweisungen für das Umstapeln

Diese Sequenz wird in einer zweiten Phase über weitere Sprachebenen unter zunehmender Berücksichtigung geometrischer, technologischer, greif- und steuerungstechnischer Randbedingungen in konkrete Anweisungen im **SRCL-IR-DATA**-Format umgesetzt. Die geometrischen Randbedingungen werden dazu in einem Umweltmodell mitgeführt. Eine Sprachebene wird vollständig übersetzt, bevor die nächste bearbeitet wird.

Die Programmerzeugung wurde zum Teil auf die verwendete **RCM**-Steuerung abgestimmt. Es werden Annahmen über die Erreichbarkeit des Arbeitsraums und über die kollisionsfreie Bewegbarkeit des Roboterarms vorausgesetzt. Diese können aufgrund der Kinematik des verwendeten Robotersystems, des Layouts und der grundsätzlichen Bewegungsabläufe beim Aufnehmen und Ablegen von Flachteilen mit Hilfe eines Sauggreifersystems getroffen werden. Daraus ergibt sich insgesamt eine

gewisse Betriebsmittel- und Layoutabhängigkeit der zweiten Übersetzungsphase. Die Strategiekomponente dagegen ist vornehmlich problemabhängig (Abb. 106).

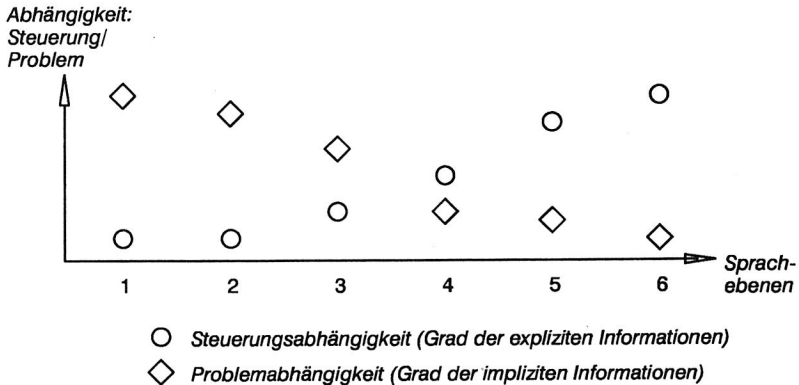


Abb. 106: Problemunabhängigkeit der Sprachebenen aus Abb. 105

Das Programmiersystem erzeugt für ein Stapelproblem entsprechende Steuerprogramme für eine Roboterzelle. Im Sinn einer Verfahrenskette werden Ergebnisse aus den Werkzeugen zur Greiferauswahl und Greifpunktplanung vom Programmiersystem direkt verarbeitet. Durch die Analyse der generierten Programme im Simulationssystem CARo kann die Kollisionsfreiheit überprüft werden. Weiterhin lassen sich Ausführungszeiten und die am Handhabungsobjekt angreifenden Kräfte und Momente ermitteln.

10.1.5 Übertragung der Steuerprogramme

Zur Überprüfung der Funktionsfähigkeit des Programmiersystems wurden erzeugte Roboterprogramme an eine reale Roboterzelle übertragen und ausgeführt (Abb. 107). Ein sechssachsiger Gelenkarmroboter vom Typ **Manutec R3** kann mit Hilfe eines Sauggreifersystems Flachteile unterschiedlicher Geometrie handhaben. Die eingesetzten Greifersysteme und die möglichen Greifsituationen sind Ergebnis der Greiferplanung.

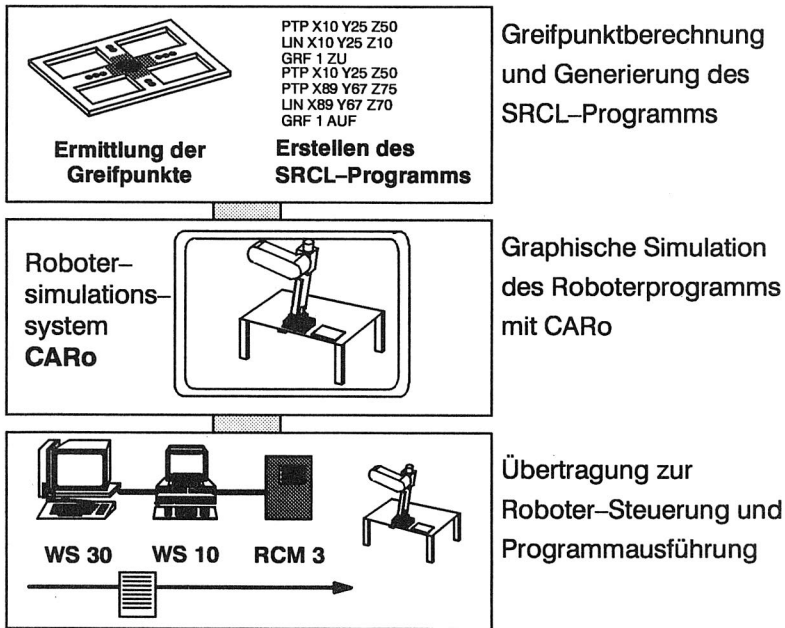


Abb. 107: Übertragung der Roboterprogramme in die Handhabungszelle

Die vom Programmiersystem erzeugten Programme im **IRDATA**-Format werden über Fabrikbus an den Zellenrechner übertragen. Dort erfolgt eine Übersetzung in das interne **SRCL**-Format mit dem Programmiersystem **SIROTEC PS-1.6**. Über die Druckerschnittstelle wird das Programm in die Steuerung übertragen und kann ausgeführt werden. Die Übertragung kann auch direkt über eine **DNC**-Schnittstelle erfolgen. Die Entwicklung eines zellenspezifischen Programmiersystems und dessen Einsatz sind für Aufgaben bzw. Bewegungsabläufe geeignet, die nicht sehr oft oder nur einmal benötigt werden. In diesem Fall ist der Aufwand bei der Programmierung ausschlaggebend. Eine Optimierung der Ausführungszeit oder der auftretenden Kräfte und Momente ist dagegen von untergeordneter Bedeutung.

Bei einem häufigeren Einsatz eines Roboterprogramms gewinnt dessen Optimierung an Bedeutung. Die Entwicklungskosten verteilen sich auf die einzelnen Programmläufe. Es

können so auch mit relativ großem Aufwand optimierte Programme wirtschaftlich entwickelt und eingesetzt werden.

10.2 Kräftemodell für Sauggreifer

Für Sauggreifersysteme mit bis zu drei Saugelementen, die auf einer Ebene liegen, wurden Kräftemodelle aufgestellt und implementiert. In Abb. 108 sind Zusammenhänge zwischen den Parametern eines Sauggreifersystems und den Parametern des gegriffenen Handhabungsobjekts sowie deren Einfluß auf die “Haltebedingung” dargestellt.

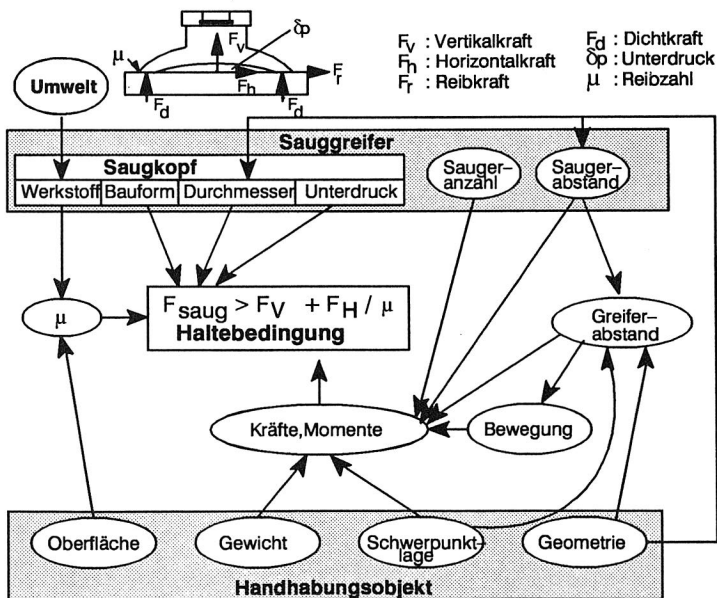


Abb. 108: Haltebedingung eines Saugelements

Ist die Haltebedingung zu jedem Zeitpunkt des Handhabungsvorgangs erfüllt, ist ein sicheres Greifen gewährleistet. Diese Zusammenhänge des Kräftemodells sind in

(Abb. 109) als Constraints-System implementiert. Das Constraints-System verarbeitet die an einem Saugelement angreifenden horizontalen und vertikalen Kräfte. Diese Kräfte werden durch die während des Handhabungsvorgangs auftretenden Trägheitskräfte und –momente des Handhabungsobjekts hervorgerufen. Fügekräfte werden in dieser Arbeit nicht modelliert. In /77/ wird eine Methodik zur Berechnung der von den Saugelementen aufzunehmenden Kräfte aus den am Handhabungsobjekt selbst angreifenden Kräfte und Momente dargestellt. Dies wird exemplarisch für Sauggreifersysteme mit vier Saugelementen durchgeführt. Diese Berechnungsmethodik wurde aus /77/ übernommen, auf Sauggreifersysteme mit einem, zwei und drei Saugelementen übertragen und als Constraints-Systeme implementiert. Diese Constraints werden über die entsprechenden Variablen an das Constraints-System aus Abb. 109 angeschlossen.

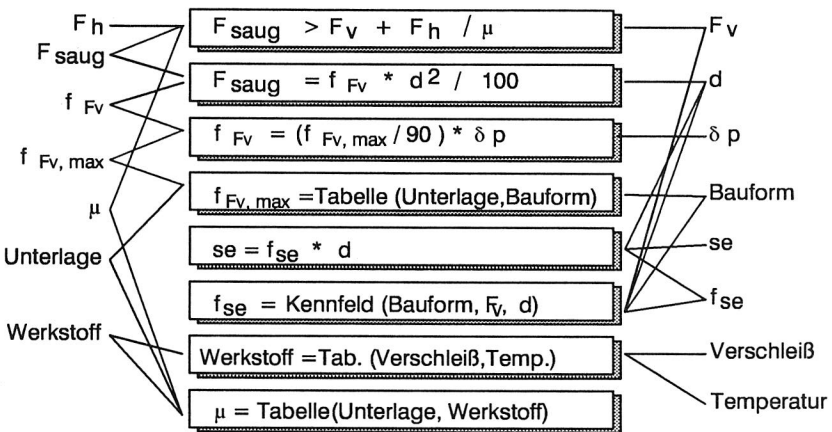


Abb. 109: Constraints-System für ein Saugelement

In Abb. 110 ist die Benutzeroberfläche des realisierten Constraints-System mit den entsprechenden Variablen dargestellt. Damit kann die *Haltebedingung* (vergl. /77/) anhand der am Handhabungsobjekt angreifenden Trägheitskräfte und –momente überprüft werden. Als zusätzliche Variable wird die Position der Saugelemente am Handhabungsobjekt benötigt. Diese Information wird vom Greifpunktplanungs Werkzeug geliefert und durch die Greifsituation vorgegeben. Zur Berechnung

der am Handhabungsobjekt auftretenden Trägheitskräfte und Momente wurde das Offline-Programmiersystem **CARo** um eine einfache exemplarische Dynamik-Komponente erweitert. Es werden ausschließlich die Trägheitskräfte und Momente, die am Handhabungsobjekt angreifen im Simulationssystem **CARo** zu diskreten Zeitpunkten ermittelt und protokolliert. Dynamische Effekte des Roboters selbst werden in **CARo** nicht berücksichtigt.

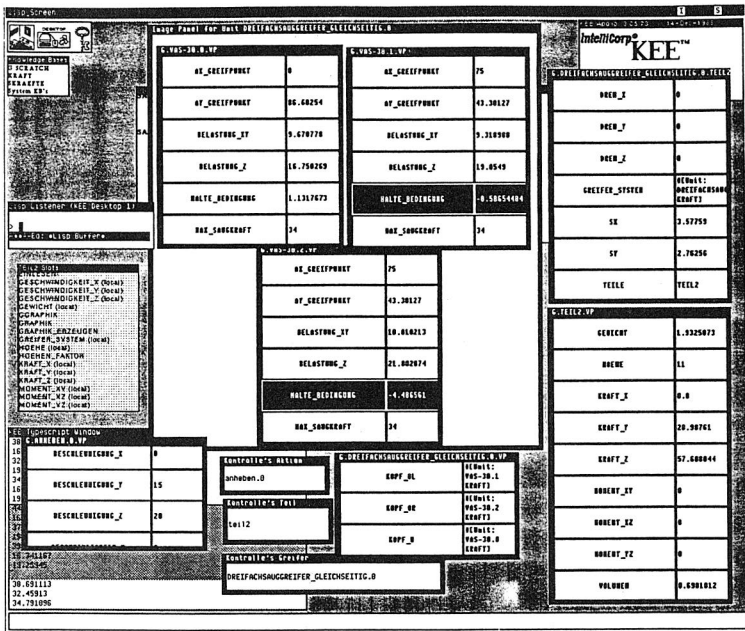


Abb. 110: Bedieneroberfläche zur Überprüfung der Haltebedingung
(Bildschirmkopie)

Die protokollierten Kraft- und Momentenverläufe werden in einem Auswertemodul nachträglich analysiert. Das Programmsystem kann dann jeden protokollierten Zeitpunkt dahingehend überprüfen, ob die Haltebedingung erfüllt ist oder nicht. Falls ein sicheres Halten nicht gewährleistet ist, müssen entsprechende Planungsschritte optimiert werden. Optimierungsmöglichkeiten bieten dazu z.B. die Bewegungsplanung,

die Greifpunktplanung und die Greiferauswahl.

In Abb. 111 ist ein Ausschnitt der Bedieneroberfläche von CARo abgebildet. Die Bewegungssätze der dargestellten Roboterbewegung wurden mit Hilfe des zellenspezifischen Programmiersystems automatisch generiert. Der verwendete Greifer und die Greifpunkte werden aus dem CAD-Produktmodell des Flachteils ermittelt und an das Programmiersystem übergeben.

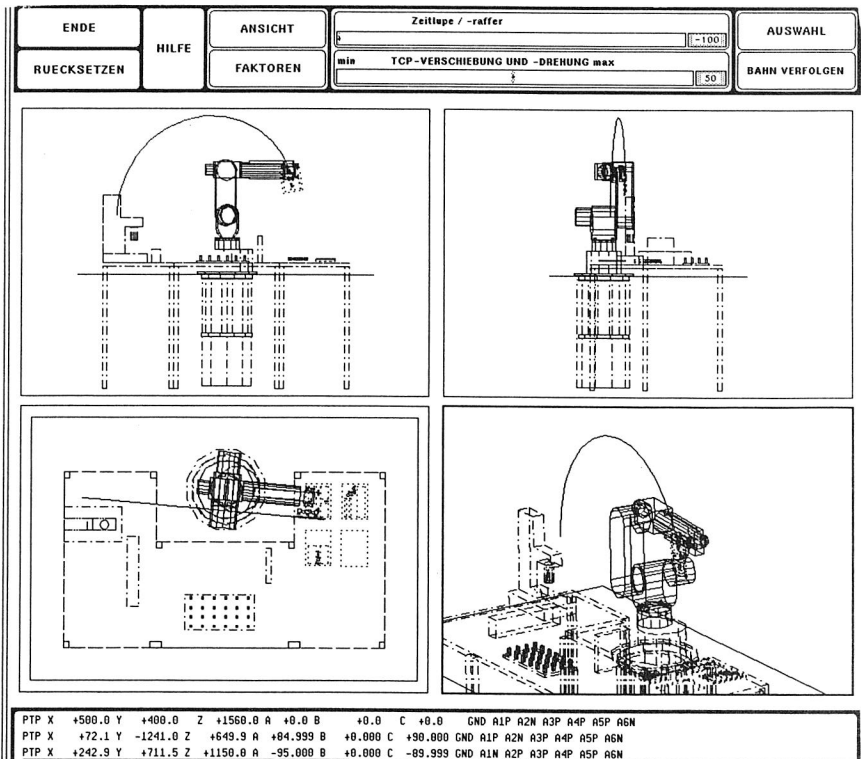


Abb. 111: Simulation eines Bewegungssatzes mit CARo
(Bildschirmkopie)

Für die in Abb. 111 dargestellte Bewegungssequenz sind die, von der Dynamik-Komponente errechneten, am Handhabungsobjekt auftretenden Kraft- und Momentverläufe in Abb. 112 dargestellt. Zu jedem Zeitpunkt muß dabei ein sicheres Halten gewährleistet sein. Dies kann mit dem Programmsystem zur Überprüfung der Haltebedingung (Abb. 110) nachgewiesen werden.

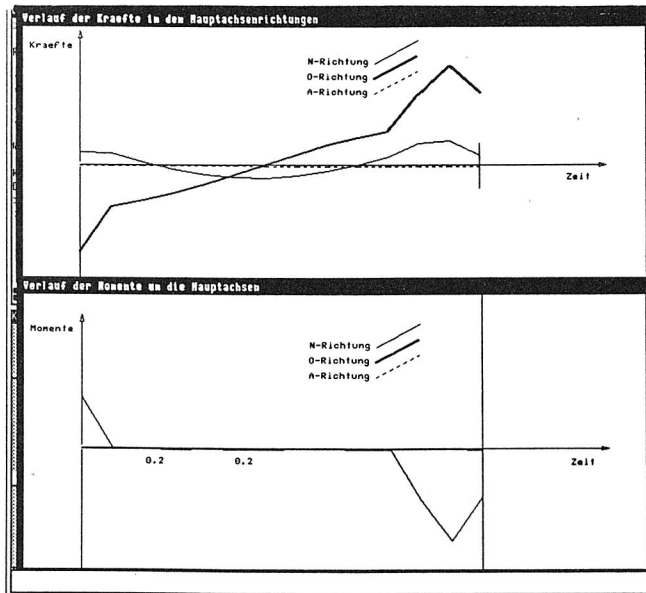


Abb. 112: Kraft- und Momentverläufe der Bewegung aus Abb. 111
(Bildschirmkopie)

10.3 Diagnose des Planungsverlaufes

Für eine problemspezifische Verfahrenskette kann versucht werden, eine rechnergestützte Kontrolle der einzelnen Planungsphasen zu realisieren. Die Kontrolle muß z.B. dann eingreifen, wenn Zielvorgaben nicht erreicht werden können. Es ist zu entscheiden, in welcher Planungsphase Anpassungen durchzuführen sind. Weiterhin ist

zu beachten, wie sich diese Anpassungen auf andere Phasen und Modelle auswirken. Die Eingriffsmöglichkeiten bei der Planung automatisierter Montagesysteme sind vielfältig und können unterschiedliche Phasen betreffen. Deshalb wird ein auf Erfahrungswissen basierendes Vorgehen vorgeschlagen.

Dazu wird eine konkrete Verfahrenskette zunächst interaktiv direkt von Planungsexperten kontrolliert. Das sich dabei heranbildende Diagnose- und Reparaturwissen kann in ein wissensbasiertes Kontrollsystem integriert und durch entsprechende Formalismen unterstützt werden. Im Diagnoseteil werden mögliche Planungsfehler ermittelt. Das Reparatursystem unterstützt die Beseitigung der Fehler und die dazu notwendigen Anpassungen. Eine problemspezifische Verfahrenskette besitzt betriebsabhängige Eigenheiten und durch das hinterlegte Wissen eine gewisse Eigendynamik. Deshalb wird auch ein Kontrollsystem von den Eigenschaften der zu überwachenden Verfahrenskette geprägt sein. Inwieweit die Entwicklung eines rechnergestützten Kontrollmechanismus sinnvoll ist, hängt u.a. von Art und Häufigkeit der auftretenden Planungsfehler und der Dynamik des dazu benötigten Wissens ab.

Daraus ergibt sich insgesamt eine mögliche Architektur für problemspezifische Verfahrensketten der Montageplanung. Eine Verfahrenskette kann als Blackboard-System aufgebaut werden. Die Planungsmodelle auf unterschiedlichen Abstraktionsebenen bilden das Blackboard. Den einzelnen Ebenen werden Planungswerkzeuge zur Entwicklung der Modelle zugeordnet. In einem Planungswerkzeug können unterschiedliche Wissensbereiche verarbeitet werden. Die Kontrolle ist als Diagnose- und Reparatursystem ausgebildet.

11. Zusammenfassung

Im Gegensatz zur Teilefertigung stehen der Montage keine universell einsetzbaren Verfahrensketten zur Verfügung. Ein Grund dafür sind die vielfältigen, komplex strukturierten Randbedingungen und Abhängigkeiten. Zu deren Auflösung setzen Planungsexperten Erfahrungswissen sowie betriebspezifische Automatisierungskonzepte und Planungsverfahren ein. Dementsprechend sollten leistungsfähige rechnergestützte Werkzeuge für die Montage individuelles, erfolgreiches, betriebs- und expertenspezifisches Vorgehen unterstützen. Kommerzielle Planungswerkzeuge, wie CAD-Systeme oder Datenbanken mit einem Entwicklungsaufwand von hunderten Mannjahren, können nur durch eine große Anzahl von Installationen wirtschaftlich genutzt werden. Eine Anpassung dieser kommerziell verfügbaren Werkzeuge an individuelle Planungsabläufe wird aber in der Regel nur unzureichend unterstützt.

Programmiermethoden der Künstlichen Intelligenz erweitern die Möglichkeiten zur wirtschaftlichen Entwicklung und Anpassung spezifischer Planungswerkzeuge bzw. Verfahrensketten und erhöhen damit die Flexibilität automatisierter Montagesysteme. Die Berücksichtigung individueller Randbedingungen und Vorgehensweisen reduziert die Komplexität der erforderlichen Regelkreise und begünstigt eine weitergehende Automatisierung der Planungsprozesse.

Problemspezifische Verfahrensketten und Planungswerkzeuge hängen u.a. vom Aufgabenbereich, betriebs- und personenspezifischen Erfahrungen ab und sind auf konkrete Handhabungs- und Montagezellen ausgerichtet. Diese Randbedingungen sind bei der Entwicklung zu beachten, weshalb sich problemspezifische Verfahrensketten nicht ohne Anpassungen auf andere Bereiche und Montagesysteme übertragen lassen. Eine wissensbasierte Arbeitsumgebung für die Montageplanung unterstützt die Planungsexperten bei dieser Aufgabe.

Da die Bedienung und Anpassung von Verfahrensketten und dialogorientierten Planungswerkzeugen mit einer Programmentwicklung vergleichbar ist, wird ein wissensbasiertes Software-Entwicklungswerkzeug als Grundlage einer Arbeitsumgebung für die Montageplanung vorgeschlagen. Zur systematischen Entwicklung problemspezifischer Verfahrensketten wird ein Phasenmodell erarbeitet.

Auf der Basis der Programmierumgebung KEE wird im zweiten Teil der Arbeit exemplarisch eine problemspezifische Verfahrenskette, mit Schwerpunkt Greifer-

planung realisiert. Die Greiferplanung wird dazu in ein Umfeld zur rechnergestützten Montageplanung integriert. Für die definierten Planungsphasen werden Werkzeuge prototypisch realisiert.

Auf der Basis einer greiftechnischen Analyse des CAD gestützten Produktmodells wird die Strukturplanung durchgeführt. Den auszuführenden Montagetätigkeiten werden Zellen zugeordnet. Dabei werden Vorrangbeziehungen, Planzeiten, zellen- und systembezogene Restriktionen sowie individuelles Problemlösungswissen berücksichtigt.

Anschließend wird für eine Zelle ein konkretes Greiferkonzept, bestehend aus einem oder mehreren Greifersystemen, ausgewählt. Dabei werden insbesondere Sauggreifersysteme detailliert modelliert. Anhand des CAD-Modells des Handhabungsobjektes werden für ausgewählte Sauggreifersysteme zulässige Positionen der Saugelemente automatisch ermittelt.

Die Saugelementpositionen werden bei der Generierung von Roboterprogrammen verarbeitet. Dazu wird für das Stapeln von Flachteilen ein zellenorientiertes Programmiersystem entwickelt. Die mit Hilfe des Programmiersystems generierten Roboterprogramme werden in einem Offline-Programmier- und Simulationssystem abgearbeitet und analysiert. Neben einer visuellen Kollisionskontrolle werden die am Handhabungsobjekt angreifenden Kräfte und Momente protokolliert. Dazu wurde das Simulationssystem CARo um eine exemplarische Dynamik-Komponente erweitert.

Anhand der protokollierten Kraft- und Momentverläufe läßt sich feststellen, ob ein sicheres Greifen gewährleistet ist. Für ausgewählte Sauggreiferkonzepte werden dazu entsprechende Kräfte Modelle implementiert.

Die vorliegende Arbeit zeigt damit Möglichkeiten zur Entwicklung problemspezifischer Verfahrensketten auf. Dabei werden Methoden und Werkzeuge der Künstlichen Intelligenz und Wissensverarbeitung auf die Montageplanung übertragen. Am Beispiel der Greiferplanung werden Entwicklungs- und Integrationspotentiale wissensbasierter Planungsverfahren aufgezeigt. Eine exemplarisch realisierte Verfahrenskette wird an einer konkreten Roboterzelle erfolgreich erprobt.

12. Literatur

1. Feldmann, K.: Rechnerintegrierte Montagesysteme.
Tagung Rechnerintegrierte Produktionssysteme,
Universität Erlangen (1987) S. 279–294.
2. Eversheim, W.: Organisation in der Produktionstechnik, Band 3,
Arbeitsvorbereitung.
VDI-Verlag, Düsseldorf (1989).
3. Huck, M.: Rechnerunterstützte Projektierung von
Roboteranwendungen.
VDI-Berichte, Nr.723, VDI-Verlag, Düsseldorf (1989).
4. Spur, G.;
Specht, D.;
Göbler, T.: Konzept einer wissensbasierten Arbeitsumgebung
für die Konstruktion.
ZwF, 83, 10 (1988) S. 502–506.
5. Warnecke, G.: Produktionsfaktor Wissen.
VDI-Z, 130, 11 (1988) S. 12–16.
6. Milberg, J.;
Diess, H.: Optimierung der Montagetechnik durch
rechnerunterstützte Planungssysteme.
ZwF, 82, 4 (1987) S. 190–195.
7. Diess, H.: Rechnergestützte Entwicklung flexibel
automatisierter Montageprozesse.
Springer Verlag, Berlin (1988).
8. Weule, H.;
Friedmann, T.: Rechnerunterstützte Produktanalyse in der
Montageplanung.
VDI-Z, 129, 12 (1987) S. 59–63.
9. Wedekind, H.;
Härder, T.: Datenbanksysteme 1.
Bibliographisches Institut, Mannheim (1983).
10. Eisele, R.;
Geyer, G.: Montagesysteme aufgabenorientiert planen
und programmieren.
ZWF, 84, 11 (1989) S. 645–649.
11. Hertzberg, J.: Planen – Einführung in die Planerstellungsmethoden
der Künstlichen Intelligenz.
BI-Wissenschafts Verlag, Mannheim (1989).
12. Bullinger, H.-J.: Systematische Montageplanung: Handbuch für die
Praxis.
Hanser Verlag, München (1988).

13. Eversheim, W.;
Witte, K.-W.;
Peffekoven, K.H.: Montage richtig planen.
Fortschritts-Berichte, VDI-Reihe 2, Nr.45,
VDI-Verlag, Düsseldorf (1981).
14. Metzger, H.: Planung und Bewertung von Arbeitssystemen in der
Montage.
Dissertation, Universität Stuttgart (1977).
15. Walther, J.: Systematische Planung flexibel automatisierter
Montageanlagen.
VDI-Z, 127, 9 (1985) S. 313-318.
16. Hemberger, A.: Innovationspotentiale in der rechnerintegrierten
Produktion durch wissensbasierte Systeme.
Hanser Verlag, München (1988).
17. Friedmann, T.: Integration von Produktentwicklung und
Montageplanung durch neue rechnerunterstützte
Verfahren.
Dissertation, Universität Karlsruhe (1989).
18. Eisele, R.: Konzeption und Wirtschaftlichkeit rechnerintegrierter
Planungssysteme.
Hanser Verlag, München (1990).
19. Köhler, F.: Montgearbeitsplanerstellung mit Expertensystemen.
TÜV Rheinland, Köln (1989).
20. Lutz, L.: Abtacken von Montagelinien.
Krausskopf-Verlag, Mainz (1973).
21. Görke, M.: Rechnerunterstütztes Verfahren zur Leistungsabstim-
mung von Mehrmodell-Montagesystemen.
Dissertation, Universität Stuttgart (1978).
22. Doll, T.J.;
Huber, D.: ROKON.1 ein Expertensystem zur Auswahl von
Greifern und Sensoren für Roboteranwendungen.
WIMPEL 88, Teubner-Verlag, Stuttgart (1988)
S. 142-156.
23. Cardaun, U.: Systematische Auswahl von Greiferkonzepten für die
Werkstückhandhabung.
Dissertation, Universität Hannover, Fakultät für
Maschinenwesen (1981).

24. Mayer, S.: LAPEX- Ein rechnerunterstütztes Verfahren zur Betriebsmittelzuordnung.
IPA-Bericht, Nr.70, Springer Verlag, Berlin (1983).
25. Schlüter, K.: Simulation als Hilfsmittel für Planung und Betrieb von Produktionssystemen.
atp, 29, 9 (1987) S. 416-42.
26. Eich, E.;
Klinger, R.;
Richter, J.;
Salfeldt, M.: Konfigurieren technischer Systeme mittels Expertensystemen.
atp, 31, 4 (1989) S. 182-189.
27. Nolting, F.-W.: Projektierung von Montagesystemen.
Dissertation, Universität Erlangen,
Hanser Verlag, München (1989).
28. Feldmann, K.;
Eisele, R.;
Kleineidam, G.: Verfahrenskette zur Planung und Programmierung von Montagesystemen.
ZwF, 82, 9 (1987) S. 521-527.
29. Kleineidam, G.: CAD/CAP: Rechnergestützte Montagefeinplanung.
Hanser Verlag, München (1990).
30. Feldmann, K.;
Abels, St.;
Thim, C.: Simulation komplexer Montagesysteme.
Fortschritte in der Simulationstechnik – Band 1,
6. Symposium, Wien, Hrsg. Breiteneker, F.; Troch, I.;
Kopacek, P., Vieweg Verlag, Braunschweig (1990)
S. 430-434.
31. Spur, G.;
Specht, W.: Expertensysteme in der Produktionstechnik.
ZwF, 81, 3 (1986) S. 131-134.
32. Krallmann, H.: Anwendungen in CIM.
Expertensysteme – State of the Art, 1
(1986) S. 73-78.
33. Mertens, P.;
Borkowski, V.;
Geis, W.: Betriebliche Expertensystem-Anwendungen,
eine Materialsammlung.
2. Auflage, Springer Verlag, Berlin (1990).
34. Puppe, F.: Einführung in Expertensysteme.
Springer Verlag, Berlin (1988).

35. Lehmann, C.M.: Wissensbasierte Unterstützung von Konstruktionsprozessen.
Hanser Verlag, München (1989).
36. Krause, F.-L.: Wissensverarbeitung für die rechnerunterstützte Produktgestaltung.
ZwF, 85, 3 (1990) S. 146–150.
37. Frommherz, B.; Hornberger, J.: Automatische Erzeugung von Vorranggraphen.
Robotersysteme, 4 (1988) S. 145–152.
38. Lozano-Prez, T.; Brooks, R.A.: An Approach to Automatic Robot Programming.
Massachusetts Institute of Technology, AI-Memo No. 842, April (1985).
39. Frommherz, B.; Werling, G.: Spezifikation von dreidimensionalen Szenen durch graphische Definition räumlicher Beziehungen.
Robotersysteme, 5 (1989) S. 197–208.
40. Scholz, W.: Modell zur datenbankgestützten Planung automatisierter Montageanlagen.
Hanser Verlag, München (1989).
41. Wiendahl, H.-P.: Einsatz neuer Software-Techniken zur Gestaltung und Steuerung zukünftiger Fabriken.
ZwF, 82, 6 (1987) S.345–351.
42. Brandt, H.-P.; Heidbrecher, U.: Rechnergestützte logistikgerechte Fabrikstrukturplanung.
ZwF, 82, 3 (1987) S. 145–151.
43. Korbach, W.: KI-Lexikon – Modellbasierte Wissensakquisition.
KI, 4 (1989) S. 13.
44. Puppe, F.: Problemlösungsmethoden in Expertensystemen.
Springer Verlag, Berlin (1990).
45. Stoyan, H.: Programmiermethoden der Künstlichen Intelligenz – Band 1.
Studienreihe Informatik, Springer Verlag, Berlin (1988).

46. Stoyan, H.: Programmiermethoden der Künstlichen Intelligenz – Band 2. Studienreihe Informatik, Springer Verlag, Berlin (1990).
47. Newell, A.: Some Problems of Basic Organisation in Problem-Solving Programs.
In: Yovits, M.C.; Jacobi, G.T.; Goldstein, D.D.: Conference on Self-Organizing Systems. Washington D.C., Spartan Books (1962) p. 393–423.
48. Erman, D.L.; Hayes-Roth, F., Lesser, V.R.; Reddy, D.R.: The HEARSAY-II Speech Understanding System: Integrated Knowledge to Resolve Uncertainty. ACM Computing Survey, 12 (1980) p. 213–253.
49. Hayes-Roth, B.: The Blackboard Architecture: A General Framework for Problem Solving?
Techn. Rep. HHP-83–30, Knowledge Systems Laboratory, Computer Science Department, Stanford University (1983).
50. Hayes-Roth, B.: BB1 – An Architecture for Blackboard Systems that Control, Explain and Learn about their own Behavior. Techn. Rep. HHP-84–16, Knowledge Systems Laboratory, Computer Science Department, Stanford University (1984).
51. Hayes-Roth, B.: Blackboard Architecture for Control. Journal of AI, 26 (1985) p. 251–321.
52. Nii, P.H.; Feigenbaum, E.A.; Anton, J.J.; Rockmore, A.J.: Signal-to-Symbol Transformation: HASP, SIAP Case Study. The AI-Magazine, 3 (1982) p. 23–35.
53. Nii, P.H.: The Blackboard Model of Problem Solving and the Evolution of Blackboard Architectures. The AI-Magazine, 8 (1986) p. 38–53.
54. Stoyan, H.; Görz, G.: LISP – Eine Einführung in die Programmierung. Springer Verlag, Studienreihe Informatik, Berlin (1984).

55. Sheil, B.: Power Tools for Programmers.
Datamation, 2 (1983) p. 131-144.
56. Bozesan, M.;
Rosenstiel, W.: Werkzeuge zur Entwicklung von Expertensystemen.
Forschungszentrum Informatik, Universität
Karlsruhe, Studie 1/87 (1987)
57. N.N.: KEE – Software Development System, Technical
Manuals, KEE-3.05.
Intellicorp, Menlo Park (1987).
58. Reinisch, H.: Datenbank für Betriebsmittel der
Montageautomatisierung.
ZwF, 85, 7 (1990) S. 352-356.
59. Wedekind, H.;
Härder, T.: Datenbanksysteme 2.
Bibliographisches Institut,
Mannheim(1976).
60. Reuter, A.: Fehlerbehandlung in Datenbanksystemen.
Hanser Verlag, München (1981).
61. Appelrath, H.-J.: Von Datenbanken zu Expertensystemen.
Springer Verlag, Berlin (1988).
62. Wode, U.: Integration von Datenbankzugriffen in die
Expertensystem-Shell TWAICE.
KI, 4 (1989) S. 47-53.
63. Härder, T.;
Mattos, F.;
Puppe, F.: Einige Schritte zur Kopplung von Datenbanksystemen
und Expertensystemen.
State of the Art 3 "Expertensysteme",
Oldenbourg Verlag (1987) S. 23-34.
64. Harmon, P.;
David, K.: Expertensysteme in der Praxis – Perspektiven,
Werkzeuge, Erfahrungen. 2. Auflage,
Oldenbourg Verlag, München (1987).
65. Karbach, W.;
Linster, M.: Wissensakquisition für Expertensysteme.
Hanser Verlag, München (1990).
66. Diedrich, J.;
Rumann, I.;
May, M.: KRITON: A Knowledge Acquisition Tool for
Expert Systems.
B.:In: Boose, J.H.; Gaines,: AAAI-Workshop
"Knowledge Acquisition for Knowledge Based
Systems", Banff, Canada (1986), p. 46-58.

67. Klinger, R.; Richter, J.: CONSTRUCT – eine Expertensystem-Shell zur Konfiguration technischer Systeme.
In: Remmele, W.: Tagungsband Künstliche Intelligenz in der Praxis. Siemens AG, interner Bericht (1988) S. 35–44.
68. Musen, M.: OPAL: Use of Domain Model to Drive an Interactive Knowledge Editing Tool.
Int. Journal of Man-Machine Studies, 26 (1987) p. 105–121.
69. Khanna, T.: Foundations of Neural Networks.
AddisonWesley. Reading, Massachusetts (1990).
70. Kemke, C.: Der neuere Konnektionismus.
Informatik Spektrum, 11, 3 (1988) S. 143–162.
71. Warnecke, H.-J.; Schraft, R.D.: Industrieroboter.
Krausskopf-Verlag, Mainz (1979).
72. Dunn, G.B.; Segen, J.: Automatic Discovery of Robotic Grasp Configurations.
IEEE Trans. on Robotics and Automation (1988) p. 396–401.
73. Warnecke, H.-J.; Schraft, R.D.; Winterwerber, J.: Handbuch Handhabungs-, Montage- und Industrierobotertechnik.
Verlag Moderne Industrie, Landsberg/Lech (1984).
74. Bologni, C.: Robotic Grasping: How to Determine Contact Positions.
Proc. IFAC Robot Control, Karlsruhe (1988) p. 385–400.
75. Grupen, R.A.; Henderson, T.C.; McCammon, I.D.: A Survey of General Purpose Manipulation.
The International Journal of Robotics Research, 8, 1 (1989) p. 38–62.
76. Hesse, S.; Mansch, I.: Auswahl flexibler Greifer.
Robotersysteme, 5 (1989) S. 57–64.
77. Braun, D.: Industrieroboter – Auslegung von pneumatischen Flächengreifern.
TÜV Rheinland, Köln (1989).
78. Schraft, R.D.; Tukada, O.: Die Teilenummerierung von Werkstücken für die Greifer der Industrieroboter.
Waseda University, Bericht Nr. 5 (1974).

79. Genschow, H.: Rechneranwendungen für die Konzipierung und Gestaltung von Werkzeugmaschinen.
IWF-Report, 5, Nov. (1976) S. 81-92.
80. Iberall, T.; Knowledge Based Prehension Capturing Human
Jackson, J.; Dexterity.
Labbe, C.; IEEE Trans. on Robotics and Automation (1988)
Zampano, Z.: p. 82-87.
81. Cutkosky, M.R.: Robotic Grasping and Fine Manipulation.
Kluver, Boston (1985).
82. Flohr, R.: Automatisches Kommissionieren von Fomularstapeln.
ZwF, 84, 9 (1989) S. 531-534.
83. Collins, K.; The Development of a an European Benchmark
Palmer, A.J.; for Comparison of Assembly Robot Programming
Rathmill, K.: Systems.
Proc. of 1thRobotics Europe Conf., Brüssel,
Juni (1984) p. 187-199.
84. Maßberg, W.; Auf dem Weg zur Integration von CAD und CAP.
Xu, J.: ZwF, 85, 3 (1990) S. 151-154.
85. Henderson, M.R.: Extraction of Feature Information from Three
 Dimensional CAD Data.
PhD Thesis at Purdue University, May (1984).
86. Krause, F.-L.; Arbeitsplanung alternativer Prozesse für flexible
Altmann, C.: Fertigungssysteme.
ZwF, 84, 5 (1989) S. 228-232.
87. Woodward, J.R.: Some Speculations on Feature Recognition.
Computer-Aided Design, 20, 4,
May (1988) p. 189-196.
88. Pratt, M.J.: Solid Modelling and the Interface Between Design
 and Manufacturing.
IEEE CG/A, July (1984) p. 52-59.
89. Requicha, A.G.: Automated systems for process planning and part
Vandenbrande, J.: programming.
Artificial Intelligence Implications for CIM,
Springer, Berlin (1988) p. 299-326.

90. Lee, Y.C.;
Fu, K.S.: Machine Understanding of CSG: Extraction and
Unification of Manufacturing Features.
IEEE CG/A, January (1987) p. 20-32.
91. Joshi, S.;
Chang, T.C.: Graph-based Heuristics for Recognition of
Machined Features from a 3D SolidModel.
Computer-Aided Design, 20, 2,
March (1988) p. 58-66.
92. Grabowski, H.;
Anderl, R.;
Schilli, B.;
Schmitt, M.,: STEP – Entwicklung einer Schnittstelle
zum Produktdatenaustausch.
VDI-Z, 131, 9 (1989) S. 68-76.
93. Marcinski, G.;
Prengemann, U.;
Holland, M.;
Mittmann, B.: Anwendungsorientierte Analyse des zukünftigen
Schnittstellen-Standards STEP.
ZwF, 84, 8 (1989) S. 456-461.
94. Straßner, H.: Mathematische Methoden helfen planen.
Data Report, 15, 4 (1980) S. 551-555.
95. Krause, M.: Die Leistungsabstimmung – Ein gelöstes Problem?
ZwF, 79, 7 (1984) S. 344-348.
96. Moodie, C.L.;
Young, H.H.: A heuristic method of assembly line balancing for
assumptions of constant or variable work element
times.
The Journal of Industrial Engineering, 16 ,1
(1965) S. 23-29.
97. Hoffmann, T.R.: Assembly line balancing with precedence
matrix.
Management Science, 9, 4 (1963) p. 551-563.
98. Arcus, A.L.: A computer method of sequencing operations
for assembly lines.
The International Journal of Production Research,
4, 4 (1966) p. 259-278.
99. Tonge, F.M.: Assembly line balancing using probabilistic
combinations of heuristics.
Management Science, 11, 7 (1965) p. 727-735.

100. Tengvald, E.: The Design of Expert Planning Systems, an Experimental Operations Planning System for Turning.
Linköping Studies in Science and Technology.
Dissertation No. 111, Department of Computer and Information Science, Linköping University (1984).
101. Wasielewski, E.: Netzplantechnik.
Hanser Verlag, München (1971).
102. Bokranz, R.;
John, B.: Arbeitsdatenermittlung.
3. Auflage, Resch Verlag, München (1986).
103. Slawiczek, P.: Rechnerunterstützte Planung und Gestaltung manueller Arbeitsmethoden auf der Basis eines Systems vorbestimmter Zeiten.
Fortschritts-Berichte VDI, Reihe 16, Nr.14,
VDI-Verlag, Düsseldorf (1982).
104. Warnecke, H.-J.;
Schweizer, M.: Taktzeitprognosen für flexible Montagestationen.
VDI-Z, 129, 3 (1987) S. 53-56.
105. Shiller, Z.;
Dubowsky, S.: Robot Path Planning with Obstacles, Actuator, Gripper, and Payload Constraints.
The International Journal of Robotics Research,
8, 6, Dec. (1989) p. 3-18.

Lebenslauf

- Persönliche Daten:** Georg Geyer
geb. am 9.5.1961 in Treuchtlingen
- Schul Ausbildung:**
- | | |
|-----------|--|
| 1967–1971 | Grundschule Mühlstetten |
| 1971–1980 | Werner-von-Siemens-Gymnasium
Weißenburg, Abschluß: Abitur |
- Militär:**
- | | |
|---------------|-----------------|
| 7/1980–9/1981 | Grundwehrdienst |
|---------------|-----------------|
- Hochschulausbildung:**
- | | |
|----------------|---|
| 11/1981–7/1987 | Studium der Informatik an der
Friedrich-Alexander-Universität
Erlangen-Nürnberg, Abschluß: Diplom |
|----------------|---|
- Berufstätigkeit:**
- | | |
|--------------|---|
| 8/1987–10/91 | Wissenschaftlicher Mitarbeiter am
Lehrstuhl für Fertigungsautomatisierung
und Produktionssystematik der Friedrich-
Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg |
|--------------|---|

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 Klelneldam
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 CO₂ - Hochleistungslasern
VIII + 170 Seiten, 93 Bilder, 4 Tabellen. 1991. Kartoniert.

Band 15
Uwe Geißler
Material- und Datenfluß in einer flexiblen Blechbearbeitungszelle
124 Seiten, 41 Bilder, 7 Tabellen. 1991. Kartoniert.

Band 16
Frank Oswald Hake
Entwicklung eines rechnergestützten Diagnosesystems für automatisierte Montagezellen
XIV + 166 Seiten, 77 Bilder. 1991. Kartoniert.

Band 17
Herbert Reichel
Optimierung der Werkzeugbereitstellung durch rechnergestützte Arbeitsfolgenbestimmung
198 Seiten, 73 Bilder, 2 Tabellen. 1991. Kartoniert.

Band 18
Josef Scheller
Modellierung und Einsatz von Softwaresystemen für rechnergeführte Montagezellen
198 Seiten, 65 Bilder. 1991. Kartoniert.

Band 19
Arnold vom Ende
Untersuchungen zum Biegeumformen mit elastischer Matrize
157 Seiten, 55 Bilder, 13 Tabellen. 1991. Kartoniert.

Band 20
Joachim Schmid
Beitrag zum automatisierten Bearbeiten von Keramikguß mit Industrierobotern
XIV + 176 Seiten, 111 Bilder, 6 Tabellen. 1991. Kartoniert.

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.