

Rainer Eisele

*Konzeption und Wirtschaftlichkeit
rechnerintegrierter Planungssysteme*

Rainer Eisele

*Konzeption und Wirtschaftlichkeit
rechnerintegrierter
Planungssysteme*

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:	12. 12. 1989
Tag der Promotion:	04. 04. 1990
Dekan:	Prof. Dr.-Ing. G. Kuhn
Berichterstatter:	Prof. Dr.-Ing. K. Feldmann Prof. Dr.-Ing. H. Meerkamm

CIP-Titelaufnahme der Deutschen Bibliothek

Eisele, Rainer:

Konzeption und Wirtschaftlichkeit rechnerintegrierter
Planungssysteme / Rainer Eisele. – München ; Wien : Hanser,
1990

(Fertigungstechnik – Erlangen ; Bd. 9)

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

ISBN 3-446-16107-4

NE: GT

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 1990

Herstellung: Copy Center 2000, Erlangen-Eltersdorf

Printed in Germany

Vorwort

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

Herrn Professor Dr.-Ing. K. Feldmann, dem Leiter des Lehrstuhls für Fertigungsautomatisierung und Produktionssystematik am Institut für Fertigungstechnik, danke ich für die wohlwollende Förderung bei der Durchführung dieser Arbeit.

Herrn Professor Dr.-Ing. H. Meerkamm, dem Leiter der Abteilung für Maschinenelemente und Fertigungsgerechtes Konstruieren, danke ich für die Übernahme des Korreferates, seine fachlichen Anregungen sowie die sorgfältige Durchsicht meiner Arbeit.

Herrn Professor Dr. P. Mertens, dem Leiter des Lehrstuhls für Betriebswirtschaftslehre insbes. Wirtschaftsinformatik an der Wirtschafts- und Sozialwissenschaftlichen Fakultät, danke ich für seine Bemühungen bei der Betreuung von Diplomarbeiten und der Durchführung des Promotionsverfahrens.

Ferner gilt mein Dank allen Kollegen, Studenten und wissenschaftlichen Hilfskräften, die durch ihre Unterstützung zum Gelingen der Arbeit beigetragen haben. Für den vorbildlichen Einsatz bedanke ich mich insbesondere bei Herrn Dietmar Bär, Herrn Thomas Holzner, Herrn Peter Schuderer und Herrn Thomas Schwan. Ebenso möchte ich meinen Kollegen Herrn Dipl.-Ing. Gerhard Kleineidam, Herrn Dipl.-Inf. Herbert Fischer, Herrn Dipl.-Ing. Jörg Franke und Herrn Dipl.-Inf. Georg Geyer für die tatkräftige Unterstützung besonderen Dank aussprechen

Rainer Eisele

**KONZEPTION UND WIRTSCHAFTLICHKEIT
RECHNERINTEGRIERTER PLANUNGSSYSTEME****-INHALTSVERZEICHNIS-**

1. Einleitung	1
2. Die Planung als Entscheidungszentrum der Produktion	3
2.1 Einfluß der Planung auf Steuerungs- und Fertigungsprozesse	4
2.1.1 Entwicklungen in der Produktionssteuerung	8
2.1.2 Verfahrensketten im Planungsbereich	10
2.2 Spezielle Anforderungen in der Montageplanung	17
2.2.1 Neue Aufgaben durch Einsatz von Robotersystemen	17
2.2.2 Integration langfristiger Planungsfunktionen	20
2.3 Bewertungsproblematik neuer Planungstechnologien	24
3. Graphisch-interaktive Planung und Simulation auf CAD-Basis	26
3.1 Modellierung von Produkten und Fertigungskomponenten	28
3.1.1 Geometrische Informationen	28
3.1.2. Technologische Informationen	32
3.2 CAD-integrierte Layoutprüfung und Bewegungsplanung	38
3.3 Graphisch-interaktive Programmierung und Simulation	41
3.3.1 Programmerstellung durch graphisches Teach-In	42
3.3.2 Simulation von Bewegungsabläufen	47
3.4 Realisierung einer Verfahrenskette: CARo	50

4. Entwicklungsschritte zu automatisierten Planungsprozessen	53
4.1 Planungsansätze aus dem Bereich Künstliche Intelligenz	55
4.1.1 Nichthierarchische Planungssysteme	58
4.1.2 Hierarchische Planungssysteme	59
4.2 Grundlagen automatisierter Planungsprozesse	61
4.3 Abstraktionsstufen in der Planung	67
4.3.1 Programmierung auf Objektebene	67
4.3.2 Programmierung auf Aufgabenebene	71
4.4 Ein objektorientierter Realisierungsansatz	76
4.4.1 Objektorientiertes Programmieren	76
4.4.2 Anwendungsbeispiel Werkstückhandhabung	77
5. Flexibilitätsaspekte beim Einsatz von Planungssystemen	83
5.1 Einfluß der Fertigungsflexibilität auf den Planungsprozeß	83
5.1.1 Ausprägungsformen der Fertigungsflexibilität	84
5.1.2 Ablauforientierter Flexibilitätsbegriff	86
5.2 Modellaufbau während des Planungsablaufes	91
5.2.1 Modellinformationen aus der Grobplanung	92
5.2.2 Modellinformationen aus der Feinplanung	99
5.3 Modellnutzung in der Planungsphase von Anlagen	103
5.3.1 Graphisch-interaktive Planungszyklen	103
5.3.2 Automatisierte Simultanplanung	107
5.4 Modellnutzung in der flexiblen Produktion	111
5.4.1 Restriktionen für die Fertigungssteuerung durch die Planung	112
5.4.2 Programmerzeugung auf Steuerungsebene	114

6. Ein Kostenmodell zur Bewertung von Planungsabläufen	122
6.1 Ermittlung übergreifender Nutzenwirkungen	123
6.1.1 Nutzenkategorien	125
6.1.2 Monetäre Bewertung von Nutzengrößen	128
6.2 Ablauforientierte Kostenrechnung	132
6.2.1 Entscheidungsorientierte Grundrechnung	132
6.2.2 Kostenkategorien und Bezugsobjekthierarchie	134
6.2.3 Auswertungsrechnung	138
6.2.4 Abbildung von Planungsprozessen	141
7. Anwendung des Modells zur Bewertung von Planungskonzepten	145
7.1 Relevante Kosten- und Einflußfaktoren	145
7.2 Nutzenbewertung in der Planungsphase von Anlagen	150
7.2.1 Anforderungen und Einflußfaktoren	150
7.2.2 Projektierung einer Montagelinie für Schaltelemente	151
7.3 Nutzenbewertung in der Produktionsphase flexibler Anlagen	155
7.3.1 Anforderungen und Einflußfaktoren	155
7.3.2 Flexible Schweißzelle	157
7.3.3 Flexible Bestückzelle	161
7.3.4 Einflußfaktoren in der Werkstückhandhabung	162
7.4 Einsatz des Kostenmodells zur Auswahl von Fertigungskonzepten	164
7.4.1 Ganzheitliche Bewertung von Fertigungssystemen	164
7.4.2 Planungsbegleitende Kalkulation	167
8. Zusammenfassung	172
9. Literaturverzeichnis	174

1. Einleitung

Durch neue Produktionstechnologien versuchen Unternehmen ihre Wettbewerbsfähigkeit zu erhalten und Marktanteile zu sichern. In der Vergangenheit stand dabei die Rationalisierung auf Fertigungsebene im Mittelpunkt des Interesses. Kennzeichen für diese Rationalisierungsbemühungen ist bis heute der Konflikt zwischen Produktivität und Flexibilität. Besonders ausgeprägt ist dieser Gegensatz in der Montage, wo bei kleinen Stückzahlen und hoher Produktvielfalt die manuelle, flexible Fertigung vorherrschend ist gegenüber automatisierten, hochproduktiven Anlagen, die in der Großserienfertigung eingesetzt werden. Mit dem Einsatz von Industrierobotern wird eine höhere Flexibilität in der automatisierten Montage analog zur Teilefertigung angestrebt.

Durch die Weiterentwicklung im Bereich der Informationsverarbeitung wird über den eigentlichen Fertigungsprozeß hinaus nun eine Optimierung des Gesamtunternehmens angestrebt. Neben dem Materialfluß wird somit der gesamte Informationsfluß betrachtet, der im Unternehmen während der Auftragsabwicklung stattfindet. Dies umfaßt sowohl die Auftragssteuerung, als auch die technischen Planungsfunktionen Konstruktion und Arbeitsplanung.

Aufgrund der Wechselwirkung zwischen Planung und Fertigung ergeben sich auch in der Montage neue Aufgaben, wie die Programmierung rechnergesteuerter Fertigungssysteme. Durch die Entwicklung von Planungssystemen wird der Aufbau von Verfahrensketten angestrebt, die eine durchgehende Fertigungsdatenverarbeitung, von der Produktbeschreibung bis zur Prozeßführung, ermöglichen [1]. Mit dem Einsatz von Verfahrensketten, die in der Teilefertigung zum Teil verfügbar sind, werden die folgenden beiden Zielsetzungen verbunden:

- Verkürzung der Anlaufphase bei neuen Produkten, um bei sinkenden Produktlebenszyklen möglichst schnell Marktanteile zu sichern
- Erhöhung des Nutzungsgrades in der flexiblen Fertigung durch schnelle Anpassung mit Hilfe durchgängiger Verfahrensketten.

Der Einsatz neuer Fertigungs- und Planungssysteme ist jedoch mit einem hohen Investitionsrisiko verbunden. Der Einführungszeitraum integrierter Systeme ist relativ lang und mit großem finanziellen Aufwand verbunden. Die wirtschaftliche Bewertung rechnergestützter Systeme als Entscheidungsunterstützung gewinnt dadurch zunehmend an Bedeutung. Allein auf der Grundlage strategischer Begründungen können diese aufwendigen und unsicheren Investitionen auf Dauer nicht getätigt werden [2].

Aufgrund der komplexen Wirkzusammenhänge ergeben sich jedoch für die Bewertung der Wirtschaftlichkeit sehr hohe Anforderungen, die sich mit den konventionellen Bewertungsinstrumenten kaum bewältigen lassen. Hier sind neue Konzepte zu erstellen, wobei eine verbesserte Datenermittlung zwingend notwendig ist. Durch einen Vergleich von Maschinen- und Lohnkosten können die komplexen Zusammenhänge von integrierten Fertigungs- und Planungssystemen allein nicht erfaßt werden. Bei der Bewertung von Planungssystemen kommt erschwerend hinzu, daß Nutzenpotentiale meist keine direkte Erlöswirkung aufweisen. Neben die Ermittlung der relevanten Einflußgrößen tritt somit das Problem der monetären Bewertung von Nutzengrößen.

Aufgrund der beschriebenen Zusammenhänge ergibt sich für die vorliegende Arbeit folgende Zielsetzung:

- Beschreibung von Anforderungen und Zusammenhängen im Planungsbereich im Hinblick auf den Einsatz rechnergestützter Werkzeuge
- Darstellung der Wechselwirkungen zwischen Planungs- und Fertigungssystemen
- Analyse der speziellen Anforderungen im Bereich Montage für den Einsatz von Planungssystemen
- Einbindung langfristiger Planungsfunktionen wie die Layoutplanung in durchgängige Verfahrensketten
- Konzepte und Realisierungsansätze von graphisch- interaktiven und automatisierten Planungssystemen
- Untersuchung der Wirkungen auf die Auftragsabwicklung beim Einsatz dieser Systeme
- Analyse von Problemen und Ansätzen bei der wirtschaftlichen Bewertung rechnergestützter Planungssysteme
- Bewertung integrierter Planungssysteme mit einer ablauforientierten Kostenrechnung.

Entsprechend der Zielsetzung werden in der Arbeit zunächst Integrationsstufen rechnergestützter Planungssysteme erläutert und in ihrer Wirkung auf den Ablauf der Auftragsabwicklung dargestellt. Diese Einflußfaktoren beim Einsatz von Planungssystemen bilden die Grundlage für eine wirtschaftliche Bewertung, die anhand verschiedener Roboteranwendungen auf der Basis einer ablauforientierten Kostenrechnung durchgeführt wird.

2. Die Planung als Entscheidungszentrum der Produktion

Die rechnerintegrierte Produktion als Globalkonzept für zukünftige Fabrikstrukturen steht heute im Mittelpunkt des Interesses von Industrie und Wissenschaft. Computer Integrated Manufacturing (CIM) bezeichnet dabei die integrierte Informationsverarbeitung für alle betriebswirtschaftlichen und technischen Aufgaben eines Industriebetriebes [3]. Mit einem durchgehenden Informationsfluß soll der Werdegang eines Produktes von der Entwicklung und Konstruktion über die Planung bis hin zu Fertigung und Montage unterstützt werden.

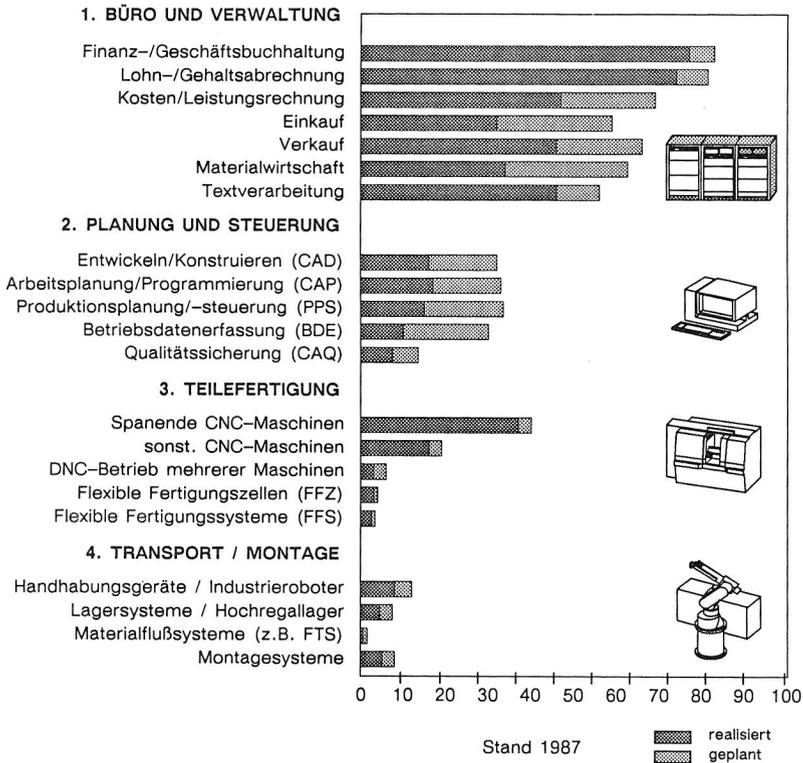


Bild 1 : Einsatz computergestützter Techniken (nach [4])

Insgesamt ist der Einsatz rechnergestützter Techniken noch nicht in allen Unternehmensbereichen weit fortgeschritten, wie eine Studie des Instituts für Sozialwissenschaftliche Forschung (ISF) München über eine Erhebung bei rund 1300 Betrieben der Investitionsgüterindustrie zeigt (Bild 1).

Dabei ist die EDV-Durchdringung in den administrativen Bereichen wie Finanzbuchhaltung oder Lohn/Gehaltsabrechnung, für die schon seit langem Lösungen angeboten werden, in den untersuchten Betrieben hoch (70%).

Auf Fertigungsebene weit verbreitet sind numerisch gesteuerte Werkzeugmaschinen (50%), während komplexere Maschinen- und Steuerungssysteme wie flexible Fertigungszellen (FFZ) oder -systeme (FFS) noch wenig eingesetzt werden. Dies gilt ebenso für Industrieroboter/Handhabungsgeräte, Lager- und Materialflußsysteme, die bisher vorwiegend in der Großindustrie Verwendung finden.

Rechnersysteme in Planungsbereichen wie Konstruktion und Arbeitsvorbereitung, welche die Durchgängigkeit von Marktanforderungen bis zur eigentlichen Produktion ermöglichen sollen und somit wesentliche Komponenten künftiger CIM-Strukturen sind, sind in 15% bis 17% aller Betriebe im Einsatz. Dies gilt sowohl für die im Rahmen der administrativen Auftragsabwicklung eingesetzten Produktionsplanungs- und steuerungssysteme (PPS) als auch für die im technischen Planungsbereich eingesetzten CAD/CAM-Systeme, die den durchgängigen Informationsfluß vom Bereich der rechnergestützten Konstruktion, CAD (computer aided design), über den Bereich der rechnergestützten Arbeitsplanung, CAP (computer aided planning), in den Bereich der rechnergestützten Fertigung, CAM (computer aided manufacturing) gewährleisten sollen.

Allerdings ist nach den Planungsabsichten der Betriebe mit starken Zuwachsraten des Rechnereinsatzes zu rechnen. Dies gilt verstärkt für den technischen Bereich, da nach Aussagen von Marktforschungsinstituten und EDV-Herstellern zukünftig speziell in die technische Planung und rechnergesteuerte Fertigung weiter investiert wird [5].

2.1 Einfluß der Planung auf Steuerungs- und Fertigungsprozesse

Die während der Auftragsabwicklung auftretenden Informationsflüsse lassen sich anhand ihrer wesentlichen Grunddaten grob in zwei Bereiche einteilen (Bild 2).

Dies sind zum einen die mehr administrativen Tätigkeiten, die beim Kundenauftrag im Vertrieb beginnen und über Einkauf, Fertigungssteuerung und Produktion bis zum Versand reichen. Die wesentlichen Grunddaten dieser Teilbereiche sind Mengen, Termine und Kapazitäten, welche zur Erzeugung und Verwaltung von Auftragsdaten dienen.

Die Auftragssteuerung umfaßt dabei die gesamte Logistik, deren Aufgabe es ist, mit Hilfe der Auftragsdaten den Materialfluß von der Beschaffung über die

Produktion bis zur Auslieferung zu steuern und zu überwachen. Der Rolle der Logistik wird im Rahmen der Auftragssteuerung immer mehr Bedeutung zugemessen, da der unternehmensinterne Rechnerverbund über die Unternehmensgrenzen hinaus auf Zulieferer und Abnehmer ausgedehnt wird. Der Bereich der administrativen Auftragsabwicklung umfaßt somit den Informationsfluß zur Auftragssteuerung sowie den gesamten Materialfluß.

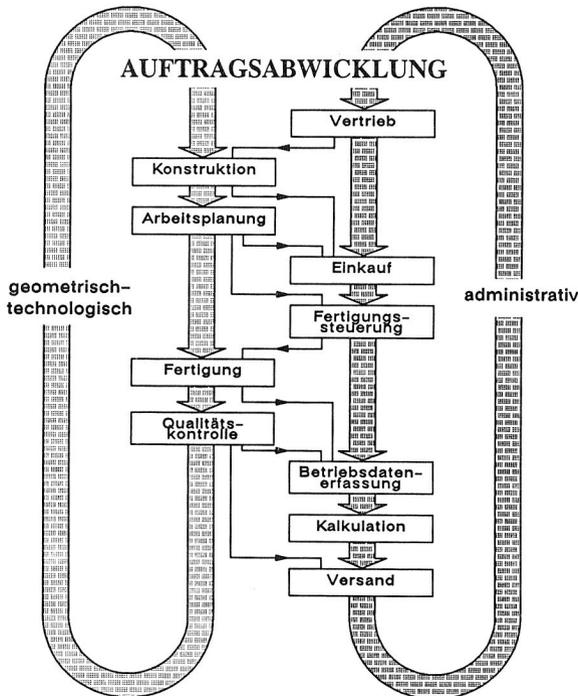


Bild 2 : Datenflüsse in der Auftragsabwicklung (nach [6])

Zum anderen existiert in der Auftragsabwicklung ein geometrisch/technologisch orientierter Informationsfluß, der die technischen Planungsbereiche Entwicklung/Konstruktion und Arbeitsplanung durchzieht. Dabei entstehen in Entwicklung und Konstruktion Produktbeschreibungen, welche in der Arbeitsplanung in die notwendigen Fertigungsunterlagen und Steueranweisungen umgesetzt werden.

Die Trennung der Auftragsabwicklung in administrative und technische Aufgaben spiegelt sich wieder in den DV-Lösungen, die entwickelt oder am Markt angeboten werden.

PPS-Systeme sollen die Durchgängigkeit in der administrativen Auftragsabwicklung von der Angebotsbearbeitung im Vertrieb über die Beschaffung und Produktion bis zum Versand gewährleisten. CAD/CAM-Systeme sollen in der technischen Auftragsabwicklung diese Durchgängigkeit von der Modellierung geometrischer Produktmodelle bis zur Steuerdatengenerierung ermöglichen (Bild 3).

Während für den Bereich Auftragssteuerung eine Vielzahl von Standardsoftware am Markt verfügbar ist, existieren im Bereich CAD/CAM zumeist nur Teillösungen.

Der unterschiedliche Realisierungsgrad für die Entwicklung durchgängiger Verfahrensketten in der Auftragsabwicklung läßt sich anhand folgender Einflußgrößen nachvollziehen (Bild 3):

- Häufigkeit des Auftretens innerhalb der Auftragsabwicklung
- Branchenabhängigkeit
- Fertigungsart
- Automatisierungsgrad in der Produktion

Die Auftragssteuerung wird bei jedem Auftragseingang angestoßen, egal ob ein Wiederholauftrag oder Neuauftrag vorliegt. Als Hauptauswahlkriterium verbleibt somit die Fertigungsart, wobei sich PPS-Systeme für die kundenorientierte Klein-/Mittlerie von Systemen für die kundenanonyme Großserienfertigung unterscheiden.

Die technische Auftragsabwicklung, die für die administrative Auftragsabwicklung die notwendigen Fertigungsunterlagen erstellt, wird nur angestoßen, falls Neuaufträge vorliegen. Weiterhin ist die Entwicklung von EDV-Lösungen sehr stark von der Technologie von Fertigungsverfahren oder Branchen abhängig. So gibt es CAD-Lösungen für Maschinenbau und Elektrotechnik oder NC-Programiersysteme für Drehen, Bohren, Fräsen etc..

In der Klein-/Mittleriefertigung laufen aufgrund der vielen Neuplanungen Auftragssteuerung und technische Planungsfunktionen zum Teil parallel ab. Die Automatisierung beschränkt sich auf die Teilefertigung, wo NC-Maschinen eingesetzt werden. Möglichkeiten zur Montage- oder Materialflußoptimierung sind aufgrund der geforderten Flexibilität stark eingeschränkt. Wesentlich ist somit ein durchgängiger Informationsfluß in Konstruktion und Arbeitsplanung, um möglichst schnell Produkte definieren und Fertigungsunterlagen erstellen zu können.

In der Serien- und Massenfertigung erfolgen Konstruktion und Arbeitsplanung kundenanonym vor der Auftragssteuerung. Aufgrund der geringeren Flexibilitätsanforderungen sind hier Automatisierungsmöglichkeiten gegeben, die sich auch auf die Montage erstrecken.

Damit tritt neben die Aufgabe der Programmierung von NC-Maschinen die Programmerstellung für Handhabungsgeräte, Industrieroboter und Materialflußsysteme. Weiterhin bedingen neue Produktkonstruktionen auch neue Anlagen, so daß die Kapazitäts- und Investitionsplanung in durchgängige Verfahrensketten zu integrieren sind. Damit sollen vorrangig schnelle Entwicklungszyklen erreicht werden.

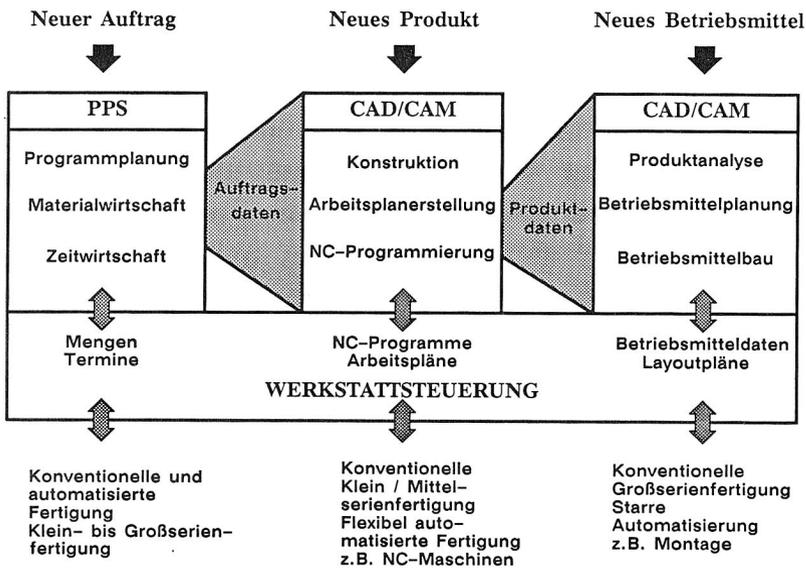


Bild 3 : Verfahrensketten in der Auftragsabwicklung

Die Anforderungen für die Entwicklung durchgängiger Verfahrensketten innerhalb der Auftragsabwicklung sind sehr unterschiedlich und vor allem in den technischen Planungsbereichen aufgrund vielfältiger technologischer und organisatorischer Einflußgrößen sehr komplex.

Die durchgängigen Lösungen, die in der Auftragssteuerung durch PPS-Systeme oder in der technischen Planung durch CAD/NC-Kopplungen als Standardsoftware verfügbar sind, müssen auf ihre Anwendbarkeit in künftigen CIM-Konzepten überprüft und gegebenenfalls neu konzipiert werden.

In den übrigen Teilbereichen, wo keine Lösungen oder nur Teillösungen existieren, sind Lösungsmöglichkeiten aufzuzeigen. Dies betrifft vor allem die Montage, wo durch neue Fertigungskonzepte neue Aufgaben für die Planung entstehen.

2.1.1 Entwicklungen in der Produktionssteuerung

Die heute verfügbaren PPS-Systeme sind nach dem Prinzip der Sukzessivplanung aufgebaut. Dabei werden die einzelnen Planungsstufen (vgl. Bild 3), die aufeinander aufbauen, nacheinander durchlaufen. Somit liegen bei Aufstellung des Produktionsprogramms noch keine Informationen über vorhandene Kapazitäten vor.

Schwerpunkt bilden die klassischen PPS-Funktionen Materialwirtschaft und Zeitwirtschaft, sowie die Grunddatenverwaltung. Dabei ergeben sich Schwächen an den Schnittstellen zur Primärbedarfsplanung nach oben und zur Werkstattsteuerung nach unten [7].

Die zur Primärbedarfserfassung eingesetzten Planungsverfahren weisen eine unbefriedigende Planungsqualität auf, obwohl sämtliche nachfolgenden Planungsstufen auf den Daten der Primärbedarfplanung basieren.

Die Werkstattsteuerung erfolgt meist nach dem Schiebeprinzip, d. h. Aufträge werden unkontrolliert in die Fertigung gegeben, ohne daß sie hinsichtlich der benötigten Komponenten, Werkzeuge und Kapazitäten abgestimmt sind. Dies führt zur Überlastung der Fertigung bei hohen Zwischenlagerbeständen mit langen Durchlaufzeiten.

Es existieren folgende neue Ansätze für die Werkstattsteuerung, die in der Literatur ausführlich beschrieben sind [8,9]:

- Belastungsorientierte Auftragsfreigabe
- KANBAN
- Fortschrittszahlenkonzept

In [9] werden diese Verfahren hinsichtlich ihrer Eignung von der Einzel- bis zur Massenfertigung bewertet (Bild 4).

Da in vielen Betrieben mehrere Fertigungsarten nebeneinander auftreten, ist es notwendig, daß neue PPS-Systeme mehrere Verfahren gleichzeitig beinhalten.

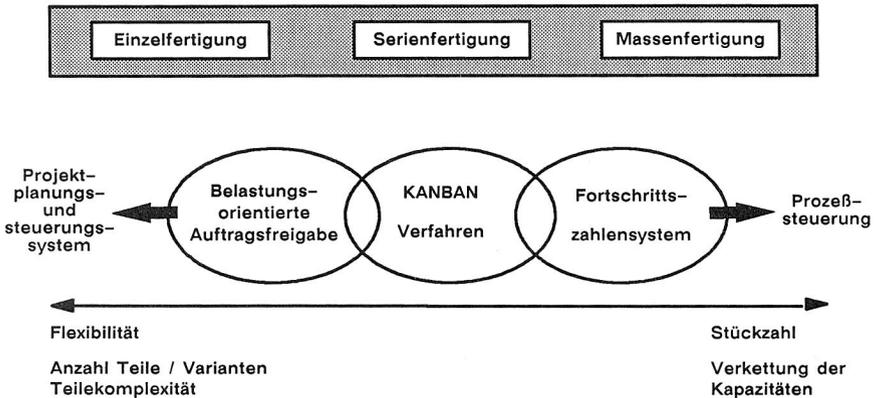


Bild 4 : Einsatzbereiche alternativer Systeme zur Werkstattsteuerung

Zu den Problemen herkömmlicher Systeme kommen Anforderungen hinzu, die aus der zunehmenden Produktionsautomatisierung resultieren [7,9] :

- neue Fertigungskonzepte, wie flexible Fertigungszellen, -linien oder -systeme erfordern eine Dezentralisierung der Fertigungssteuerung
- im Sinne der Logistik muß die gesamte Versorgungskette von der Beschaffung bis zur Distribution abgedeckt sein
- die fortschreitende Datenverarbeitung zeigt immer deutlicher die vielfältigen Wechselbeziehungen zwischen betriebswirtschaftlicher und technischer Informationsverarbeitung
- die Fertigungs- und Montageautomatisierung läßt wenig Handlungsspielraum zu. Sämtliche Handlungsalternativen müssen in Form von Daten und Modellen abgebildet sein. Dies erfordert eine umfangreichere Verfügbarkeitsprüfung, z. B. der Steuerungsdaten (NC-Programme, RC-Programme)
- Neue Entwicklungen der EDV-Technologie (Netze, Mikrocomputer, Sprachen der 4. Generation) ermöglichen flexiblere Planungsstrukturen.

Der Arbeitsablauf und die Funktionen eines dezentralen PPS-Systems werden ausführlich in [9] beschrieben. Dabei werden auch die Auswirkungen einer

flexiblen dezentralen Steuerung auf die technischen Planungsbereiche beschrieben. So wirken sich bisherige Arbeitspläne und NC-Programme, die fest auf einzelne Arbeitsplätze oder Maschinen zugeschnitten sind, restriktiv aus. Die Bereitstellung alternativer Arbeitspläne mit allen zugehörigen Unterlagen wie NC-Programme würde einen immensen Mehraufwand bedeuten. In [10,11] wird deshalb ein Konzept beschrieben, bei dem die Zuordnung auf Maschinen erst zum spätmöglichen Zeitpunkt erfolgt. Die abstrakten Fertigungsaufgaben werden dabei erst im flexiblen Fertigungssystem in Steueranweisungen umgesetzt. Dies führt natürlich zu völlig veränderten Organisationsstrukturen innerhalb der technischen Planungsbereiche (vgl. Kapitel 5), zeigt aber gleichzeitig die wechselseitige Beeinflussung von Steuerungs- und Planungsaufgaben.

Hierzu wäre es auch erforderlich, geeignete Schnittstellen für PPS-Systeme zu definieren. Interessanterweise gibt es aber trotz vielfältiger Standardisierungs- und Normierungsbestrebungen auf nationaler und internationaler Ebene für den PPS-Bereich leider kaum Ansätze. Dies wäre aber aufgrund der gezeigten Anforderungen ein wichtiger Schritt für künftige Entwicklungen.

Entscheidend für die Gestaltung durchgängiger Verfahrensketten ist der Übergang von der Planungsebene zur Fertigungsebene. Zentraler Bestandteil dieser Schnittstelle ist die Werkstattsteuerung. Bisher als Funktion in PPS-Systeme integriert, wird die Werkstattsteuerung durch neue Steuerungskonzepte dezentral auf Fertigungsinseln aufgeteilt. Dies geschieht mit der Hauptzielsetzung Flexibilität, um Störungen im automatischen Prozeß ausgleichen und Durchlaufzeiten und Bestände senken zu können.

Neue Organisationsformen in der Werkstattsteuerung wirken sich nicht nur auf die Gestaltung zukünftiger PPS-Systeme aus, sondern auch auf die Erzeugung und den Inhalt von Fertigungsunterlagen. Diese Auswirkungen sollen bei der Gestaltung durchgängiger Informationsflüsse in der technischen Auftragsplanung im folgenden berücksichtigt werden.

2.1.2 Verfahrensketten im Planungsbereich

Innerhalb der technischen Planungsbereiche Konstruktion und Arbeitsplanung werden Produkte zunächst entworfen und gestaltet. Anschließend werden die technologischen Bedingungen für die Fertigung dieser Produkte geplant.

Im Rahmen einer zügigen Auftragssteuerung besteht somit die Hauptaufgabe in der schnellen Bereitstellung der benötigten Fertigungsunterlagen. Diese lassen

sich unterscheiden nach Unterlagen, die für die Planungsphase in der Auftragsabwicklung benötigt werden, und solche, die für die eigentliche Produktion notwendig sind.

Stücklisten und Arbeitspläne bilden die wesentlichen Grunddaten für die klassischen PPS-Funktionen Material- und Zeitwirtschaft. Entsprechend wichtig ist auch die rechtzeitige Bereitstellung und Übertragung dieser Unterlagen aus Konstruktion und Arbeitsplanung in die Auftragssteuerung.

Daten und Komponenten für die Fertigung, wie NC-Programme, Werkzeuge oder sonstige Fertigungshilfsmittel, werden für die Planungsdurchführung in der Auftragsabwicklung nicht benötigt, sondern erst für die eigentliche Produktion.

Während des Arbeitsprozesses von der Konstruktion eines Produktes bis zur Steuerdatengenerierung für die Produktion werden verschiedene Phasen durchlaufen, in denen funktionale, geometrische und technologische Randbedingungen auftreten. Innerhalb der Konstruktion steht dabei in der Konzept- und Entwurfsphase zunächst das Funktionsprinzip im Mittelpunkt. Bei der Gestaltung und Detaillierung gewinnt die Geometrie zunehmend an Bedeutung.

Diese geometrischen Informationen werden innerhalb der Arbeitsplanung zur Erstellung der Fertigungsunterlagen unter technologischen Gesichtspunkten verarbeitet. Die Konstruktion wird somit als Geometrieverarbeitung unter funktionalen und physikalischen Voraussetzungen bezeichnet. Die Arbeitsplanung dagegen als Geometrieverarbeitung unter technologischen Randbedingungen [12].

Für die Rechnerunterstützung bedeutet dies den schrittweisen Aufbau eines geometrischen und technologischen Modells während der Planung, aus dem die nachfolgenden Planungsschritte die notwendigen Informationen für die Erstellung der Fertigungsunterlagen ableiten können. Durch den Einfluß der Produktionsautomatisierung müssen zunehmend detailliertere Fertigungsunterlagen, wie NC-Programme für die Maschinen und Handhabungsgeräte, bereitgestellt werden. Damit müssen auch mehr Informationen rechnerunterstützt verarbeitet werden, wodurch die Produktmodelle komplexer werden.

Charakteristisch für die konventionelle Fertigungsunterlagenerstellung ist, daß die in einem Planungsschritt erstellten Unterlagen Ausgangsbasis für die folgenden Planungsschritte sind (Bild 5). Mit zunehmendem Planungsprozeß werden dabei die Eingangsinformationen innerhalb der Planungsstufen umfangreicher und die Freiheitsgrade geringer.

Auch bei rechnergestützten Fertigungsunterlagenerstellung bauen die in den Planungsstufen erzeugten Informationen aufeinander auf. Als Informationsträger

dienen hierbei jedoch nicht die erstellten Unterlagen, sondern das rechnerinterne Modell, auf das jederzeit während des Planungsprozesses zugegriffen werden kann.

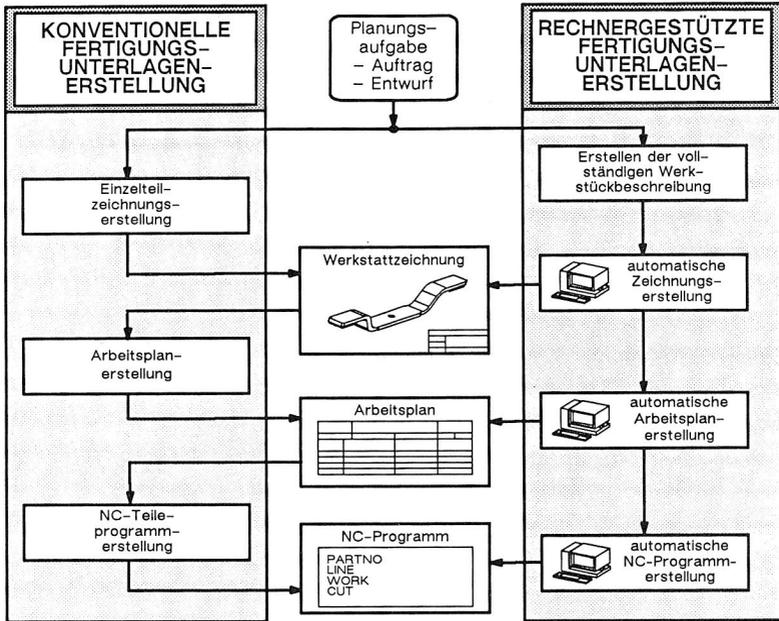


Bild 5 : Ablauf der Fertigungsunterlagenerstellung [12]

In der administrativen Auftragsabwicklung entspricht dieses Modell der Grunddatenverwaltung, wo die benötigten Informationen wie Stücklisten, Arbeitspläne, Betriebsmitteldaten und Aufträge rechnerintern bereitgestellt werden.

Die Realisierung eines solchen Modells gestaltet sich im technischen Bereich sehr viel komplexer. Neben den umfangreichen geometrischen und technologischen Produktdaten, müssen vielfältige technologische Informationen über Fertigungsverfahren, Fertigungsmittel und -hilfsmittel enthalten sein (Bild 6).

Zentraler Bestandteil eines solchen Modells ist die Werkstückbeschreibung, da hierin alle geometrischen und technologischen Daten über den Aufbau von Produkten, Baugruppen und Einzelteilen enthalten sind, die in den folgenden Planungsschritten benötigt werden.

Schwierigkeiten für die rechnerinterne Erzeugung einer geeigneten Werkstückbeschreibung ergeben sich daraus, daß die funktions-/geometrieorien-

tierte Vorgehensweise der Konstruktion in eine geometrie-/technologieorientierte Betrachtungsweise der Arbeitsplanung überführt werden muß. So existieren bedingt durch die historische Entwicklung in den Bereichen Konstruktion und Arbeitsplanung zumeist nur Einzellösungen. Ansätze für durchgängige Lösungen gibt es nur im Bereich der Kopplung Konstruktion – NC-Programmierung.

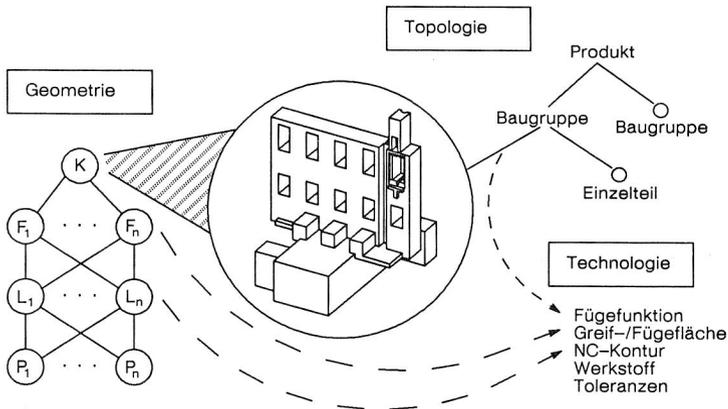


Bild 6 : Geometrische und technologische Beziehungen im Produktmodell

Für die Aufgaben Zeichnungserstellung, Arbeitsplanerstellung und NC-Programmierung werden die folgenden EDV-Lösungen angeboten und eingesetzt [13]:

- CAD-Systeme
- Systeme zur Arbeitsplanerstellung
- NC-Programmiersysteme.

Die einzelnen Systeme wurden nicht im Hinblick auf eine integrierte Fertigungsunterlagererstellung konzipiert und sind somit aufgrund unterschiedlicher Datenstrukturen nur bedingt für den Aufbau eines umfassenden rechnerintegrierten Modells geeignet.

Die Anforderungen einer vollständigen Werkstückbeschreibung hinsichtlich der Geometrie können nur durch die dreidimensionale Darstellung auf der Basis von Volumenmodellen erfüllt werden. Alle 2D-Ansichten sind in einem solchen Modell enthalten und logisch verbunden.

Bei den meisten heute verfügbaren 2D/3D-CAD-Systemen werden jedoch bestehende 2D-Zeichnungssysteme um 3D-Modellierer ergänzt, so daß zwei unterschiedliche Datenmodelle in einem System integriert sind. Zwischen 2D-Bereich und 3D-Bereich werden Daten über interne Schnittstellen ausgetauscht. Die Änderung einer Zeichnung im 2D-Bereich führt somit nicht automatisch zu einer notwendigen Änderung des 3D-Objektes. Somit liegt nicht einmal der geometrischen Werkstückbeschreibung ein einheitliches Datenmodell zugrunde.

Die Geometrielemente müssen um technologische Parameter wie Bemaßung, Oberflächengüte und Toleranz ergänzt werden. Die Anbindung dieser Parameter an die Geometrielemente ist vielfach vor allem im 3D-Bereich nur in Form einfacher Attribute möglich. Deshalb wird an der Kopplung zu Datenbanksystemen gearbeitet. Die Geometrieinformationen bleiben dabei aus Performancegründen im CAD-System gespeichert, während technologische Parameter in der Datenbank verwaltet werden. Dies wirft zum einen große Konsistenzprobleme auf, zum anderen existiert dadurch ein drittes Datenmodell innerhalb der Werkstückbeschreibung neben den 2D- und 3D-Datenmodellen.

Verfügbare Systeme zur Arbeitsplanerstellung lassen sich nach folgenden beiden Prinzipien unterscheiden [14]:

- Systeme nach dem Ähnlichkeitsprinzip
- Systeme nach dem Neuplanungsprinzip.

Systeme nach dem Ähnlichkeitsprinzip ermöglichen den Zugriff auf vorhandene abgespeicherte Arbeitspläne über Klassifizierungsschlüssel. Solche Systeme bilden meist eine Erweiterung bestehender PPS-Systeme und arbeiten auf den dort verwalteten Arbeitsplänen.

Wesentlich weniger verbreitet sind trotz zahlreicher Forschungsarbeiten Systeme zur Neugenerierung von Arbeitsplänen. Dies liegt vor allem an dem hohen betriebsspezifischen Anpassungsaufwand und dem damit verbundenen Fehlen von Standardsoftware.

Da Systeme zur Arbeitsplanerstellung für die konventionelle Teilefertigung und Montage entwickelt wurden, fehlen meist Schnittstellen zur NC-Programmierung für die automatische Fertigung. Dabei stellen NC-Programme nichts anderes als detaillierte Arbeitspläne dar. Auch die Ausgangsinformationen wie geometrische und technologische Werkstückinformationen sind ähnlich wie bei der Arbeitsplanerstellung. Die logische Verbindung stellen dabei Arbeitsgänge dar, die als NC-Daten auf hoher Abstraktionsebene verstanden werden können.

Für die NC-Programmierung existiert eine Vielzahl an Systemen, die in der Werkstatt oder Arbeitsvorbereitung eingesetzt werden. Wesentlich geprägt wurden diese Entwicklungen durch die Konzepte, die der Sprache APT zugrundeliegen. Dies belegt auch die DIN-Norm 66025, die den Programmaufbau für numerisch gesteuerte Arbeitsmaschinen definiert.

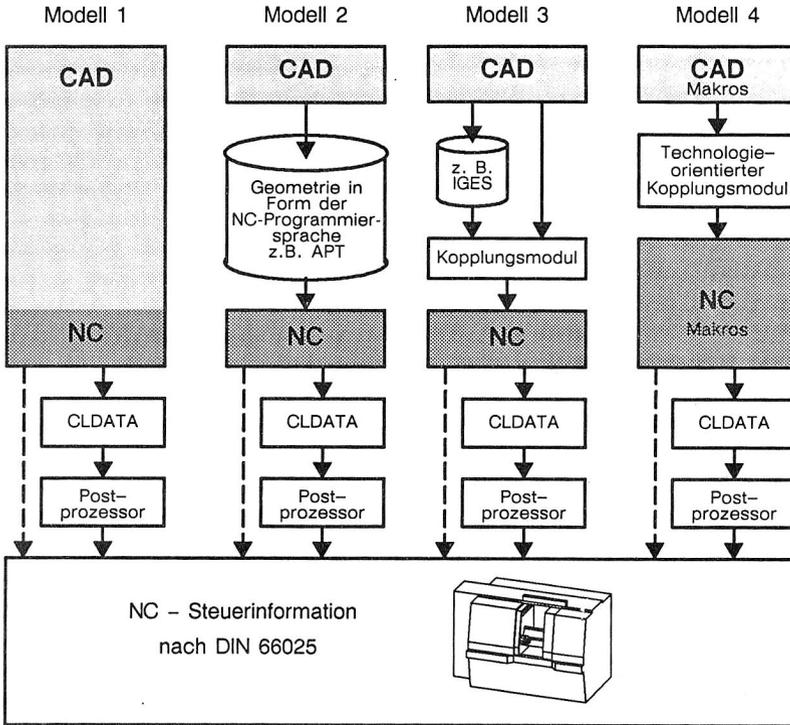


Bild 7: Modelle für die CAD/NC-Kopplung (nach [15])

Eine grundlegende Eigenschaft ist dabei die Aufteilung in einen maschinenneutralen und maschinenspezifischen Teil. Die Verbindung zwischen beiden Teilen wird durch eine Datei realisiert, deren Form und Inhalt international durch ISO (International Standardization Organisation) unter dem Begriff CLDATA (Cutter Location Data) genormt ist. Die Anpassung an die Maschinen erfolgt durch ein Nachverarbeitungsprogramm (Postprozessor).

Neben dieser gängigen Kopplung zwischen NC-Programmierung und Maschinensteuerung existieren heute verschiedene Modelle für die Verbindung

zu CAD-Systemen (Bild 7). Diese Modelle beinhalten den heutigen Stand durchgängiger Lösungen in der technischen Auftragsabwicklung. Dabei wirken sich die verschiedenen Schnittstellen zur Übertragung der Daten zwischen den Systemen auf die Gestaltungsmöglichkeiten in der Werkstatt aus [16]. Bei Modell 1 ist die NC-Programmierung voll in den CAD-Bereich integriert. Das CAD-System ist dabei um ein NC-Modul erweitert, das auf der einheitlichen geometrischen Datenbasis arbeitet. Damit entfällt das Problem inkonsistenter Daten, wenn Änderungen am Modell durch den Konstrukteur oder NC-Programmierer vorgenommen werden.

Bei den Modellen 2 bis 4 wird die NC-Programmierung in getrennten Systemen durchgeführt, die über verschiedene Schnittstellen mit CAD-Systemen verknüpft sind. Bei Modell 2 wird dabei die Geometrie direkt in das Format einer bestimmten NC-Programmiersprache übertragen. Dieses Programm wird dann vom NC-Programmierer noch um die fehlenden Technologiedaten ergänzt. Änderungen an den Geometrieinformationen können bei diesem Modell nicht mehr in den Konstruktionsbereich zurückgeführt werden. Dasselbe gilt für Modell 4, wobei hier neben den Geometriedefinitionen auch Makro-Aufrufe für Verfah- und Technologieanweisungen übergeben werden. Dieses Modell kommt vor allem bei der Produktion von Teilefamilien nach vorgegebenen standardisierten Fertigungsabläufen zur Anwendung.

Eine andere Vorgehensweise kennzeichnet Modell 3. Hierbei werden die für den Datenaustausch unterschiedlicher CAD-Systeme geschaffenen Schnittstellen für die NC-Programmierung verwendet. Damit soll im Unterschied zu Modell 2 und 4 ein wechselseitiger Datenaustausch ermöglicht werden. Eine solche Vorgehensweise erscheint vor allem dann sinnvoll, wenn geeignete Normen für einen solchen Datenaustausch vorliegen.

Die derzeitigen internationalen Normierungsbemühungen konzentrieren sich auf diese Integration verschiedener Systeme über Datenschnittstellen im technischen Bereich. Dabei kommt auch zum Ausdruck, daß im technischen Bereich der Vereinheitlichung beim Datenaustausch, d. h. der Kopplung verschiedener Applikationen, größere Praxisrelevanz eingeräumt wird, als der Integration verschiedener Applikationen über ein gemeinsames konzeptionelles Schema. Das Ziel aller Normierungsaktivitäten ist der künftige internationale Standard STEP (Standard for the Exchange of Product Model Data), dessen Entwicklung unter Koordination und Überwachung der ISO (International Standardisation Organisation) erfolgt [17].

2.2 Spezielle Anforderungen in der Montageplanung

2.2.1 Neue Aufgaben durch Einsatz von Robotersystemen

Für Roboter bieten sich aufgrund ihrer Flexibilität in der Montage vielfältige Anwendungsmöglichkeiten. Die Montage gilt daher als größter Wachstumsbereich für den zukünftigen Einsatz von Industrierobotern. Daneben existieren eine Vielzahl von Bereichen, wo Roboter bereits erfolgreich eingesetzt werden (Bild 8).

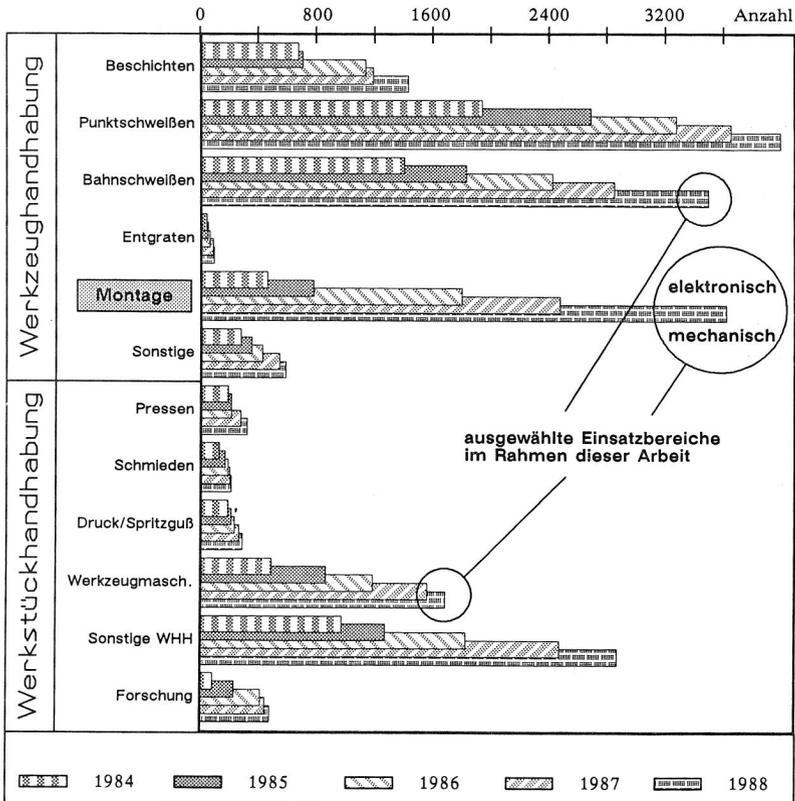


Bild 8: Einsatzbereiche von Industrierobotern unter Hervorhebung ausgewählter Untersuchungsgebiete (nach [18])

Achssysteme in Portalbauweise zur Werkstückhandhabung an Werkzeugmaschinen bilden dabei neben Gelenkarmrobotern zum Punkt- und

Bahnschweißen in der Automobilindustrie den Einsatzschwerpunkt. Allerdings sind bei den meisten Roboteranwendungen aufgrund der meist aufwendigen Peripherie so geringe Losgrößen wie in der Teilefertigung mit NC-Maschinen bisher wirtschaftlich nicht realisierbar. Dies gilt besonders für die Montage, wo an die Teilebereitstellung und den Teiletransport sehr hohe Anforderungen gestellt werden. Eine Ausnahme bildet die elektronische Montage mit dem Einsatz von Bestückautomaten. Durch die dort vorliegenden Bedingungen des immer gleichen Fügeprozesses von Bauteilen auf Leiterplatten und die Entwicklung der SMD-Technik (surface mounted device), sind hohe Flexibilitätsgrade zu erzielen [19].

Als neue Planungsaufgabe wird somit zukünftig die Erstellung der Steueranweisungen für die eingesetzten Automatisierungsgeräte an Bedeutung gewinnen. Eine Programmierung vor Ort wie sie heute in der Praxis vorherrschend ist, wird den Anforderungen an hohe Flexibilität und der Einbindung in betriebliche Informationsflüsse nicht gerecht. Eine NC-Programmierung von Handhabungssystemen in diesem Sinne nützt zur Erstellung der Steueranweisungen analog zur Teilefertigung die Information, die in den vorgelagerten Planungsbereichen während der Auftragsabwicklung entstehen.

Programmierv Verfahren für Industrieroboter werden allgemein nach dem Ort der Programmierung in online-Verfahren und offline-Verfahren unterschieden (Bild 9). Bei den online-Verfahren findet die Programmierung direkt an der Steuerung des Handhabungssystems statt. Alle Bewegungen und Aktionen werden mit Hilfe der Roboterantriebe oder von Menschenhand geführt, dem Industrieroboter vorgemacht und dabei die Bewegungen und Punkte abgespeichert. Deshalb werden die online-Verfahren Teach-In und Playback auch als Lernverfahren bezeichnet [20].

Neben diesen in der Praxis vorherrschenden Verfahren wird zukünftig die sensorgestützte Programmierung an Bedeutung gewinnen [21]. Bekannte Funktionen aus dem Teach-In-Verfahren werden hierbei um Möglichkeiten der modernen Sensorik ergänzt.

Bei den offline-Verfahren werden Roboterprogramme ganz oder teilweise steuerextern in der Werkstatt oder Arbeitsplanung erstellt. Für die Unterscheidung dieser Verfahren ist es sinnvoll, die Programminformationen nach Bewegungsbefehlen und Ablauflogik einzuteilen.

Der Übergang von den online-Verfahren zu den offline-Verfahren hat sich fließend vollzogen. So werden bereits bei der Teach-In-Programmierung einfache Sprachen an der Steuerung eingesetzt. Aus der Übertragung dieser

Sprachen auf einfache Programmiersysteme, an denen parallel zum Produktionsbetrieb der Programmablauf erstellt werden konnte, entstand die textuelle Programmierung.

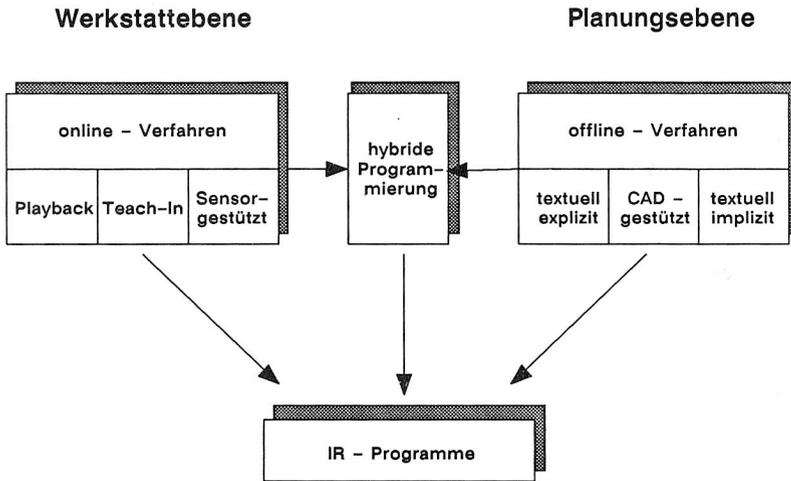


Bild 9: Programmierverfahren für Industrieroboter

Eine Lösung, wie sie momentan in der Praxis vorherrscht, bietet die hybride Programmierung mit den genannten Nachteilen der online-Verfahren. Mit Hilfe der textuellen Programmierung wird der Ablauf des Programms steuerungsextern erstellt, die fehlenden Bewegungsanweisungen werden anschließend vor Ort durch online-Verfahren ergänzt.

Durch den Einsatz der CAD-Technik ist es möglich geworden, auch Bewegungsanweisungen aus Geometrieinformationen abzuleiten. Deshalb werden CAD-gestützte Roboterprogrammiersysteme entwickelt, die es erlauben, komplette Programme steuerungsextern zu erstellen. Eine Anpassung vor Ort ist je nach Qualität dieser Programme notwendig.

Diese Ansätze sind in Richtung integrierter Planungssysteme weiterzuentwickeln, um die im Planungsprozeß entstehenden geometrischen und technologischen Modellinformationen für die Programmerstellung nutzen zu können.

2.2.2 Integration langfristiger Planungsfunktionen

Die Montage wird in den zahlreichen Veröffentlichungen, die sich mit der Thematik CIM befassen meist ausgeklammert. Dies hängt zum einen mit dem bisher geringen Automatisierungsgrad in der Montage zusammen, der nur wenige Ansatzpunkte für die Rechnerintegration bietet, zum anderen mit der Komplexität, die in der Montage auftritt.

In der Teilefertigung konnte durch den verbreiteten Einsatz flexibler CNC-Maschinen eine hohe Produktivität erreicht werden. Damit hat sich der Schwerpunkt jetziger Rationalisierungsbemühungen im Produktionsbereich zur Montage hin verschoben. Vorherrschend in der Montage sind heute starr automatisierte Montageanlagen für die Massenfertigung sowie die manuelle Montage für die Klein- und Mittelserienfertigung. Kennzeichen für diese beiden Konzepte ist der Gegensatz von Flexibilität und Produktivität.

Durch zunehmende Variantenvielfalt und sinkende Stückzahlen sind die bewährten Automatisierungskonzepte nicht mehr wirtschaftlich einsetzbar. Die Vorteile der NC-Technik sollen deshalb, ähnlich wie in der Teilefertigung, für die Montage erschlossen werden, um eine höhere Flexibilität zu erreichen. Dies wird ermöglicht durch die Entwicklung frei programmierbarer numerisch gesteuerter Handhabungssysteme. Diese Systeme lassen sich durch Eingabe neuer Programme einfach an wechselnde Aufgaben anpassen im Gegensatz zu herkömmlichen Einlegegeräten, die mechanisch umgerüstet werden müssen.

Zunächst haben deshalb modulare, freiprogrammierbare Bewegungsachsen, die als Bausteine eines Baukastensystems beliebig zusammengestellt werden können, als Ersatz für konventionelle Fügeeinrichtungen schnell Verbreitung gefunden. Inzwischen reicht das Spektrum eingesetzter Systeme von diesen einfachen Achssystemen bis zu mehrachsigen komplexen Industrierobotern (Bild 10).

Die Integration einfacher Linearachsen in bestehende Linienkonzepte ermöglicht eine Flexibilisierung hinsichtlich Variantenvielfalt und geringer Losgrößen [1]. Die Aufteilung der Montagefunktionen auf einzelne Geräte sowie die Einhaltung senkrechter Fugebewegungen erfordert nur wenige Achsen. Neben Achssystemen kommen in der Linienmontage auch sogenannte Scararoboter zum Einsatz, die aufgrund ihrer Achsanordnung sehr schnelle Fugebewegungen ermöglichen und speziell für die Montage entwickelt wurden. Neben diesen Konzepten für die Großserienfertigung wird an der Realisierung flexibler Montagezellen analog zur Teilefertigung gearbeitet, um auch Einsatzmöglichkeiten bei mittleren Stückzahlen ermöglichen zu können. Kennzeichnend für die Mon-

tage ist dabei, daß mehrere Montagefunktionen innerhalb einer Zelle von einem Handhabungssystem ausgeführt werden. Für die Montageplanung hätte die Realisierung flexibel automatisierter Montagesysteme zur Folge, daß nicht bei jeder Produktneukonstruktion auch eine Anlagenneuplanung durchzuführen wäre.

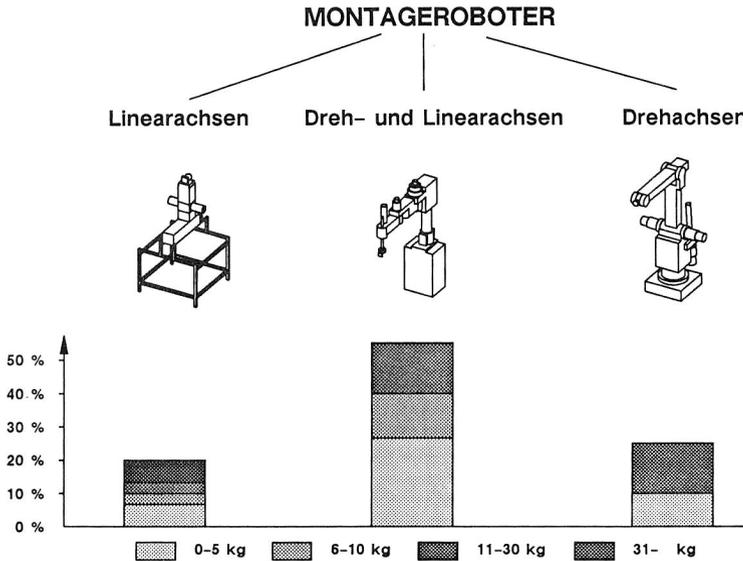


Bild 10: Kinematik der Montageroboter und deren Anwendungshäufigkeit (nach [18])

Aufgabe der Montageplanung ist es, für eine bestimmte Montageaufgabe den Montageablauf festzulegen, das Montagesystem zu planen, sowie die Unterlagen und Anweisungen auszuarbeiten, nach denen die Erzeugnisse optimal montiert werden können. Die Montageplanung als Teilbereich der Fertigungsplanung umfaßt damit dieselben langfristigen und kurzfristigen Aufgaben, die auch für die Teilefertigung anfallen. Der Begriff Montageplanung wird in der Literatur jedoch fast nur für die Planung automatisierter Montagesysteme und damit für die langfristigen Aufgaben verwendet. Kurzfristige Aufgaben, wie etwa das Erstellen von Montageplänen, werden dagegen unter dem Begriff Arbeitsplanung gesehen.

Für die Montageplanung existiert bislang keine durchgängige rechnergestützte Lösung. Die bisherigen Entwicklungsansätze behandeln einzelne Funktionen meist isoliert [22,23,24,25,26,27,28]:

- montagegerechten Produktgestaltung
- Montageplanerstellung
- Planung von Montageablaufstrukturen
- Grobplanung von Montagesystemen
- Geräteauswahl und Betriebsmittelzuordnung
- Simulation des Einsatzverhaltens
- Programmierung und Simulation von Montagesystemen

Da eine Produktneukonstruktion in der automatischen Montage meist mit der Neuplanung einer Anlage verbunden ist, wird die Betriebsmittelplanung und -konstruktion Teil der Auftragsabwicklung. In der Systemgestaltung wird sehr viel Know-How über Fügeprozesse und Betriebsmittel der automatisierten Montage benötigt, da komplexe Montageanlagen nicht standardmäßig verfügbar sind wie NC-Maschinen in der Teilefertigung [29]. Zeitaufwendige Funktionen, wie die Betriebsmittelplanung und Konstruktion, gewinnen somit bei der Entwicklung integrierter Planungssysteme zunehmend an Bedeutung.

Aufgrund der geringen Flexibilität bisheriger Anlagen wird die Trennung in die Systemgestaltung einerseits und die Fertigungsunterlagenerstellung im Rahmen der Auftragsabwicklung andererseits in der Planung der automatischen Montage aufgehoben. Dies bedeutet für die Gestaltung durchgängiger Informationsflüsse ein wesentliches Unterscheidungsmerkmal gegenüber der manuellen Montage und der Teilefertigung.

Gleichzeitig bedeutet der Planungsschritt Betriebsmittelwahl das wesentliche Unterscheidungsmerkmal zur automatisierten Montage, für die ansonsten dieselben Planungsschritte zutreffen. Anstelle der Auswahl vorhandener Arbeitsplätze tritt bei der automatisierten Montage die Planung, Konstruktion, Beschaffung und Inbetriebnahme einer Neuanlage als Bestandteil der Auftragsabwicklung (Bild 11).

Alle erzeugten Planungsinformationen der kurz- und langfristigen Aufgaben sind in der Funktion Montageprogrammierung zu berücksichtigen, die als Schnittstelle zwischen Planungs- und Fertigungsebene fungiert. Die Programmierung numerisch gesteuerter Handhabungssysteme wird dabei zunehmend, analog zur

Teilefertigung, als Aufgabe der Montageplanung verstanden. Die Programmierung an der Schnittstelle zwischen Planung und Steuerung wird damit zentraler Bestandteil einer Verfahrenskette für die Montage.

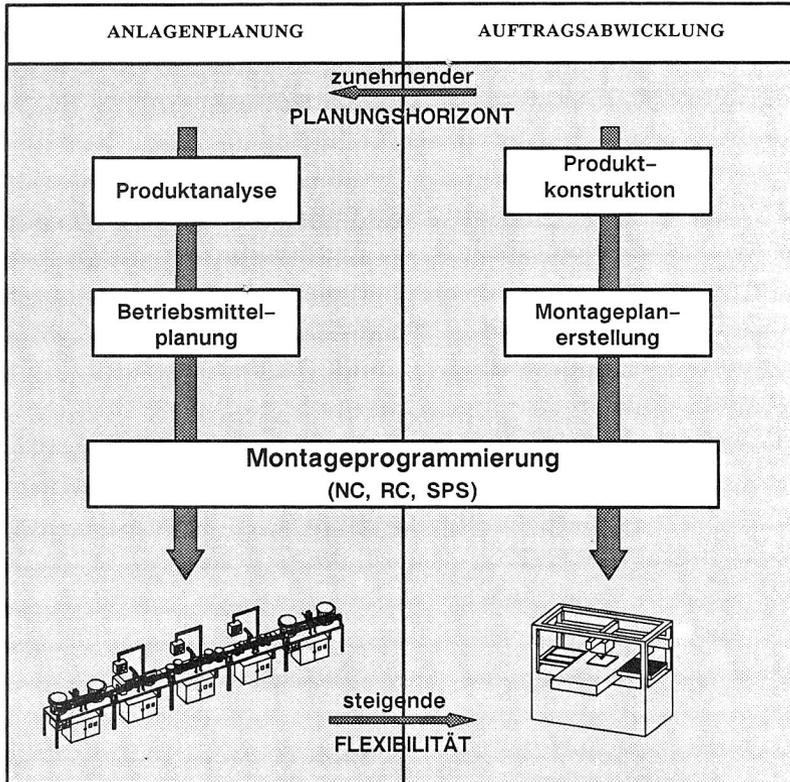


Bild 11: Zusammenhang von Planungsabläufen und Flexibilität der eingesetzten Montagesysteme

Bei der Konzeption integrierter Planungssysteme im Rahmen dieser Arbeit, wird daher die Programmierung von Robotern in der Montage als Beispiel für den Zusammenhang zukünftiger Planungs- und Produktionstechnologien eine wesentliche Rolle spielen. Gleichzeitig zeigt sich die Bewertungsproblematik neuer Technologien an der Schnittstelle zwischen Planung und Fertigung am Beispiel der Programmierung in besonderer Weise.

2.3 Bewertungsproblematik neuer Planungstechnologien

Der Einsatz von CIM-Technologien ist aufgrund der langen Einführungsdauer und des hohen Kostenaufwandes mit Risiko verbunden. Daher besteht gerade auch für mittelständische Unternehmen die Notwendigkeit einer wirtschaftlichen Bewertung zur Entscheidungsunterstützung. Über die geeignete Methodik zur wirtschaftlichen Bewertung von CIM-Technologien bestehen sehr unterschiedliche Ansichten, wobei folgende Modelle herangezogen werden [30]:

- Traditionelle Wirtschaftlichkeitsverfahren
- mehrdimensionale Verfahren wie die Nutzwertanalyse
- Kombinierte Wirtschaftlichkeits- und Nutzwertermittlung
- Modelle mit Vergleichskennzahlen
- Modelle mit strategischer Zielrichtung

Die einzelnen Verfahren können eine Entscheidung nicht vorwegnehmen, sondern dienen zur Vorbereitung und Unterstützung. Für die Bewertung quantitativer Faktoren werden Wirtschaftlichkeitsverfahren eingesetzt, während qualitative Faktoren über Kennzahlen oder Nutzwertanalysen bewertet werden.

Die Bewertungsproblematik besteht in der Ermittlung zukünftiger Zahlungsreihen von Einnahmen und Ausgaben. Der Einsatz qualitativer Verfahren stellt oftmals eine Notlösung dar, da die komplexen Wirkzusammenhänge von CIM-Technologien in konventionellen Wirtschaftlichkeitsverfahren nicht abgebildet werden.

Eine detaillierte Analyse der Informationsflüsse und eine Darstellung der Kosteneinflüsse ist erforderlich, um scheinbar qualitative Faktoren quantifizieren zu können. Dies gilt sowohl für den unternehmensinternen Bereich als auch für den Marktbereich. Durch die Entwicklung neuer Kostenmodelle wird die bestehende Bewertungslücke geschlossen, indem traditionelle Ansätze erweitert und qualitative Verfahren ersetzt werden.

Aufgrund der beschriebenen Problematik ist es eine wesentliche Zielsetzung der vorliegenden Arbeit, neben ablauforganisatorischen und technologischen Aspekten den wirtschaftlichen Nutzen zukünftiger Planungstechnologien zu untersuchen. Dabei sind die beiden folgenden Fragestellungen von besonderem Interesse:

- wie können Planungsabläufe einer Bewertung zugänglich gemacht werden?

- welche Nutzenpotentiale ergeben sich beim Einsatz der untersuchten Planungskonzepte in realen Anwendungen?

Bei der heutigen Kostenrechnung erfolgt eine Bewertung begleitend zum Materialfluß. Relevante Kosteneinflüsse, die während des Informationsflusses in den Planungsbereichen auftreten, sind nicht erfassbar, da sie in Gemeinkostenzuschlagsätzen oder Fixkostenblöcken verborgen sind. Betrachtet man jedoch die möglichen Integrationsstufen, die auf Planungs- und Fertigungsebene durchlaufen werden, so stellt man hinsichtlich der Einflußgrößen und relevanten Kostenfaktoren sehr große Gemeinsamkeiten fest (Bild 12).

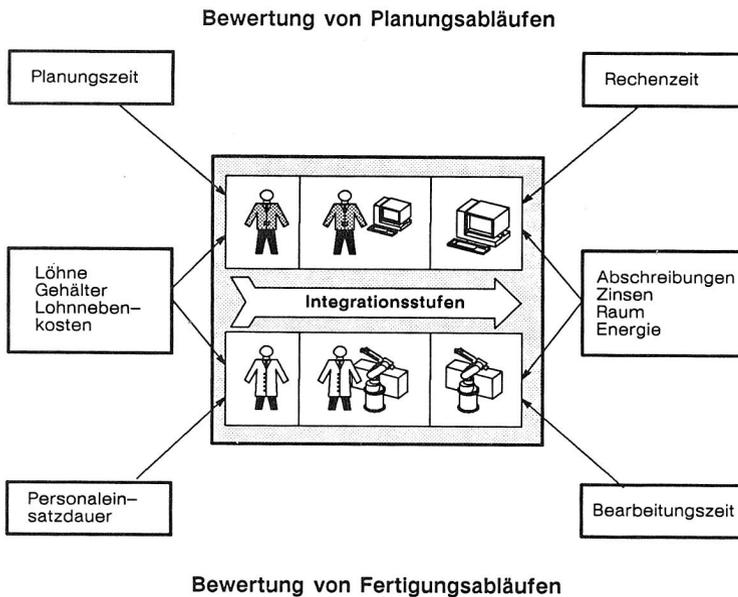


Bild 12: Analoge Bewertung von Planungs- und Fertigungsprozessen

Planungsprozesse können somit analog zu Fertigungsprozessen in einem Kostenmodell abgebildet werden (vgl. Kap 6). Ein solches Modell ermöglicht die Bewertung von Planungssystemen, da die auftretenden Kosten- und Erlöswirkungen auf Planungs- und Fertigungsebene erfassbar sind. Dies betrifft lang- und kurzfristige Aufgaben, die im Rahmen integrierter Verfahrensketten vor und während der Produktionsphase durchzuführen sind (vgl. Kap. 7).

3. Graphisch-interaktive Planung und Simulation auf CAD-Basis

Durch den Einsatz leistungsfähiger Graphikwerkzeuge ist es möglich geworden, die verfügbaren textuellen Systeme in Richtung graphisch-interaktiver Planungssysteme weiterzuentwickeln, d. h. vorhandene geometrische und technologische Modellinformationen für die Layoutplanung, Programmierung und Simulation zu nutzen.

Die heute eingesetzten textuellen Programmiersysteme basieren auf unterschiedlichen Sprachkonzepten. Während die im Bereich der NC-Programmierung verfügbaren Sprachen letztendlich auf der Entwicklung der Sprache APT beruhen, gibt es im Bereich der Roboterprogrammierung unterschiedliche Konzepte, die zu einer Vielzahl von Sprachentwicklungen geführt haben [31]. Die Bandbreite reicht von den ersten einfachen Sprachen, in denen jede Achsbewegung explizit vorgegeben werden muß, bis hin zu Ansätzen, wo aus Anweisungen in natürlicher Sprache Roboterprogramme automatisch abgeleitet werden. Aufgrund dieser Ableitung von Programmen aus vorhandenen Informationen werden Ansätze nach diesem Prinzip als implizite Programmierung bezeichnet.

Explizite Sprachen, wie sie heute an Steuerungen und bei der Entwicklung von offline-Programmiersystemen gebräuchlich sind, benötigen keine Modellinformation. Die Anweisungen einer expliziten Programmiersprache können an der Steuerung direkt ausgeführt werden, d.h. der Programmierer muß jeden Bewegungsschritt einzeln vorgeben. Bei der Entwicklung expliziter Sprachen werden Konzepte, wie sie aus höheren Programmiersprachen der Informatik bekannt sind, verwendet. Hinzu kommen roboterspezifische Anweisungen wie Bewegungs- oder Greifbefehle. Diese Bewegungsanweisungen stellen das Hauptproblem bei der textuellen Programmierung auf Basis expliziter Sprachen dar, da der Programmierer keinerlei Systemunterstützung bekommt.

Die Möglichkeiten graphisch-interaktiver Planungssysteme zeichnen sich gegenüber den textuellen Verfahren durch folgende wesentliche Merkmale aus:

- Eingabe von Bewegungsanweisungen durch visuelle Unterstützung
- Ausnutzen vorhandener Modellinformationen für die Programm-erstellung
- Simultanes Erstellen und Testen von Programmen
- hohe Benutzerergonomie durch graphisch-interaktive Dialogführung

- Einbindung in den Informationsfluß der technischen Auftragsabwicklung

Je leistungsfähiger die Graphikwerkzeuge sind, desto umfangreicher wird die Modellerstellung und damit die Modellunterstützung (Bild 13). Bereits die Funktionalität verfügbarer CAD-Systeme ermöglicht Erreichbarkeitstests und Kollisionsuntersuchungen. Durch die Entwicklung von Simulationssystemen können Taktzeiten ermittelt und Bewegungsstudien durchgeführt werden.

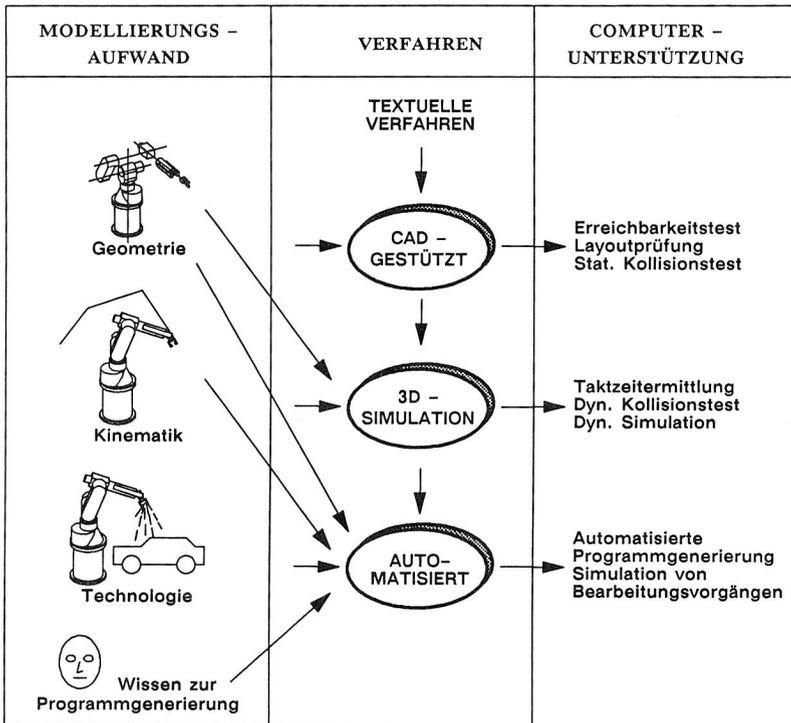


Bild 13 : Entwicklungsschritte von Planungssystemen zur Programmierung

Mit Graphikunterstützung können damit komplette Programme in der Planung erstellt und auch getestet werden. Diese Regelkreisfunktion innerhalb der Planung bedeutet einen wesentlichen Fortschritt für den effizienten Einsatz von offline-Verfahren. Durch die Nutzung vorhandener Modellinformationen findet gleichzeitig ein Schritt von der expliziten, manuellen zur impliziten, automatischen Programmierung statt.

Wesentlich für die Entwicklung durchgängiger Lösungen sind die Phasen der Modellbildung bei der Layoutgenerierung und die Modellnutzung bei der Programmierung und Simulation. Die Beschreibung dieser Phasen auf der Basis graphisch-interaktiver Planungssysteme wird im folgenden dargestellt.

3.1 Modellierung von Produkten und Fertigungskomponenten

In der Teilefertigung sind der Arbeitsraum von Werkzeugmaschinen und somit die Zustellbewegungen der Werkzeugschlitten vom Hersteller fest vorgegeben. Damit dient für die NC-Programmierung nur die Werkstückkontur als Basis für die Vergabe von Zielpositionen. Die Konfiguration des Fertigungssystems, die im Rahmen der langfristigen Betriebsmittelplanung festgelegt wird, ist für die Programmerstellung ohne Bedeutung.

Bei der Programmierung von Handhabungssystemen muß der Arbeitsraum jedoch mitberücksichtigt werden. Ein wesentlicher Teil der NC-Programme sind Bewegungsanweisungen, die sich auf Punkte im Arbeitsraum beziehen. Aufgrund möglicher Kollisionen genügt es nicht Zielpositionen vorzugeben, sondern für die Definition von Raumkurven sind häufig Hilfspunkte im Raum erforderlich [32].

Für die Modellbildung sind somit neben den Daten aus der Produktkonstruktion auch Informationen aus der Betriebsmittelplanung heranzuziehen. Dies betrifft sowohl kurzfristige Informationen über Werkstückträger, Werkzeuge oder Greifer als auch langfristige Daten über die Anordnung von Transport-, Zubring- und Handhabungseinrichtungen. Für die graphische Programmierung sind vor allem geometrische Informationen bereitzustellen, die im Rahmen der Betriebsmittelkonstruktion entstehen.

Dies ist nur zu gewährleisten, wenn auch in langfristigen Planungsbereichen rechnergestützte Werkzeuge wie CAD-Systeme eingesetzt werden. Die Erstellung komplexer geometrischer und technologischer Modelle von Fertigungssystemen nur zum Zwecke der Programmerstellung wäre zu aufwendig. Diese für die graphische Programmierung von Handhabungssystemen erforderlichen Daten sollen im folgenden erläutert werden.

3.1.1 Geometrische Informationen

Geometrische Daten müssen über die Komponenten von Fertigungssystemen, die am Produktionsprozeß beteiligt sind, verfügbar sein. Handhabungs-, Trans-

port-, Füge- und Bearbeitungsprozesse wirken dabei in komplexer Weise zusammen.

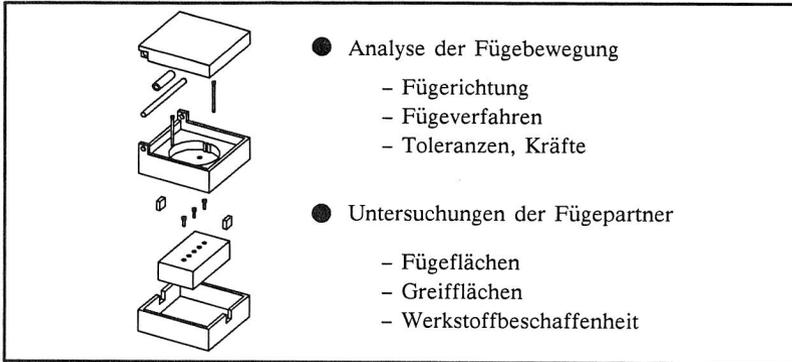


Bild 14 : Explosionsdarstellung eines Produktes

Für die folgenden Komponenten müssen somit Geometriemodelle erstellt werden:

- Werkstücke (Einzelteile, Baugruppen)
- Handhabungssysteme (Roboter, NC-Achsen)
- Werkzeuge (Greifer, Schrauber, Schweißzangen)
- Transportsysteme (Bänder, Flurförderfahrzeuge)
- Bearbeitungsmaschinen bzw. Fügevorrichtungen
- Werkstückträger bzw. Spannmittel
- Ordnungseinrichtungen (Vibrationswendelförderer, Paletten)
- sonstige Komponenten (Steuerungen, Portale, Sensoren)

Geometriemodelle von Werkstücken stammen aus der Produktkonstruktion und können mit Hilfe von CAD-Systemen erstellt werden. Während für die NC-Programmierung in der Teilefertigung häufig 2D- oder 2 $\frac{1}{2}$ D-Modelle ausreichen, sind für die Roboterprogrammierung aufgrund der räumlichen Bewegungen 3D-Modelle erforderlich. Solche Modelle müssen je nach Anwendungsfall von Einzelteilen, Baugruppen oder Produkten verfügbar sein.

Durch die Verwendung volumenorientierter Modelle können speziell in der Montage, wo gleichzeitig mehrere Einzelteile oder Baugruppen am Fügeprozess

beteiligt sind, wirkungsvolle Untersuchungen anhand des Produktmodells durchgeführt werden. So können Fügeoperationen simuliert werden oder mögliche Kollisionen durch Einbauuntersuchungen ermittelt werden. Anhand von Explosionsdarstellungen der Produktstruktur kann auf den Montageablauf geschlossen werden (Bild 14). Die Produktstruktur liegt meist in konstruktionsorientierter Form vor und muß erst in eine fertigungsorientierte Darstellung gebracht werden. Dieser Vorgang entspricht der rechnergestützten Überführung von konstruktionsorientierten Stücklisten in Fertigungsstücklisten.

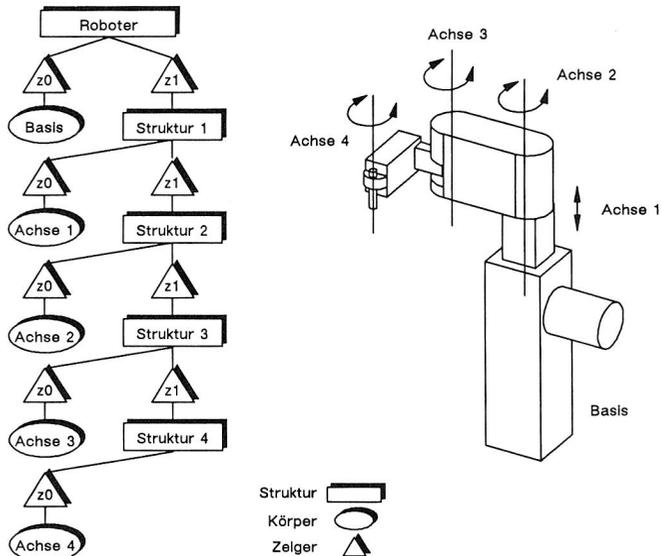


Bild 15 : CAD-Datenstruktur eines Industrieroboters

Abgesehen von diesen notwendigen Änderungen an der Produktstruktur erfolgt die geometrische Modellierung der Einzelteile im Rahmen der Auftragsabwicklung bei der Produktkonstruktion. Für die übrigen aufgeführten Komponenten ist dies nicht der Fall, da zum einen der CAD-Einsatz in der Betriebsmittelplanung noch nicht weit fortgeschritten ist und zum anderen Betriebsmittel häufig von außen bezogen werden. Hierfür ist eine CAD-Datenübergabe zwischen Zulieferer und Unternehmen notwendig, wie sie bereits in der Automobilindustrie existiert. Solche zwischenbetrieblichen Integrationsbestrebungen gewinnen durch die Just-in-time Philosophie zunehmend an Bedeutung.

Neben den Werkstücken sind die Handhabungssysteme die wichtigsten Komponenten für die graphische Programmierung. Dabei sind die Achsen entsprechend ihrer Freiheitsgrade so anzuordnen und zu verknüpfen, daß die gewünschte kinematische Struktur entsteht. Mit Hilfe von CAD-Systemen können durch Zeiger aus Einzelkörpern Körpergruppen erzeugt werden, die wiederum zu beliebig komplexen Strukturen zusammengefaßt werden können. Auf diese Weise können die notwendigen Produktstrukturen und kinematischen Mechanismen innerhalb eines Fertigungssystems gebildet werden (Bild 15).

Ebenso wird durch diese Funktionen zur Strukturbildung der Speicherbedarf reduziert, wenn bei mehrmaligem Auftreten derselben Objekte anstelle der redundanten Geometrieinformationen nur noch verschiedene Zeiger abzuspeichern sind, die auf diese Geometrieinformationen verweisen.

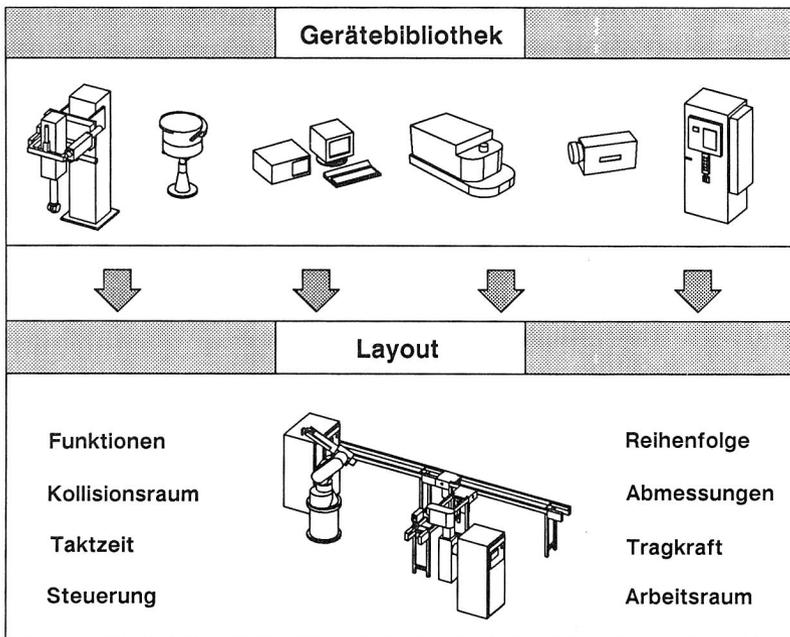


Bild 16 : Rechnergestützte Layoutplanung

In analoger Weise lassen sich die Geometrie- und Strukturinformationen der übrigen Fertigungskomponenten erzeugen. Im nächsten Schritt werden aus diesen verschiedenen Gerätekomponenten Zellenlayouts generiert. Jede auftretende Gerätevariante muß nur einmal geometrisch modelliert werden, und kann dann

in unterschiedlichen Layouts Verwendung finden. Die Gerätedaten können nach ihren Kategorien in Bibliotheken abgelegt werden. Durch die Verwendung von Baukastensystemen kann der Aufwand für die Modellierung durch entsprechende Variantenprogramme erheblich reduziert werden.

Bei der Layoutgenerierung können dann die gewünschten Geräte aus der jeweiligen Bibliothek ausgewählt werden (Bild 16).

Mit der beschriebenen Zeigerstruktur können so die Einzelgeräte in beliebig komplexe Zellen oder Anlagen hierarchisch organisiert werden. Für jedes Gerät in einer Zelle existiert dann ein Zeiger auf die einmalig abgespeicherte Geometrieinformation. Die Geometriemodelle der Geräte sind mit einer bestimmten Lage und Orientierung, beispielsweise im Ursprungskordinatensystem des CAD-Systems, abgelegt.

Mit den üblichen CAD-Funktionen können die Einzelgeräte an die gewünschten Koordinaten in der Zelle plziert werden. Die wichtigsten Funktionen für die Layoutgenerierung sind dabei das Drehen, Verschieben, Kopieren, Projizieren, Auswählen, Laden, Löschen und Abspeichern von Modellen.

Das erzeugte Layout wird mit den Zeigern auf die zugehörigen Gerätedaten abgespeichert und steht für die folgenden Planungsschritte zur Verfügung. Die Zeiger beinhalten dabei für jedes Gerät die entsprechende Lage und Orientierung in der Zelle. Diese Bewegungskordinatensysteme der Geräte sind bei der Eingabe der technologischen Parameter, wie z. B. kinematischer Achsparameter von Industrierobotern zu berücksichtigen.

3.1.2 Technologische Informationen

Die geometrischen Modelle von Werkstücken und Fertigungskomponenten müssen analog zur Teilefertigung um technologische Angaben ergänzt werden. Wesentliche Angaben für die graphische Programmierung können durch Bezugskordinatensysteme definiert und mit geometrischen Modellen verknüpft werden. Auf diese Weise ist es möglich die Lage und Orientierung von beliebigen Objekten im Raum festzulegen. Bei der Layoutplanung wird wie beschrieben die Anordnung von Betriebsmitteln in einem Fertigungssystem über solche Bezugskordinatensysteme bestimmt.

An Werkstücken können solche Objekte Greifpunkte, Fügepunkte, Entgratverläufe oder Schweißbahnen sein. Die Definition solcher Bezugskordinatensysteme kann bereits in der Produkt- oder Betriebsmit-

telkonstruktion erfolgen, wie z.B. das Festlegen einer Schweißnaht [33], oder erst bei der Programmierung, wo bei der Bewegungsplanung Raumpunkte bestimmt werden. Diese Bewegungsplanung ist ein wesentlicher Teil der Roboterprogrammierung, da die kinematische Struktur des jeweiligen Gerätes bei der Programmierung berücksichtigt werden muß. Die kinematischen Parameter eines Handhabungssystems müssen daher in einem Datenmodell für die graphische Programmierung enthalten sein. Diese kinematische Modellierung muß für jedes Gerät einmal durchgeführt werden. Dabei werden die Bewegungsmöglichkeiten eines Handhabungssystems mathematisch beschrieben.

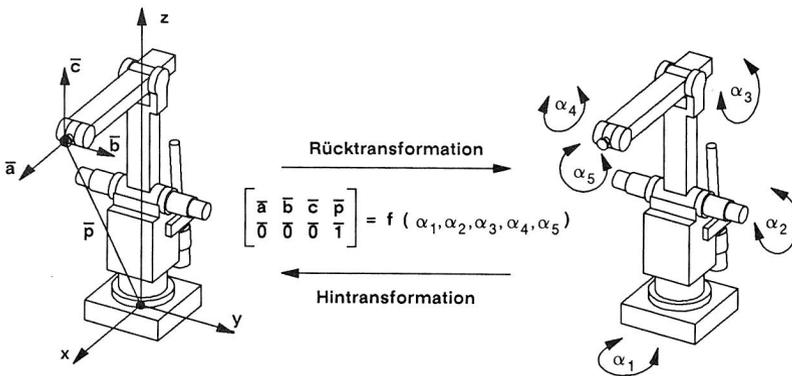


Bild 17 : Koordinatentransformation bei Industrierobotern

Diese Beschreibung dient als Grundlage für die Durchführung der Koordinatentransformation. Diese Transformation ist erforderlich, um bei Achsbewegungen die neue Stellung des Handhabungssystems berechnen zu können. Zwei Arten der Koordinatentransformation lassen sich generell unterscheiden (Bild 17) [34]:

- bei der Hintransformation wird ausgehend von rotatorischen oder translatorischen Achsbewegungen die Stellung des Handhabungssystems im definierten Endbezugskordinatensystem in Raumkoordinaten in Bezug auf ein Ursprungskordinatensystem berechnet. Die Hintransformation führt zu einer eindeutigen Lösung.
- bei der Rücktransformation wird umgekehrt von einer gewünschten Stellung in Raumkoordinaten auf die hierfür erforderlichen rotatori-

schen oder translatorischen Achsbewegungen zurückgerechnet. Die Lösung der Rücktransformation ist oft mehrdeutig.

Für die Koordinatentransformation hat sich das DENAVIT-HARTENBERG-Verfahren als besonders günstig erwiesen [35].

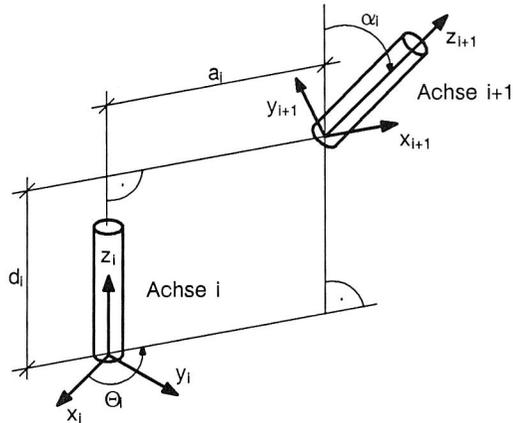


Bild 18 : Übergang von zwei Koordinatensystemen

Das DENAVIT-HARTENBERG-Verfahren geht davon aus, daß in jedes Roboter-gelenk ein eigenes Koordinatensystem gelegt wird, dessen z -Achse in die Richtung der Bewegungsachse weist, wobei die Richtung einer rotatorischen Achse im Sinne einer Rechtsschraube definiert ist. Der gesuchte Übergang von einem Bezugskoordinatensystem des Roboters zum Endkoordinatensystem wird in mehrere Teilübergänge zerlegt, wobei sich bei jedem Teilübergang die Änderung höchstens einer Gelenkvariable auswirken kann. Die Teilübergänge vollziehen sich nach folgendem standardisiertem Schema [35]:

1. Schritt : Rotation um die Achse z_i
2. Schritt : Translation entlang der Achse z_i
3. Schritt : Translation entlang der Achse x_{i+1}
4. Schritt : Rotation um die Achse z_{i+1}

Bild 18 zeigt beispielhaft die Überführung eines Koordinatensystems mit dem Index "i" in ein Koordinatensystem mit dem Index "i+1" durch die Abfolge der oben genannten Schritte.

Mathematisch wird ein Koordinatensystemübergang durch die sog. DENAVIT-HARTENBERG-Matrix beschrieben, die folgende Blockstruktur besitzt:

$$\underline{\underline{D}}_{1,i+1} = \left[\begin{array}{ccc|c} \underline{\underline{R}} & & & \underline{\underline{t}} \\ \hline 0 & 0 & 0 & 1 \end{array} \right]$$

wobei $\underline{\underline{R}}$ eine 3×3 -Rotationsmatrix und $\underline{\underline{t}}$ ein 3×1 -Translationsvektor ist. Diese Struktur ermöglicht es, die Vorteile des Matrizenkalküls gleichzeitig auf die Rotation und die Translation eines Raumpunktes anzuwenden und somit eine kompakte Darstellungsform zu erhalten. Eine Gesamttransformationsmatrix ergibt sich, wenn man das Produkt aus den DENAVIT-HARTENBERG-Matrizen aller Achsübergänge bildet.

Aus der Kenntnis des Transformationsalgorithmus' läßt sich die Information gewinnen, daß zur Beschreibung eines Koordinatensystemübergangs lediglich die vier Achsparameter Θ_i , d_i , a_i und α_i zu ermitteln sind. Während drei dieser Parameter a priori konstant sind, ist bei einem rotatorischen Gelenk Θ_i und bei einem translatorischen Gelenk d_i die jeweilige Gelenkvariable. Die übrigen Achsparameter sind durch die konstruktive Auslegung des Roboters festgelegt.

Dabei richtet sich die Auswahl eines Roboters nach der entsprechenden Aufgabe, welche für die Anordnung der translatorischen und rotatorischen Achsen bestimmend ist.

Zur Erzeugung des Hauptarbeitsraumes ist eine kinematische Kette mit mindestens drei Getriebefreiheitsgraden erforderlich. Dies entspricht der Abfolge der ersten drei Achsen, die deshalb auch als Hauptachsen (Schultergelenk) bezeichnet werden. Die weiteren Achsen werden als Nebenachsen (Handgelenk) bezeichnet und dienen zur Einstellung der gewünschten Orientierung des Endkoordinatensystems (tool-center-point) des am Roboter befindlichen Werkzeugs. Die Nebenachsen sind meist rotatorisch, da durch Translationsgelenke keine Veränderung der Orientierung erreicht werden kann. Für die Anordnung der Hauptachsen, die den möglichen Arbeitsraum festlegen, gibt es aufgrund der Kombinatorik theoretisch eine Vielzahl von Alternativen. Von diesen theoretisch denkbaren Kinemattketten findet jedoch nur ein Bruchteil in der Robotertechnologie Anwendung. Diese ergeben sich einerseits aus dem Wunsch nach bestimmten Hauptarbeitsräumen und andererseits aus Gründen des Steuerungsaufwandes, der Steifigkeit oder Positioniergenauigkeit.

Aufgrund dieser Erkenntnisse lassen sich die gebräuchlichsten Roboterfabrikate hinsichtlich der Anordnung ihrer Hauptachsen klassifizieren. Für die Zweckmäßigkeit einer solchen Klassifizierung sprechen die folgenden Gründe:

- Standardisierung der kinematischen Beschreibung innerhalb der Roboterklassen
- vereinfachter Vergleich verschiedener Roboterfabrikate hinsichtlich deren Eignung für bestimmte Handhabungsaufgaben
- Möglichkeit der Bereitstellung von Transformationsalgorithmen für die klassifizierten Fabrikate
- Einsatz von rechnergestützten Werkzeugen für die kinematische Beschreibung von Industrierobotern

Gerade der letzte Punkt ist für die Modellbildung im Rahmen der graphischen Programmierung sehr wichtig. Der Programmierer kann dadurch von Tätigkeiten entlastet werden, die mit der eigentlichen Programmieraufgabe nichts zu tun haben.

Die für eine Klassifizierung wichtigsten Hauptachskonfigurationen, die in der Praxis anzutreffen sind, sind die folgenden:

- drei Translationsachsen, (ttt) quaderförmiger Arbeitsraum Beispiel
KUKA IR 400, ASEA IRb 8200
- eine Rotationsachse, zwei Translationsachsen (rtt) zylindrischer Arbeitsraum Beispiel MANUTEC m3
- eine Translationsachse, zwei Rotationsachsen (trr) zylindrischer Arbeitsraum Beispiel BOSCH SR 800
- drei Rotationsachsen (rrr) kugelförmiger Arbeitsraum Beispiel
KUKA IR 161, MANUTEC r3

Aufgrund ihrer aufwendigen Kinematik eignen sich Roboter der Klasse rrr besonders für komplexe Handhabungsaufgaben, wie das Punktschweißen in der KFZ-Montage. Sogenannte SCARA-Roboter der Klasse trr sind aufgrund ihrer hohen selektiven Steifigkeit und Positionierung häufig in der Kleinmontage anzutreffen. Die einfache Kinematik der Klasse ttt wird intern in Portal- und Säulengeräte unterteilt. Während Portalgeräte überwiegend bei der Maschinen-

beschickung mit Werkzeugen und Werkstücken Verwendung finden, werden Säulengeräte vor allem auch zu Montagezwecken eingesetzt.

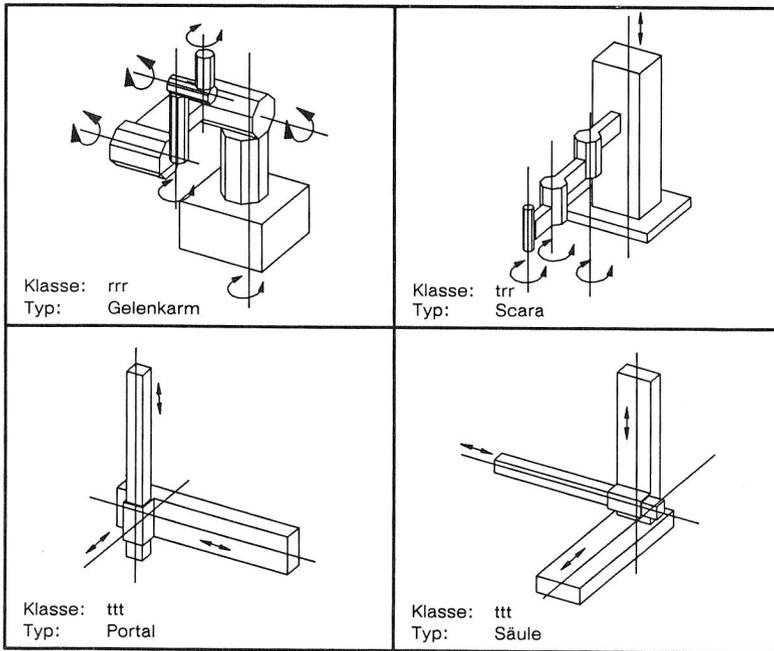


Bild 19: Vordefinierte Kinematik-Konfigurationen

Die Aufteilung für eine Klassifizierung in Haupt- und Nebenachsen beizubehalten ist sinnvoll, da die Hauptachskonfigurationen mit verschiedensten Handgelenken kombiniert werden können. Da diese meist problemangepaßt sind, gibt es vielzählige Varianten, so daß eine Klassifizierung über die Anordnung aller Achsen nicht mehr möglich wäre. Mögliche Unterscheidungsmerkmale sind die Anzahl der Gelenke, die Art der Gelenke sowie der Übergang von Hauptachsen zu Nebenachsen.

Durch die Klassifizierung kann der Benutzer bei der kinematischen Beschreibung auf vordefinierte Hauptachs-Konfigurationen zurückgreifen (Bild 19).

Neben diesen Parametern zur kinematischen Beschreibung sind für eine realitätsnahe Bewegungssimulation weitere Daten erforderlich. Diese Daten sind entweder den Achsen oder dem Roboter zuzuordnen:

- Minimalstellung der Achse

- Maximalstellung der Achse
- maximale Geschwindigkeit der Achse
- Beschleunigung der Achse
- Bahngeschwindigkeit des Roboters
- Bahnbeschleunigung des Roboters

Sind bei der Bewegung hohe Lasten zu berücksichtigen, so müssen weitere Angaben zu Gewichten, Drehmomenten und Kräften, sowie deren Auswirkungen auf Geschwindigkeiten und Beschleunigungen gemacht werden. Solche dynamische Berechnungen werden bisher aus Performancegründen parallel zur Simulation durchgeführt, um Toleranzgrenzen für die derart berechneten Werte ermitteln zu können [36] [37].

Mit den beschriebenen geometrischen und technologischen Modellinformationen ist es möglich, graphisch interaktiv Roboterprogramme zu generieren. Durch die Nutzung der Modellinformationen können nicht nur Programme erstellt und getestet, sondern auch vorliegende Planungsergebnisse korrigiert und optimiert werden.

3.2 CAD-integrierte Layoutprüfung und Bewegungsplanung

Nach der Datenmodellierung sind die Dimensionen von Werkstücken und Fertigungszellen geometrisch festgelegt, sowie Bewegungsmechanismen innerhalb der Zellen zusätzlich kinematisch beschrieben. Mit den allgemein verfügbaren Funktionen von CAD-Systemen können diese Daten zur Generierung von Bewegungsanweisungen und zur Layoutprüfung genutzt werden. Durch die Kombination von textuellen Verfahren können somit komplette Programme erstellt werden. Erfolgt die Eingabe von Programmlogik und Raumpunkten nicht gleichzeitig, so können mit heute gebräuchlichen Programmiersprachen Variablen für die Positionswerte eingegeben werden. Diese Positionswerte werden im CAD-System ermittelt und in einer Liste abgelegt, aus der sie sukzessiv in die Variablen eingelesen werden können. Die Positionsdaten werden nach Lage und Orientierung durch Bezugskordinatensysteme an Werkstücken oder innerhalb des Layouts bei der Datenmodellierung definiert.

Diese Bezugskordinatensysteme entstehen entweder funktionsorientiert im Rahmen der Produktkonstruktion wie z. B. Schweißpunkte, oder im Hinblick auf

den Fertigungsablauf in der Betriebsmittelplanung, wie z. B. Greifpunkte an Werkstücken oder Abhol- und Ablegepositionen innerhalb des Layouts.

Mit den üblichen Abfragemöglichkeiten von Modellen können die für die Programmierung benötigten Positionswerte am CAD-System ermittelt und für die Programmerstellung zur Verfügung gestellt werden. Hierzu ist eine räumliche Darstellung notwendig, die nur durch 3D-Modelle ermöglicht wird. Neben diesem Vorteil gegenüber der konventionellen Werkstattzeichnung bietet die rechnerinterne Darstellung vielfältige Testmöglichkeiten, die erst eine ausreichende Qualität der Bewegungsanweisungen gewährleisten können.

Bei der Erstellung des Zellenlayouts und der Programmgenerierung möchte der Benutzer überprüfen, ob der ausgewählte Roboter die Arbeitsaufgabe in gewünschter Weise erfüllen kann.

Mit Hilfe von CAD-Systemen können die Darstellungen rechnerinterner Modelle am Bildschirm visuell überprüft werden. Dabei kann je nach Leistungsfähigkeit des Systems auf folgende Funktionen zurückgegriffen werden:

- Aus-/Einblendung verdeckter Kanten
- Skalierung
- Meßfunktionen
- Farbschattierung
- Verändern der Blickrichtung
- Verändern des Standpunktes
- perspektivische, isometrische Darstellung
- Spiegeln, Drehen und Verschieben der gesamten Darstellung

Durch diese CAD-Funktionen, sowie durch die bei der Modellbildung erzeugten geometrischen und kinematischen Beschreibungen, kann die Qualität der Bewegungsanweisungen und damit die Aufgabenerfüllung innerhalb des Layouts wirksam getestet werden.

Dabei sind die folgenden beiden Fragestellungen von besonderer Bedeutung:

- sind alle definierten Raumpunkte vom Roboter aus erreichbar, d. h. sind die Komponenten innerhalb des Layouts optimal angeordnet ?

- Treten beim Abfahren der Raumpunkte, d. h. während des Programmablaufes Kollisionen zwischen Roboter, Werkstücken, Werkzeugen usw. auf ?

Die Erreichbarkeit von Raumpunkten hängt vom ausgewählten Roboter ab. Durch die zugehörige kinematische Struktur ergibt sich der Arbeitsraum, d. h. der Wirkbereich für den Roboter.

Durch die Hauptachskonfiguration wird dabei der Hauptarbeitsraum festgelegt, innerhalb dessen beliebige Positionen erreichbar sind. Welche dieser Positionen in beliebiger Orientierung angefahren werden können, ist durch die Nebenachsen festgelegt [38].

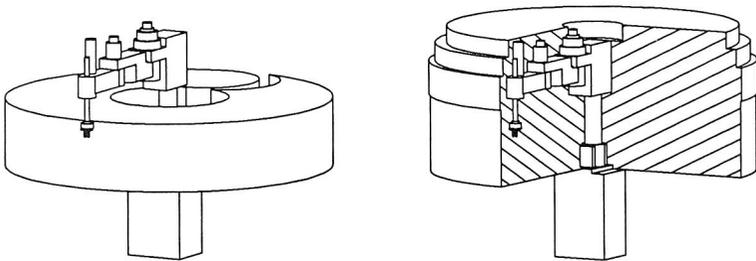


Bild 20: Arbeits- und Kollisionsraum eines Industrieroboters

Die Erreichbarkeit von Raumpunkten kann nun dadurch überprüft werden, daß die Verfahrwegsgrenzen der Hauptachsen, der Hauptarbeitsraum, in die Darstellung einblendet werden. Durch Einblenden eines Roboterarbeitsraumes in das Layout, kann die richtige Platzierung schnell und einfach überprüft werden (Bild 20).

Bei Linienmodellen muß diese Überprüfung visuell mit den vorher beschriebenen Funktionen durchgeführt werden. Flächen- und Volumenmodelle erlauben eine automatische Erreichbarkeitskontrolle, da alle Komponenten innerhalb des Layouts auf Überschneidungen mit dem Objekt Arbeitsraum überprüfbar sind. Außerdem wird die Anschaulichkeit durch das Ausblenden verdeckter Kanten bei komplexen Darstellungen vergrößert.

Ist der Roboter richtig plaziert, d. h. sind alle benötigten Punkte erreichbar, so ist im nächsten Schritt zu überprüfen, ob die Bewegungsanweisungen mit der gewünschten Orientierung und ohne auftretende Kollisionen ausführbar sind.

Eine derartige Prüfung ist mit CAD-Funktionen nur eingeschränkt möglich. Das Anfahren der Positionen im Raum mit gewünschter Orientierung mit den Verschiebe- und Drehfunktionen des CAD-Systems ist ohne Rücktransformation sehr aufwendig. Die Einhaltung zulässiger Verfahrensgrenzen für die Achsen muß dabei manuell überprüft werden. In den gewünschten Arbeitsstellungen ist eine Kollisionsüberprüfung je nach Modell analog zur Erreichbarkeitsprüfung visuell oder automatisch möglich [39]. Sowohl die Erreichbarkeitsprüfung als auch die Kollisionsüberwachung erstrecken sich jedoch nur auf die im Programm definierten Raumpunkte und nicht auf die Bewegungsbahnen zwischen diesen Punkten. Die Bestimmung eines Kollisionsraumes (Bild 20), den der Roboter mit seinem Gestell, seinen Achsen, Werkstücken, Greifern oder Werkzeugen für alle möglichen Arbeitsstellungen überstreicht, ist ohne Kenntnis der Bahnverläufe nicht möglich. In Gegensatz zum Arbeitsraum, der nur vom ausgewählten Roboter abhängig ist, ändert sich der Kollisionsraum mit der Aufgabenstellung und Layoutanordnung.

Die beschriebenen Testfunktionen sind somit nur dort sinnvoll einsetzbar, wo überschaubare Kollisionsräume und Bahnverläufe vorhanden sind. Dies ist beispielsweise beim Einsatz kartesischer Portalachssysteme zur Werkstückhandhabung an Werkzeugmaschinen möglich.

Bei den meisten Anwendungsfällen sind jedoch komplexe Bahnverläufe mit vielfältigen Kollisionsmöglichkeiten zu berücksichtigen. Hierfür sind CAD-Systeme, die die beschriebenen geometrischen und technologischen Modellinformationen nur zum Teil ausnutzen, nicht ausreichend.

Dies ist nur durch leistungsfähige Simulationssysteme zu gewährleisten, die dynamische Zeit- und Bewegstudien kompletter Programme mit Echtzeitsimulation ermöglichen.

3.3 Graphisch-interaktive Programmierung und Simulation

Die heute zur Verfügung stehenden Arbeitsplatzrechner, mit ihren leistungsfähigen Graphikwerkzeugen bieten die Möglichkeit, geometrische Objekte in Echtzeit und in dreidimensionaler Darstellung am Bildschirm zu manipulieren. Diese Fortschritte in der Entwicklung der Computergraphik haben große

Bedeutung für den Einsatz graphischer Programmierverfahren. Die Verfügbarkeit schneller Graphikprozessoren ermöglicht es, komplexe Roboterarbeitszellen nicht nur darzustellen, sondern auch Bewegungen des Roboters am Bildschirm zu simulieren. Damit können die vorhandenen Modellinformationen zum Testen und Erstellen von Programmen besser genutzt werden. Neben statischen Erreichbarkeitsstudien und Kollisionsbetrachtungen, sind zusätzlich dynamische Prüfungen während der Bewegung möglich. Die hierfür notwendigen Bildmanipulationsfunktionen werden teilweise bereits hardwaremäßig unterstützt [40]. Die Manipulation komplexer geometrischer Objekte ist aufgrund des hohen Rechenaufwandes zumeist auf Linien- oder einfache Flächenmodelle beschränkt, die auf Polyedern als Grundkörper basieren.

Für die Darstellung von Bewegungsbahnen sind neben den beschriebenen geometrischen und kinematischen Daten Informationen über die Steuerung des ausgewählten Gerätes notwendig. Hierzu zählen im wesentlichen die Beschreibung der Bahnplanungsalgorithmen, durch die die genauen Bewegungsbahnen bestimmt werden. Die Beschreibung dieser Informationen ist sehr aufwendig und somit Teil der langfristigen Systementwicklung im Gegensatz zu den Modellinformationen, die im Rahmen der Programmierung entstehen. Ein generelles Problem ergibt sich dadurch, daß die Informationen über Steuerungen im allgemeinen Betriebsgeheimnis sind. Die Entwicklung von Simulationssystemen kann somit nur mit den Steuerungsherstellern gemeinsam erfolgen. Nur dadurch kann gewährleistet werden, daß die Bewegungsbahnen realitätsgetreu definiert und getestet werden können.

Weiterhin werden durch die Steuerungshersteller, aufgrund des Fehlens einer geeigneten Schnittstelle wie CLDATA für die Teilefertigung, die Programmiersprachen definiert. Ein Simulationssystem muß somit für jede Steuerung einen Sprachinterpreter enthalten, der wiederum die Funktionsmöglichkeiten bei der Programmerstellung wesentlich beeinflusst.

3.3.1 Programmerstellung durch graphisches Teach-In

Die Aufgaben der Programmerstellung lassen sich nach den Programminformationen grob in die Eingaben der Ablauflogik und der Bewegungsanweisungen einteilen. Die Eingabe des Programmablaufes erfolgt analog zur textuellen Programmierung mit Hilfe einer Programmiersprache. Für die Eingabe einer Ablauflogik bieten die vorhandenen Modellinformationen keine Unterstützungsmöglichkeit. Diese werden für die Definition und Überprüfung von Bewegungsanweisungen benutzt.

Für das Erzeugen von Bewegungsfolgen stehen die für die graphischen Dialoge am Bildschirm üblichen Eingabehilfsmittel zur Verfügung. Neben der wenig ergonomischen und fehleranfälligen Eingabe in alphanumerischer Form über Tastatur, können Eingaben zusätzlich über Positionieren mit Maus oder Lichtgriffel, Funktionstasten und Menütechnik erfolgen. Diese benutzerfreundliche Art der Programmierung ist bereits ein wesentlicher Vorteil gegenüber der textuellen Programmierung (Bild 21).

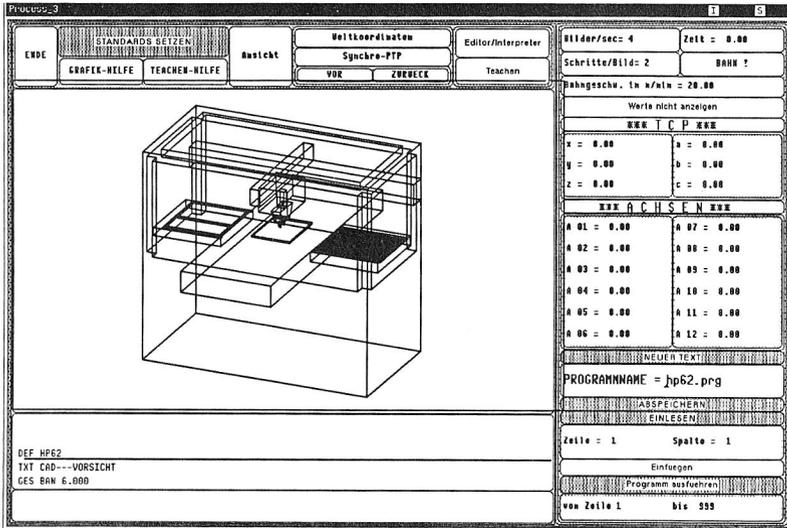


Bild 21: Programmierung und Simulation am graphischen Bildschirm

Ein wesentlicher Teil bei der Generierung von Bewegungsanweisungen ist die Planung der Bewegungsbahnen. Als Modellinformation kann dabei zum einen auf die definierten Bezugskoordinatensysteme sowie auf die kinematische Beschreibung der Bewegungsmechanismen zurückgegriffen werden. Für das Anfahren der definierten Punkte ist es notwendig, die Lage- und Orientierungsangaben in die Achskoordinaten des Handhabungssystems umzurechnen. Hierfür sind für jeden Bewegungsmechanismus spezielle Transformationsalgorithmen bereitzustellen. Das Denavit-Hartenberg-Verfahren für die Koordinatentransformation wurde bereits in Kapitel 3.1.2. kurz beschrieben. Probleme bereitet die Rücktransformation von Raum- in Roboterkoordinaten, da je nach kinematischer Struktur mehrere Lösungen entstehen können.

Ist der Roboter für bestimmte Bereiche des Arbeitsraums überbestimmt, d. h., kann in diesen Bereichen eine vorgegebene Stellung durch mehrere Winkelkonfigurationen realisiert werden, so sind die Lösungsgleichungen nicht eindeutig lösbar. Um die Eindeutigkeit der Rücktransformation bei der realen Ausführung zu gewährleisten, können neben den Lage- und Orientierungsangaben zusätzlich Angaben zu den Winkelrichtungen der Achsen, sowie zur gewünschten Stellung (Grund- / Überkopfstellung) erforderlich sein. Diese Daten beziehen sich auf die zu erreichende Zielposition. Für die Planung der Bewegungsbahnen müssen die Bahnen zwischen den Zielpositionen beschrieben werden. Die Art der Bewegungsbahn hängt von der zu erfüllenden Aufgabe ab. Die einfachste Bewegung ist die PTP-Bewegung (Point to Point), bei der die einzelnen Achsen unabhängig voneinander entsprechend der Winkel- oder Wegvorgaben von Punkt zu Punkt bewegt werden. Die resultierende Bewegungsbahn ist nicht vorhersehbar, da die einzelnen Achsen ja nach maximaler Achsgeschwindigkeit zu unterschiedlichen Zeiten die Zielposition erreichen.

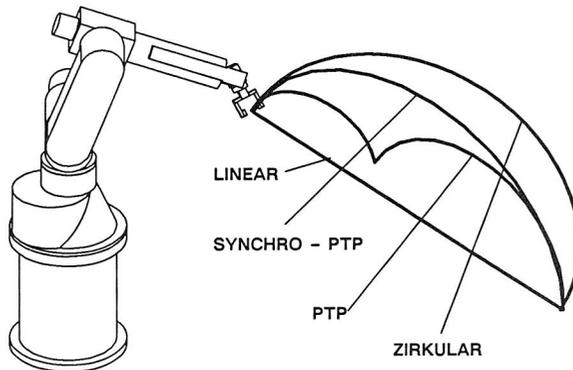


Bild 22: Bewegungsarten eines Industrieroboters

Häufig wird deshalb die Synchro-PTP-Bewegung verwendet, bei der alle Achsen zur selben Zeit die Bewegung beginnen und beenden. Die PTP-Bewegungsarten ermöglichen sehr schnelle Bewegungen und erfordern wenig Steuerungsaufwand. Aufgrund der unbestimmten Bewegungsbahn werden sie für Bewegungen im Raum ohne Kollisionsgefahr eingesetzt.

Ist zwischen den Raumpunkten eine definierte Genauigkeit hinsichtlich Lage und Orientierung gefordert, so müssen Interpolationsverfahren angewandt werden.

Die Bahn zwischen zwei Punkten wird dabei je nach Interpolationsart in Bahnsegmente aufgeteilt, für die die Achswerte berechnet werden. Die entstehenden Bahnen sind mathematisch beschreibbar und können in Form von Geraden, Kreisen oder Polynomen höherer Ordnung auftreten (Bild 22).

Die gebräuchlichste Art ist die Linearinterpolation bei der die resultierende Bewegungsbahn eine Gerade darstellt. Die Zwischenpunkte auf der Geraden, für die eine Rücktransformation erfolgt, können über die Bahngeschwindigkeit zu diskreten Zeitintervallen ermittelt werden. Je kleiner diese Zeitintervalle gewählt werden, desto genauer wird die resultierende Bahn.

Interpolationsverfahren werden für Feinbewegungen eingesetzt, sowie bei Anwendungen mit komplexen Bewegungsverläufen, wie z. B. beim Bahnschweißen.

Zusätzlich zur Bewegungsart muß die Orientierung bei der Bewegung eingegeben werden. Dabei wird zwischen raumfester und bahnfester Orientierung unterschieden. Punktschweißen z.B. wird meist mit zur Bahn fixen Orientierung gefahren, Handhabungsaufgaben dagegen, wie z. B. Transport mit Sauggreifer, oft mit raumfester Orientierung.

Durch die Eingabe der beschriebenen Bewegungsinformationen sowie der definierten Raumpunkte kann der Bewegungsablauf einfach definiert werden. Der Benutzer aktiviert den gewünschten Punkt am graphischen Bildschirm und gibt über Menütechnik die geforderten Bewegungsinformationen ein. Aus diesen Daten kann das System die notwendigen Bewegungsanweisungen automatisch generieren. Ebenso einfach kann durch Greifbefehle auf vorhandene Greifpunkte zugegriffen werden. Der wesentliche Vorteil besteht darin, daß durch Befehle wie 'Greifen' oder 'Punkt anfahren' von den geometrischen Koordinatenwerten abstrahiert werden kann. Dies gilt jedoch nur für die Bezugskoordinatensysteme, die bei der Datenmodellierung bereits in der Produktkonstruktion oder Betriebsmittelplanung generiert und plaziert wurden.

Häufig bilden diese vordefinierten Positionswerte nur Eckdaten innerhalb eines Programms und müssen um zahlreiche Raumpunkte, die bei der Bewegungsplanung entstehen, ergänzt werden.

Diese Raumpunkte können nur unter Berücksichtigung der kinematischen Struktur des Bewegungsmechanismus bestimmt werden. Dies geschieht bei der graphischen Programmierung durch das sogenannte graphische Teach-In, bei dem der Roboter wie an der Steuerung über Funktionstasten an die gewünschten Stellungen verfahren wird.

Zum Teachen des Programmes lassen sich die Achsen der Bewegungssysteme beziehungsweise die daran angeschlossenen Werkzeuge über Funktionstasten an

die vorgesehenen Positionen im Raum bewegen. Die einzelnen Achsen werden dabei in positiver oder negativer Richtung sukzessive verfahren. Für den Benutzer ist das Verfahren eines Roboters an gewünschte Positionen in Roboterkoordinaten vor allem bei rotatorischen Achsbewegungen schwierig.

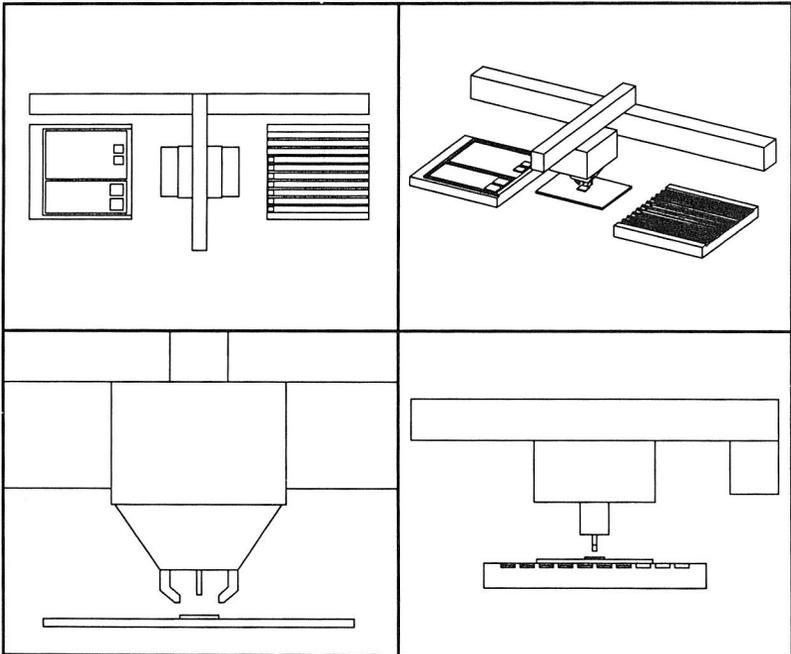


Bild 23: Graphisches Teach-in in vier Ansichten mit Zoom-Funktion

Aufgrund der beschriebenen Transformationsalgorithmen kann der Roboter deshalb über die Funktionstasten in kartesischen Raumkoordinaten verfahren werden. Ideal ist diese Möglichkeit, wenn gleichzeitig in vier Fenstern gearbeitet wird. Neben der dreidimensionalen Darstellung stehen dabei Ansichten aus den kartesischen Achsrichtungen zur Verfügung (Bild 23). Gewünschte Stellungen können über das Verfahren in Raumkoordinaten sukzessive einfach erreicht werden.

Für Feinbewegungen beim Fügen oder Greifen kann der Roboter zusätzlich wie an der Steuerung im Bezugskoordinatensystem des Werkzeugs verfahren werden. Wenn durch Anfahren in den beschriebenen Koordinatensystemen die gewünschten Stellungen erreicht sind, können sie als Raumpunkte definiert und

abgespeichert werden. Ebenso kann die Stellung des Roboters mit den zugehörigen Winkelrichtungen in diesen Raumpunkten festgelegt werden.

Die Definition von Raumpunkten durch graphisches Einlernen, sowie das Selektieren und Anfahren vordefinierter Raumpunkte über vorgegebene Bahnen bieten eine benutzerfreundliche Möglichkeit zur Generierung von Bewegungsanweisungen. Bei der graphischen Programmerstellung bestehen eine Vielzahl von Funktionen, die generierten Programmteile bereits während des Programmiervorganges zu testen.

3.3.2 Simulation von Bewegungsabläufen

Der Programmtest ist ein wesentlicher Bestandteil von offline-Verfahren, da Fehler im Programmablauf, Inkonsistenz zwischen Geometrie und Kinematik, sowie Planungsfehler hinsichtlich Layoutgestaltung oder Taktzeitüberschreitung bereits in der Planungsebene festgestellt werden können. Statt der realen Fertigungsumgebung wird ein graphisches Zellenmodell und ein leistungsfähiges Simulationssystem zur Programmierung benötigt.

Um den Programmtest wirkungsvoll zu machen, müssen Programme in der Form simuliert werden können, in der sie an der Steuerung ablauffähig sind. Aufgrund fehlender Normierungen muß deshalb für jede Steuerung und deren zugehörige Programmiersprache ein eigener Sprachinterpreter vorhanden sein. Mit Hilfe eines Sprachinterpreters ist es möglich, Programme komplett zu testen. Nicht nur Bewegungsanweisungen, sondern auch die Ablauflogik kann simuliert werden, die bei vielen Anwendungen einen großen Anteil des Programms ausmacht. Neben den Anweisungen zum Programmablauf, wie Sprüngen, Schleifen oder Unterprogrammaufrufe, beinhaltet die Ablauflogik auch die gesamte Kommunikation mit anderen Steuerungseinheiten und Sensorabfragen.

Die Simulation paralleler Abläufe ist notwendig, wenn sich in einem Fertigungssystem verschiedene Steuerungseinheiten befinden, die miteinander kommunizieren oder deren Arbeitsräume sich überschneiden. Die Koordination getrennter Bewegungsabläufe erfolgt mit Hilfe der Zeitmessung. Über die vorgegebenen Weg- und Geschwindigkeitsverläufe können die Zeiten einzelner Programmschritte oder die Ausführungszeiten kompletter Programme berechnet werden. Für die Animation können daraus die aktuellen Darstellungen der einzelnen Bewegungsabläufe zu diskreten Zeitpunkten abgeleitet werden. Neben der Koordinationsfunktion erlaubt die Zeitmessung somit die Überprüfung von Ausführungs- oder Taktzeiten, die eine wichtige Planungsgrundlage bilden. In

vorgelagerten Planungsbereichen können diese Zeiten nur geschätzt werden, so daß durch die automatisierte Zeitmessung eine Absicherung dieser Planungsdaten erfolgt.

Neben der Simulation paralleler Abläufe müssen Kommunikationsbeziehungen, die durch Signalaustausch verschiedener Steuerungseinheiten entstehen, abgebildet und simuliert werden. Dazu werden die Ein- und Ausgabekanäle der Steuerungen in der Datenstruktur abgebildet, um die notwendigen Verknüpfungen herstellen zu können. Auf diese Weise läßt sich die Kommunikation zwischen verschiedenen Steuerungen simulieren, wobei Synchronisation der Zellenkomponenten durch entsprechende Aufrufe in den Programmen vollzogen wird.

Auf dieselbe Weise lassen sich auch Sensorabfragen realisieren. Je nach Sensortyp erfolgt die Belegung der Eingangskanäle von einfachen binären Signalen bis hin zu Daten über die Lage und Orientierung von Objekten. Ein häufiger Anwendungsfall ist die Entnahme von Werkstücken vom Transportband durch einen Roboter. Die Ankunft eines Teiles wird durch einen Sensor dem Roboter gemeldet. Vom Signalempfang bis zum Greifvorgang verstreicht Zeit, während der sich das Teil und mit ihm das zugehörige Koordinatensystem weiterbewegt. Die Koordinatentransformation erfolgt also zeitabhängig, was bei der Simulation berücksichtigt werden muß.

Die Simulation kompletter Programme, einschließlich von Programmablaufanweisungen, Kommunikationsbeziehungen und Sensorabfragen kann erst nach der Programmierung der einzelnen Programme erfolgen. Alle Komponenten des simulierten Fertigungssystems müssen dabei mit ihren logischen, geometrischen und technologischen Daten in der Datenstruktur des Simulationssystems enthalten sein und in konsistentem Zustand gehalten werden. Die Datenstruktur kann durch Zeigerstrukturen gebildet werden, die ständig entsprechend des Simulationsablaufes aktualisiert werden müssen. Bewirken die Zustandsänderungen eine Änderung der Darstellung, so erfolgt eine Animation am graphischen Bildschirm.

Bei der Erstellung von Bewegungsanweisungen kann bereits in der Programmierphase auf Testfunktionen des Simulationssystems zurückgegriffen werden. Hierzu stehen dieselben Bildmanipulationsfunktionen zur Verfügung, wie sie bereits bei der Layoutprüfung beschrieben wurden. Beim Arbeiten mit Fenster-technik mit verschiedenen Ansichten können diese Operationen auf die jeweils aktuelle Ansicht gleichzeitig angewandt werden. So kann beim graphischen Teachen in einer Ansicht die gesamte Zelle dargestellt werden, während in einer

weiteren Ansicht durch Zoomen ein Ausschnitt in der Fügeart zur Ermittlung von Feinbewegungen gezeigt wird.

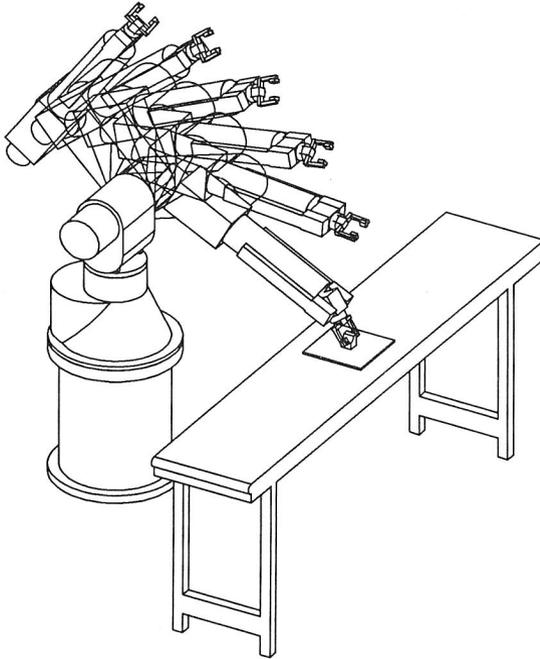


Bild 24: Graphische Simulation von Fügebewegungen mit Volumenmodellen

Bei Bahnbewegungen werden ständig die folgenden Parameter angezeigt:

- Lage und Orientierung des Endkoordinatensystems am Roboter in Raumkoordinaten
- die Stellung der Bewegungsachsen in Roboterkoordinaten
- die für eine Bewegung benötigte Zeit

Treten beim graphischen Teachen oder beim Abfahren einer Bahn Überschreitungen der maximalen Verfahrswege, Achswinkel, Geschwindigkeiten oder Beschleunigungen auf, so wird dies dem Benutzer durch eine Fehlermeldung mitgeteilt.

Zur Verfolgung komplizierter Bewegungsbahnen kann die gesamte Bahn des Endpunktes am Roboter oder Werkzeug als Linienzug graphisch dargestellt

werden. Erstellte Programmsequenzen können komplett oder schrittweise vorwärts und rückwärts simuliert werden. Die Simulation kann an jeder Stelle des Programms begonnen oder beendet werden.

Die graphische Darstellung der Bewegung am Bildschirm kann durch die Eingabe der Bewegungsintervalle und der Bildintervalle beeinflusst werden. Ebenso ist es möglich, einzelne Zellenkomponenten während der Simulation auszublenden.

Eine hohe Performance erreicht man auch durch das Verwenden von Linienmodellen anstelle von Volumenmodellen. Allerdings hat dies zum Nachteil, daß eine Kollisionsüberprüfung mit den erwähnten Bildschirmoperationen nur visuell durchführbar ist. Trotz der Unterstützungsfunktionen ist dies bei komplexen Modellen mit vielen Linien sehr schwierig. Für eine automatische Kollisionsüberprüfung sind deshalb Flächen- oder Volumenmodelle zu verwenden. Während des Bewegungsablaufs können diese Modelle zu definierten Zeitpunkten auf Überschneidungen mit anderen Objekten automatisch überprüft werden (Bild 24). Bei auftretenden Kollisionen werden Meldungen am Bildschirm ausgegeben.

3.4 Realisierung einer Verfahrenskette: CARo

CARo ist ein Werkzeug zur graphisch interaktiven Layoutplanung und Programmierung von Montagesystemen. So können auf der Basis eines CAD-Systems, einem Modul zur Zellenmodellierung und einem Modul zur Programmierung und Simulation, Roboterarbeitszellen gestaltet, programmiert und getestet werden. Schließlich ist es möglich, die offline erstellten und getesteten Programme an die Robotersteuerung zu übergeben. Die wesentlichen Eigenschaften von CARo lassen sich folgendermaßen zusammenfassen [28]:

- Geometrische und technologische Modellierung von Montagekomponenten, wie z.B. Robotern, sonstigen Montagekomponenten und Werkstücken im graphisch interaktiven Dialog.
- Abspeichern und Archivieren von Modellen in Bibliotheken.
- Zusammenstellen von Montagesystemen in beliebigen Layoutvariationen.
- Einbauuntersuchungen am Produktmodell. Durchführung von Erreichbarkeitsstudien mit dem Montagesystemmodell.
- Programmierung durch graphisches Teachin und/oder textuelle Programmeingabe sowie Validierung durch grafische Programmsimulation.

- Test und Optimierung der Roboterprogramme, beispielsweise durch Taktzeiterfassung am Graphikbildschirm.
- Übergabe der IR-Programme an die Robotersteuerung

Als Hardwarekonfiguration für die Entwicklung dienen Arbeitsplatzrechner vom Typ WS 30 der Firma Siemens. Die einzelnen Rechner sind mit hoher lokaler Rechnerleistung, sowie Haupt- und Plattenspeicher ausgerüstet. Die Kommunikation erfolgt über ein lokales Netzwerk (Token-Ring), so daß an jedem Arbeitsplatz auf alle Daten im Rechnerring zugegriffen werden kann. Jeder Arbeitsplatz verfügt über die für Arbeitsplatzrechner üblichen Standards, wie 32 bit-Architektur, Multiwindowing, Multitasking und Multiprocessing, sowie leistungsfähige Graphikwerkzeuge. Als Betriebssysteme stehen Aegis von der Firma Apollo Domain und Unix zur Verfügung. Die erstellten Planungsdaten können über ein Fabriknetz (Sinec H1) vom Rechnerring an die Steuerungen auf Fertigungsebene übertragen werden.

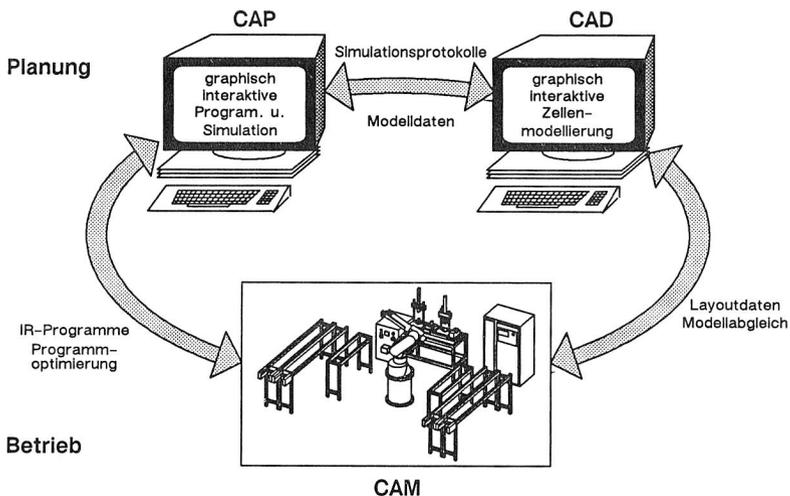


Bild 25: Systemaufbau der Verfahrenskette CARo

Die gesamte Konfiguration ist Teil einer Modellfabrik, die im Rahmen eines Kooperationsmodells (PAP-Projekt) zwischen der Universität Erlangen-Nürnberg und der Industrie entwickelt wurde [41].

Das Systemaufbau von CARo lässt sich logisch in die folgenden drei Bereiche untergliedern (Bild 25):

- CAD: Modellierung und Layoutplanung auf der Basis eines CAD-Systems
- CAP: Interaktive Offline-Programmierung und Simulation von Roboterarbeitszellen
- CAM: Programmübergabe und -test in der realen Roboterarbeitszelle

Das Zusammenwirken der Systemmodule Modellierung und Programmierung auf Planungsebene basiert auf einer einheitlichen Rechnerhardwarde. Dabei werden über definierte Schnittstellen geometrische und technologische Modelldaten für die Programmierung und Simulation übergeben, während umgekehrt Protokolle von Simulationsläufen zur Modellierung zurückfließen.

Aus dem Planungsbereich werden bemaßte Zellenlayouts, Werkstückzeichnungen, Stücklisten (für Produkt und Zellenkonfiguration) auf der einen, und getestete Roboterprogramme auf der anderen Seite zur Betriebsebene übertragen. Dabei gehen die offline erstellten IR-Programme über das Fabriknetz an die entsprechenden Zellenrechner bzw. Gerätesteuernngen.

4. Entwicklungsschritte zu automatisierten Planungsprozessen

Die beschriebenen graphisch–interaktiven Planungssysteme bieten die Möglichkeit, Bewegungsanweisungen mit Rechnerunterstützung zu generieren, und komplette Programme auf Planungsebene zu testen. Durch Zugriff auf rechnerinterne Modelldaten kann dabei von geometrischer Detailinformation wie Raumkoordinaten abstrahiert werden. Der Programmablauf wird jedoch analog zu den textuellen Verfahren entsprechend der jeweiligen Steuerung in Form einer Programmiersprache vom Planer explizit niedergeschrieben.

Die Struktur dieser Sprachen, die sich immer näher an höhere Programmiersprachen aus der Informatik annähern, erfordern zum Teil sehr umfangreiche EDV–Kenntnisse, weshalb statt Ingenieuren zunehmend Computerexperten für die Roboterprogrammierung benötigt werden. Weiterhin wird bei der expliziten Programmierung die eigentliche Aufgabe hinter einer abstrakten Beschreibung in Form langer, schwer lesbarer Bewegungsbefehle verborgen. Der Aufwand für Erstellung, Wartung und Pflege wird dadurch immer größer.

Roboterprogrammierung	NC–Programmierung von Werkzeugmaschinen	Bedeutung
explizit, bewegungsorientiert	manuell	Programmerstellung ohne Nutzung rechnerinterner Modellinformationen
implizit, aufgabenorientiert	maschinell	Rechnerunterstützung bei der Programmerstellung

Bild 26: Begriffsvielfalt in der NC–Programmierung

Die logische Konsequenz ist deshalb der Übergang zu sogenannten impliziten Programmiersystemen, bei denen aus Aufgabenbeschreibungen die Anweisungen des Roboters in Form einer Programmiersprache abgeleitet werden.

Im Gegensatz zu den expliziten bewegungsorientierten Verfahren sind implizite Verfahren aufgabenorientiert. Der Begriff "aufgabenorientiert" bedeutet dabei, daß der Fertigungsingenieur entsprechend seiner geometrisch/technologisch orientierten Denkweise mit Rechnerunterstützung ein Programm erstellen kann [42]. Aufgabenorientierte Systeme in diesem Sinne sind eine Weiterentwicklung

der graphischen Systeme in Richtung zunehmender maschineller Programmgenerierung. Die letztendliche Zielsetzung ist dabei die automatische Generierung kompletter Programme.

Interessant ist die Begriffsvielfalt, die im Zusammenhang mit der Entwicklung aufgabenorientierter Systeme entstanden ist (Bild 26). Während sich die Begriffe für die NC-Programmierung von Werkzeugmaschinen auf den Vorgang der Programmierung beziehen, werden die entsprechenden Begriffe der Roboterprogrammierung gleichzeitig für Sprachentwicklungen verwendet. Als Beispiel seien hier die Sprache Autopass als implizite aufgabenorientierte Sprache und die Sprache VAL als explizite bewegungsorientierte Sprache genannt.

In der Teilefertigung hingegen beruhen die verbreiteten Sprachkonzepte auf der expliziten Sprache APT, die als erste NC-Programmiersprache entwickelt wurde. Die Systeme zur Programmgenerierung in der jeweiligen Programmiersprache verfügen teilweise bereits über Planungsbausteine, die die automatische Erstellung von Programmteilen oder kompletten Programmen ermöglichen. Diese Technologiebausteine wurden vor allem für die gängigen Fertigungsverfahren Drehen, Bohren und Fräsen entwickelt und können die folgenden Planungsaufgaben automatisch ausführen:

- Auswahl der Werkzeuge
- Festlegung von Arbeitszyklen
- Ermittlung von Vorschüben und Drehzahlen
- Berechnung und Kollisionsprüfung von Werkzeugwegen

In den Technologiebausteinen müssen zur automatischen Planung Daten von Werkzeugen, Werkstoffen, Spannmitteln und Maschinen verwaltet und gepflegt werden.

Die Eingaben für den Benutzer reduzieren sich auf die Erfassung von Geometrie- und Technologieelementen sowie die Grobplanung des Arbeitsablaufs. Durch Aufruf vordefinierter Benutzerelemente für Geometrie und Technologie kann der Eingabeaufwand weiter reduziert werden.

In der Modellierungsphase werden Formelemente erzeugt, auf die in der anschließenden Programmierphase zugegriffen werden kann. Bei geometrischen Formelementen, die aus einer Zusammenfassung geometrischer Grundelemente bestehen, können durch wenige Eingaben die notwendigen technologischen Pa-

parameter ergänzt werden. Bei Verwendung von Technologiemakros wie beispielsweise Sacklochbohrung, Nut oder Einstich sind technologische Informationen bereits hinterlegt und können ohne weitere Eingaben von Technologiebausteinen für die automatische Programmgenerierung benutzt werden [43].

Die Entwicklung der Technologiebausteine wird sehr stark von der Standardisierung der Fertigungsabläufe und den eingesetzten Betriebsmitteln beeinflusst. Die Integration dieser Bausteine in graphisch-interaktive NC-Programmierverfahren ermöglicht bei einfachen Anwendungen die Erstellung kompletter Programme. Die Entlastung von der Eingabe der NC-Anweisungen ermöglicht eine aufgabenorientierte Arbeitsweise, wie sie in der Roboterprogrammierung noch nicht existiert.

Die Entwicklung aufgabenorientierter Systeme ist ein Schwerpunkt der Forschungsaktivitäten in der heutigen Roboterforschung. Erste Ansätze von Roboterplanungssystemen entstanden im Rahmen der Forschung über die menschliche Intelligenz.

4.1 Planungsansätze aus dem Bereich Künstliche Intelligenz

Planen ist eine der grundlegenden Techniken der Künstlichen Intelligenz, wobei die Abgrenzung zum Problemlösen unscharf ist. Planen bezeichnet die Tätigkeit, zur Lösung eines Problems Aktionen zusammenzustellen, die, wenn man sie ausführt, das Problem lösen [44]. Planungsverfahren wurden schon früh innerhalb der Forschung der künstlichen Intelligenz entwickelt und sind beispielsweise in folgenden komplexen Systemen zu finden [45]:

- Expertensysteme
- Systeme zur Analyse natürlicher Sprache
- Spiele
- Robotersteuerungen

Roboter dienen in der Künstlichen Intelligenz als Anwendungsbeispiel, um Verfahren wie Problemlösen oder Planen verständlich zu machen, und stehen nicht im Vordergrund als industrielles Werkzeug. Die entwickelten Planungssysteme, die mit den Arbeiten von Newell/Simon begannen, befassen sich deshalb auch mit der Grobplanung auszuführender Aktionen und nicht mit Detailproblemen wie die Ermittlung von Greifkonfigurationen (Bild 27).

Durch psychologische Fragestellungen veranlaßt, stand anfangs die Entwicklung allgemeiner nicht bereichsspezifischer Planungsverfahren (General Problem Solver) im Mittelpunkt. Diese Verfahren ließen sich jedoch nicht auf reale Problemstellungen anwenden, so daß in der heutigen Entwicklung von Planungssystemen das anwendungsspezifische Wissen als Kernproblem angesehen wird.

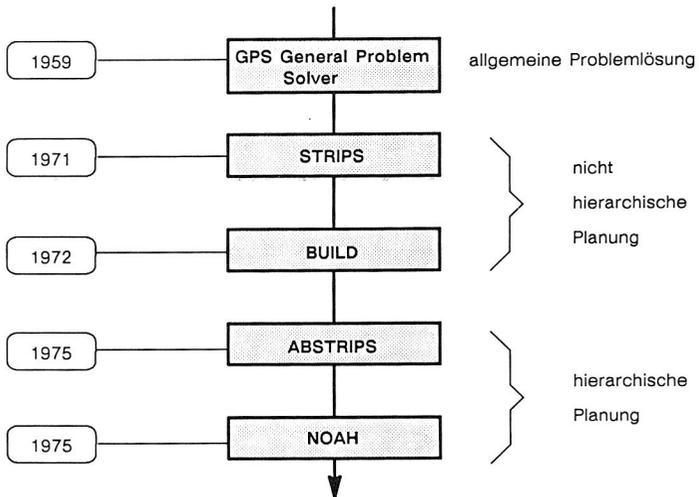


Bild 27: Grobplanungsansätze für Roboter

In den frühen Roboterplanungssystemen wird die Umwelt stark vereinfacht dargestellt, wobei als Standardbeispiel die Blockswelt verwendet wird. Die Blockswelt besteht aus einem Roboter oder Greifer, der auf einer ebenen Fläche, z.B. einem Tisch, aus einer Menge von Blöcken jeweils einen zu einem Zeitpunkt handhaben kann. Für die Planung in dieser vereinfachten Welt existieren zwei Objektklassen:

- Operatoren
- Zustände der Welt

Operatoren sind die bei der Problemlösung auszuführenden Handlungen. Zustände sind Modelle der Welt mit den planungsrelevanten Merkmalen in den verschiedenen Stadien der Planungsausführung. Planen bedeutet die Suche einer

Folge von Operatoren, die den aktuellen Weltzustand in den gewünschten Zielzustand überführen. Die Operatoren sollen von einem realen oder gedachten Roboter ausgeführt werden. Dabei gibt es Operatoren, die als atomar, unmittelbar ausführbar anzunehmen sind. Im Beispiel der Blockswelt sind es die Operatoren: Auflegen – Abnehmen – Aufnehmen – Ablegen.

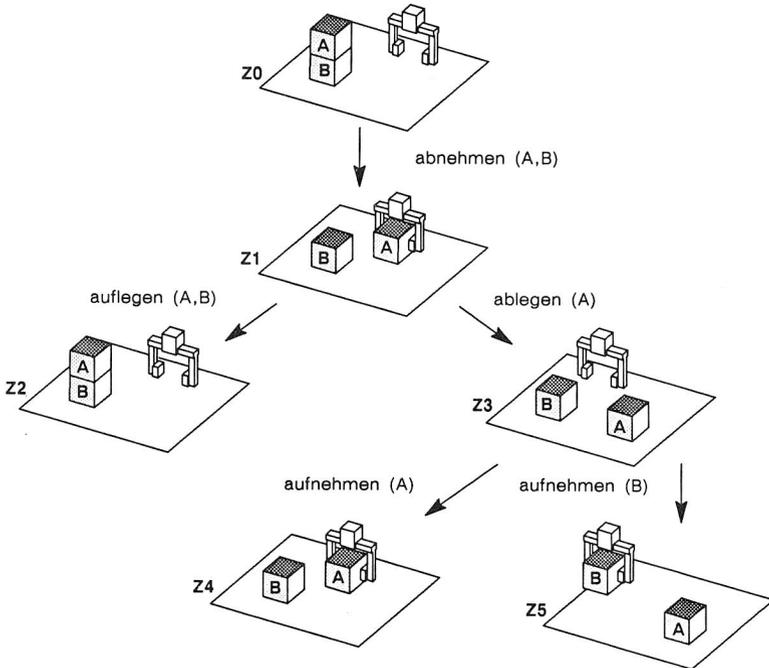


Bild 28: Zustandsraum in der 2-Block-Blockswelt

Die Auswirkung dieser Operatoren auf die Zustände der Welt sind in Bild 28 dargestellt. Bei der Lösung einer Aufgabe kann man ausgehend von diesen Operatoren eine Folge zu bilden versuchen, die das Problem löst. Diese Vorgehensweise benutzen die frühen nichthierarchischen Planungssysteme (Bild 27).

Bei komplexeren Problemen löst man die Aufgabe erst im groben und versucht die Lösung schrittweise zu verfeinern, bis man bei den Elementaroperationen angelangt ist. Dieses hierarchische Vorgehen ist der Normalfall für Planungssysteme, die nach 1975 entwickelt wurden.

4.1.1 Nichthierarchische Planungssysteme

Die Planung in nichthierarchischen Systemen ist der sukzessive Aufbau einer Folge von elementaren Operatoren zur Lösung des gegebenen Problems. Planen in dieser Sichtweise ist also gleichbedeutend mit der Suche im gegebenen Zustandsraum nach einem Weg von der Ausgangssituation zur Zielsituation. Dies bedeutet, daß die Effizienz der Planung identisch mit der Effizienz der Suche ist, da bekannte Suchstrategien unmittelbar zu verwenden sind.

Als besonders wirkungsvolle Suchstrategie hat sich dabei die Rückwärtssuche erwiesen, da die Zielsituation meist nicht vollständig beschrieben ist. Ausgehend von einer Zielsituation ist es einfacher, rückwärts zur vollständigen Startsituation zu gelangen.

Das für die Sichtweise des Planens als Suche klassische Programm ist STRIPS [46]. STRIPS wurde angewendet, um Aktionen für den mobilen Roboter SHAKEY zu planen, der sich in einer Welt bestehend aus mehreren Zimmern bewegte, die mit einfachen Objekten angefüllt waren, die er manipulieren konnte. Der Roboter konnte beispielsweise Rampen zusammenbauen, um Stufen auf dem Weg in andere Zimmer überwinden zu können. STRIPS diente als Vorbild und Ausgangspunkt für Planungsverfahren der kommenden Jahre [47], da durch die reale Planausführung durch einen Roboter theoretische und praktische Probleme des Planens erkannt und formuliert wurden.

Das Hauptproblem nichthierarchischer Planungssysteme ergibt sich durch die Zerlegung komplexer Aufgaben in Teilaufgaben, für die jeweils eine lineare Ordnung von Elementaroperationen ermittelt wird. Bei der Zusammenführung dieser Teilaufgaben zu einem Gesamtplan ergeben sich häufig unausführbare Pläne, da durch die Wechselwirkung der Teilpläne Ergebnisse einzelner Teilpläne für die Ausführung anderer Teilpläne rückgängig gemacht werden müssen. Spätere Planungssysteme versuchen deshalb, Abhängigkeiten in erzeugten Teilplänen zu erkennen und durch Umordnen der Reihenfolge aufzulösen.

Dies führte zur Entwicklung der sogenannten nichtlinearen Planungssysteme. Diese gehen von der Überlegung aus, daß es wenig sinnvoll ist, einen Plan aus linear geordneten Teilplänen zu machen und diese Ordnung aufgrund von Abhängigkeiten wieder aufzulösen. Stattdessen wird versucht, nur partiell geordnete Teilpläne zu erzeugen, deren Ordnung anschließend so erweitert wird, daß ein interaktionsfreier Gesamtplan entsteht.

Während also lineare Planungssysteme die Lösungen zunächst überbeschränken und anschließend wieder lockern, werden bei der nichtlinearen Sichtweise Lösungen zunächst unterbeschränkt und im Sinne des Gesamtplanes danach verschärft.

Die nichtlineare Planung ist heute eine Standardstrategie beim Planen und ist beispielsweise im System NOAH zu finden [48].

Nichthierarchische Planungssysteme mit ihren Erweiterungen zur Berücksichtigung von Interaktionen sind erfolgreich einsetzbar in vereinfachten Weltmodellen. Bei komplexeren Problemen ist diese Vorgehensweise durch die entstehenden Suchräume auch bei Verwendung effizienter Heuristiken nicht mehr durchführbar. Um nicht sofort sämtliche Detailprobleme in den Planungsvorgang einbeziehen zu müssen, entstanden daher hierarchische Planungssysteme.

4.1.2 Hierarchische Planungssysteme

Bei nichthierarchischen Planungssystemen versucht man durch unabhängige Planung von Teilzielen den Suchbaum aufzuteilen, um ihn effizienter handhaben zu können. In hierarchischen Planungssystemen wird der Suchbaum klein gehalten, indem Lösungen zunächst im groben entwickelt und anschließend schrittweise verfeinert werden.

Die Entwicklung hierarchischer Planungssysteme wurde entsprechend der vorhandenen Beschreibungsobjekte der Planung nach zwei Sichtweisen vollzogen:

- Zustandsabstraktion
- Operatorabstraktion

Grundgedanken der Zustandsabstraktion ist es, die Merkmale einer Repräsentation des Zustandsraumes nach Wichtigkeit zu unterteilen. Diese Merkmale sind gleichzeitig in den Anwendbarkeitsbedingungen der einzelnen Operatoren enthalten. Ein Plan entsteht sukzessive durch mehrmaliges Durchlaufen des Planungsprozesses unter Berücksichtigung von immer weniger wichtigen Merkmalen der Anwendbarkeitsbedingungen für die einzelnen Operatoren.

Das klassische Planungsprogramm der Zustandsabstraktion ist das System ABSTRIPS [49]. Das System ABSTRIPS verwendet Operatoren aus dem System STRIPS, wobei die Merkmale der Vorbedingungen der Operatoren durch Zahlen nach Wichtigkeit geordnet sind:

Operator:

Aufnehmen (x)

Wichtigkeit

Vorbedingung: auf_Tisch(x) -> 1
 oben_freie(x) -> 2
 Greifer_leer -> 1

Nachbedingung: nicht_auf_Tisch(x)
 nicht_oben_freie(x)
 nicht_Greifer_leer
 Greifer_hält(x)

Die Zahlen entsprechen den Stufen, die während des Planungsprozesses bis zur Fertigstellung eines Planes durchlaufen werden müssen.

Der alternative Ansatz ist das Planen mit abstrakten Operatoren, die nicht real ausgeführt werden können, sondern erst in eine Folge elementarer Operationen umgesetzt werden müssen.

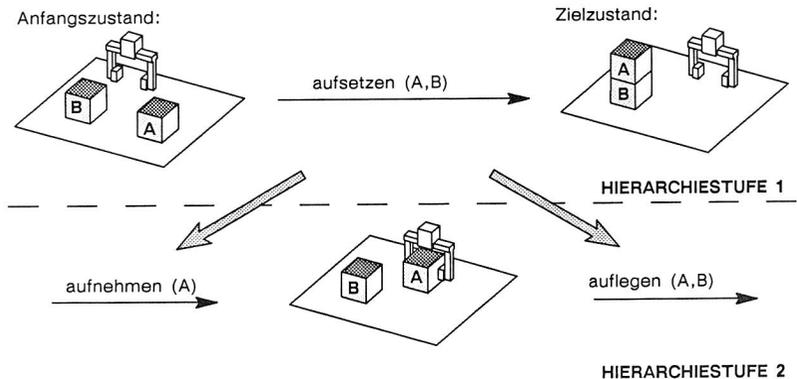


Bild 29: Hierarchische Planung durch Operatorabstraktion

Während des Planungsprozesses wird zunächst ein Plan mit den Operatoren der abstraktesten Ebene erzeugt. Schon auf dieser Ebene können Reihenfolgebeziehungen berücksichtigt werden, die sich bis auf die Ausführungsebene auswirken. Sukzessive werden die abstrakten Operatoren umgesetzt und somit konkretisiert, bis die Ebene der Elementaroperationen erreicht ist (Bild 29).

Klassiker der Operator-Abstraktion ist das System NOAH, das diese Art der hierarchischen Planung mit nichtlinearem Planen kombiniert, um Teilzielinteraktionen zwischen den Operatoren aufzulösen, die durch die Umsetzung abstrakter Operatoren im Plan entstehen können.

Sowohl die Zustands- als auch die Operatorabstraktion sind wesentliche Bestandteile für die Entwicklung von Planungssystemen in realen Umgebungen. Betrachtet man die Vorgehensweise in den Systemen ABSTRIPS und NOAH, so stellt man fest, daß in beiden Systemen eine Abstraktion auf Planungsebene aber nicht auf Modellebene stattfindet. Aus dieser Sicht sind Operatoren mit abstrakten Vorbedingungen (ABSTRIPS) und abstrakte Operatoren (NOAH) als gleichwertig zu betrachten.

Am Beispiel des abstrakten Operators "aufsetzen" aus Bild 29 erkennt man, daß auf beiden Hierarchieebenen auf diese Blöcke A und B Bezug genommen wird.

Durch die Anwendbarkeitsbedingungen der Operatoren wird Bezug auf das Weltmodell genommen. Dies bedeutet, daß die Definition des Planungswissens nicht unabhängig von der Beschreibung des Weltmodells erfolgen kann.

So wäre es nicht sinnvoll in der Blockswelt die Farben der Blöcke zu definieren, wenn es keine Operatoren gibt, die auf diese Farben Bezug nehmen. Umgekehrt wäre ein Operator zum Einsortieren von Blöcken in eine Schachtel unsinnig, wenn diese Schachtel in der Umwelt nicht modelliert wäre.

Für reale Problemstellungen ist es wichtig, neben den Abstraktionsebenen wie sie in den Systemen NOAH und ABSTRIPS auf Planungsebene eingeführt werden, auch Abstraktionen des Weltmodells einzubeziehen. Diese könnten wiederum in den Anwendbarkeitsbedingungen der Operatoren enthalten sein, um den Zusammenhang zwischen Planung und Modell herzustellen.

Ein solcher Operator könnte lauten:

Aufräumen der Blöcke in einen Behälter.

Behälter könnte dann Oberbegriff von Schachtel oder Kiste sein. Damit könnten hierarchische Planungssysteme sowohl Abstraktionen auf Planungsebene wie in NOAH oder ABSTRIPS, als auch auf Modellebene durchführen, wie sie für reale Problemstellungen benötigt werden.

4.2 Grundlagen automatisierter Planungsprozesse

Innerhalb der frühen Planungssysteme aus den Bereichen Künstliche Intelligenz wurden viele grundlegende Techniken und Probleme automatischer Problemlösung erörtert und beschrieben. Viele Arbeiten nach 1975 haben diese Ansätze aufgegriffen und in Einzelaspekten vertieft und weiterentwickelt. Gleich-

zeitig wurde der Roboter als ein für vielerlei Aufgaben einsetzbares industrielles Werkzeug für die ingenieurwissenschaftlichen Disziplinen interessant.

Aus diesen getrennten Sichtweisen heraus entstand der Forschungsbereich Robotik als Teilbereich der Künstlichen Intelligenz. Die Robotik richtet das Interesse der künstlichen Intelligenz auf reale Objekte, die sich in einer komplexen Welt befinden.

Zwischen der Robotik und dem Bereich Künstliche Intelligenz bestehen Wechselbeziehungen, da für die Entwicklung intelligenter Roboter Methoden der Wissensdarstellung und -manipulation benötigt werden. Die Anwendung dieser Methoden in realen Umgebungen ergeben wiederum Anforderungen von der Robotik an die Künstliche Intelligenz. Während sich frühere Planungssysteme mit der Globalplanung von Aktionen auf hohem Abstraktionsniveau befassen, steht in der Robotik die Feinplanung als Detaillierung dieser Aktionen im Vordergrund. Die Ergebnisse der Feinplanung müssen in Form expliziter Bewegungsanweisungen vorliegen, die ein realer Roboter in einer komplexen Umwelt ausführen kann. Als wesentliche Teilaspekte des Planungsvorganges zur Erzeugung dieser Bewegungsanweisungen lassen sich folgende nennen [50]:

- Planung kollisionsfreier Bewegungsbahnen
- Planung des Greifvorganges
- Planung von Sensoroperationen
- Planung der Fein- oder Fügebewegungen

Diese zu lösenden Planungsaufgaben sind jedoch nicht voneinander unabhängig, so daß sich die Problemlösung darauf beschränken könnte, eine passende Reihenfolge dieser Aktionen zur Zielerreichung zu finden. So kann beispielsweise nicht jede ausgewählte Greifkonfiguration auf einer kollisionsfreien Bahn erreicht werden.

Innerhalb der Grobbewegungsplanung müssen Bahnen ermittelt werden, auf denen der Roboter mit seiner Last kollisionsfrei verfahren kann. Bei der Greifplanung sind geeignete Greifkonfigurationen sowie die zugehörigen kollisionsfreien Annäherungspfade auszuwählen. Feinbewegungen sind gekennzeichnet durch hohe Genauigkeitsanforderungen, die meist nur bei geringer Bewegungsgeschwindigkeit zu erfüllen sind. Feinbewegungen sind aufgrund geometrischer Unsicherheiten die kritischen Phasen bei der Ausführung von Roboterbewegungen. Diese Unsicherheiten sind ebenfalls bei der Planung zu berücksichtigen.

So treten in einer Fertigungszelle Ungenauigkeiten durch den Roboter (Position, Wiederholgenauigkeit), Werkstücktoleranzen oder Lage- und Orientierungsabweichungen auf, die durch die Planung von Sensoroperationen aufzufangen sind. Für die beschriebenen Teilprobleme existieren eine Reihe von Lösungsansätzen [51]. Ein Planungssystem, in dem mehrere solche Ansätze zu einem einsetzbaren Werkzeug integriert sind, existiert bisher nicht, da reale Problemstellungen sich bisher als zu komplex erwiesen haben.

Grundsätzlich sind für die Entwicklung eines aufgabenorientierten Planungssystems die folgenden Teilmodelle erforderlich:

- Aufgabenmodell
- Umweltmodell
- Planungsmodell

Das Aufgabenmodell dient zur Beschreibung der Aufgabe, die entweder durch eine Vorgabe des gewünschten Zielzustandes oder durch eine Folge von Aktionen definiert werden kann.

Diese Informationen für das Aufgabenmodell können zum einen aus bereits vorhandenen Fertigungsunterlagen in rechnerinterner Form oder interaktiv durch den Benutzer erzeugt werden.

Als Fertigungsunterlagen kommen vor allem Arbeitspläne und -unterweisungen in Betracht, die in manuellen Fertigungssystemen für die Aufgabenbeschreibung verwendet werden. Die interaktiven Eingaben durch den Benutzer können entweder textuell mittels einer aufgabenorientierten Sprache oder graphisch mit Hilfe der Maus, Lichtgriffel oder symbolisch über Funktionstasten erzeugt werden. Die innerhalb des Aufgabenmodells vorliegenden Informationen beziehen sich auf die Daten des vorliegenden Umweltmodells.

Das Umweltmodell enthält Daten über Produkte, Fertigungsmittel und Fertigungsprozesse, wobei die folgenden wesentlichen Informationen benötigt werden [52]:

- Geometrie und technologische Eigenschaften von Objekten, wie z.B. Gewicht, Oberflächenbeschaffenheit
- Lage und Orientierung von Objekten innerhalb der Umwelt relativ zu einem Weltkoordinatensystem
- Unsicherheiten, mit denen Objekte behaftet sind, wie z.B. Fertigungstoleranzen, Lageabweichungen

- kinematische und dynamische Eigenschaften von beweglichen Objekten der Umwelt.
- Charakteristiken der Objekte in der Umwelt, wie z.B. Arbeitsraum, Traglast, Meßbereich
- Verbindungen zwischen Objekten und ihre Beschaffenheit.

Das Planungsmodell hat die Aufgabe, ausgehend von der Aufgabenbeschreibung durch Zugriff auf Informationen im Umweltmodell, ausführbare Bewegungsanweisungen für die Roboter und sonstigen Bewegungssysteme zu erzeugen. Die drei wesentlichen Bestandteile eines aufgabenorientierten Planungssystems – Aufgabenmodell, Umweltmodell und Planungsmodell – stehen somit in ständiger Wechselbeziehung. Die Aufgabenbeschreibung ist dabei Auslöser für den Planungsmodul, der ausgehend vom aktuellen Zustand des Umweltmodells versucht, den gewünschten Zielzustand herzustellen.

Die Aufgaben des Planungsmoduls können somit wie folgt zusammengefaßt werden:

- Interpretation der Aufgabenbeschreibung
- Schlußfolgerungsprozeß auf Basis der Informationen des Umweltmodells
- Transformation der Planungsergebnisse in explizite Bewegungsanweisungen für die Gerätesteuerungen

Die Komplexität dieser Teilaufgaben des Planungsmoduls hängt von der Mächtigkeit der beiden Komponenten Aufgabenmodell und Umweltmodell ab.

Das Zusammenwirken der Teilmodelle soll an einem Beispiel verdeutlicht werden. Hierzu dient die in Bild 30 dargestellte Fertigungszelle, bestehend aus einem Montageroboter, einer Ablage, einer Box, sowie fünf Blöcken. Das Planungssystem hat die Aufgabe, aus aufgabenorientierten Zielvorgaben einen Ablaufplan für das Handhaben der beteiligten Objekte durch den Montageroboter zu entwickeln.

Die Aufgabenbeschreibung besteht aus den beiden abstrakten Anweisungen Fügen und Handhaben, wobei berücksichtigt werden muß, daß zwischen den beteiligten Blöcken topologische Beziehungen bestehen. Ein Block kann auf einem anderen Block stehen oder als Unterlage für einen anderen Block dienen.

Die beiden Anweisungen sind dann wie folgt definiert:

- Fügen (Objekt1 Objekt2) bedeutet, daß Objekt1 (Block) auf oder in Objekt2 (Block oder Box) gelegt wird, wobei auf Objekt1 oder Objekt2 liegende Objekte auf die Ablage gelegt werden.
- Handhaben (Objekt1 Objekt2) entspricht mehrmaligem Fügen, wobei die auf Objekt1 liegenden Objekte nach dem Fügen von Objekt1 von der Ablage wieder auf Objekt1 gelegt werden.

Das Umweltmodell umfaßt Daten über Geometrie (Größe, Position und Orientierung) und Topologie (liegt_direkt_unter, liegt_auf) (Bild 30).

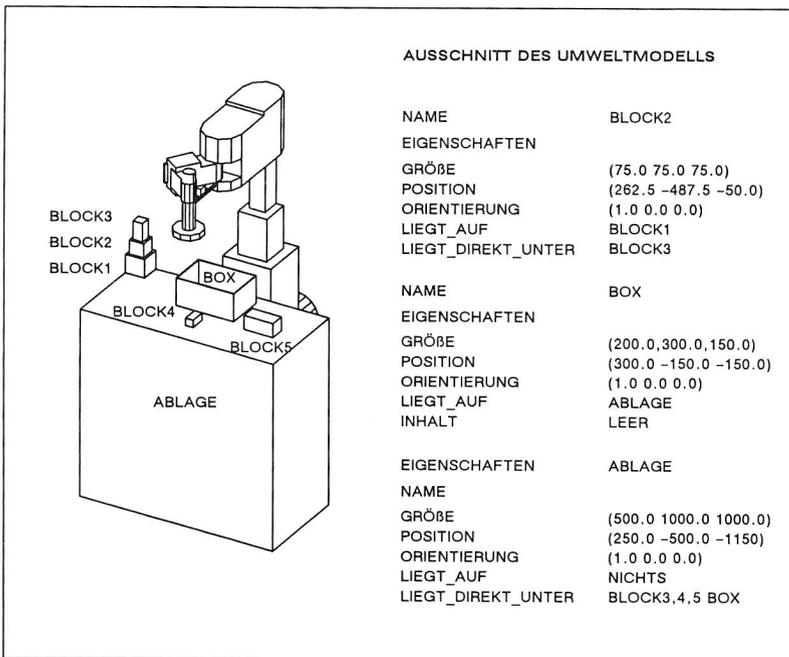


Bild 30: Modell einer einfachen Montagezelle

Diese Daten werden von einer Planungskomponente benutzt, um einen logischen Programmablauf zu erzeugen. Während des Planungsvorganges sind die folgenden Bedingungen zu beachten:

- Größere Objekte können nicht auf kleinere Objekte gelegt werden

- Ein kleineres Objekt, das sich auf einem größeren Objekt befindet, hat seinen Platz immer innerhalb der Auflagefläche

Die einzelnen Planungsschritte, die während des Planungsprozesses durchlaufen werden, lassen sich anhand einer konkreten Aufgabenstellung erkennen, wobei auf den in Bild 30 dargestellten Ausschnitt des Umweltmodells Bezug genommen wird.

Der Befehl, der zum Einlegen von BLOCK 2 und BLOCK 3 unter Beibehaltung der topologischen Beziehungen in die Box führt, lautet wie folgt:

” Handhaben BLOCK2 BOX ”

Dieser Befehl führt zur Durchführung nachfolgender Planungsstufen:

- Feststellen, daß BLOCK3 auf BLOCK2 liegt
- Ermitteln der Ausweichposition für BLOCK3 auf ABLAGE
- Fügen von BLOCK3 auf ABLAGE
Aktualisieren des Umweltmodells
- Ermitteln der Position für BLOCK2 in BOX
- Fügen von BLOCK2 in BOX
Aktualisieren des Umweltmodells
- Wiederherstellen der topologischen Beziehung
- Ermitteln der Position für BLOCK3 auf BLOCK2
- Fügen von BLOCK3 auf BLOCK2
Aktualisieren des Umweltmodells

Das Ermitteln der Position geschieht durch einen heuristischen Algorithmus über die geometrischen Positions- und Größenangaben der Objekte. Die topologischen Daten werden vom Planungsmodell benötigt, um aus dem abstrakten Befehl ”Handhaben” mehrere Fügevorgänge ableiten zu können.

Die Fügevorgänge müssen danach auf Steuerungsvorgänge transformiert werden. Die Greif- und Feinplanung sind vereinfacht, da jeder Block von oben mit Hilfe eines Sauggreifers angefahren wird. Greifkonfiguration und Anfahrbewegungen können somit aus den geometrischen Daten abgeleitet werden. Durch die kinematische Struktur des Montageroboters sind kollisionsfreie Bewegungen im

Arbeitsraum einfach durchzuführen. Die Bewegungsbahnen setzen sich aus vertikalen und horizontalen Bewegungen zusammen.

Das Anfahren der Blöcke wird durch Linearbewegungen ausgeführt, während Raumbewegungen mit Punkt-zu-Punkt-Bewegungen durchgeführt werden.

Das Beispiel macht die Wechselwirkung zwischen Aufgaben-, Umwelt- und Planungsmodell deutlich. Topologische Umweltinformationen werden auf abstrakter Ebene für die Aufgabenzerlegung benötigt, während geometrische Daten erst bei der Umsetzung in Bewegungsanweisungen erforderlich sind. Je höher die Abstraktionsebene des Aufgabenmodells ist, desto mehr Informationen müssen für die Aufgabenlösung im Planungs- und Umweltmodell enthalten sein.

4.3 Abstraktionsstufen in der Planung

Eine wichtige Erkenntnis der frühen Planungssysteme bestand in der Einführung von Abstraktionsebenen [53]. Innerhalb von Roboterplanungsstufen sind eine Reihe solcher Abstraktionsstufen definierbar, die sowohl die Planungs- als auch die Modellebene betreffen.

Bereits in der konventionellen Auftragsabwicklung sind diese Abstraktionsebenen zu finden. Dies beginnt auf oberster Ebene in der Produktplanung mit der abstrakten Aufgabenstellung, ein Produkt herzustellen. Während des Konstruktionsprozesses erfolgt eine Aufteilung in Teilefertigung von Einzelteilen und Montage von Baugruppen. Im Rahmen der Arbeitsplanung erfolgt schließlich eine weitere Aufteilung in einzelne Arbeitsgänge, die entweder vom Menschen direkt ausgeführt werden können oder im Falle automatisierter Fertigungseinheiten in explizite Bewegungsanweisungen zu transformieren sind.

Die Entwicklung automatisierter Planungssysteme dagegen beginnt auf unterster Abstraktionsebene mit Systemen für die explizite Roboterprogrammierung. Die unterste Abstraktionsebene entspricht damit der Gerätesteuerung, innerhalb derer die Bewegungsanweisungen in Befehle für Stellglieder und Antriebsmotoren umgesetzt werden.

4.3.1 Programmierung auf Objektebene

Die Objektebene stellt die nächste Stufe bei der Entwicklung aufgabenorientierter Systeme zur Programmierung von Industrierobotern dar. Die Zielsetzung besteht

darin, geometrische und technologische Detailinformationen automatisch abzuleiten.

Die Programmanweisungen beziehen sich auf Objekte, die Komponenten des Fertigungssystems oder Raumpunkte darstellen können und per Name ansprechbar sind (Bild 31). Die Programmierung auf dieser Ebene bedeutet eine große Erleichterung für den Benutzer. Hinter den einzelnen Befehlen verbergen sich jedoch die gesamten Probleme der Greif- und Bewegungsplanung. So müssen beim Anfahren eines Teils Annäherungspunkte ermittelt werden, geeignete Greifkonfigurationen bestimmt sowie auftretende Kräfte und Ungenauigkeiten berücksichtigt werden. Der Befehl "Anfahren der Drehmaschine" bewirkt, daß ein Pfad von Zwischenpunkten abgeleitet werden muß, um kollisionsfrei in die Drehmaschine fahren zu können. Dieser Pfad ergibt sich aus den geometrischen Abmessungen der Drehmaschine.

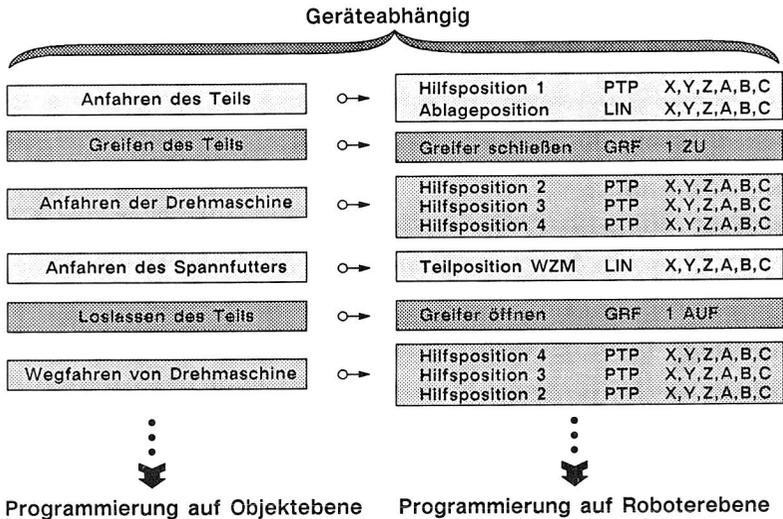


Bild 31: Objektbezogenes Programmieren

Sowohl die aufgabenorientierten Sprachansätze, als auch die graphischen Planungssysteme (vgl. Kapitel 3) sind in ihrem Befehlsumfang der Programmierung auf Objektebene zuzuordnen.

Ansätze für aufgabenorientierte Sprachen entstanden meist als Weiterentwicklung für bereits vorhandene explizite Programmiersprachen. Zu nennen sind hierbei [51] [52]:

- RAPT für die Sprache VAL
- LM-GEO für die Sprache LM
- Erweiterung von AL

Als erste Sprachansätze entstanden die beiden Systeme AUTOPASS [54] und LAMA [55].

AUTOPASS wurde von IBM entwickelt und ist in eine Teilmenge der Programmiersprache PL/1 eingebettet. Die Anweisungen können Objekte enthalten und entsprechen den Arbeitsgängen aus Montageplänen. Die Befehle sind in drei Gruppen eingeteilt:

- Plazieren
- Operieren
- Befestigen

Der Forschungsschwerpunkt war die Entwicklung eines Verfahrens zur Planung kollisionsfreier Bahnen für einen kartesischen Roboter.

LAMA wurde am MIT entwickelt und enthält ein Weltmodell, das aus polyedrischen Modellen der Objekte besteht. Die Programmierung erfolgt durch Befehle wie "Greife" oder "Plaziere" mit nachfolgender Objektbezeichnung.

AL wurde an der Universität Stanford entwickelt und ermöglicht es, Koordinatensysteme objektgebunden zu programmieren. Die Befehle haben etwa folgende Gestalt:

- CLOSE hand
- MOVE frame1 TO frame2 VIA frame3 WITH speed
- OPEN hand

Frame x wird als zum Objekt gehörig und das Objekt beschreibend betrachtet.

RAPT wurde an der Universität Edinburgh entwickelt und benutzt die NC-Sprache APT, damit Anwender aus dem NC-Bereich diese leicht erlernen können. Die Programmierung von RAPT kann wie in AUTOPASS oder über die Angabe von Objektbeziehungen erfolgen [52]:

- Bewege Stift senkrecht über Bohrung

Hierzu müssen im System die räumlichen Beziehungen der Objekte zueinander vorhanden sein.

Ähnlich wie RAPT operiert auch das LM-GEO System, das als Resultat LM-Code generiert. Viele Sprachansätze wurden nur theoretisch entworfen und aufgrund zahlreicher Probleme nicht implementiert. Dabei wurden meist nur geometrische Beziehungen zwischen Objekten ausgewertet, während technologische Daten oder Unsicherheiten bei der Planung unberücksichtigt blieben. Aus dieser Sicht entsprechen die aufgabenorientierten Sprachansätze dem Umfang graphischer Planungssysteme.

Graphische Planungssysteme werden mit der Zielsetzung entwickelt, explizite Roboterprogramme zu simulieren und damit zu testen und zu optimieren. Aufgrund ihrer Architektur beinhalten sie jedoch Informationen, die sich im Hinblick auf aufgabenorientierte Programmierung nutzen lassen [56].

Eine Programmierung auf Objektebene ist durch die Möglichkeiten der graphischen Programmierung gegeben:

- Objektorientierte Bewegungs- und Greifbefehle über vordefinierte Bezugskordinatensysteme
- graphisches Teachen
- graphische Manipulationsfunktionen wie "Anpicken mit der Maus" oder Visualisierung von Anweisungen

Diese Anweisungen auf Objektebene können aufgrund der vorhandenen Modellinformationen graphischer Systeme in explizite Programme übersetzt werden. Das Umweltmodell enthält die für die Bewegungssimulation benötigten Daten:

- | | |
|-------------------------|---|
| - Produkte | (Namen, Greifpunkte, Geometrie, Gewicht, Lage, Orientierung) |
| - Werkzeuge, Greifer | (Namen, Lage, Funktion, Bearbeitungspunkte) |
| - Statische Komponenten | (Namen, Orientierung, Lage) |
| - Roboter | (Namen, Geometrie, Kinematik, Lage, Orientierung, Steuerung, Werkzeuge) |

Graphische Systeme besitzen bereits einfache Möglichkeiten eines Planungsmodells:

- Greifbefehle werden nur ausgeführt, wenn Teile im Greifbereich vorhanden sind
- Bei Anfahrbefehlen werden die Verfahrensgrenzen der Bewegungsachsen überprüft
- Bei Flächen- und Volumenmodellen können Kollisionen erkannt und angezeigt werden

Die Anweisungen bei der Programmierung auf Objektebene lassen sich in verschiedene explizite Zielsprachen übersetzen. Damit entspricht diese Ebene der Programmierung bereits einer steuerungsneutralen Ebene. Häufig besitzen deshalb graphische Systeme eigene Sprachen, die erst nach der Simulation in Steuerungscode übersetzt werden.

Eine steuerungsneutrale Sprache genügt jedoch nicht, um eine höhere Fertigungsflexibilität zu erreichen. Hierzu müssen auch die mechanischen Bewegungssysteme der verschiedenen Steuerungen in der Lage sein, die vorgegebenen Anweisungen auszuführen. Die Anweisungen auf Objektebene sind jedoch nicht geräteunabhängig, so daß nur bei ähnlich aufgebauten Fertigungssystemen ein Programm auf Objektebene auch zum selben Ergebnis führen würde.

Erst die Einführung höherer Abstraktionsebenen, die problembezogen und geräteunabhängig sind, gewährleistet die Ausführung einer Aufgabe in verschiedenen Fertigungssystemen. Diese Ebenen entsprechen einer Programmierung auf Aufgabenebene und führen letztendlich bis zu den höchsten Planungsebenen.

4.3.2 Programmierung auf Aufgabenebene

Bereits bei der Programmierung auf Objektebene ist zu erkennen, daß nicht jeder Befehl genau einer Anweisung im Steuerungscode entspricht (vgl. Bild 31). So enthält der Befehl "Anfahren der Drehmaschine" mehrere Hilfspositionen, die den Pfad in die Drehmaschine beschreiben.

Dieser Pfad entspricht bereits einem primitiven Programmgerüst, das bei der Umsetzung des Befehls in Steuerungscode je nach Maschine mit der entsprechenden Detailinformation angefüllt wird.

Das Bilden derartiger Programmgerüste für standardisierte Abläufe stellt eine wesentliche Grundlage für die Entwicklung aufgabenorientierter Planungssysteme dar. Auch innerhalb des Systemes ATLAS, das als eines der fortgeschrittensten

Ansätze im Bereich aufgabenorientierter Programmierung gilt [51], wird die Aufgabenstellung über eine Folge von Befehlen in Form von "skeleton programs" definiert. Ein Programmgerüst für einen einfachen Vorgang, bei dem ein Teil A geholt und auf einen Tisch gelegt wird, sieht dabei wie folgt aus:

- 1) Öffne Greifer um <Greifweite>
- 2) Bewege zu <A> über <Pfad>
- 3) Greife <A>
- 4) Bewege zu <Tisch> über <Pfad>
- 5) Lasse los <A>
- 6) Bewege zu <Referenzposition>

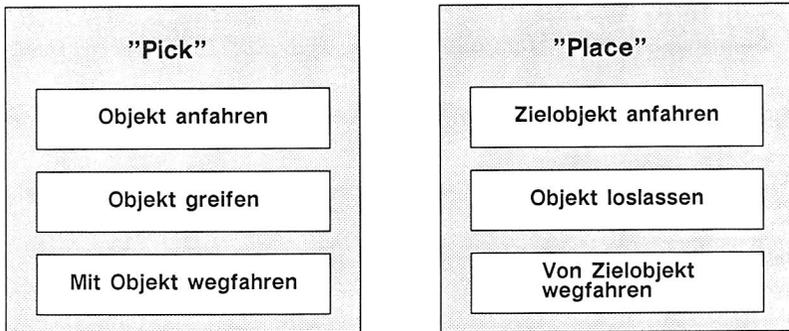


Bild 32: "Pick and Place"-Operationen

Die in Klammern stehenden Begriffe sind Parameter, die während des Planungsprozesses mit aktuellen Werten besetzt werden müssen. Dies geschieht im System ATLAS über die Ausbreitung von Anwendbarkeitsbedingungen, die in Form von Ungleichungen definiert werden. Für das Fügen eines Bolzens in ein Loch ist eine solche Anwendbarkeitsbedingung

$$\text{Radius von Bolzen} < \text{Radius von Loch.}$$

Das Programmgerüst für das Handhaben von Teil A entspricht einem typischen Vorgang für Industrieroboteranwendungen. Diese standardisierten Abläufe für das Holen und Bringen eines Objektes werden als sogenannte "Pick and Place"-Operationen bezeichnet. Diese "Pick and Place"-Operationen stellen eine Abstraktionsstufe über den Befehlen auf Objektebene dar. Die Zuordnung der Befehle ist in Bild 32 dargestellt.

Um einen "Pick and Place"-Vorgang durchführen zu können, benötigt man topologische Informationen, die festlegen, an welche Objekte die zu transportierenden Objekte gebunden sind.

Beim Holen eines Teils kann dadurch ermittelt werden, daß sich dieses in einer Palette befindet und somit erst die Informationen zum Anfahren der Palette verarbeitet werden. Die Operationen "Greifen" und "Loslassen" ändern solche Strukturbeziehungen. Diese Operationen können deshalb Nebeneffekte wie Maßnahmen zur Synchronisation bei der Übernahme eines Teils bewirken.

Durch das Bilden geeigneter "Pick and Place"-Aufgaben können auf diese Weise aufgabenorientierte Befehle realisiert werden. Bei der Werkstückhandhabung lassen sich die "Pick"-Operationen

- Fertigteil entnehmen
- Rohteil holen

und die "Place"-Operationen

- Fertigteil ablegen
- Rohteil einlegen

definieren. Diese können dann paarweise auf einer weiteren Abstraktionsstufe zu Transportanweisungen zusammengefaßt werden.

Somit entsteht eine Hierarchie von Abstraktionsstufen, die von der Steuerungsebene über die Programmierung auf Objektebene bis zu mächtigen aufgabenorientierten Befehlen wie "Transportiere Teil zur Drehmaschine" reicht (Bild 33) [53].

Dies ist jedoch nur möglich, wenn standardisierte Abläufe definierbar sind, die als Befehlsgerüst zur Bildung einer Abstraktionsebene zusammengefaßt werden können.

In Kapitel 4.2 wurde erläutert, wie die Module Aufgabenbeschreibung, Umweltmodell und Planungsmodell während des Planungsprozesses ineinandergreifen. Diese Wechselwirkung spielt bei der Bildung von Abstraktionsstufen über Standardabläufe eine entscheidende Rolle.

Die Programmierung auf Objektebene bereitet hierbei noch wenig Probleme, da die Anweisungen in Steuerungscode direkt über die Information der beteiligten Objekte aus dem Umweltmodell abgeleitet werden können.

Bei der nächsthöheren Abstraktionsebene, der Zusammenfassung objektorientierter Befehle zu "Pick"- oder "Place"-Operationen ergeben sich jedoch bereits Wechselwirkungen aus den Eigenschaften der beteiligten Objekte.

Die Ableitung der "Pick and Place"-Operationen aus Bild 33 erfolgte unter der Annahme der Verwendung eines Einfachgreifers. Wird anstelle eines Einfachgreifers nun ein Wechselgreifer eingesetzt, so hat dies Konsequenzen für den definierten Standardablauf.

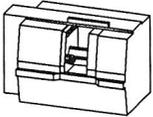
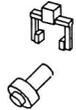
Objektebene	"Pick-and-Place"-Operationen	Aufgabenebene
Anfahren der Ablage Anfahren des Teils Greifen des Teils Wegfahren von der Ablage	Rohteil holen	
Anfahren der Drehmaschine Anfahren der Zielposition Signal "Spannfutter schließen" Antwortsignal abwarten Loslassen des Teils Wegfahren vom Teil Wegfahren von Drehmaschine	Rohteil einlegen	Transportiere Teil zur Drehmaschine 
Anfahren der Drehmaschine Anfahren des Teils Greifen des Teils Signal "Spannfutter öffnen" Antwortsignal abwarten Wegfahren von Drehmaschine	Fertigteil entnehmen	
Anfahren der Ablage Anfahren der Zielposition Loslassen des Teils Wegfahren vom Teil Wegfahren von der Ablage	Fertigteil ablegen	Transportiere Teil zur Ablage 

Bild 33: Aufgabenbezogenes Programmieren

Das Einlegen eines Rohteils und das Entnehmen eines Fertigteils erfolgen innerhalb der Drehmaschine, ohne daß der Roboter aus dieser herausfährt. Dadurch muß der Befehl "Greifer drehen", der sich direkt aus den Eigenschaften eines Wechselgreifers ergibt, innerhalb der "Pick and Place"-Operationen abgeleitet werden.

Die Eigenschaften des Wechselgreifers wirken sich jedoch auch in der nächsthöheren Ebene aus. Das Abfahren der Bahn erfolgt zwar über dieselben Positionen, aber in einem veränderten Zyklus. Ebenso entstehen aktionsspezifische Nebenwirkungen (Synchronisation bei Aktionen des Greifers) und Nebenwirkungen, die an bestimmte Positionen gebunden sind (Drehen des Greifers).

Die Wirkungen, die sich durch den Einsatz eines Wechselgreifers auf die einzelnen Abstraktionsstufen ergeben, sind zusammenfassend in Bild 34 dargestellt.

Wesentlich ist die Wechselwirkung zwischen Objekteigenschaften und Aufgabenzerlegung. Ohne Berücksichtigung dieser Wechselwirkung könnte ein korrekter Programmablauf für den Wechselgreifereinsatz nur auf Objektebene ermittelt werden. Die Definition von Standardabläufen sowie deren Variation durch Objekteigenschaften ist somit eine wesentliche Aufgabe bei der Entwicklung von aufgabenorientierten Planungssystemen.

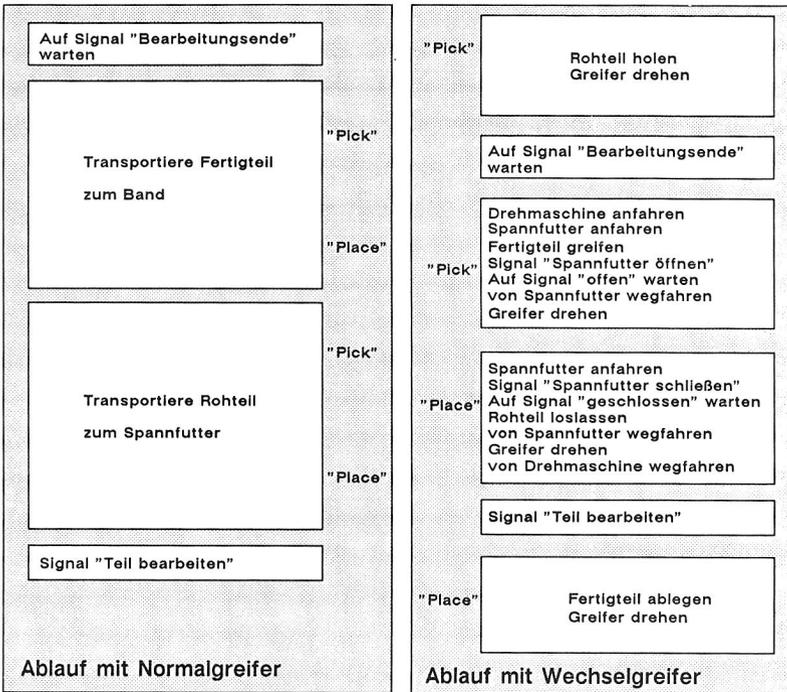


Bild 34: Auswirkung spezieller Objekteigenschaften (Wechselgreifer)

Aufgabenorientierte Abstraktionsebenen sind im Gegensatz zu den vorher beschriebenen Ebenen produktorientiert und somit geräteneutral. Aufgabenorientierte Befehle wie "Hole Rohteil" oder "Transportiere Fertigteil zur Ablage" können unabhängig von der Gerätekonfiguration ausgeführt werden.

Aufgabenorientierte Planungssysteme sind somit nicht nur geeignet, sondern auch notwendig für die Realisierung flexibler Fertigungssysteme, bei denen eine Zuteilung der Aufgabe erst zum spätestmöglichen Zeitpunkt vorgenommen wird.

4.4 Ein objektorientierter Realisierungsansatz

4.4.1 Objektorientiertes Programmieren

Objektorientierte Programmierung stellt – im Gegensatz zur prozeduralen Art der Programmierung in Programmieranweisungen und Prozeduren – den Begriff des Objektes in den Vordergrund. Objektorientierte Programmierung ist ebenso wie funktionale, logische oder regelorientierte Programmierung ein Programmierstil aus dem Bereich Künstliche Intelligenz. Dabei stehen im Mittelpunkt der Betrachtung Datenobjekte, die durch Objektklassen, Methoden, Slots und Instanzen beschrieben werden können.

Funktionale Teile (Methoden) und Datenfelder (Slots), auf denen sie operieren, werden zu einer Einheit (abstrakter Datentyp) verschmolzen. So sind Daten und Algorithmus lokal eng gekoppelt. Infolge dieses Lokalitätsprinzips bleiben die Algorithmen klein und übersichtlich. Dadurch wird eine der strukturierten Programmierung entsprechende schrittweise Verfeinerung bis zu überschaubaren atomaren Einheiten erreicht.

Der Aufbau eines objektorientierten Systems läßt sich anhand der Darstellung in Bild 35 beschreiben [57].

Im Mittelpunkt stehen dabei Objekte, die entweder eine Klasse oder eine Instanz darstellen. Klassen definieren diejenigen Eigenschaften, die ihre sämtlichen Instanzen gemeinsam haben. Instanzen sind lauffähige Objekte, die einer bestimmten Klasse zugeordnet werden. Beim Instantiierungsprozeß wird aus den Klassen ermittelt, welche Slots, Slotwerte und Methoden eine Instanz erhält.

Slots sind lokale Zustandsvariablen, die nach außen hin verborgen sind. Sie beschreiben die Eigenschaften eines Objektes. Fremde Objekte können Slotwerte nur durch Senden einer entsprechenden Nachricht an das Objekt lesen und verändern.

Die Reaktion eines Objekts auf ankommende Nachrichten wird durch Methoden definiert. Methoden bestehen aus einem Protokoll, welches die Nachrichten beschreibt, die mit der Methode bearbeitet werden können, und dem Code, der ausgeführt wird, wenn eine entsprechende Nachricht bei dem Objekt eintrifft. Die Reaktion auf eine ankommende Nachricht kann die Veränderung des Werts einer Zustandsvariablen, das Versenden von Nachrichten an andere Objekte oder die Rückgabe eines Wertes sein. Die Reaktion auf eine Nachricht ist nur inner-

halb eines Objektes bekannt, außerhalb ist nur bekannt, welche Nachrichten von diesem Objekt verstanden werden.

Eine Klasse kann auf andere Klassen Bezug nehmen und von diesen sogenannten Superklassen Eigenschaften erben. Auf diese Weise entsteht ein Vererbungsnetz, das als zyklenfreier Graph dargestellt werden kann. Wird von einer Klasse eine Instanz gebildet, so erhält diese sämtliche Slots und Methoden aus der Klasse und deren übergeordneten Superklassen. Die Reihenfolge der Vererbung wird durch den Aufbau der Vererbungshierarchie festgelegt.

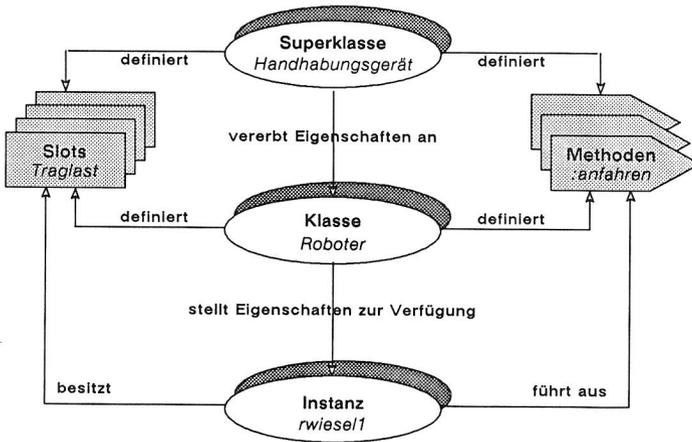


Bild 35: Beispiel für die Anwendung objektorientierter Konzepte

Durch die Bildung von Klassen und deren Anordnung in einer Vererbungshierarchie ist es möglich, verschiedene Abstraktionsebenen von Umweltmodellen einzuführen. Dies ist für die Abbildung der Abstraktionsstufen aufgabenorientierter Planungssysteme von großer Bedeutung.

Die Ablaufsteuerung erfolgt in objektorientierten Systemen über den Austausch von Nachrichten zwischen den Objekten. Alle Zustandsänderungen eines Objekts, die von anderen Objekten veranlaßt werden, geschehen über diesen Nachrichtenmechanismus. Eine spezielle Nachricht kann für die Abfrage der Nachrichten, die ein Objekt interpretieren kann, benutzt werden.

4.4.2 Anwendungsbeispiel Werkstückhandhabung

Anhand eines konkreten Anwendungsfalles soll nun die aufgabenorientierte Planung mit Hilfe des objektorientierten Modells aufgezeigt werden.

Hierzu muß zunächst die reale Welt im Modell abgebildet werden. Als Anwendungsfall wird die Werkstückhandhabung durch einen Industrieroboter verwendet.

Ein Portalroboter mit 3 Linearachsen hat die Aufgabe, eine Drehmaschine mit Rohteilen zu versorgen und die Fertigteile zu entnehmen und abzulegen (Bild 36). Wichtigster Schritt bei der objektorientierten Modellabbildung ist dabei die Datenabstraktion.

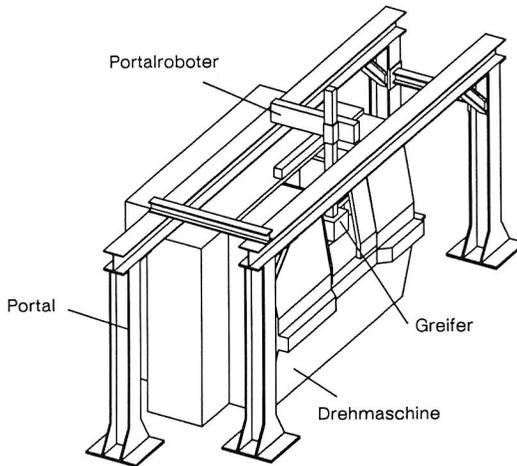


Bild 36: CAD - Modell der betrachteten Drehzelle

Jedes Objekt in der Zelle benötigt in der Wissensbasis einen zugeordneten abstrakten Datentyp. Aufgrund des Vererbungsmechanismus können allgemeine Eigenschaften von Objekten in einem Datentyp zentral abgelegt werden.

Position, Orientierung und Größe eines Objekts sind solche allgemeinen Eigenschaften, die man in einer Superklasse "Geometrie" zusammenfassen kann. Diese geometrischen Definitionen werden bei der Instantiierung den einzelnen Datenobjekten vererbt.

Auf diese Weise entsteht ein Netz von Typbeschreibungen (Bild 37). Jede Typbeschreibung enthält eine Anzahl von Slotdefinitionen, die zur Aufnahme von Objektdaten dienen.

Den Klassen "Statik_Element" und "Werkstück" wird eine Superklasse "Handhabungspfad" zugeordnet, in der die Annäherungsbahnen definiert sind.

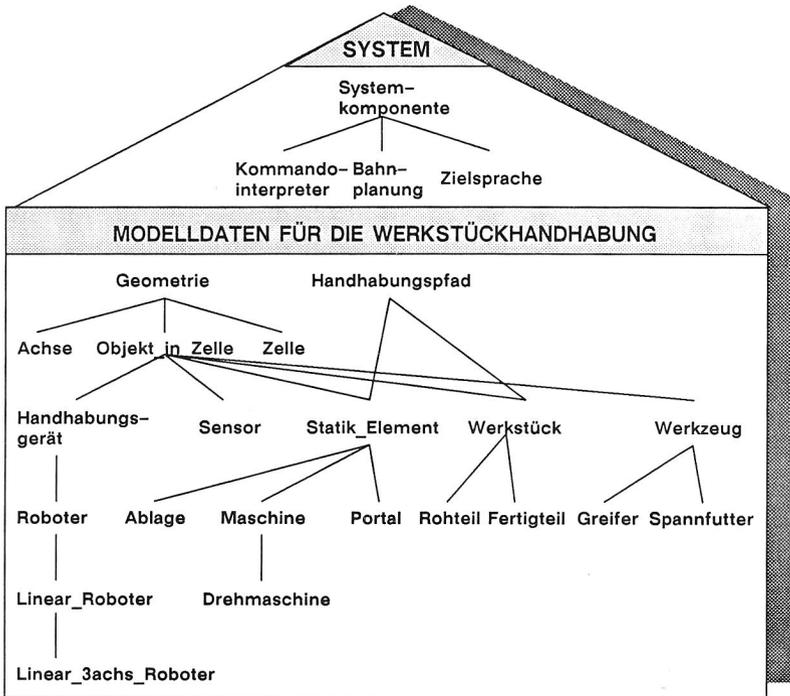


Bild 37: Abstrakte Datentypen für das Drehzellenbeispiel

Weiterhin müssen den Typbeschreibungen prozedurale Teile, Methoden, zugeordnet werden (Bild 38). Als natürliche Faustregel gilt: "Eine Methode wird dem aktiv handelnden Objekt zugeordnet". Ein Großteil der Methoden ist den Typbeschreibungen der Roboter zugeordnet, da hauptsächlich sie auf dem Umweltmodell operieren:

- Methoden für Befehle auf Steuerungsebene (Stufe 1)
- Methoden für Abarbeitung von Pfaden (Stufe 2)
- Methoden für "Pick-and-Place"-Operationen (Stufe 3)

Methoden für Operationen der Stufe 4 sind aufgabenbezogen. Am besten ordnet man sie dem Kommandointerpreter zu, der als Mensch-Maschine-Schnittstelle Benutzereingaben interpretiert.

Werkzeuge operieren auf Werkstücken. Ihnen werden als Methoden Synchronisations- und Bearbeitungsschritte zugeordnet, die als Seiteneffekte bei dem Abfahren der Pfade auftreten. Änderungen der topologischen Beziehungen (z.B. bei Greiferoperationen) und Signale zu anderen beteiligten Objekten (Drehmaschine bzw. Spannfutter) werden in solchen Methoden verborgen.

Abstrakte Datentypen für Steuerungen bzw. ihre Sprachen besitzen Methoden, die die abstrakten Anweisungen des Roboters (z.B. Linearbefehl) in die Steuerungssyntax umsetzen. Sie definieren Interpreterbausteine.

Die Verarbeitung der geometrischen Daten geschieht in den Methoden des Bahnplaners.

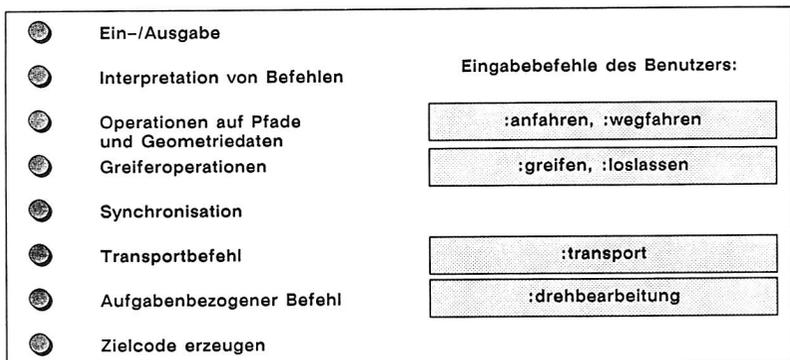


Bild 38: Grobklassifizierung der Methoden und Eingabebefehle des Benutzers

Eingaben des Benutzers werden interpretiert und mit Hilfe der Objektdaten, des Planungswissens und der Bahnplanung auf das Niveau einer abstrakten Steuerung transformiert. Das nun vorliegende abstrakte Programm wird von Interpreterbausteinen in die entsprechende Sprache der realen Steuerung übersetzt.

Gearbeitet wird im Laufzeitsystem mit Instanzen der abstrakten Datentypen, deren Slots aus der zugrundeliegenden Datenbasis mit den für die Zelle gültigen Werten belegt werden. Programmiert wird praktisch dadurch, daß für den Kommandointerpreter Methoden definiert werden.

Die Methoden für die Benutzereingaben werden entsprechend der beschriebenen Abstraktionsebenen definiert (vgl. Kap. 4.3). Für die Programmierung auf Ob-

jektenebene stehen die Befehle "Anfahren", "Wegfahren", "Greifen" und "Loslassen" zur Verfügung. Für die aufgabenorientierte Programmierung wurde der Befehl "Transport" definiert, der sich noch in "Pick and Place"-Operationen unterteilen läßt, sowie der Befehl "Drehbearbeitung", welcher der höchsten Abstraktionsebene entspricht.

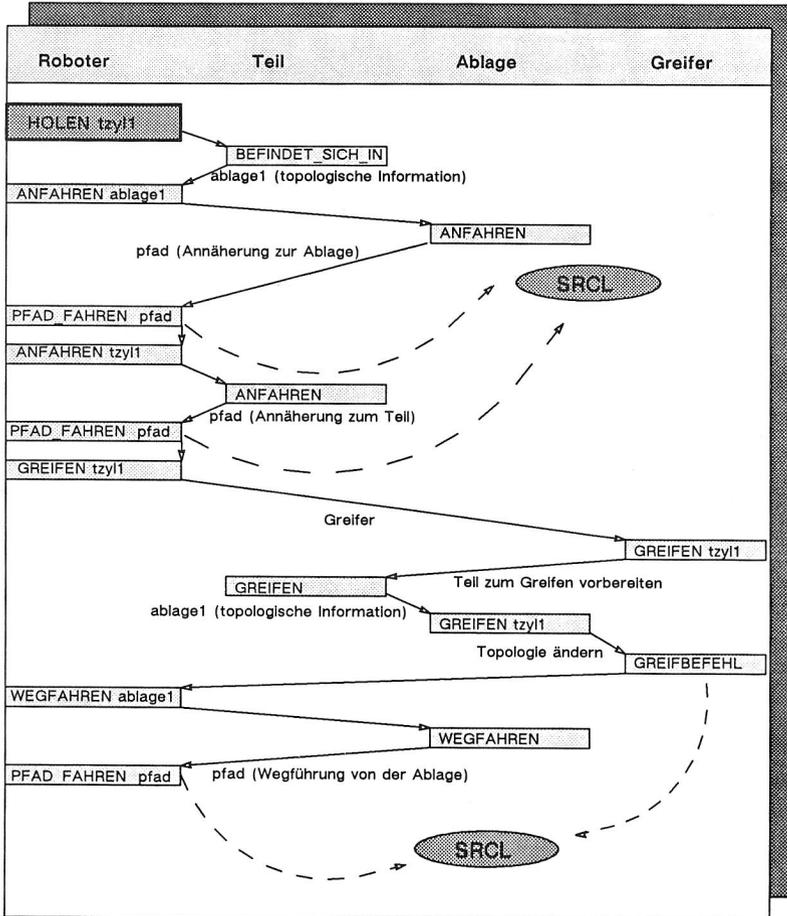


Bild 39: Nachrichtenaustausch der Operation "HOLEN tzy11"

Die Methode "anfahren" ermittelt den zu "Objekt" zugehörigen Pfad und generiert über die Methode "pfad_fahren" eine Folge von SRCL-Befehlen.

Entspricht "Objekt" dem Teil, so wird dieses auf kürzestem Wege angefahren. Andernfalls, wenn "Objekt" der Drehmaschine entspricht, wird auf der vordefinierten kollisionsfreien Bahn in die Maschine zur Teileposition gefahren. Dies zeigt, daß objektspezifische Eigenschaften in den Planungsprozeß integriert werden können.

Die Methode "transport" besteht aus Sequenzen der Befehle auf Objekt-Ebene. Auf dieser Ebene werden topologische Informationen ausgewertet, über die eine Ermittlung der kollisionsfreien Pfade möglich ist.

Anhand des Befehles "Teil holen" wird dargestellt, wie der Nachrichtenmechanismus funktioniert (Bild 39). Ausgehend von der Benutzereingabe werden Nachrichten gesendet und empfangen und somit die notwendigen Informationen zur Abarbeitung der Abstraktionsebenen ausgetauscht. Insbesondere bei der Operation "greifen" werden Nachrichten an alle beteiligten Objekte versandt, um Nebenwirkungen für Synchronisationsbefehle auslösen zu können.

Im folgenden sollen die Umgebungen realer Roboter untersucht werden, die sich in ihrer Komplexität zwischen einfachen Blockwelten und beliebigen Welten befinden. Im Mittelpunkt soll dabei der Begriff Flexibilität stehen, der für die Einbindung aufgabenorientierter Planungssysteme in den Prozeß der technischen Auftragsabwicklung von großer Bedeutung ist.

5. Flexibilitätsaspekte beim Einsatz von Planungssystemen

Als die beiden wesentlichen Prinzipien für die Planung von Roboteranwendungen wurden Grundlagen und Ansätze graphisch- interaktiver und aufgabenorientierter Planungssysteme beschrieben. Für den Einsatz dieser Systeme im Rahmen der Auftragsabwicklung sind folgende Merkmale von Bedeutung:

Graphisch- interaktive Planungssysteme ermöglichen die Programmierung auf Planungsebene, verwenden die Modellinformationen jedoch im wesentlichen für die Bewegungssimulation. Weiterhin sind die erstellten expliziten Programme als Schnittstelle für die flexible Fertigung unzureichend.

Aufgabenorientierte Planungssysteme verwenden Planwissen, um aus den Modellinformationen Programme ableiten zu können. Die Modell-erstellung ist sehr aufwendig und muß daher während des Planungsprozesses erfolgen. Aufgrund der Komplexität realer Anwendungen existieren bisher nur Lösungen für einzelne Teilbereiche wie die kollisionsfreie Bahnplanung.

Beide Ansätze sind in einem durchgängigen Planungskonzept zu vereinen, wobei die während des Planungsprozesses entstehenden Informationen genutzt werden müssen.

Graphisch- interaktive Planungssysteme nutzen bereits Modellinformationen auf niederer Abstraktionsebene. Diese müssen in Richtung aufgabenorientierter Systeme erweitert werden, wobei sich die Roboterumgebung nicht auf beliebige Welten erstrecken soll, sondern auf reale Fertigungsumgebungen. Durch diese Fertigungsumgebungen werden die Komplexität und die Anforderungen für die Planung vorgegeben.

Ein wesentlicher Faktor beim Entwurf eines durchgängigen Planungskonzeptes ist dabei der Flexibilitätsgrad der eingesetzten Fertigungssysteme. Dieser weist zwischen manuellen Systemen auf der einen und starr automatisierten Systemen auf der anderen Seite eine große Bandbreite auf. Die Flexibilität auf Fertigungsebene hat großen Einfluß auf den Planungsprozeß, der im folgenden analysiert werden soll.

5.1 Einfluß der Fertigungsflexibilität auf den Planungsprozeß

Flexibilität in der Fertigung bedeutet den Grad der Anpassungsfähigkeit auf Marktanforderungen. Diese Marktanforderungen sind gekennzeichnet durch eine

sich in vielen Branchen verstärkende Differenzierung der Kundenwünsche. Diesen vielfältigen Anforderungen hinsichtlich der Herstellung von Produkten steht ein Potential von Fertigungsmöglichkeiten in den Unternehmen gegenüber.

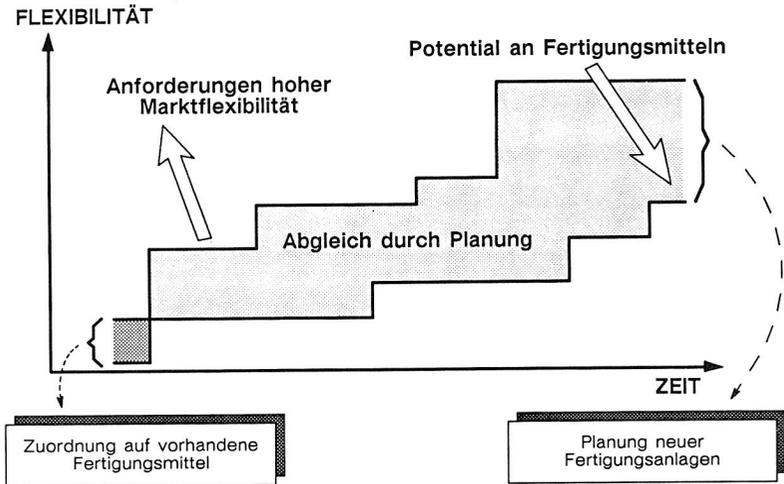


Bild 40: Flexibilitätsabgleich durch die Planung

Je flexibler das Potential der Fertigungsmittel ist, desto einfacher kann der Abgleich zwischen Bedarf und Angebot erfolgen. Diesen Abgleich zwischen vom Markt geforderter Produktgestalt und im Unternehmen vorhandenem Fertigungspotential erfolgt durch die Planung (Bild 40).

Bei hochflexiblen Fertigungsanlagen beschränkt sich die Planung auf die Erstellung der Fertigungsunterlagen, in denen die Zuordnung der herzustellenden Produkte auf vorhandene Anlagen erfolgt. Bei geringer Fertigungsflexibilität hat im schlimmsten Fall die Planung die Aufgabe, komplett neue Fertigungsanlagen zu konzipieren [58].

5.1.1 Ausprägungsformen der Fertigungsflexibilität

Die Flexibilität auf Fertigungsebene wird häufig auch als Produktionsflexibilität im Gegensatz zur Produktflexibilität bezeichnet [59]. Diese bezieht sich auf die Gestaltung eines Produktes, das den Kundenanforderungen genügt und mit vorhandenen Produktionsmitteln kostengünstig herzustellen ist.

Die Produktionsflexibilität ist gekennzeichnet durch eine Wechselwirkung zwischen Produktivität und Flexibilität. Diese wurden in der Vergangenheit als gegenläufige Zielsetzungen verstanden, was sich in den unterschiedlichen Fertigungstypen zeigt. So ist die Werkstattfertigung durch hohe Flexibilität und geringe Produktivität gekennzeichnet, bei der Fließfertigung verhält es sich umgekehrt. Durch den Einsatz der NC-Technik ist es zum Teil möglich geworden, die gegenläufigen Zielsetzungen in Einklang zu bringen. So ist eine mehrspindlige NC-Bearbeitungsmaschine durch gleichhohe Produktivität wie konventionelle Automaten bei weitaus geringerem Umrüstaufwand gekennzeichnet.

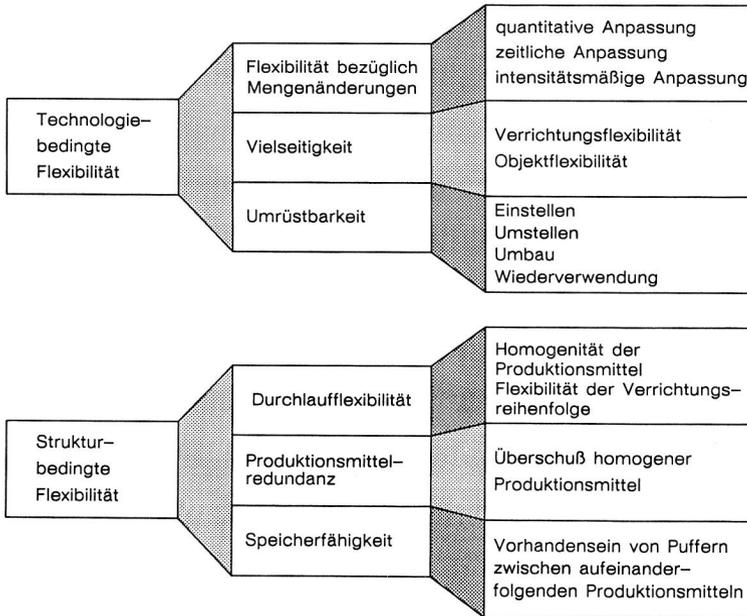


Bild 41: Ausprägungsformen der Produktionsflexibilität

Die Produktionsflexibilität läßt sich anhand technologischer und struktureller Kriterien untergliedern (Bild 41) [60]. Technologische Kriterien beziehen sich auf die Fähigkeit eines Fertigungssystems, verschiedene Fertigungsaufgaben durchzuführen. Die Vielseitigkeit eines Fertigungssystems zeigt sich dabei in dem Spektrum der Aufgaben, die mit vorhandener Ausrüstung durchgeführt werden können. Dagegen wird die Umrüstbarkeit durch den Rüstaufwand bestimmt, der zur Umstellung auf ein bestimmtes Teilespektrum notwendig ist [61].

Durch Einsatz der NC-Technik kann der Rüstaufwand gegenüber den mechanischen Umrüstarbeiten stark gesenkt werden. Dies geht bis zur wirtschaftlichen Fertigung der Losgröße eins, wenn Rüstvorgänge parallel zum Bearbeitungsprozeß automatisch durchgeführt werden. Dies zeigt gleichzeitig den engen Zusammenhang zwischen der Vielseitigkeit und Umrüstbarkeit und der Flexibilität bezüglich Mengenänderungen, die sich auf die wirtschaftlich zu fertigenden Stückzahlen bezieht.

Die technologische Flexibilität ist Voraussetzung für die strukturbedingte Flexibilität, die durch dispositive Maßnahmen erreicht werden kann. Die Durchlaufflexibilität bestimmt die Möglichkeit, Arbeitsfolgen unabhängig von der Struktur eines Fertigungssystems festzulegen. Dies ist bei Terminänderungen und Störungen des Fertigungsprozesses von Wichtigkeit. Dasselbe gilt für die Redundanz, welche die Erfüllung einer Aufgabe auf Alternativmaschinen gewährleistet. Besonders bei starr automatisierten Anlagen spielen Puffer zum Ausgleich von Störungen vor- oder nachgelagerter Fertigungseinheiten eine bedeutende Rolle.

Die technologische Flexibilität wird direkt durch dispositive Funktionen beeinflusst, wobei dadurch indirekt Planungsaufgaben entstehen können. So müssen beim Ausweichen auf Ersatzmaschinen die benötigten Fertigungsunterlagen bereitgestellt werden.

Grundsätzlich sind die beschriebenen Flexibilitätsarten unter dem Aspekt einer kurzfristigen Anpassungsfähigkeit der Produktion an veränderte Anforderungen zu sehen, wobei von einer vorhandenen Ausstattung an Betriebsmitteln ausgegangen wird. Um auch mittel- und langfristige Anpassungsmaßnahmen einzubeziehen, die viel mehr durch Planungsprozesse beeinflusst werden, muß ein erweiterter Flexibilitätsbegriff eingeführt werden.

5.1.2 Ablauforientierter Flexibilitätsbegriff

Die beschriebenen Ausprägungsformen der Produktionsflexibilität stehen in Wechselwirkung mit dispositiven und planerischen Maßnahmen unabhängig davon, ob es sich um Neuaufträge oder Wiederholaufträge handelt. Alle Fertigungsunterlagen sind zur Produktionszeit bereitgestellt und Maßnahmen müssen nur bei kurzfristigen Anforderungsänderungen ergriffen werden.

Betrachtet man die Flexibilität nicht nur im Produktions-, sondern auch im Planungsbereich, so ist bereits der Zeitpunkt der Auftragserteilung entscheidend. Handelt es sich um einen Neuauftrag, so muß neben der Produktionsflexibilität die Produktflexibilität betrachtet werden, welche durch die Realisierung kurzer Produktentwicklungszyklen zur Reaktion auf Kundenwünsche gekennzeichnet ist.

Dies beginnt in der Produktkonstruktion, wo die Gestalt und Funktion des Produktes entsprechend den Kundenwünschen festgelegt wird. Entscheidend ist jedoch die Arbeitsplanung, da hier entschieden wird, ob das Produkt mit den vorhandenen Betriebsmitteln hergestellt werden kann.

Hier erfolgt der eigentliche Abgleich zwischen Marktanforderungen und Fertigungspotential, wobei die vorhandene Produktionsflexibilität ausschlaggebend ist für die zu erreichende Produktflexibilität.

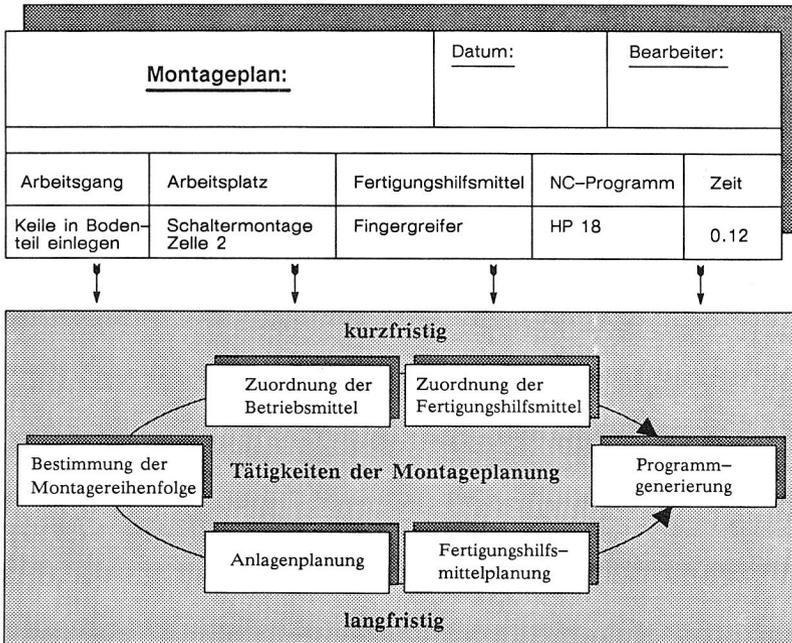


Bild 42: Zusammenhang zwischen kurz- und langfristigen Planungsfunktionen

Dies wird deutlich bei den Tätigkeiten zur Erstellung eines Montageplanes, wo in Abhängigkeit von der Produktionsflexibilität entweder eine Zuordnung auf vorhandene Betriebsmittel stattfindet, oder eine Neuplanung vorgenommen werden muß (Bild 42). Gleichzeitig macht dies auch den Zusammenhang zwischen kurz- und langfristigen Tätigkeiten in der Montageplanung deutlich. Die Bestimmung des Montageablaufs und die Programmgenerierung erfolgen in jedem Fall, während die Neuplanung von Betriebsmitteln und Fertigungshilfsmitteln nur bei nicht vorhandener Produktionsflexibilität erfolgt.

Bei geringer Produktionsflexibilität entstehen somit zusätzliche Planungsaufgaben, die wiederum die Produktflexibilität einschränken. Die Planungsfunktionen sind somit die Verbindung zwischen Produktions- und Produktflexibilität und werden daher als Kriterien für die Beschreibung einer erweiterten Flexibilität herangezogen.

Flexibilität im Hinblick auf die Planung bedeutet somit den Aufwand an Planungstätigkeiten, der aufgrund von Neu- oder Wiederholaufträgen und der vorhandenen Produktionsflexibilität verursacht wird.

Bei Wiederholaufträgen kann durch dispositive Maßnahmen eine Umordnung von Fertigungsablauf und Betriebsmitteln vorgenommen werden, falls die erforderlichen Fertigungshilfsmittel und Programme verfügbar sind. Ansonsten ist es kurzfristig nur möglich, neue Programme zu erstellen.

Während also bei Neuaufträgen die Planungskette von oben durchlaufen wird, geschieht dies bei Wiederholaufträgen von unten nach oben.

Für den Einsatz rechnergestützter Planungssysteme ergeben sich damit hinsichtlich der Flexibilität die folgenden Aufgabenschwerpunkte:

- bei niedriger Produktionsflexibilität Realisierung kurzer Planungszyklen bei Neuaufträgen durch Integration von Anlagen- und Fertigungshilfsmittelplanung
- bei hoher Produktionsflexibilität schnelle Erstellung der Fertigungsunterlagen in der Planung bei Neuaufträgen und Erhöhung der Flexibilität in der Produktion bei Wiederholaufträgen durch Reduzierung des Umrüstaufwandes

Diese Gesichtspunkte sind bei der Realisierung durchgängiger Planungskonzepte unter dem Aspekt Flexibilität zu berücksichtigen.

Der Planungsprozeß umfaßt die beschriebenen Planungsfunktionen von der Anlageplanung bis zur NC-Programmierung. Welche dieser Planungsfunktionen während der Auftragsabwicklung durchgeführt werden, hängt wie beschrieben von der vorhandenen Fertigungsflexibilität ab. Mit Hilfe des funktionsorientierten Flexibilitätsbegriffes können bei verschiedenen Auswertungen die im Rahmen der Auftragsabwicklung auszuführenden Planungsfunktionen bestimmt werden.

Eine besonders hohe Integration ist erforderlich, wenn viele oder auch alle Planungsfunktionen, wie es in der mechanischen Montage oftmals der Fall ist, von der Auftragsabwicklung berührt werden. Bei flexiblen Anwendungen dagegen liegen viele Daten im Modell bereits vor und von Neuaufträgen sind nur wenige Planungsfunktionen betroffen.

Die zeitliche Dimension muß in einem Planungsmodell berücksichtigt werden, um den Einfluß der Fertigungsflexibilität abbilden zu können. Das Planungsmodell gliedert sich somit in langfristige, mittelfristige und kurzfristige Daten (Bild 43).

Neben Technologiebausteinen gehört zu den Grundinformationen eines Planungsmodells übergreifendes Planwissen, wozu auch Beschreibungen über standardisierte Fertigungsabläufe zählen. "Pick and Place"-Vorgänge sind solche allgemeingültige Abläufe, die im Planungsmodell definiert sein müssen, um Anweisungen in einer Abstraktionsstufe in Teilaufgaben zerlegen zu können. Neben diesen langfristigen Grundinformationen, die nur durch Systementwickler verändert werden können, sind im Planungsmodell Informationen enthalten, die zeitabhängig im Planungsprozeß entstehen.

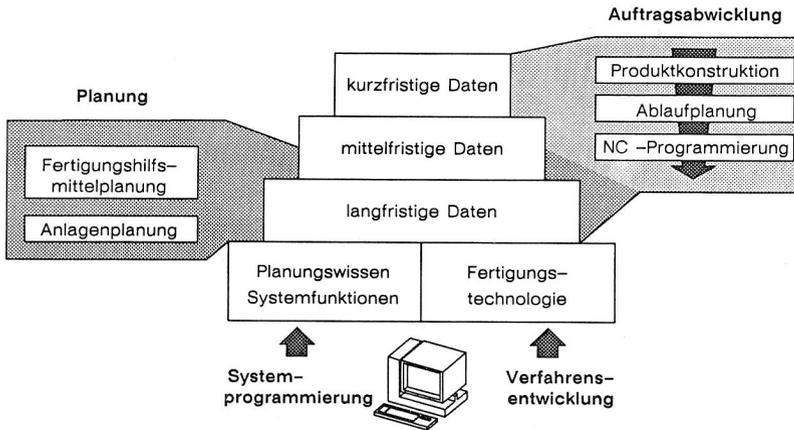


Bild 43: Ablauforientiertes Planungsmodell

Je nach Anwendungsfall können die erzeugten Planungsinformationen den Zeitkategorien zugeteilt werden. Die Daten der einzelnen Planungsfunktionen lassen sich jedoch anwendungsunabhängig schwerpunktmäßig einordnen. Produktkonstruktion, Ablaufplanung und NC-Programmierung müssen bei jedem Neuauftrag durchlaufen werden und sind daher meist kurzfristig veränderbar. Die Planung von Fertigungshilfsmitteln oder kompletter Anlagen ist nur mittel- oder langfristig möglich und wird nur bei geringer Produktionsflexibilität von Neuaufträgen berührt.

Bei flexiblen Anwendungen sind maschinenabhängige Informationen langfristig und auftragsunabhängig. Produktabhängige Informationen dagegen sind auftragsabhängig und kurzfristig veränderbar. Diese Aufteilung zeigt sich deutlich in der NC-Teilefertigung.

Während der Auftragsabwicklung werden Produktinformationen und Informationen über Werkzeuge, Spannmittel und Vorrichtungen erzeugt und für die NC-Programmierung genutzt. Maschinenabhängige Informationen sind dagegen in Postprozessoren langfristig abgespeichert und werden erst in einer zweiten Stufe für die Programmerstellung genutzt.

Am Beispiel der Werkstückhandhabung, die im Kapitel 4 beschrieben wurde, soll der Aufbau des Planungsmodells verdeutlicht werden (Bild 44).

Durch die Betriebsmittelplanung werden langfristig folgende Daten im Planungsmodell angespeichert:

- Geometrische Abmessungen von Maschine, Portalroboter, Ablage, Transporteinrichtungen
- kinematische Daten des Portalroboters über Verfahrgrenzen, Geschwindigkeiten und Beschleunigungen
- Definition wichtiger Arbeitspunkte im Arbeitsraum
- kollisionsfreie Bahnen zwischen Arbeitspunkten

Bei Neuaufträgen wird zunächst die Produktkonstruktion angestoßen, in der die Geometrie des Teiles sowie technologische Angaben über Toleranzen, Oberflächengüte und Material erzeugt werden. In der anschließenden Ablaufplanung erfolgt die Zuordnung der benötigten Fertigungshilfsmittel. Dazu können vorhandene Modellinformationen über Greifer, Spannmittel und Vorrichtungen benutzt werden, und falls diese nicht geeignet sind, eine Neuplanung angestoßen werden.

Durch Konstruktion und Ablaufplanung werden dem Modell somit kurz- bzw. mittelfristig folgende Planungsinformationen zugefügt:

- Geometrie von Werkstücken und Fertigungshilfsmitteln
- Greifpunkte und Annäherungsbahnen für Werkstücke
- Technologische Eigenschaften von Fertigungshilfsmitteln

Innerhalb der NC-Programmierung können die im Modell enthaltenen Informationen für die Programmerstellung genutzt werden. Im Idealfall genügt die Definition der Greifpunkte zum Teil für die automatische Programmerstellung, da alle weiteren Modellinformationen bereits vorliegen.

An Grundwissen könnte im System Planwissen für die Aufgabenzerlegung und Technologiewissen über sensorüberwachte und kraftgeregelte Feinbewegungen enthalten sein.

Mit dem ablauforientierten Planungsmodell können die Integrationsstufen rechnergestützter Planungssysteme im Hinblick auf unterschiedlich flexible Anwendungen analysiert und bewertet werden.

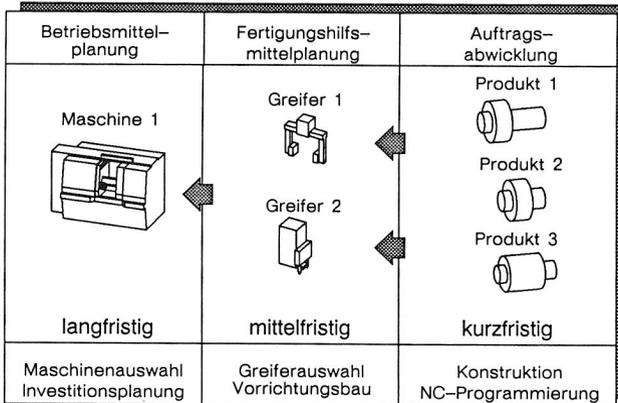


Bild 44: Planungsmodell für die Werkstückhandhabung

Wesentlich ist hierbei die Betrachtung der beiden Phasen Modellerstellung und Modellnutzung in Planung, Programmierung und Steuerung.

5.2 Modellaufbau während des Planungsablaufes

Die Planung vollzieht sich über verschiedene Stufen von der Produktkonstruktion bis zur NC-Programmgenerierung. In jedem Planungsschritt werden Daten erzeugt, die von den nachfolgenden Stufen genutzt werden können. Dieser Prozeß der Erzeugung von Modellinformation kann wie beschrieben zeitlich und räumlich getrennt oder auch in einem Planungszyklus erfolgen.

Aufgrund der geringen Fertigungsflexibilität werden in der mechanischen Montage bei Neuaufträgen meist sämtliche Planungsstufen sukzessive in einem Zyklus durchlaufen. Der Ablauf der Montageplanung läßt sich dabei in die Bereiche Grobplanung und Feinplanung aufteilen. Wesentliche Aufgaben der Grobplanung sind [25]:

- Montageaufgabenanalyse
- Montagekonzepterstellung
- Montagelayouterstellung
- Bewertung und Auswahl

Innerhalb der Grobplanung werden verschiedene Systemalternativen analysiert und verglichen. Aufgrund der hohen Komplexität automatisierter Montageanlagen wäre der Aufwand zu hoch, alle Alternativen im Detail durchzuplanen. Daher wird am Ende der Grobplanung eine Alternative ausgewählt, für die eine Feinplanung durchgeführt wird. Wesentliche Aufgaben sind dabei die Detailkonstruktion, sowie die rechnergestützte Layoutüberprüfung und Programmgenerierung. Für die Feinplanung bietet sich der Einsatz graphisch- interaktiver Planungssysteme auf der Basis von CAD an (vgl. Kap 3).

5.2.1 Modellinformationen aus der Grobplanung

Die Grobplanung beginnt mit der Analyse der Montageaufgabe. Dabei werden zunächst die erwarteten Stückzahlen des Produktes und die Produktvarianten ermittelt. Mit Hilfe der verfügbaren Fertigungszeit läßt sich daraus die geforderte Ausbringungsmenge pro Zeiteinheit ermitteln. Diese sogenannte Taktzeit bildet die wesentliche Grundlage für die Montagekonzepterstellung. Weiterhin beinhaltet die Aufgabenanalyse eine Analyse des Produktes. Ausgangspunkt für die Produktanalyse bildet das mit einem CAD-System erstellte rechnerinterne Modell des Produktes mit seinen geometrischen und topologischen Eigenschaften (Bild 46).

Mit Hilfe des CAD-Modelles können Einbauuntersuchungen durchgeführt werden, indem verschiedene Fügesituationen am Bildschirm dargestellt werden. Damit kann die Montagegerechtheit und der Aufbau des Produktes wirkungsvoll untersucht werden.

Die Produktstruktur zeigt den Aufbau des Produktes aus Baugruppen und Einzelteilen. Damit sind bereits Reihenfolgebeziehungen hinsichtlich der Vor- und Endmontage festgelegt. Dies gilt ebenso für die Montageverfahren, die im Gegensatz zu den Teilefertigungsverfahren, bereits im Produktaufbau enthalten sind.

Die Produktstruktur beinhaltet somit bereits Aufgabenbeschreibungen und -zerlegungen auf höchster Abstraktionsebene wie z.B. "Montiere Produkt" oder "Montiere Baugruppe" (Bild 45).

Diese Aufgabenstellungen können bis zu den Einzelteilen auf unterster Fertigungsebene mit entsprechenden Montagefunktionen zerlegt werden. Für diese Aufgabenzerlegung muß jedoch die Reihenfolge der auszuführenden Montagefunktionen festgelegt werden.

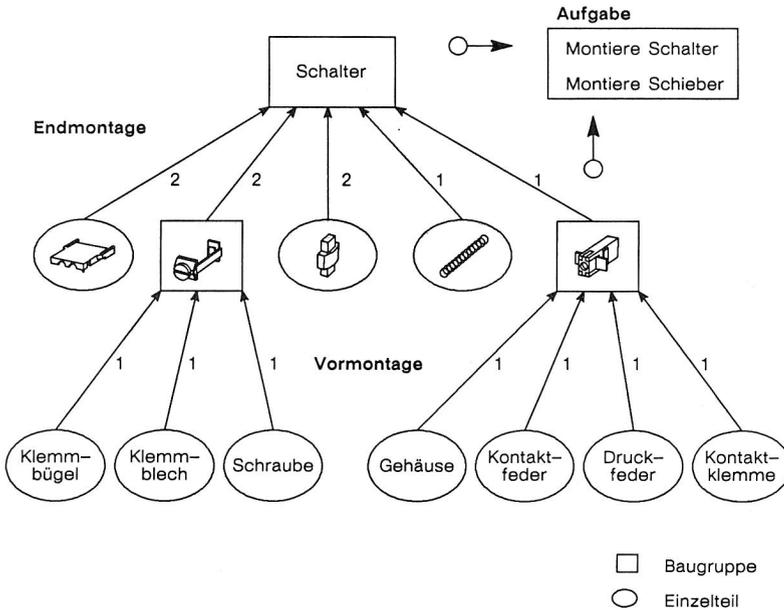


Bild 45: Erzeugnisgliederung eines Produktes

Die Ermittlung der Montagereihenfolge basiert auf den Vorrangbeziehungen der Bauteile des Produktes. Diese Vorrangbeziehungen lassen sich anhand geometrischer, topologischer und technologischer Informationen aus dem CAD-Produktmodell ableiten.

Topologische Informationen ergeben Vorrangbeziehungen zwischen Bauteilen entsprechend der Erzeugnisgliederung. Wichtig ist hierbei, daß Baugruppen im CAD-Modell auch tatsächlichen Montagebaugruppen entsprechen. Die Ermittlung der Vorrangbeziehungen kann dann für jede Fertigungsstufe analog zum Aufbau der Baukastenstückliste jeweils einzeln durchgeführt werden. Im Beispiel können die Vorrangbeziehungen getrennt für den Schieber, die Klemme und für den Schalter ermittelt werden, die realen Montagebaugruppen beziehungsweise dem Endprodukt entsprechen.

Die Auswertung der Vorrangbeziehungen einer Montagebaugruppe kann aufgrund der geometrischen Anordnung der Bauteile im montierten Zustand ermittelt werden. Liegen die Bauteile im CAD-System als Flächen- oder Volumenmodelle vor, so können automatisch über Schnittfunktionen Berührflächen zwischen den Bauteilen berechnet werden.

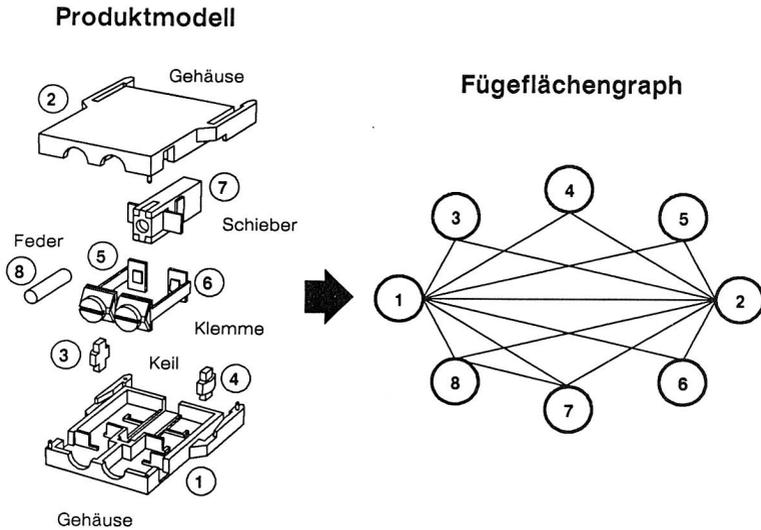


Bild 46: CAD-Produktmodell mit Fügeflächengraph

Das Ergebnis lässt sich in Form des sogenannten Fügeflächengraphen darstellen (Bild 46), wobei die Knoten den Bauteilen und die Kanten vorhandenen Berührflächen zwischen zwei Bauteilen entsprechen. Aus diesen ungerichteten Berührkanten sind im nächsten Schritt Vorgänger-/Nachfolger-Beziehungen abzuleiten. Zwei Gesichtspunkte sind hierbei von großer Wichtigkeit [62]:

- die Definition geeigneter Basisteile
- die Ermittlung möglicher Fügerichtungen

Diese beiden Kriterien sind im Zusammenhang zu sehen, da günstige Basisteile neben geeigneten Spann- und Auflageflächen horizontale oder vertikale Fügebewegungen ermöglichen. Durch die Beschränkung auf die Hauptfügerichtungen wird auch die rechnergestützte Ermittlung der Vorgänger-/Nachfolgerbeziehungen wesentlich vereinfacht.

Die Berechnung erfolgt über eine Betrachtung der Flächennormalen, die parallel zur Füge­richtung liegen. Diese sind bei Körpern nach außen gerichtet, wodurch bei sich berührenden Flächen eindeutig eine Vorgänger-/Nachfolger-Beziehung zwischen zwei Bauteilen in Füge­richtung bestimmt werden kann (Bild 47).

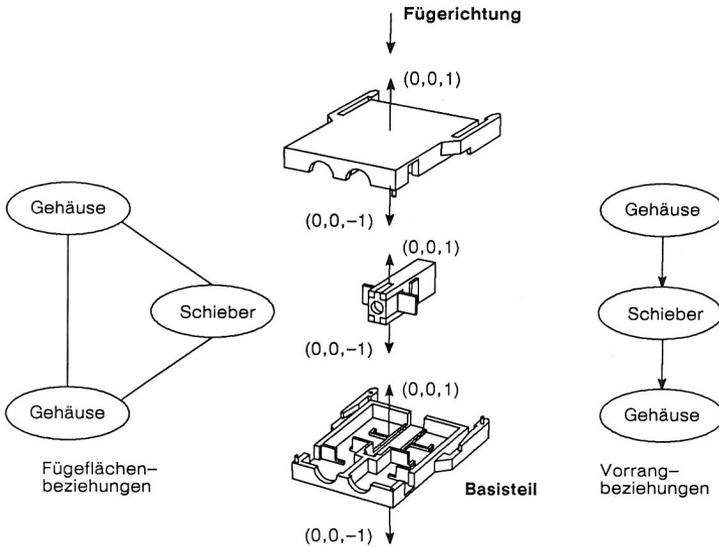


Bild 47: Ermittlung der Vorrangbeziehungen

Die geometrischen Informationen aus dem CAD-Produktmodell sind für eine automatische Vorranggraphenerstellung meist nicht ausreichend. So existieren Vorrangbeziehungen zwischen Bauteilen aufgrund technologischer Randbedingungen, ohne daß zwischen den Bauteilen Berührbeziehungen existieren. Dies ist bei Einschlußbedingungen der Fall, wenn eingeschlossene Bauteile keine Berührflächen zu den einschließenden Bauteilen aufweisen. Bei der Montage würde die Nichtbeachtung solcher Restriktionen zu Kollisionen führen.

Weiterhin besitzen Bauteile im CAD-Produktmodell eine Idealgeometrie. Verformungen, die während der Montage auftreten, wie thermische Behandlungen oder Spannungsvorgänge bei Federn, sind im Geometriemodell nicht enthalten. Solche Informationen müssen durch technologische Attribute an die entsprechenden Geometrie­elemente angehängt werden. Dadurch können auch Verbindungsteile kenntlich gemacht werden, was für die Analyse von Kraft- und Formschlüssen in allen möglichen Füge­richtungen zwischen Bauteilen erforderlich ist.

Ein Ansatz, Vorrangbeziehungen aufgrund geometrischer und technologischer Informationen mit Hilfe der Simulation des Demontagevorganges zu ermitteln, wird in [63] beschrieben. Der Einsatz wissensbasierter Methoden und die Ankopplung an CAD-Systeme bilden den Schwerpunkt bei der Weiterentwicklung der numerischen Ansätze zur rechnergestützten Vorranggraphermittlung. Aufgrund der Komplexität der Aufgabenstellung sind jedoch interaktive Eingaben des Benutzers unerlässlich, um den vom System vorgeschlagenen Vorranggraphen zu überprüfen und optimieren zu können.

Der Vorranggraph enthält alle Reihenfolgebeziehungen, die bei der Montage einzuhalten sind. Die Kanten entsprechen somit nicht mehr Berührflächen, sondern Vorgänger-/Nachfolger-Beziehungen zwischen Bauteilen. Der Vorranggraph für den Schalter (Bild 48) wurde aus den geometrischen Informationen des CAD-Modells abgeleitet. Die Vorrangbeziehungen zwischen Klemmen und Schieber sind jedoch nur technologisch begründbar (Klemmen sind nach eingebautem Schieber mit Feder nicht mehr montierbar) und wurden interaktiv eingegeben.

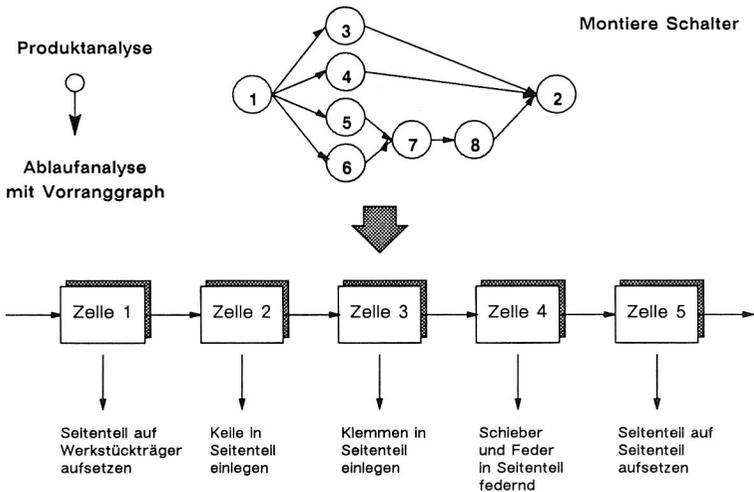


Bild 48: Informationen aus Produkt- und Ablaufanalyse

Die nächste Planungsaufgabe besteht nun in der Ermittlung einer optimalen Montagereihenfolge unter Beachtung der ermittelten Vorrangbeziehungen. Als Kriterium wird hierzu der Zeitbedarf für die auszuführenden Teileverrichtungen herangezogen. Der bauteilebezogene Vorranggraph muß hierzu in einen tätigkeitsbezogenen Vorranggraphen überführt werden. Hierbei ist zu beachten, daß

Bauteile nicht einfach durch Fügefunktionen ersetzt werden können, sondern daß zusätzliche Funktionen wie Handhaben oder Prüfen zu berücksichtigen sind.

Jeder ermittelten Teileverrichtung wird eine Vorgabezeit zugeordnet, um die Montagereihenfolge durch die sogenannte Abtaktung ermitteln zu können. Für die Abtaktung von Fertigungssystemen existieren eine Reihe von mathematischen Verfahren, die in [64] hinsichtlich ihrer Merkmale charakterisiert sind und nach erzieltm Abstimmungsgrad, Rechnerzeit und Speicherplatzbedarf verglichen werden.

Die Verfahren versuchen ausgehend vom Vorranggraphen bei vorgegebener Taktzeit die Anzahl von Stationen beziehungsweise umgekehrt bei gegebener Anzahl von Stationen die Taktzeit zu minimieren. Die Teileverrichtungen werden entsprechend ihrer Vorgabezeit sukzessive unter Beachtung der Taktzeit den Stationen zugeordnet. Als Ergebnis erhält man eine Montagereihenfolge mit der Zuordnung der Teileverrichtungen auf Stationen sowie die entsprechende Taktzeit.

Dies entspricht einer Verfeinerung der Aufgabenbeschreibung aus dem Produktmodell, sowie der zusätzlichen Reihenfolge, in der Teilaufgaben auszuführen sind (Bild 48).

Für diese Teilaufgaben müssen im nächsten Planungsschritt geeignete Funktionsträger ausgewählt werden. Während die bisher beschriebenen Planungsschritte bei jeder Neukonstruktion in dieser Form durchgeführt werden, hängt die Funktionsträgerauswahl von der Flexibilität der Fertigung ab. Bei manueller (flexibler) Montage des Schalters müßte eine Zuordnung auf vorhandene Arbeitsplätze durchgeführt werden, bei automatischer (unflexibler) Montage eine Neuplanung der Montagestationen.

Die bisherige, strukturelle Beschreibung des Montageablaufs in Form von Stationen und Teilaufgaben muß für die Geräteauswahl verfeinert werden. Hierzu wird der Montageprozeß hierarchisch gegliedert und eine funktionale Beschreibung des Montageablaufs vorgenommen. Dabei können als Funktionselemente die Symbole verwendet werden, die in der VDI-Richtlinie 2860 [65] als Handhabungsfunktionen definiert sind. In [66] wird ein Modell vorgestellt, in dem der funktionale Montageablauf rechnergestützt ausgehend vom Montagevorranggraph ermittelt und mit Hilfe der VDI-Symbole am Bildschirm graphisch dargestellt wird.

Mit Hilfe der funktionalen Beschreibung des Montageablaufs kann nun die Geräteauswahl durchgeführt werden. Hierzu bietet sich der Einsatz von Datenbanken an, in denen Geräte mit Eigenschaften und zugehörigen Funktionen abgespeichert sind [66]. Geräte können sich auf Funktionsklassen beziehen. Für die

Station 2 mit der Teilaufgabe "Keil in Gehäuse einlegen" ist der funktionale Ablauf sowie die zugehörigen Funktionsträger dargestellt (Bild 49).

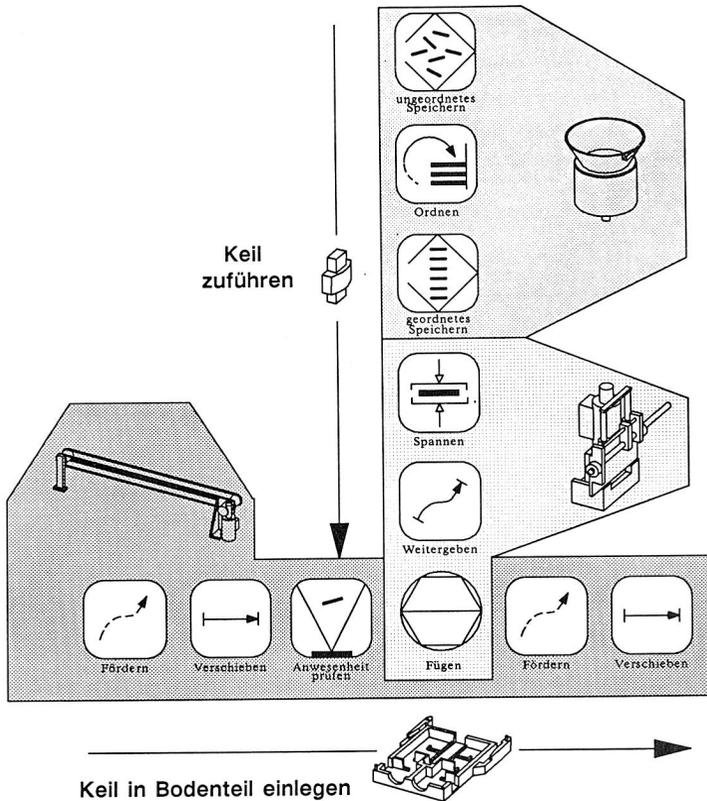


Bild 49: Zuordnung von Funktionsträgern

Mit der Geräteauswahl erfolgt gleichzeitig die Festlegung der zugehörigen Steuerungen. Damit ist bestimmt, welche Teilfunktionen auf welche Steuerung mit der zugehörigen Steuerungssprache transformiert werden müssen. Ebenso sind in der funktionalen Beschreibung die Schnittstellen zwischen den einzelnen Steuerungen enthalten. Diese sind nicht nur für die hardwaremäßige Verdrahtung, sondern auch für die Kommunikationsanweisungen in den Steuerprogrammen eine wesentliche Informationsgrundlage auf hoher Abstraktionsebene.

Durch die Geräteauswahl sind wesentliche Informationen für die Feinplanung wie Tragkraft, Positionier- und Wiederholgenauigkeit und Steuerungseigenschaf-

ten festgelegt. Weitere Informationen ergeben sich aus der Anordnung der Geräte, die in der anschließenden Layoutplanung erfolgt. Die Layouterstellung kann mit Hilfe von CAD-Systemen erfolgen. Der Planer kann dabei alle Möglichkeiten nutzen, die ihm graphische Planungssysteme zur Verfügung stellen (vgl. Kap. 3.2). Die Planung selbst erfolgt auf der Basis der Ergebnisse der Montagekonzepterstellung. Hierbei wird die Montagestruktur, d.h. Linien- oder Neststruktur festgelegt. Bei Linienstruktur orientiert sich die Layoutplanung am zentralen Materialflußsystem, bei Neststruktur erfolgt die Anordnung der Geräte um das zentrale Handhabungsgerät.

Durch die Montagestruktur wird auch der Funktionsumfang der einzelnen Geräte festgelegt, und damit die Geräteauswahl beeinflusst. Ein Ansatz für die automatische Geräteauswahl und Layoutanordnung mit Hilfe eines Expertensystems wird in [67] beschrieben. Durch die Layouterstellung sind wesentliche Informationen für die anschließende Feinplanung definiert.

5.2.2 Modellinformationen aus der Feinplanung

Für die Bewegungsplanung sind dies Arbeits- und Kollisionsräume sowie Bezugskoordinatensysteme zur Definition von Arbeitspunkten an den Geräten im Arbeitsraum (vgl. Kap 3.2).

Neben diesen Daten für die Planung von Grobbewegungen werden im Rahmen der Fertigungshilfsmittelplanung die Daten für Greif- und Fügebewegungen ermittelt [68]. Diese werden durch die Konstruktion von Vorrichtungen, Spannmitteln, Werkzeugen und Greifern festgelegt.

Grundlagen für alle diese Tätigkeiten der Feinplanung ist wiederum das CAD-Modell des Produktes. Für die Fertigungshilfsmittelkonstruktion sind die geometrische Gestalt der Bauteile sowie zusätzliche technologischer Attribute wie Material, Toleranzen und Oberflächengüte von Bedeutung.

Für die Konstruktion von Werkstückträgern und Spannvorrichtungen ist die Auswahl der Basisteile wichtig. Anhand der Auflage- und Spannflächen können die erforderlichen Informationen für die Fixierung der Basisteile abgeleitet werden.

Ein wesentlicher Faktor für die geringe Flexibilität in der automatischen Montage ist die Greiferproblematik. In der manuellen Montage ist dies aufgrund der Universalität der menschlichen Hand kein Problem, gerade in der automatisierten Montage vielfältiger Bauteile, jedoch eine sehr schwierige Fragestellung. Vor allem in der Nestmontage, wo vielfältige Aufgaben mit einem Montageroboter ausgeführt werden, ist das Greiferproblem nur durch komplizierte Wechselgreifersysteme oder zeitaufwendige Greiferwechsel zu lösen. Für die

Greiferauswahl müssen zunächst die Greifflächen am zu greifenden Bauteil bestimmt werden. Dabei darf das Bauteil nicht einzeln, sondern muß in eingebautem Zustand zusammen mit den Fügepartnern betrachtet werden, um Kollisionen beim Montagevorgang auszuschließen. So ist die Rückseite des Gehäuses als Greiffläche ungeeignet, da es sonst bei der Montage Kollisionen mit dem eingebauten Schieber gäbe (Bild 50).

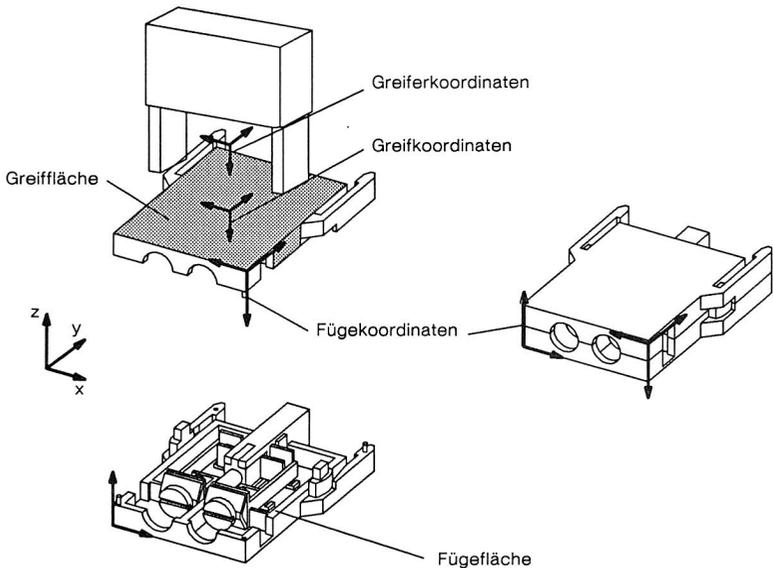


Bild 50: Feinplanung mit Bezugskoordinationssystemen

Durch CAD-gestützte Produktkonstruktion sind Lage und Orientierung jedes Bauteils im zusammengebauten Produkt rechnerintern abgelegt. Innerhalb der Layoutplanung werden Zuführ-, Abhol- und Fügepunkte innerhalb der Zelle definiert. Mit Hilfe der am Bauteil festgelegten Greifpunkte können durch Transformationen die Bewegungsbahnen für den Montagevorgang bestimmt werden. Um Kollisionen zu vermeiden, müssen jedoch Hilfspunkte für die Feinbewegungen ermittelt werden [68].

Diese können aus den Fügerichtungen, die bei der Vorranggraphenermittlung definiert werden, abgeleitet werden. Die Fügerichtung für das Aufsetzen des Gehäuses (Bild 50) entspricht der z-Achse von oben nach unten. Dies ist

aufgrund der Stifte und Bohrungen an den Ecken der Gehäuseteile, die zur Fixierung angebracht sind, eindeutig festgelegt. Durch das gleichzeitige mehrfache Ineinanderschieben von Stift und Bohrung während des Fügevorgangs müssen Lage und Orientierung des Gehäuses vor und nach dem Fügevorgang miteinander übereinstimmen. Als Hilfspunkt kommt daher nur eine Verschiebung in z-Richtung in Frage. Aus den Toleranzen der Teile sowie der am Fügeprozeß beteiligten Wirkorgane wie Greifer und Roboter ergeben sich Anforderungen für den Einsatz von Sensoren [69]. Werden diese eingesetzt, so müssen entsprechende Abfragen in den Steuerprogrammen der Geräte vorgesehen werden.

Im letzten Schritt erfolgt eine Umsetzung in die jeweilige Steuersprache und eine Bewegungssimulation des Montageablaufs. Durch Zugriff auf die vorhandenen Planungsinformationen ist eine automatische Programmgenerierung auf Objektebene möglich. Damit läßt sich der gesamte Montageablauf auf steuerungsneutraler Ebene simulieren und optimieren. Anschließend muß das steuerungsneutrale Format in die Zielsprachen der jeweiligen Steuerungen übertragen werden. Eine Simulation im Format der Zielsprachen würde für jede Zielsprache einen eigenen Sprachinterpreter erfordern, was aufgrund der unterschiedlichen Steuerungsfunktionalität kaum realisierbar erscheint.

Eine weitere Aufgabe stellt die Programmierung von speicherprogrammierbaren Steuerungen (SPS) dar, die in der Montageautomatisierung bislang weitaus häufiger eingesetzt werden als numerische Steuerungen und Robotersteuerungen. Während diese mittels expliziter Programmiersprachen programmierbar sind, ist das Sprachniveau von SPS-Steuerungen geringer, wodurch eine weitere Transformation erforderlich ist. Damit stellt sich die Aufgabe, die SPS-Programmierung in den Planungsprozeß zu integrieren.

Die bisherige SPS-Programmierung erfolgt in zwei Stufen:

- in der Betriebsmittelkonstruktion wird eine strukturelle funktionale Beschreibung des Fertigungssystems erstellt, wobei neben Zeichnungen, Hydraulik- und Pneumatikplänen, Funktionsdiagrammen, Funktionspläne oder betriebsspezifische Unterlagen erstellt werden.
- aufgrund dieser Unterlagen erfolgt die manuelle Erstellung der SPS-Programme, wobei Funktionsdiagramme und -pläne wesentliche Informationen für den Ablauf darstellen.

Bei der strukturellen und funktionalen Beschreibung kann auf die Daten, die bei der Simulation des Montageablaufs entstehen, zurückgegriffen werden. Aufbau und kinematische Struktur von Bewegungssystemen sind im Modell erhalten. Der

funktionale Ablauf kann aus dem steuerungsneutralen Ablaufprogramm sowie aus den Daten während des Simulationslaufes gewonnen werden (Bild 51).

Dabei werden vom Simulationsinterpreter zu jedem Taktzeitpunkt die Zustände der einzelnen Bewegungsachsen berechnet. Aus diesen Zuständen ergeben sich die Weg-Zeit-Verläufe der einzelnen Achsen. Jede Steigungsänderung in diesem Diagramm stellt einen charakteristischen Punkt dar, der als Ereignis bei der SPS-Programmierung berücksichtigt werden muß. Die charakteristischen Punkte können für die Achsen in Schrittketten umgewandelt werden, was einer Funktionsbeschreibung im Sinne eines Funktionsdiagramms entspricht. Den Schritten sind Aktionen zuzuordnen, wobei der Aktionstyp vom Verhalten der Achsen bei synchronen und asynchronen Bewegungen abhängt.

Simulationsprogramm

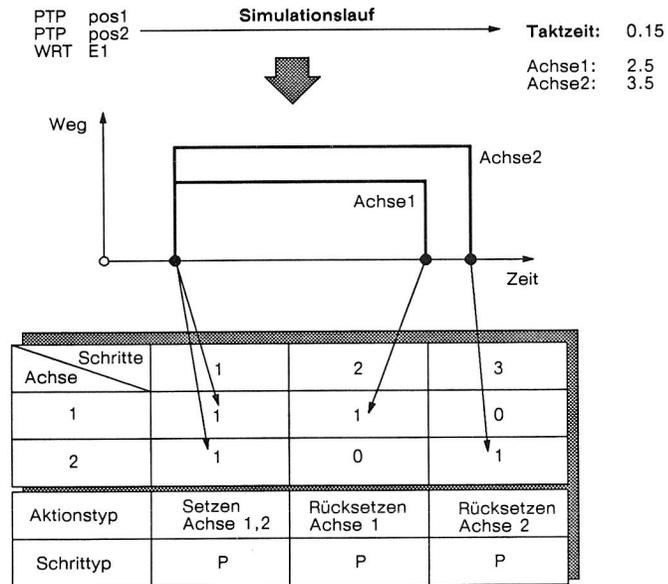


Bild 51: Erstellung von SPS-Programmen

Im Beispiel dargestellt ist eine asynchrone Bewegung, bei der beide Achsen zum selben Zeitpunkt starten, aber ihre Bewegung nach unterschiedlichen Zeiten beenden. Im ersten Schritt werden beide Achsen gestartet, d.h., die entsprechenden Ausgänge auf Signalzustand "1" gebracht. Im zweiten Schritt wird die erste Achse zurückgesetzt und im dritten Schritt die zweite.

Die einzelnen Schritte werden durch Signale aus dem Prozeß oder den Ablauf von Wartezeiten ausgelöst, die aus den Anweisungen des Simulationsprogrammes abgeleitet werden können. Die erzeugten Daten können nun für die SPS-Programmgenerierung genutzt werden, wobei der Rechereinsatz sehr stark vom Standardisierungsgrad des Aufbaus der SPS-Programme in Organisationsbausteine, Programmbausteine und Zentralteil abhängt. Somit ist ein durchgängiger Informationsfluß von der Produktkonstruktion bis zur Erstellung der Steuerprogramme geschaffen. Die einzelnen Planungsstufen mit den zugehörigen Informationen werden dabei sukzessive durchlaufen.

Zwischen den Planungsstufen bestehen jedoch Wechselwirkungen, die im Rahmen eines durchgängigen Planungskonzeptes beachtet werden müssen.

5.3 Modellnutzung in der Planungsphase von Anlagen

5.3.1 Graphisch-interaktive Planungszyklen

Die einzelnen Planungsstufen werden sukzessive durchlaufen, wobei die Informationen einer Stufe als Grundlage für die nachfolgenden Planungsprozesse dienen. Gleichzeitig üben die Planungsstufen eine Kontrollfunktion für die vorausgegangenen Planungsergebnisse aus, da während des Planungsprozesses eine stetige Konkretisierung stattfindet. Es entstehen somit in der Planung Regelkreise, die bis zum realen Aufbau und zur Produktion reichen, da Planungsergebnisse letztendlich erst dort getestet und optimiert werden können.

Dies zeigt das sukzessive Vorgehen in der konventionellen Planung, da dort ohne wirksame Simulations- und Planungsmethoden erst auf Fertigungsebene Planungsfehler entdeckt werden können (Bild 52). Ausgehend von Produktanalyse und Konzepterstellung werden Layoutalternativen konzipiert und bewertet. Das Auftreten von möglichen Kollisionen oder Taktzeitüberschreitungen wird jedoch erst beim Aufbau und der Programmierung auf Fertigungsebene festgestellt. Bereits der Umbau der Anlage zum Fehlerausgleich ist sehr aufwendig. Noch schlimmer ist es, wenn Neuplanungen vorgenommen werden müssen, die zu zeit- und kostenintensiven Neubeschaffungen führen.

Bis zur fehlerlosen Produktion müssen somit viele Stufen iterativ mehrmals durchlaufen werden. Der hohe Termindruck in der Planung wird dadurch noch verstärkt, was zur Folge hat, daß meist eine Alternative frühzeitig angewählt wird, für die nur noch die weiteren Planungsschritte ausgeführt werden. Auf

diese Weise führt das sukzessive Vorgehen in der konventionellen Planung nicht nur zu langen Planungszeiten, sondern auch zu schlechten Planungsergebnissen. Verstärkt wird diese Situation durch die immer kürzer werdenden Produktlebenszyklen und den entsprechend geforderten Innovationszyklen.

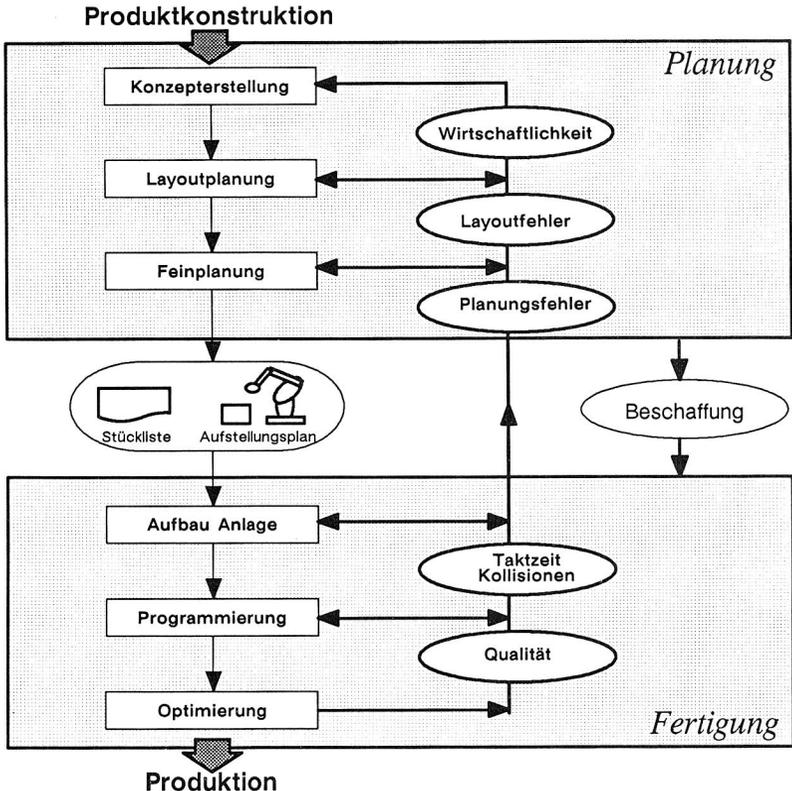


Bild 52: Sukzessive Vorgehensweise und resultierende Regelkreise bei konventioneller Planung

Die Sukzessivplanung ist aufgrund der starken Arbeitsteilung in der industriellen Praxis vorherrschend. Auch die meisten der rechnergestützten Verfahren folgen diesem Konzept, da die einzelnen Planungsstufen einfach in EDV-Programme übersetzt wurden. Ein Beispiel hierfür sind die verbreiteten PPS-Systeme, die aus Modulen zur Material- und Zeitwirtschaft entstanden.

Bei der Sukzessivplanung wird auf jeder Planungsstufe aus einer Anzahl von Alternativen eine ausgewählt.

In der Anlageplanung sind Entscheidungen zu treffen über:

- Montagereihenfolgen
- Geräte
- Layoutanordnungen
- Fertigungshilfsmittel
- Programmalternativen

Die Alternativen jeder Planungsstufe entsprechen einem riesigen Entscheidungsbaum, der im Planungsprozeß durchlaufen wird. Eine ideale Planung, bei der alle Alternativen bis zum kleinsten Detail verfolgt werden, ist mit derzeitigen Mitteln nicht realisierbar.

Auf jeder Stufe wird eine Auswahl getroffen und die entsprechenden Alternativen mit den Restriktionen der Entscheidungsfindung nach unten weitergegeben. Auf diese Weise wird der Entscheidungsbaum auf einem Pfad nach unten durchlaufen, bis auf einer Stufe eine Restriktion nicht mehr eingehalten werden kann und zur entsprechenden Stelle nach oben zurückgekehrt werden muß. Dies kann sehr häufig auftreten, da auf hohen Planungsstufen mit sehr ungenauen Daten gearbeitet werden muß, die erst im Verlaufe des Planungsprozesses genau bestimmbar sind.

Die einzelnen Planungsstufen sind daher nicht unabhängig, sondern stehen in ständiger Wechselwirkung. Es erscheint daher sinnvoll, den Rechner als Werkzeug zu nutzen, um möglichst kleine Regelkreise aufzubauen. Damit können Planungsschritte simultan ausgeführt werden und mehrere Planungsalternativen verfolgt werden.

Graphische Planungssysteme (vgl. Kap 3) bieten einen wesentlichen Ansatzpunkt in diese Richtung. Dies zeigt der Ablauf der gesamten Planungskette im Vergleich zur konventionellen Vorgehensweise (Bild 53).

Ein wesentlicher Unterschied besteht zunächst in der Verlagerung der Programmierfähigkeit in die Planung. Durch graphische Simulation des späteren Bewegungsablaufes in Form des NC-Programms wird eine ganz wesentliche Kontrollfunktion in die Planung vorgezogen. In der Fertigung erfolgt lediglich eine Anpassung der Programme an die realen Abmessungen, was nur in Ausnahmefällen zu Umbaumaßnahmen oder gar Neuplanungen führen kann. Durch die Simulation der Bewegungsprogramme kann somit der Planungszyklus wesentlich verkürzt werden. Dies ist jedoch nicht der einzige Effekt. Durch die Verknüpfung von Simulationssystemen und CAD-Systemen können die Aufgaben Layout-Planung/Betriebsmittelkonstruktion und Programmierung/Simulation parallel ausgeführt werden.

Umgekehrt existieren jedoch ebenfalls eine Reihe von Abhängigkeiten:

- Die Struktur der Anlage wird aufgrund von Zeitermittlungen und Reihenfolgebeziehungen festgelegt. Diese sind jedoch abhängig von den eingesetzten Geräten und technologischen Randbedingungen, die erst in der Layout- und Feinplanung ermittelt werden.
- Im Rahmen der Layoutplanung werden Geräte als Funktionsträger ausgewählt. Die erforderlichen Freiheitsgrade für den Fügeprozeß ergeben sich jedoch erst in der Feinanalyse.
- Eine exakte Zeitmessung kann erst am Ende des Planungsprozesses mit Hilfe der Simulation auf der Basis genauer Modelle erfolgen. Die ermittelten Zeitwerte beeinflussen jedoch jeden der vorausgegangenen Planungsschritte.

Es existieren also zum einen starke Abhängigkeiten zwischen Layout- und Feinplanung, da sich Geräteauswahl, Greifplanung und Fügeanalyse gegenseitig bedingen [70]. Diese Abhängigkeiten können jedoch durch graphische Planungssysteme mit kurzen Iterationszyklen berücksichtigt werden. Andererseits stehen diese Planungstätigkeiten mit der übergeordneten Strukturplanung in Wechselbeziehung. Der wesentliche Einflußfaktor ist dabei die Vorgabezeit für die einzelnen Teileverrichtungen. Die Vorgabezeit ist sowohl bei der Auswahl von Werkzeugmaschinen als auch bei der Konzipierung von Montageanlagen bestimmend für die Auswahl der wirtschaftlich und technologisch geeigneten Alternativen. Dies ist auf den direkten Zusammenhang von Vorgabezeit und Ausbringungsmenge und den damit verbundenen Erlösen zurückzuführen.

5.3.2 Automatisierte Simultanplanung

In der automatisierten Montage werden Anlagen für bestimmte Produkte konzipiert, für die Planstückzahlen vorliegen. Über diese Stückzahlen und die verfügbare Zeit kann die Taktzeit als Sollvorgabewert direkt berechnet werden. Die Taktzeit ist somit direkte Bezugsgröße für die zu erwartenden Einnahmen. Ausgehend von der Taktzeit wird die Struktur einer Anlage so ausgelegt, daß alle Teileverrichtungen innerhalb dieser Taktzeit ausgeführt werden können. Voraussetzung hierfür ist die Bestimmung der Vorgabezeit für die einzelnen Teileverrichtungen.

Da in der Planungsphase jedoch reale Anlagen noch nicht existieren, kann dies nur über Planzeiten erfolgen. Exakte Zeitaufnahmen wären nur mittels aufwendiger Versuchsaufbauten nach der Layoutplanung möglich.

Zur Berechnung der Vorgabezeit in der manuellen Montage eignen sich die Systeme vorbestimmter Zeiten, insbesondere das Workfactor-Verfahren und das MTM-Verfahren. Hierbei wird der Ablauf jeder Teileverrichtung analysiert und in Grundelemente wie Holen, Bringen, Fügen zerlegt. Für diese Grundelemente existieren Zeittabellen, die entsprechend verschiedener Einflußfaktoren, wie Entfernung, aufgebaut sind. Durch Addition der einzelnen Zeitwerte kann die Vorgabezeit für eine manuelle Teileverrichtung berechnet werden. Dies ist jedoch nur möglich, da manuelle Arbeitsplätze im Gegensatz zu automatisierten in ihrer Struktur gleich aufgebaut sind. Die Zeitermittlung kann somit unabhängig von der detaillierten Layoutplanung erfolgen.

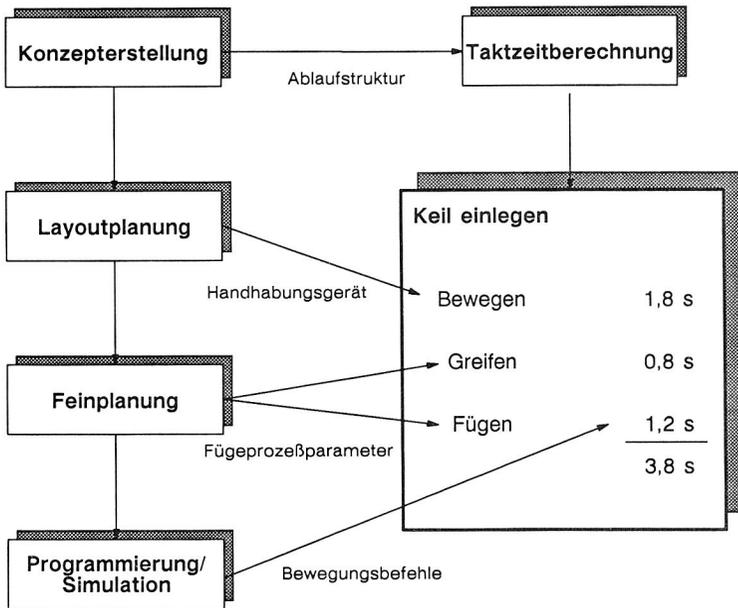


Bild 54: Informationen für die Taktzeitermittlung

Vordefinierte Zeitbausteine sind auch für die automatisierte Montage möglich. Dazu müßten die Montagefunktionen unterteilt werden in Unterfunktionen, für die jeweils Einflußfaktoren definierbar sind. Eine solche Aufteilung könnte entsprechend aufgabenorientierter Planungssysteme in Grob- und Feinbewegungen sowie Fügeoperationen erfolgen.

Für Füge- und Greifoperationen existieren bereits empirische Studien, die für die Zeitermittlung verwendet werden können [71]. Zeiten für Grobbewegungen

hängen von der Entfernung und vom eingesetzten Gerät ab. Dies zeigt, daß die Einflußgrößen für die Vorgabezeitberechnung von nachfolgenden Planungsschritten abhängen (Bild 54). In der Praxis werden die Planungszeiten jedoch meist geschätzt oder bei Verwendung von Zeitbausteinen werden die Einflußgrößen nicht an die nachfolgenden Planungsstufen weitergegeben. Dies führt oftmals zu Taktzeitüberschreitungen, die erst spät bemerkt werden und zu aufwendigen Neuplanungen führen.

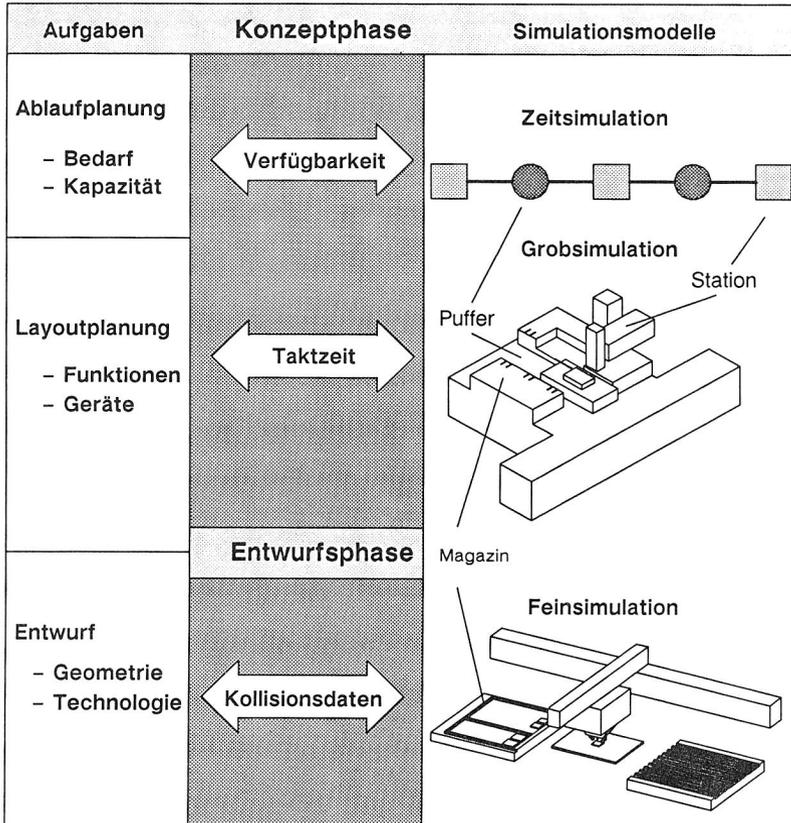


Bild 55: Simultane Montageplanung mit konsistenten Simulationsmodellen

In einem simultanen Planungsansatz müßten folgende Bedingungen enthalten sein:

- Die Einflußgrößen, die zu einer Entscheidung geführt haben, müssen weitergegeben und in nachfolgenden Planungstätigkeiten berücksichtigt werden.

- Die einzelnen Tätigkeiten sind nicht stufenweise, sondern möglichst parallel auszuführen, um kleine Regelkreise zu erhalten.

Ein paralleles Ausführen aller Planungsstufen (vgl. Bild 55) in beliebigem Detailierungsgrad ist aus Komplexitätsgründen nicht möglich.

Die Einflußfaktoren der einzelnen Planungsergebnisse sind deshalb als Restriktionen an den nächsten Planungsschritt mitzugeben. Dort kann sofort die Einhaltung der Restriktionen überprüft werden, um notfalls eine Entscheidungsänderung auf einer höheren Planungsstufe erreichen zu können.

Die Abtaktung wird auf Basis des Vorranggraphen, der Taktzeit und der Planvorgabezeiten für die einzelnen Teilverrichtungen durchgeführt. Als Ergebnis erhält man die Anzahl der benötigten Stationen mit den zugeordneten Teilverrichtungen. Zusätzlich werden als Einflußgrößen der Zeitermittlung die Verwendung von kartesischen NC-Achsen mit Bewegungen in x- und z-Richtung weitergegeben. Auf Basis dieser Daten kann ein Groblayout erstellt werden und eine Bewegungssimulation durchgeführt werden (Bild 55). Damit ist eine frühzeitige Überprüfung der Abtaktungsergebnisse möglich, die gegebenenfalls zu einer erneuten Abtaktung führt. Andernfalls kann das Groblayout weiter detailliert werden.

Durch die Weitergabe von Entscheidungsfaktoren als Restriktion und die Einführung von verschiedenen Abstraktionsebenen der Modelle, wie z. B. Layouts, kann die Konzepterstellung mit den nachfolgenden Planungsschritten verzahnt werden und damit können kleine Regelkreise realisiert werden [72].

Bei einer solchen Vorgehensweise sind sowohl kurze Planungszeiten, als auch gute Planungsergebnisse erzielbar. Ein weiterer Vorteil besteht darin, daß die einzelnen Planungsschritte entweder automatisiert, graphisch-interaktiv oder auch manuell durchgeführt werden können. Im Beispiel könnte die Vorranggraphenerstellung rechnergestützt, die Planung der Vorgabezeiten manuell, die Abtaktung automatisch und die Groblayouterstellung und Simulation graphisch-interaktiv erfolgen. Dies ermöglicht den schrittweisen Aufbau einer so komplexen Planungskette.

Da die Simulation eine wichtige Kontrollfunktion innerhalb der Planungskette bedeutet, sind graphische Planungssysteme auf der Basis von CAD-Systemen wesentlich für die Einführung derartiger Systeme. Dies gilt auch für den Einsatz von Datenbanken zur langfristigen Speicherung der Vielzahl an Planungsmodellen, -information und -ergebnissen.

Auf Basis dieser Daten können sowohl numerische Optimierungsrechnungen wie Abtaktungsprogramme oder wissensbasierte Planungen wie aufgabenorientierte Layouterstellung und Programmierung ausgeführt werden [73].

Die Entwicklung technischer Datenbanken mit der Integration von CAD-Systemen einerseits und die Entwicklung wissensbasierter Modelle in konventionellen DV-Umgebungen andererseits wird für die Realisierung einer integrierten Planung eine wesentliche Rolle spielen.

5.4 Modellnutzung in der flexiblen Produktion

Die Komplexität der simultanen Planung und Programmierung ist gekennzeichnet durch den Entscheidungsbaum aller möglichen Planalternativen. Da es sich hierbei um Neuplanung handelt und somit kreative Prozesse ablaufen, sind die Möglichkeiten für die Planung fast unbegrenzt.

Bei unflexibler Fertigung erfolgt die gesamte Planung vor der eigentlichen Produktion. Demzufolge muß sehr viel Aufwand in die Optimierung der einzelnen Planergebnisse gesteckt werden, um einen reibungslosen Fertigungsablauf garantieren zu können. Auftretende Planungsfehler können durch Maßnahmen der Auftragssteuerung nur in sehr geringem Umfang ausgeglichen werden.

Bei flexiblen Anlagen ist eine derartige Prozeßoptimierung nicht erforderlich und kann auch gar nicht durchgeführt werden, da das gesamte Produktspektrum zum Zeitpunkt der Planung noch gar nicht bekannt ist. Im Gegensatz zur unflexiblen Fertigung müssen Planungsfunktionen aufgrund von Neuaufträgen auch parallel zur Produktion ausgeführt werden. Da die Anlage bereits vorhanden ist, beschränkt sich der Planungsumfang auf die Fertigungshilfsmittelplanung und Programmerstellung. Wesentlich für einen effizienten Planungszyklus ist hierbei die enge Verknüpfung dieser Planungsfunktionen mit den vorhandenen CAD-Produktmodellen.

Zusätzlich zu diesen Planungsaufgaben müssen bei flexibler Fertigung Zuordnungsprobleme gelöst werden. Dabei müssen für die Produkte geeignete Fertigungsverfahren, Betriebsmittel und Werkzeuge ausgewählt werden. Im Gegensatz zur unflexiblen Fertigung muß ein Entscheidungsbaum durchlaufen werden, der anstelle möglicher Planalternativen bereits im Unternehmen vorhandenes Fertigungspotential enthält. Je mehr von diesem Fertigungspotential für Neuaufträge verwendet werden kann, desto geringer wird der anschließend zu durchlaufende Planungszyklus.

Das Durchlaufen des Entscheidungsbaumes entspricht den Aufgaben der Arbeitsplan- und Montageplanerstellung, die sukzessive folgendermaßen durchgeführt werden:

- Auswahl der Fertigungsverfahren-/Montagereihenfolge

- Auswahl der Betriebsmittel/Arbeitsplätze
- Auswahl/Planung von Fertigungshilfsmitteln
- Bestimmen der Vorgabezeit

Auswahlkriterien sind neben technologischen Randbedingungen vor allem die Stückzahlen und die Vorgabezeiten. Die Ergebnisse der Auswahlentscheidungen liegen direkt in Form der Arbeits- und Montagepläne vor. Diese bilden wiederum eine wesentliche Planungsgrundlage für die Auftrags- und Werkstattsteuerung.

5.4.1 Restriktionen für die Fertigungssteuerung durch die Planung

Auf der Basis der in den Arbeitsplänen enthaltenen Planungsergebnisse erfolgt durch PPS-Systeme für jeden Arbeitsgang eine Termin- und Kapazitätsplanung. Dazu werden die jedem Arbeitsgang zugeordneten Betriebsmittel und Vorgabezeiten verwendet, um Belastungsübersichten und Arbeitsgangterminierungen durchführen zu können.

Die zugehörigen Werkzeuge und NC-Programme für jeden Arbeitsgang werden für die eigentliche Disposition nicht benötigt, sondern nur auf ihre Verfügbarkeit hin überprüft. Bei vorliegender Verfügbarkeit wird ein Auftrag mit Stückzahl, Terminen und Kapazitätsbelegung an die Werkstattsteuerung übergeben. Die Aufgabe der Werkstattsteuerung besteht in der Feinsteuerung der Aufträge. Hierzu muß ein Abgleich zwischen den vom PPS-System vorgegebenen Planwerten und tatsächlichen Istwerten aus der Produktion vorgenommen werden. Dies erfolgt in einer Verfeinerung der Planwerte, da Zeiträume von Tagen und Wochen und zugehörige Kapazitätsgruppen auf einzelne Maschinen mit Zeitangaben in Stunden und Minuten zu übertragen sind.

Die Belegungsplanung, in der ein Abgleich zwischen Plan- und Istwerten erfolgt, wird in der konventionellen Werkstattsteuerung manuell durch den Meister vorgenommen. Aufgrund von Maschinenausfällen, Wartezeiten bei Transporten, limitierten Fertigungshilfsmitteln wie Paletten und Werkzeugen sowie Kapazitätsüberlastungen können die vorgegebenen Planwerte meist nicht realisiert werden. Der Meister weicht deshalb vom vorgegebenen Arbeitsplan ab und wählt eine Ersatzkapazität aus. Die Auswirkungen dieser Entscheidungen sind sehr schwierig zu bewerten und können in der darüberliegenden Planungsebene im PPS-System nur bei entsprechender Rückmeldung berücksichtigt werden.

Durch den Einsatz von Simulationssystemen wird deshalb versucht, Entscheidungen transparent zu machen, indem man Pläne am Modell überprüft und

Ablaufänderungen bewertet werden können [74]. Für die Durchführung der Simulation müssen alle Systemkomponenten der Werkstatt als Strukturmodell abgebildet sein. Bei der Planung können dann die Auswirkungen von Um-dispositionen im Hinblick auf Durchlaufzeit, Kapazitätsbelastung und Fertigungskosten bewertet werden. Ebenso ist es möglich, daß die Entscheidung über die beste Alternative bei Vorgabe eines Optimierungsziels vom System automatisch ermittelt wird.

Für den Einsatz derartiger Simulationssysteme müssen alle möglichen Planungsalternativen rechnerintern abgebildet sein. Dies betrifft zunächst für jeden Arbeitsgang die Abbildung von Ausweichmaschinen, um kapazitive Um-dispositionen vornehmen zu können. Falls diese nicht ausreichen, werden alternative Fertigungsabläufe benötigt, um technologische Um-dispositionen zu ermöglichen.

Herkömmliche lineare Arbeitspläne sind als Informationsgrundlage ungeeignet, da sie keinerlei Spielraum für Um-dispositionen lassen. Der Aufbau kompletter Alternativarbeitspläne, wie sie in PPS-Systemen vorgesehen sind, ist zum einen sehr speicheraufwendig, andererseits können Um-dispositionen während des Fertigungsablaufs nur umständlich ermittelt werden. Anstelle herkömmlicher Arbeitspläne wird daher die Verwendung flexibler Arbeitspläne in Form von Entscheidungsnetzplänen gefordert [75] [76].

Ein Entscheidungsnetzplan enthält dabei sämtliche alternativen Folgen an Arbeitsgängen, wobei jedem Arbeitsgang wiederum alle möglichen Betriebsmittel mit zugehörigen Werkzeugen und NC-Programmen zugeordnet sind.

Für die Arbeitsplanung ergeben sich hieraus völlig neue Anforderungen, da das Zuordnungsproblem entfällt und in die Werkstattsteuerung verschoben wird.

Für die Arbeitsplanung verbleibt damit die Aufgabe, den Entscheidungsnetzplan aufzubauen. Anstelle der Auswahl eines optimalen Fertigungsablaufs müssen jedoch alle möglichen Alternativen abgebildet und bewertet werden. Der optimale Fertigungsablauf wird als Standardablauf deklariert und dient als Ausgangspunkt für die Planung. Die übrigen Alternativen werden der Reihe nach geordnet und bei Um-dispositionen in Betrachtung gezogen.

Der Planungsaufwand steigt erheblich beim Aufbau von Entscheidungsnetzplänen, da im Gegensatz zur bisherigen hierarchischen Vorgehensweise, für jeden möglichen Fertigungsablauf die zugehörigen Fertigungsmittel bestimmt werden müssen. Die bisherigen Ansätze beschränken sich auf die Teilefertigung. Wesentlich hierbei ist die Bestimmung möglicher Fertigungsverfahren, da jedes Verfahren eigene Betriebsmittel, Werkzeuge und NC-Programme erforderlich macht. In der Montage dagegen sind diese Verfahren

durch die Produktkonstruktion fest definiert, so daß nur Spielraum bei der Reihenfolge dieser Verfahren verbleibt. Auf die Auswahl von Betriebsmitteln und Werkzeugen sowie die Programmerstellung haben Reihenfolgealternativen, die im Vorranggraph enthalten sind, nur dann Auswirkungen, wenn sich Arbeitsinhalte verschieben und damit der Arbeitsumfang für die einzelnen Montagezellen geändert wird.

Die Planung technologischer Alternativen führt somit in der Teilefertigung zu einem höheren Planungsaufwand bei der Betriebsmittelauswahl als in der Montage.

Entscheidend sind jedoch nicht die bisher betrachteten Zuordnungsaufgaben der Verfahrens- und Betriebsmittelauswahl, sondern die Planungsaufgaben, die durch die Planung kapazitiver Alternativen entstehen. Dies betrifft die Fertigungshilfsmittelplanung und die NC-Programmierung, deren Ergebnisse direkt in die reale Produktion eingehen und während der Belegungsplanung nur auf Verfügbarkeit überprüft werden [9]. Diese Tätigkeiten bilden die eigentliche Restriktion für die Belegungsplanung, die nur auf der abstrakten Beziehung zwischen Teilen, Fertigungsverfahren und Betriebsmitteln beruht und somit theoretisch höchst flexibel wäre.

Auf die Fertigungshilfsmittelplanung und NC-Programmierung entfällt ein wesentlicher Teil der Durchlaufzeit in der Planung. Besonders zeitaufwendig sind Neukonstruktionen von Sonderhilfsmitteln, da zusätzlich noch der Betriebsmittelbau durchlaufen werden muß. Umdispositionen im Rahmen der Belegungsplanung können deshalb nur vorgenommen werden, wenn entsprechende Werkzeuge und Vorrichtungen verfügbar sind. Aufwendige Neuplanungen sind nur für einen ausgewählten, optimierten Fertigungsablauf möglich. Dasselbe gilt für die NC-Programmerstellung, die nur durch neue Programmierkonzepte für unterschiedliche Alternativen möglich ist.

5.4.2 Programmerzeugung auf Steuerungsebene

Die Flexibilität der Belegungsplanung wird wesentlich eingeschränkt durch den Aufwand für die NC-Programmierung. Bereits das Ausweichen auf andere Werkzeuge hat meist Programmänderungen zur Folge. Die Erstellung und das Testen von NC-Programmen für mehrere Alternativen ist nicht realisierbar, da der Aufwand schon für eine einzige im Arbeitsplan vorgesehene Möglichkeit sehr hoch ist. Diese Situation wird noch dadurch verstärkt, daß durch die zunehmende Automatisierung der Anteil der Programmierung immer mehr wächst. Ohne eine steuerungsexterne Programmierung auf der Basis von Planungsdaten wären

flexible Anlagen wirtschaftlich nicht realisierbar. Ein weiteres Problem stellen die unterschiedlichen Steuerungen dar, die in einer Fertigungszelle zusammenwirken und durch verschiedene Methoden und Sprachen programmiert werden. Dies macht zunächst die Anwendung einer durchgängigen einheitlichen und benutzerfreundlichen Programmierung erforderlich. Ein Ansatz einer solchen steuerungsneutralen Sprache ist die Sprache BAPS (Bewegungs–Ablauf–Programmiersprache) [77]. Die Sprache BAPS ist eine problemorientierte, höhere Programmiersprache, die bisher für die Programmierung von Steuerungskombinationen bestehend aus Robotersteuerung, speicherprogrammierbarer Steuerung und Einachssteuerungen realisiert wurde.

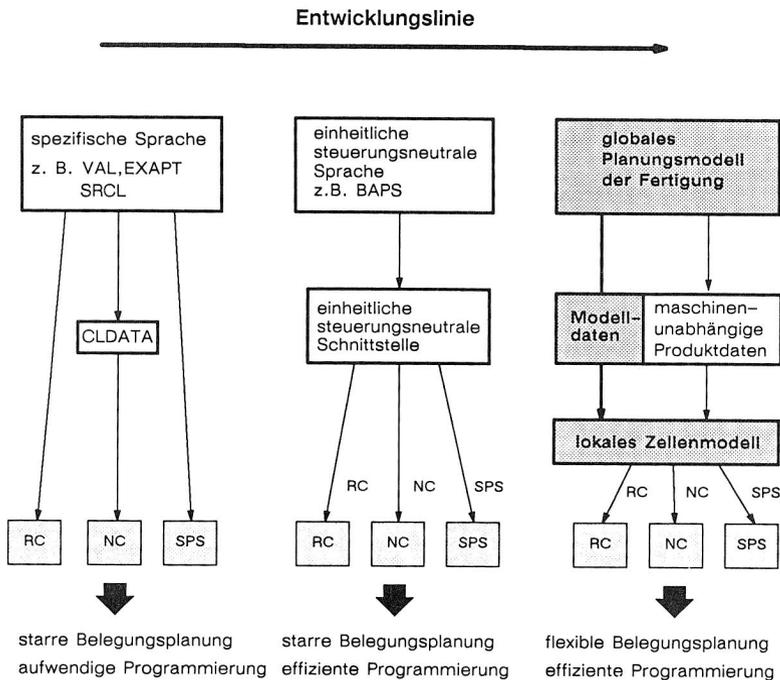


Bild 56: Entwicklungsstufen der Steuerungsprogrammierung

Für die Umsetzung einer steuerungsneutralen Sprache in den jeweiligen Steuerungscode sind standardisierte Schnittstellen erforderlich, die bisher erst in der NC-Fertigung in Form von CLDATA erfolgreich eingesetzt werden. Eine einheitliche steuerungsneutrale standardisierte Schnittstelle für unterschiedliche

Steuerungstypen und -fabrikate ist für eine Reduzierung des Programmieraufwandes notwendig. Durch die Verknüpfung mit Planungsmodellen könnten Fertigungszellen über eine derartige Schnittstelle effizient programmiert werden. Eine Erweiterung von IRDATA wird als Schnittstelle in [77] hierfür in Betracht gezogen. Neben der Steuerungsneutralität ist im Hinblick auf eine flexible Belegungsplanung für eine derartige Schnittstelle die Eigenschaft Maschineneinzelteilunabhängigkeit erforderlich. Im Gegensatz zu IRDATA ist dies bei der Schnittstelle CLDATA gewährleistet. CLDATA entspricht daher einem produktunabhängigen Teileprogramm. Die maschineneinzelteilunabhängigen Daten dagegen enthält der Postprozessor.

In der flexiblen Teilefertigung ist es daher möglich, bei Umdispositionen durch Postprozessorläufe schnell NC-Programme für eine Ausweichmaschine zu erstellen.

Eine flexible Belegungsplanung beliebiger Fertigungs- und Montagezellen ist daher nur durch die Entwicklung einer einheitlichen steuerungsneutralen und maschineneinzelteilunabhängigen Schnittstelle realisierbar (Bild 56).

Zur Erläuterung der drei Modelle soll eine Drehzelle mit integriertem Handhabungssystem betrachtet werden, die im Rahmen von Umdispositionsmaßnahmen als Ausweichkapazität bestimmt wird:

- im linken Modell kann aufgrund der Schnittstelle CLDATA durch einen Postprozessorlauf das NC-Teileprogramm erstellt werden. Die Programme für das Handhabungssystem müssen jedoch neu erstellt werden, weshalb eine kurzfristige Umdisposition nicht möglich ist.
- im mittleren Modell kann die gesamte Zelle durch eine steuerungsneutrale Sprache einheitlich programmiert werden. Eine kurzfristige Umdisposition ist jedoch nicht möglich, da das Zellenprogramm neu erstellt werden müsste.
- im rechten Modell ist ein maschineneinzelteilunabhängiges und steuerungsneutrales Zellenprogramm vorhanden. Eine schnelle Anpassung bei kurzfristiger Umdisposition ist daher möglich.

Um trotz fehlender Schnittstellen eine flexible Belegungsplanung zu ermöglichen, werden in der Praxis individuelle Lösungen entwickelt. Für die NC-Teilefertigung wird CLDATA verwendet, während für die Programmierung des Handhabungssystems ein lokales Modell in die Steuerung integriert wird.

Dieses Modell enthält die Abmessungen der Anlage sowie Standardabläufe des Handhabungssystems innerhalb der Zelle. Bei einer Umdisposition müssen somit

lediglich die produktabhängigen Parameter eingegeben werden, um ein fertiges Programm zu erzeugen. Dies betrifft im wesentlichen den Greifvorgang an der Werkstückablage und den Einlegevorgang am Spannfutter. Folgende Parameter sind dabei von Bedeutung:

- Greifdrehkopffosition beim Aufnehmen, Einlegen, Entnehmen und Ablegen von Roh- und Fertigteil
- Abstand und Anzahl, sowie x- und z-Maße von Roh- und Fertigteil in der Palette
- Spanndurchmesser von Roh- und Fertigteil, sowie Anfahrwege zum Einlegen und Entnehmen

Auf diese Weise läßt sich der Programmieraufwand sehr stark reduzieren und damit kann flexibel auf Umdispositionen reagiert werden.

Modellinformationen auf Steuerungsebene sind in automatisierten Fertigungssystemen aus zwei wesentlichen Gründen erforderlich:

- In der flexiblen Fertigung können bei Umdispositionen schnell Steuerprogramme erstellt werden.
- Bei auftretenden Störungen oder sensorgestützten Abläufen kann in der flexibel und starr automatisierten Fertigung schnell reagiert werden.

Besonders hoch sind somit die Anforderungen in der flexiblen Fertigung, da in der starr automatisierten Fertigung aufgrund des bekannten Produktspektrums eine Prozeßoptimierung möglich ist.

Während in der flexiblen NC-Teilfertigung bereits Lösungen existieren, fehlen entsprechende Konzepte für Roboterzellen. Aus technologischer Sicht sind flexible Roboterzellen in der elektronischen Montage und der Werkzeughandhabung realisierbar [78]. Der wirtschaftliche Einsatz wird jedoch meist durch fehlende Programmierkonzepte verhindert, was zu hohen Verlustzeiten führt.

Im folgenden wird deshalb die verteilte Programmgenerierung am Beispiel einer Bestückzelle aus der elektronischen Montage demonstriert (Bild 57).

Die untersuchte Roboterbestückzelle ist bei einem Unternehmen der Elektronikbranche im Einsatz, und wird zum Bestücken von Leiterplatten in kleineren bis mittleren Losgrößen eingesetzt.

Folgende Argumente lassen sich für den Einsatz von Robotern in der Leiterplattenbestückung anführen [79]:

- in Roboterbestückzellen können alle Bauelementgruppen – Standardbauelemente, Sonderbauelemente und SMD-Bauelemente (oberflächenmontierbare Bauelemente) – verarbeitet werden.
- Durch den Einsatz universeller Werkzeugwechselsysteme sind außer dem Bestücken weitere Verfahrensprozesse – Schrauben, Löten, Kleben, Prüfen – in die Zelle integrierbar.
- Roboterbestückzellen können in beliebigen Verkettungsstrukturen – Fertigungsinsel, taktunabhängige Verkettung, taktabhängige Verkettung – auch mit Handarbeitsplätzen kombiniert werden.

Der Aufbau der Zelle ist in Bild 57 dargestellt, wobei folgende Komponenten von Bedeutung sind:

- Bestückroboter
- Steuerung
- Werkzeugmagazin
- Zuführeinrichtungen für Bauelemente
- Leiterplattentransportsystem

Die Bestückzelle ist zur Bestückung von Sonderbauelementen in eine Fertigungslinie integriert. Über einen Barcodeleser werden Aufträge an den Zellenrechner übermittelt. Bei Auftragserteilung wird die vormontierte Baugruppe in einem Arbeitsspeicher abgelegt. Beim Einlegen in die Arbeitsspeicher muß sichergestellt sein, daß ein Bestückprogramm vorhanden ist. Die Anforderungen an das Programmierkonzept sind somit zum einen die Möglichkeit einer offline-Programmgenerierung und zum zweiten die Aufteilung in produktabhängige und -neutrale Daten, um die Fertigungssteuerung nicht einzuschränken.

Das Programmierkonzept ergibt sich aus einer Analyse der Planungsdaten, die ausgehend von der langfristigen Anlagenplanung bis hin zur kurzfristigen Auftragsabwicklung entstehen.

In der Anlagenplanung wird der Planungsprozeß durchlaufen, wie er in Kap. 5.3 beschrieben wurde. Da es sich um eine flexible Anlage handelt, sind kurze Planungszyklen für die Prozeßoptimierung nicht von so hoher Bedeutung wie in der starr automatisierten Montage. Wesentlich sind Layoutuntersuchungen mit Kollisions- und Taktzeitbetrachtungen, um die Bestückzelle im Hinblick auf die Aufgabenstellung zu optimieren.

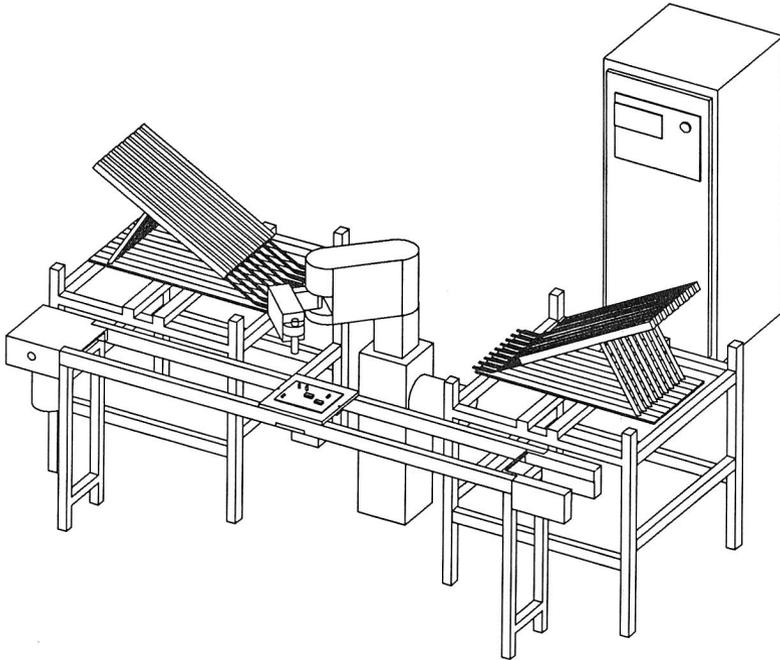


Bild 57: Layout der Roboterbestückzelle als CAD-Modell

Als Ergebnis der Anlagenplanung sind folgende Daten langfristig festgelegt (Bild 58):

- Werkzeugmagazin mit Abholposition
- Bauelementzuführungen mit Entnahmepositionen
- Fixierpunkte der Leiterplatten
- Definition von "Pick and Place"-Abläufen
- Bestückungsstrategien
- Greiferzuordnung für definierte Bauteile

Diese Modellinformationen sind auf Planungsebene rechnerintern abzuspeichern und beim Aufbau der Bestückzelle in die Steuerung zu integrieren. Auf Steuerungsebene bilden diese Modellinformationen den maschinenabhängigen Teil für die Programmgenerierung, was einem Postprozessor für die Montage entspricht.

Die produktabhängigen Daten werden im Rahmen der Auftragsabwicklung erzeugt. Innerhalb der Konstruktion erfolgt der Entwurf der Leiterplatten, wofür

elektronische CAD-Software eingesetzt wird. Damit sind die Bestückpositionen der Bauelemente auf der Leiterplatte festgelegt und im Planungsmodell abgebildet.

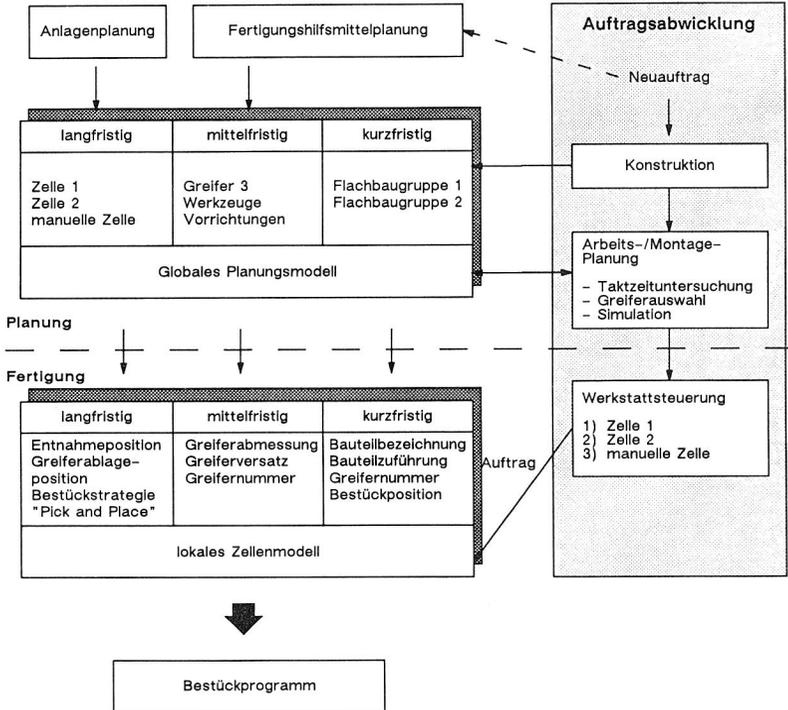


Bild 58: Verteilte Planungsmodelle in der Leiterplattenbestückung mit Industrierobotern

Innerhalb der anschließenden Montageplanung muß zunächst der Fertigungsablauf definiert werden, der anhand der Bauelementegruppen in der elektronischen Montage einfach bestimmt werden kann. Im nächsten Schritt erfolgt die Zuordnung der Fertigungszellen, die für eine flexible Belegungsplanung in der Reihenfolge ihrer Eignung an die Werkstattsteuerung übergeben werden. Für die Eignungsbewertung kann auf die Daten der Anlagen und Produkte im globalen Planungsmodell zugegriffen werden. Eine exakte Bewertung ist nur möglich, wenn aufgrund der vorhandenen Planungsdaten Taktzeituntersuchungen durchgeführt werden, anhand derer eine Wirtschaftlichkeitsbewertung ermöglicht wird.

Weiterhin muß für jedes Bauelement ein geeigneter Greifer ausgewählt werden. Die Fertigungshilfsmittelplanung wird angestoßen, wenn ein neuer Greifer konstruiert werden muß. Greiferabmessungen, Greiferversatz und Position im Werkzeugmagazin müssen in die lokale Zellensteuerung integriert werden. Aufgrund der Wechselwirkungen zwischen den Planungsschritten sind diese möglichst simultan durchzuführen (vgl. Kap 5.3). Neben den Alternativen für den Fertigungsablauf werden die produktabhängigen Daten an die Werkstattsteuerung übergeben. Bei neuen Bauelementen müssen Zuführungen zugeordnet werden oder sogar Umbauten an der Anlage vorgenommen werden, die jedoch kurzfristig nicht möglich sind.

In der Werkstattsteuerung wird aufgrund der vorliegenden Daten die Belegungsplanung durchgeführt und es werden Aufträge an die Bestückzellen verteilt. Bei Zuteilung eines Auftrags werden die produktabhängigen Daten an die Zellensteuerung übergeben. Aus diesen Daten können zusammen mit den Modellinformationen in der Zelle schnell Bestückprogramme generiert werden.

Die produktabhängige Programmierung erfolgt somit auf Planungsebene, die maschinenabhängige auf Steuerungsebene. Wesentlich ist hierbei, daß alle Modellinformationen der Zellensteuerung irgendwann in der Planung erzeugt wurden. Jede Modelländerung auf Fertigungsebene muß an die Planung zurückgemeldet werden. Die Modellinformationen werden dort zur Durchführung der einzelnen Planungsschritte benötigt. Die Übertragung maschinenneutraler Produktdaten und alternativer Fertigungszellen zwischen Planung und Steuerung stellt sehr hohe Anforderungen an die Standardisierung und Definition geeigneter Schnittstellen. Bedenkt man, daß der Ausgleich von Ungenauigkeiten zwischen Planung und Fertigung und damit eine weitergehende Automatisierung nur durch Sensorintegration ermöglicht wird, so müssen zukünftig Modellinformationen verstärkt an Sensorrechner übertragen werden. Derartige Sensormodelle werden auch in starr automatisierten Anlagen benötigt, so daß das vorgestellte Konzept verteilter Modellinformationen in beliebigen Automatisierungssystemen Bedeutung erlangt.

6. Ein Kostenmodell zur Bewertung von Planungsabläufen

Die Möglichkeiten und Auswirkungen des Rechneinsatzes innerhalb des Planungsablaufs wurden unter dem Gesichtspunkt der Integration in die Auftragsabwicklung dargestellt. Wesentlich war dabei die Wechselwirkung zwischen Fertigungsflexibilität einerseits und den möglichen Integrationsstufen in der Planung andererseits.

Die Komplexität der gegenseitigen Beziehungen bei der Gestaltung rechnerintegrierter Planungsabläufe, die mit einem hohen Kapitaleinsatz und organisatorischen Umstrukturierungen verbunden sind, machen eine wirtschaftliche Bewertung erforderlich, wobei die Meinungen über eine solche Bewertung weit auseinandergehen.

Vor allem in Großunternehmen wird der Nutzen rechnerintegrierter Systeme oftmals nur in strategischen Wettbewerbsvorteilen gesehen. Demgegenüber ist in kleinen und mittleren Unternehmen, die nur einen begrenzten Finanzrahmen zur Verfügung haben, die Meinung vorherrschend, daß sich CIM-Projekte analog zu klassischen Rationalisierungsprojekten über Kostensenkungen und Amortisationszeiten begründen lassen müssen.

Erschwerend kommt hinzu, daß die Eignung herkömmlicher Investitionsrechenverfahren für die Bewertung rechnergestützter Systeme bezweifelt wird. Diese Methoden beruhen auf einer Gegenüberstellung von Einnahmen und Ausgaben über verschiedene Perioden. Die Schwierigkeiten sind jedoch gerade in der Aufstellung dieser Zahlungsreihen und damit in der Datenerfassung begründet und nicht etwa in den Auswertungsmethoden. Die Schwierigkeit in der Datenerfassung, die bei der Bewertung von CIM-Investitionen zu Tage tritt, bestand bereits in der konventionellen Fertigung. Automatisierungsvorhaben auf Fertigungsebene wurden dabei über die Ausbringungsmenge und den damit direkt verbundenen Erlösveränderungen beurteilt. Weitere Einflußgrößen blieben meist unberücksichtigt, da sich die Bewertung auf Einzelobjekte bezog und damit in einem engen Systemrahmen durchgeführt wurde. Rechnerintegrierte Abläufe hingegen wirken sich in verschiedenen Bereichen innerhalb und außerhalb des Unternehmens aus und lassen sich nur sehr schwer über Stückzahlen und Erlösveränderungen beurteilen.

Voraussetzung für die Bewertung rechnergestützter Planungssysteme bilden aufgrund der beschriebenen Problematik die folgenden beiden Grundsätze:

- Ermittlung von Nutzengrößen, die sich über Einflußfaktoren direkt oder indirekt auf Kosten oder Erlöse auswirken

- Differenzierte Kostenerfassung, die eine verursachungsgerechte Zuordnung und Auswertung von Kostenwerten in Planung und Fertigung ermöglicht.

In den folgenden Abschnitten werden diese Grundsätze untersucht, um im abschließenden Kapitel die beschriebenen Planungskonzepte anhand konkreter Beispiele bewerten zu können.

6.1 Ermittlung übergreifender Nutzenwirkungen

Dem Ergebnis eines durchgängigen Informationsflusses steht nicht unmittelbar ein monetärer Nutzen gegenüber, wie dem Output eines Fertigungssystems in einem bestimmten Zeitraum. Dieses Fertigungssystem verursacht Material-, Personal- und Betriebsmittelkosten auf Fertigungsebene, denen eine Wertsteigerung als Anteil am späteren Erlös gegenübersteht. Die Festlegung dieser Kosten erfolgt jedoch im Planungsbereich. In der Konstruktion, Arbeits- und Montageplanung und im PPS-Bereich werden die Entscheidungen über die Anschaffung, Planung und Nutzung der Produktionsmittel getroffen. Diese Entscheidungen haben wesentlichen Einfluß auf die Kosten, die in der Teilefertigung und Montage einerseits und auf Planungsebene andererseits anfallen (Bild 59).

Allgemeinen Zahlen zufolge liegt der Anteil der Kostenfestlegung durch Konstruktion und Arbeitsvorbereitung zusammen bei ca 85% [80]. Aufgrund des hohen Automatisierungsgrades in der Teilefertigung gilt die Montage als Hauptbereich für die Kostenverursachung. Dies ergibt besondere Anforderungen für die Montageplanung und -steuerung.

Im Planungsbereich selbst werden jedoch nicht nur die Kosten für die Fertigungsebene festgelegt, sondern auch die Planungskosten verursacht. Aufgrund der geforderten Marktflexibilität und den sich daraus ergebenden hohen Planungszyklen wird der Anteil der Planungskosten an den Gesamtkosten immer höher. Verstärkt wird dies durch die kostenreduzierenden Rationalisierungsmaßnahmen auf Fertigungsebene.

Für den Einsatz von Planungssystemen ergeben sich damit zwei übergeordnete Nutzenziele:

- Senkung der Planungszeiten durch Entlastung der Benutzer von Routinetätigkeiten, um die Planungskosten zu reduzieren.

- Verbesserung der Planungsqualität durch Entscheidungsunterstützung für den Benutzer, um die Fertigungskosten zu reduzieren und die Erlöse zu erhöhen.

Hieraus ist bereits ersichtlich, daß sich der Einsatz von Planungssystemen sowohl auf Kosten, als auch auf Erlöse auswirken kann. Dieser Sachverhalt wird in der Literatur häufig als Innen- und Außenwirkung bezeichnet [81], da Kostenwirkungen innerhalb des Unternehmens auftreten, während Erlöswirkungen den Markt betreffen.

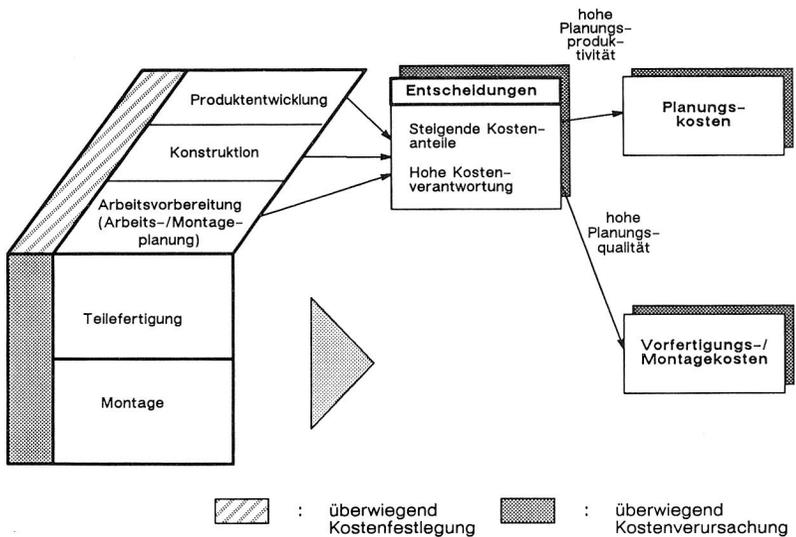


Bild 59: Kostenfestlegung/Kostenverursachung im technischen Bereich

Der Kostenaufwand, der mit dem Einsatz von Planungssystemen verbunden ist, läßt sich meist relativ einfach bestimmen [82]. Hierzu zählen folgende Kostenkategorien:

- Anschaffungskosten
- Planungskosten für die Konzepterarbeitung
- Kosten für Wartung und Pflege

- Einführungs- und Schulungskosten

Diese Kosten sind entweder durch vertragliche Vereinbarungen festgelegt, oder können unternehmensintern über Zeiten- und Kostensätze verrechnet werden.

Weitaus schwieriger ist es dagegen, die Kosteneinsparungen oder Erlössteigerungen zu quantifizieren, die mit dem Rechnereinsatz verbunden sind.

Qualitative Verfahren, wie die Nutzwertanalyse, versuchen Alternativen über Punktschichten zu bewerten, die das Ergebnis einer punktmäßigen Bewertung gewichteter Einzelkriterien darstellen. Eine solche Vorgehensweise ist bei bestimmten Entscheidungsproblemen durchaus sinnvoll, für eine Bewertung der Wirtschaftlichkeit von CIM-Investitionen jedoch ungeeignet [83]. Zum einen besteht ein hoher subjektiver Einfluß innerhalb der auszuführenden Schritte, andererseits lassen sich die Ergebnisse schlecht in Kostenvorgaben umsetzen und erschweren damit eine Kontrolle. Es ist deshalb notwendig, den Einfluß der Nutzengrößen auf die jeweilige Kostenart zu ermitteln und zu quantifizieren.

6.1.1 Nutzenkategorien

Die Nutzengrößen einer Rechnerintegration lassen sich nach zwei Gesichtspunkten unterscheiden, die bei einer schrittweisen Bewertung zu beachten sind (Bild 60):

- Wirkungsweise der Rechnerintegration
- Art der Kosten-/Erlösbeeinflussung durch die Integration

Die Wirkungsweise einer Rechnerintegration wird nach ihrem räumlichen Auftreten meist in Innen- und Außenwirkung unterteilt, wobei unternehmensintern eine weitere Unterteilung in die direkt betroffenen Funktionalbereiche und die nur indirekt betroffenen Bereiche vorzunehmen ist. Die direkt betroffenen Bereiche sind die Bereiche, in denen die Investition getätigt wird, d.h. alle Kosten der Systemeingührung werden diesen Bereichen zugerechnet. Bei Einführung eines CAD-Systems werden somit alle Kosten der Kostenstelle Konstruktion als direkt betroffenem Bereich zugerechnet, während der Nutzen einer beschleunigten NC-Programmierung in der indirekt betroffenen Kostenstelle NC-Programmierung auftritt. Dies zeigt, daß die herkömmliche Aufteilung eines Unternehmens in Kostenstellen, die als Profitcenters fungieren und über eigene Investi-

tionsbudgets verfügen, für eine Bewertung rechnergestützter Abläufe eher hinderlich ist. Eine solche Bewertung ist nur übergeordnet möglich, um die Nutzenwirkungen in verschiedenen Bereichen erfassen zu können.

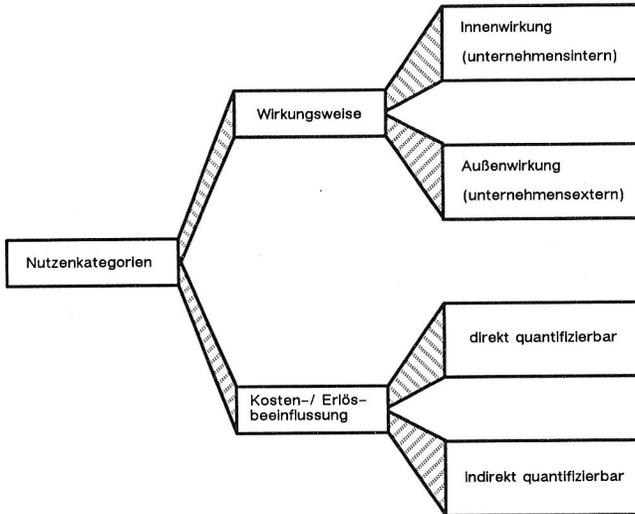


Bild 60: Gliederung der Nutzen in verschiedene Kategorien

Die Wirkungen der Rechnerintegration sollten deshalb zunächst weniger anhand räumlicher Gegebenheiten, als vielmehr anhand der funktionalen Informationsflüsse erfolgen. Dabei ist zu analysieren, inwieweit sich die Arbeitsinhalte durch den Rechnereinsatz verändern. Ausgehend von der konventionellen Planung ist eine Bewertung der Auswirkungen anhand der schrittweisen Integration vorzunehmen:

- Wirkung isolierter Systeme
- Wirkung gekoppelter Systeme
- Wirkung integrierter Systeme

Eine solche Nutzenaufteilung in Nutzen der Datenintegration und Funktionsintegration ist in [81] zu finden. Wesentlich ist dabei die weitere Unterteilung in

Nutzen, die unmittelbar mit dem Kommunikationsvorgang auftreten und solche Nutzen, die aufgrund einer verbesserten Informationsbasis der Aufgabenträger entstehen. Entsprechend dieser Aufteilung werden die beeinflussten Kosten als Kommunikations- und Autonomiekosten bezeichnet.

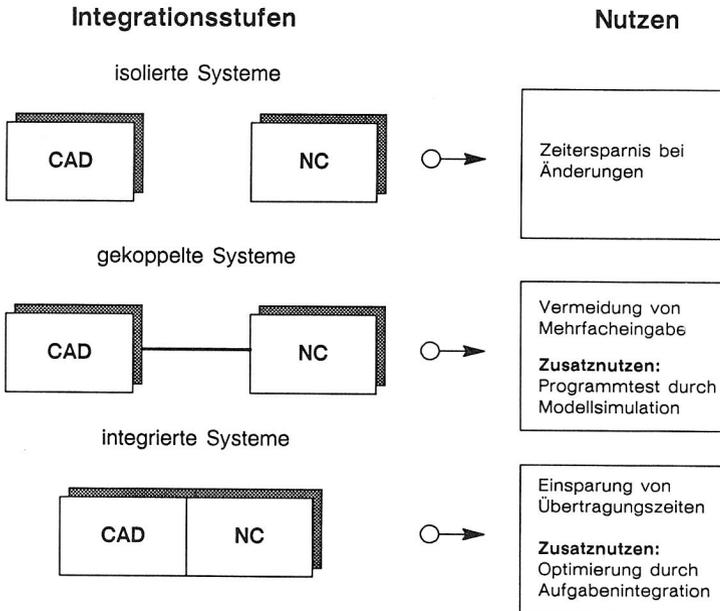


Bild 61: Nutzen der Integration

Beim Einsatz isolierter Systeme können die auftretenden Kosten und Nutzen im betroffenen Bereich direkt gegenübergestellt werden, da weitere Bereiche nicht berührt werden. Solche Systeme sind meist dort wirtschaftlich, wo der Eingabeaufwand nicht zu hoch ist und eine Verarbeitung von Massendaten wie in der kommerziellen EDV stattfindet.

Bei gekoppelten Systemen entsteht ein direkter Nutzen durch die Vermeidung von Mehrfacheingaben gleicher Daten. Daten für die Geometriedefinition in der NC-Programmierung können direkt aus dem CAD-System übernommen werden. Indirekt kann jedoch ein Zusatznutzen entstehen, wenn aufgrund der Datenintegration in der NC-Programmierung Modellsimulationen durchgeführt werden können.

Bei integrierten Systemen ergibt sich eine Verkürzung der Durchlaufzeiten aufgrund der Aufgabenintegration. Durch das Zusammenführen vormals getrennter Aufgaben ergibt sich gleichzeitig die Möglichkeit der Simultanplanung und damit eine verbesserte Planungsqualität durch Optimierung (Bild 61).

Steigende Integration bewirkt somit nicht nur Nutzengrößen aufgrund eines verkürzten Kommunikationsvorganges, die durch entsprechenden Mehraufwand kompensiert würden, sondern es entsteht ein Zusatznutzen, der auf die veränderte Datenbasis und die damit verbundenen Arbeitsinhalte zurückzuführen ist.

Ein wesentlicher Schritt bei der Bewertung rechnergestützter Planungssysteme stellt somit eine detaillierte Wirkungsanalyse dar, die Veränderungen auf bestehende Arbeitsabläufe und -inhalte aufzeigt. Im folgenden Schritt muß der Einfluß der dabei ermittelten Nutzgrößen auf Kosten und Erlöse aufgezeigt werden. Dabei ist der Gesichtspunkt der Art der Kosten-/Erlösbeeinflussung von Bedeutung.

Unterscheiden lassen sich Nutzgrößen, die direkten Einfluß auf Kosten oder Erlöse ausüben von solchen, die nur einen indirekten Bezug aufweisen.

Bei indirektem Einfluß müssen Wirkungsketten aufgebaut werden, um eine Bewertung über die Beeinflussung anderer Nutzengrößen zu ermöglichen. Eine exakte Quantifizierung ist jedoch generell nur möglich, wenn funktionale Beziehungen zwischen Nutzen- und Kosten/Erlösgrößen bestehen.

Andernfalls ist nur eine näherungsweise Quantifizierung über Schätzmethoden oder qualitative Aussagen möglich.

6.1.2 Monetäre Bewertung von Nutzengrößen

Der Nutzen rechnergestützter Systeme oder auch die Ziele, die mit diesen Systemen verfolgt werden, wird meist nicht in Form von Kosten- oder Erlöswerten, sondern über Bezugsgrößen angegeben. Häufig sind folgende Nutzenziele zu finden:

- Verkürzung der Durchlaufzeit
- Höhere Kapazitätsauslastung
- Weniger Terminüberschreitungen

- bessere Qualität
- höhere Flexibilität

Eine Ausnahme bilden die Personalkosten, deren Einsparung als Ziel aufgeführt wird, was auf die klassische Bewertung von Rationalisierungsvorhaben zurückzuführen ist. Für eine monetäre Bewertung von Nutzengrößen ist jedoch der Wirkungszusammenhang zwischen den genannten Bezugsgrößen und den relevanten Kosten- und Erlösarten transparent zu machen.

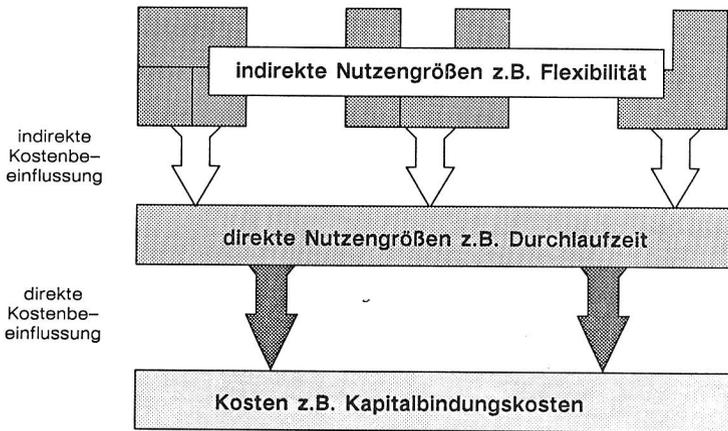


Bild 62: Aufbau einer Nutzenhierarchie

Ein Teil dieser Bezugsgrößen, wie die Durchlaufzeit oder Kapazitätsauslastung, stehen in direktem funktionalen Zusammenhang mit Kosten- und Erlösdaten, während Bezugsgrößen wie die Flexibilität nur indirekte Kostenwirkungen ausüben.

Eine monetäre Bewertung ist somit nur möglich, wenn eine Nutzenhierarchie entsprechend Bild 62 aufgebaut wird.

Dabei müssen zum einen Wirkzusammenhänge zwischen indirekten und direkten Nutzen und andererseits zwischen direkten Nutzen und Kosten- und Erlösdaten ermittelt werden.

Die Ermittlung dieser Zusammenhänge kann rein qualitativ bereits sehr aufwendig sein, noch schwieriger ist es jedoch, den quantitativen Einfluß zwischen

Nutzengrößen einerseits und zwischen Nutzen und Kosten andererseits zu bestimmen.

Ausgangspunkt einer Quantifizierung sind dabei die zugrundeliegenden Kosten- und Erlösfunktionen.

Diese können meist auf die Kostensätze für Personal, Betriebsmittel und Material zurückgeführt werden, die mit Mengen- und Zeitwerten gewichtet werden:

- Materialkosten = Preis x Menge
- Maschinenkosten = Stundensatz x Zeit

Da sich der Rechnereinsatz auf Informationsflüsse und Arbeitsinhalt auswirkt, sollten diese elementaren Funktionen entsprechend der auszuführenden Funktionen zusammengefaßt werden. Dadurch können Kostenwirkungen, die durch Veränderungen im Arbeitsablauf entstehen, in verschiedenen Bereichen, die betroffen sind, erfaßt werden.

Eine Nutzenbewertung über die Veränderung von Bezugsgrößen in der Planung ist nur dann möglich, wenn auf Planungsebene eine Plandatenerfassung analog zur Betriebsdatenerfassung auf Fertigungsebene durchgeführt wird. Dies ist jedoch nur dort sinnvoll, wo determinierte Planungsabläufe vorliegen, da kreative Entscheidungsprozesse nicht in Zeit- und Mengengrößen gepreßt werden können. Der Rechnereinsatz ist jedoch, abgesehen von Expertensystementwicklungen, gerade dort sinnvoll, wo Abläufe strukturiert und algorithmierbar sind. Auswirkungen der Daten- und Funktionsintegration auf die Entscheidungsbasis und damit verbundene Kostenwirkungen können dann simuliert und bewertet werden.

Als Beispiel sei hier die Belegungsplanung in der Werkstattsteuerung genannt, wo Ausgangsdaten über verschiedene Strategien simuliert und Auswirkungen transparent gemacht werden (vgl. Kap 5.4.1). In [84] werden die Auswirkungen von Simulationsergebnissen kostenmäßig aufgezeigt. Damit ist es möglich den Nutzen zu quantifizieren, der sich als Zusatznutzen aufgrund verbesserter Ausgangsdaten ergibt. Es verbleiben jedoch Nutzen, die, wie z.B. größere Arbeitszufriedenheit, im menschlichen oder organisatorischen Bereich liegen oder durch externe Einflüsse entstehen und sich einer Quantifizierung entziehen.

Diese Nutzen müssen über Mitarbeiterbefragungen oder durch Schätzen quantifizierbar gemacht werden, um die Entscheidungsgrundlage für die Bewertung zu verbessern.

Ein Beispiel soll die Zusammenhänge verdeutlichen (Bild 63). In der Kostenstelle Fertigung fallen Rüstkosten durch mechanische Rüstarbeiten und Programmierertätigkeiten an. Durch den Einsatz eines Planungssystems kann ein Teil dieser Programmierertätigkeiten in der Planung durchgeführt werden. Die Auswirkungen dieser Maßnahme können über den dargestellten Kostenzusammenhang ermittelt werden.

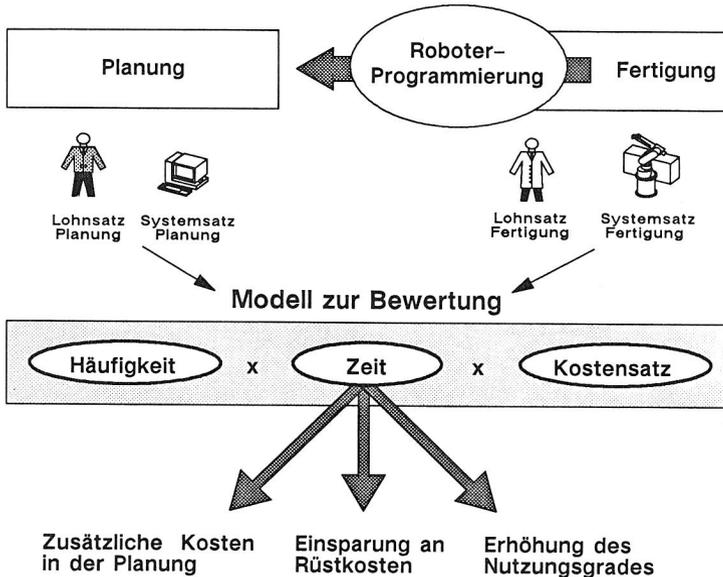


Bild 63: Wirkungsketten von Nutzen bei veränderter Aufgabenstellung

Die kürzere Rüstzeit bewirkt eine direkte Einsparung an Rüstkosten. Gleichzeitig erhöht sich der Nutzungsgrad der Anlage, was zu einer höheren Ausbringung und damit zu einem höheren Erlös führt, falls keine sonstigen Fertigungs- und Markteinflüsse vorliegen. In der Planung ergeben sich zusätzliche Kosten, die vom eingesetzten System und der damit verbundenen Planungszeit abhängen. Dies zeigt, wie durch Einsatz eines Planungssystems vielschichtige Kosten- und Erlöswirkungen auftreten können.

Ein großes Problem bei der Nutzenbewertung ergibt sich daraus, daß in der Planung im Gegensatz zur Fertigung meist keine Vergleichsbasis gegeben ist. In

vielen Unternehmen verbirgt sich der gesamte Planungsbereich hinter Gemeinkostenzuschlagssätzen, die einmal jährlich Veränderungen angepaßt werden [85]. Auf einer solchen Datenbasis ist eine Bewertung von CIM-Komponenten kaum möglich.

Generell gilt, daß eine Nichtberücksichtigung von Nutzengrößen einer Bewertung mit Null entspricht, was immer willkürlicher ist, als irgendeine Zahl, die auf fundierter Schätzung beruht. Für eine solche Schätzung wird in [86] der Grundsatz angeführt:

” Lieber vage richtig, als exakt falsch ”.

In [83] wird ein stufenweises Vorgehen empfohlen, bei der zunächst die monetär quantifizierbaren Kostengrößen, anschließend die schwer quantifizierbaren und zuletzt Markteinflußgrößen ins Kalkül gezogen werden. Bei diesem Vorgehen wird das Risiko der Investitionsentscheidung schrittweise transparent gemacht.

6.2 Ablauforientierte Kostenrechnung

6.2.1 Entscheidungsorientierte Grundrechnung

Um den oben genannten Anforderungen gerecht werden zu können, wird die Grundlage eines Konzepts zur Wirtschaftlichkeitsanalyse von einer Datenbasis mit zweckneutraler Kostenerfassung (Grundrechnung) gebildet. Eine neutrale Datenerfassung ermöglicht die verursachungsgerechte Verrechnung der Kosten und vielfältige Auswertungsmöglichkeiten. Auf die Grundrechnung bauen verschiedene Standardauswertungen auf, die jederzeit durch weitere Applikationen ergänzt werden können.

Vorrangiges Ziel der Grundrechnung ist die Bereitstellung von relevanten Kosten und Erlösen für eine nicht vollständig erfaßbare Anzahl von unterschiedlichen Auswertungsaufgaben, die zum Zeitpunkt der Konzeption noch nicht in ihrer Gesamtheit bekannt sind [87]. Da jede Entscheidungssituation die Berücksichtigung unterschiedlicher Kosten und Erlöse erfordert und sich die relevanten Kosten und Erlöse grundsätzlich nur fallweise für ganz bestimmte Fragestellungen und Situationen ermitteln lassen, werden an die Konzeption einer Grundrechnung bezüglich der Verfügbarkeit von Informationen hohe Anforderungen gestellt.

Die Grundrechnung kann als kombinierte Kostenstellen-, Kostenarten- und Kostenträgerrechnung bezeichnet werden. Sie enthält alle in den einzelnen

anfallenden Kostenarten, die den jeweiligen Bezugsobjekten zugeordnet werden. Die Grundrechnung sollte als flexibles System konzipiert werden, so daß sie leicht an veränderte Fragestellungen angepaßt werden kann. Sie muß in der Lage sein, für möglichst alle Entscheidungssituationen, die in der Realität auftreten können, Kosten- und Erlösdaten zur Verfügung zu stellen.

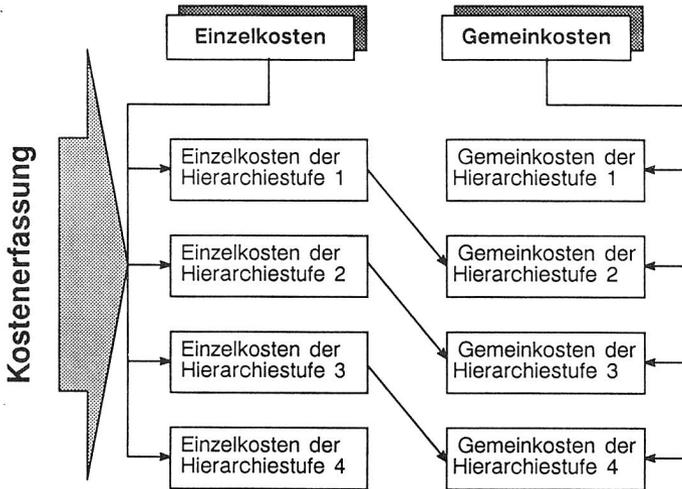


Bild 64: Zuordnung von Kostengrößen in der Grundrechnung

Beim Entwurf der Grundrechnung ist darauf zu achten, daß nicht durch einseitige Verdichtungen oder Bewertungen bestimmte Auswertungszwecke bevorzugt werden. Die Kosten- und Erlösinformationen dürfen nur elementar bzw. nicht aggregiert abgespeichert werden. Bei einer Zusammenfassung könnten eventuell Einzelinformationen verlorengehen, die für zukünftige Auswertungszwecke noch benötigt werden [88].

Die einzelnen Kosten- und Ertragsgrößen sind in der Grundrechnung dem jeweils speziellsten Bezugsobjekt zuzurechnen, also demjenigen Zurechnungsobjekt, das die unterste Stelle der betrieblichen Bezugsobjekthierarchie bildet, in der die Rechnungsgröße gerade noch als Einzelkostenbetrag ausgewiesen wer-

den kann. Die Lohnkosten eines in der Montage beschäftigten Mitarbeiters, der unterschiedliche Tätigkeiten ausführt, sind dementsprechend dem Kostenbereich Montage zuzuordnen. Arbeitet dieses Belegschaftsmitglied ausschließlich an einer bestimmten Montagezelle, so werden die Lohnkosten als Kostenstelleneinzelkosten dieser Montagezelle erfaßt. Stellt der Arbeitnehmer nur ein einzelnes Produkt her, können die Lohnkosten direkt diesem Kostenträger zugeordnet werden.

In Bezug auf speziellere, in der Zurechnungshierarchie tiefer eingeordnete Kalkulationsobjekte, z.B. Kostenstellen des Kostenbereichs Montage, sind die als Einzelkosten erfaßten Rechnungsgrößen den Gemeinkosten zuzurechnen (Bild 64). Das Gehalt des Bereichsleiters Montage zählt beispielsweise zu den Einzelkosten des Kostenbereichs Montage, für deren einzelne Kostenstellen stellt es jedoch Gemeinkosten dar.

Diese Art der Datenerfassung entspricht dem Verursachungsprinzip und ermöglicht das Rechnen mit relativen Einzelkosten. Es ist in jedem Fall darauf zu achten, daß unter keinen Umständen eine Schlüsselung von Gemeinkosten bereits in der Grundrechnung vorgenommen wird, da dies einen sehr hohen Informationsverlust nach sich ziehen würde. Gemeinkosten sind einer höheren Stufe der Bezugsobjekthierarchie zuzuordnen, in der sie dann Einzelkosten darstellen, oder sie sind bei mehreren Bezugsobjekten gleichzeitig zu erfassen.

Ein weiterer wichtiger Aspekt der Grundrechnung ist die Berücksichtigung des zeitlichen Horizonts. Damit soll erreicht werden, daß in Abhängigkeit des Zeitbezugs einer Entscheidungssituation nur diejenigen Kosten und Erlöse aus der Grundrechnung selektiert werden, die in dem entsprechenden Zeitraum auch disponierbar sind.

6.2.2 Kostenkategorien und Bezugsobjekthierarchie

Für eine zweckneutrale und verursachungsgerechte Kostenerfassung ist es nicht ausreichend, die Kosten in die üblichen Kostenkategorien 'fix' und 'variabel' aufzuteilen. Beide Kostenkategorien sind sehr stark vom zeitlichen Horizont der Entscheidung abhängig, so daß keine allgemein gültige und sachlogisch korrekte Aufteilung ohne Berücksichtigung der zeitlichen Disponierbarkeit vorgenommen werden kann. Da die Grundrechnung Daten für möglichst alle Entscheidungssituationen zur Verfügung stellen sollte, wird die zeitunabhängige Einteilung in Leistungs- und Bereitschaftskosten gewählt (Bild 65) [89].

Die Leistungskosten sind in ihrer Höhe direkt vom Produktionsprogramm abhängig und variieren ohne zusätzliche Entscheidungen mit der Art und der

Menge der erstellten Leistungen. Eine weitere Untergliederung kann nach den Kriterien Stück-, Los- und Zeitabhängigkeit erfolgen [96]. Stückabhängige Leistungskosten sind z.B. die Materialkosten eines Werkstücks und verändern sich direkt mit der Menge der montierten Produkte. Kosten, die eindeutig einem bestimmten Los zuzuordnen sind, wie Rüstkosten oder Konstruktions- und Programmierleistungen für ein Sonderlos, werden als losabhängige Kosten bezeichnet. Verändern sich Kosten in Abhängigkeit der in Anspruch genommenen Montagezeit, so handelt es sich um zeitabhängige Leistungskosten. Energie- oder Instandhaltungskosten, die jeweils nach einer gewissen Betriebsdauer einer Anlage anfallen, sind der Kategorie zeitabhängige Kosten zuzurechnen.

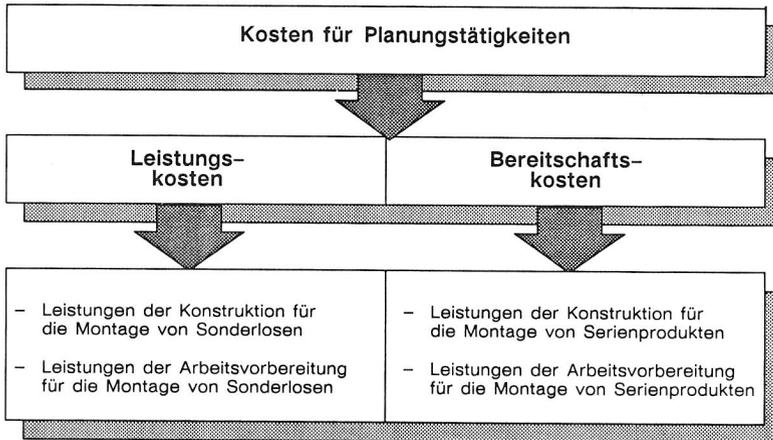


Bild 65: Gliederung der Planungskosten in Leistungs- und Bereitschaftskosten (nach [90])

Alle Kosten, die kurzfristig nicht veränderbar sind oder nur aufgrund von Entscheidungen, z.B. Einstellung oder Entlassung von Arbeitskräften, Anmietung von Gebäuden oder Kauf von Anlagen, variieren, werden den Bereitschaftskosten zugeordnet. Die Bereitschaftskosten können weiter in einmalig anfallende und wiederkehrende Kosten aufgeteilt werden.

Auch die Kosten für Planungstätigkeiten können in beiden Kostenkategorien auftreten. Während die Leistungen von Konstruktion und Arbeitsvorbereitung für Serienprodukte, wie Konstruktionszeichnungen, Stücklisten oder NC-Programme, unabhängig von der Anzahl der gefertigten Lose nur einmal zu erstellen sind und deshalb den einmalig anfallenden Bereitschaftskosten zugeordnet werden, sind dieselben Leistungen für einmalige Sonderlose bei den losabhängigen Leistungskosten auszuweisen (Bild 65). Die Anzahl der in beiden Kostenkategorien auftretenden Kostenarten ist sehr stark vom Differenzierungsgrad der Kostenartenhierarchie abhängig.

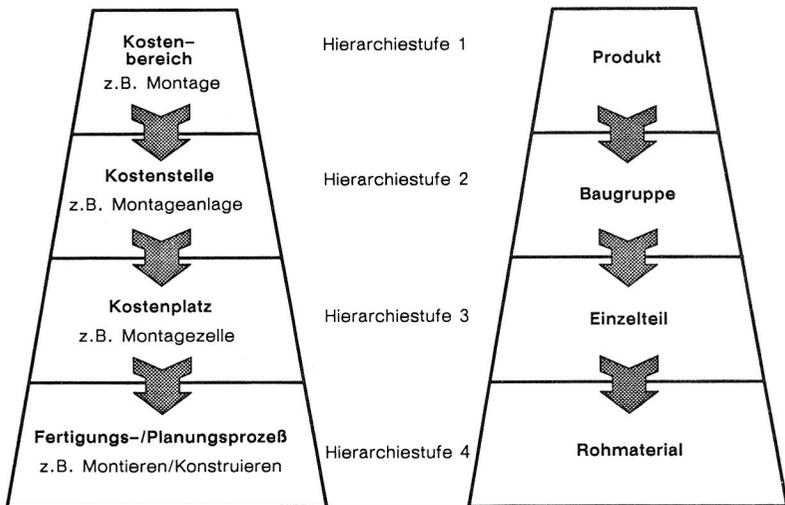


Bild 66: Kostenstellen- u. Kostenträgerhierarchie

Die Forderung, daß in der Grundrechnung weder homogene Elemente aufgeschlüsselt oder verrechnet noch heterogene Rechnungsgrößen zusammengefaßt werden sollten, sondern alle Kosten nach dem Identitätsprinzip dem jeweils speziellsten Bezugsobjekt zuzuordnen sind, führt zur Bildung einer sehr differenzierten und hierarchisch gegliederten Bezugsgrößenordnung (Bild 66).

Die Gliederung der Bezugsobjekte ist stark vom betrieblichen Aufbau der Unternehmung und der im Vordergrund der Auswertung stehenden Fragestellungen abhängig, wobei eine zu differenzierte Aufteilung aus wirtschaftlichen Gesichtspunkten nicht vorgenommen werden sollte.

Der hierarchische Aufbau der Bezugsobjektstruktur wurde gewählt, um die Möglichkeit zu schaffen, Abhängigkeiten einzelner Komponenten zu ihrem Umfeld einfach darzustellen. Damit wird erreicht, daß Informationen von einzelnen Geräten bis hin zum Unternehmensbereich Montage und ihre entsprechenden Wirkungen auf die jeweils übergeordneten Kostenstellen oder -bereiche für die Entscheidungsunterstützung zur Verfügung gestellt werden können. Die Kostenträgerhierarchie wird nach denselben Kriterien gebildet und ist im wesentlichen vom Produktaufbau abhängig.

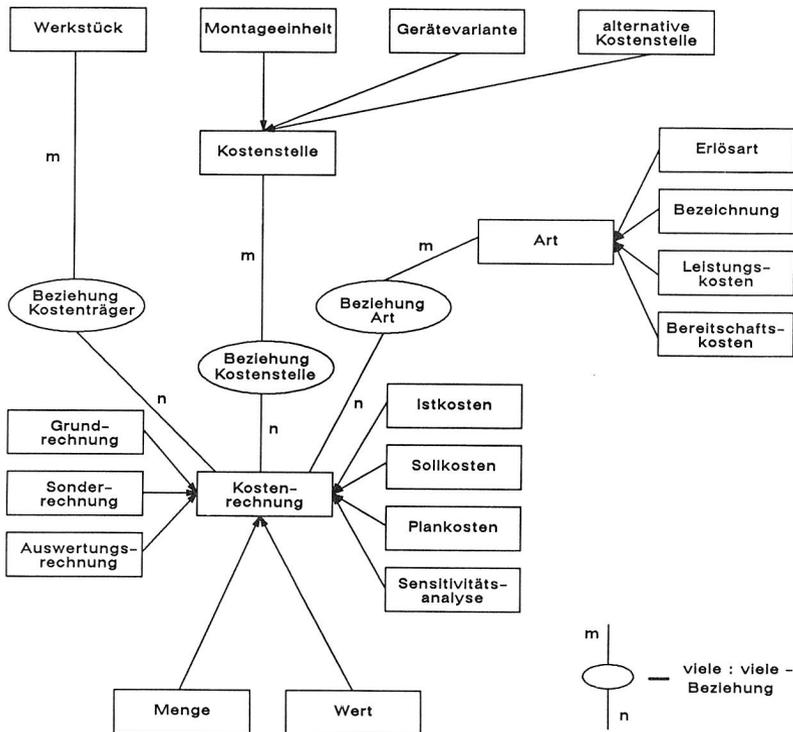


Bild 67: Schema der Objekte und Beziehungen für das Kostenmodell

Auch diese Hierarchie ist sehr tief gegliedert, da die Möglichkeit gegeben sein sollte, alle Kosten, die durch eine produktbezogene Entscheidung verursacht werden, direkt beim entsprechenden Kostenträger zu erfassen. Damit kann über

jedes Einzelteil, das in ein Produkt eingeht, getrennt disponiert werden. Dies ist beispielsweise von Bedeutung, wenn über Eigenfertigung oder Fremdbezug eines Einzelteiles entschieden werden muß.

Die jeweiligen Bezugsobjekthierarchien sind nicht voneinander unabhängig, sondern überschneiden sich teilweise. Wird in einer Montagezelle nur ein einzelnes Werkstück gefertigt, sind alle Einzelkosten dieser Zelle zugleich auch Einzelkosten des Werkstücks. Die unterschiedlichen Zurechnungsstrukturen sind nicht als gegensätzliche, sich ausschließende Bezugsobjekthierarchien zu verstehen, sondern machen parallele Mehrfachzuordnungen von Kosten für heterogene Auswertungen möglich.

Für die Verwaltung von großen Datenbeständen, die bei einer Grundrechnung anfallen, bietet sich die Verwendung eines Datenbankmanagementsystems an [91]. Die Informationen können in einem eigenständigen, von speziellen Anwendungen unabhängigen Organisationskonzept gespeichert werden. Durch die Integration der Daten werden die unterschiedlichsten Auswertungsmöglichkeiten geschaffen, was eine elementare Voraussetzung für den Aufbau einer Grundrechnung ist.

Die zentrale Speicherung aller Informationen in einer Datenbank verringert redundante Datenhaltung. Dadurch können Speicherplatz eingespart und Änderungsanomalien verhindert werden. Die Flexibilität und Benutzerfreundlichkeit wird besonderes bei ad hoc-Auswertungen durch den Einsatz von anwenderfreundlichen Abfragesprachen gesteigert. Das konzeptionelle Schema der Grundrechnung wurde deshalb auf dem relationalen Datenbankmanagementsystem INGRES implementiert (Bild 67).

Die Bezugsobjekthierarchie der Grundrechnung wird durch die beiden Begriffe Kostenstelle und Werkstück repräsentiert. Diese beiden Objekttypen bilden zugleich die Schnittstelle zu dem bereits implementierten Datenbankschema für die Montageanlagenplanung [66]. Für die Kostenstellenhierarchie mußte eine zusätzliche Komponente konstruiert werden, da die Tabellen Montageeinheit und Gerät/Gerätevariante nicht in der Lage sind, alle möglicherweise auftretenden Kostenstellen aufzunehmen. Der neu gebildete Objekttyp Kostenstelle erlaubt es, auch Kostenbereiche, wie Konstruktion oder Datenverarbeitung, in die Kostenstellenhierarchie zu integrieren.

6.2.3 Auswertungsrechnung

Aufbauend auf die Grundrechnung liefern diverse Auswertungen Informationen zu den jeweiligen Entscheidungssituationen, indem sie auf die in der Grundrech-

nung erfaßten Daten zurückgreifen. Die Genauigkeit der ermittelten Kennwerte hängt einerseits von der gewählten Methode ab, andererseits wird sie sehr stark von den zur Verfügung stehenden Daten beeinflusst.

In den Moduln zur Sonder- und Auswertungsrechnung werden die entscheidungsrelevanten Kosten für konkret auftretende Problemstellungen nach ihren jeweiligen spezifischen Anforderungen gesondert aus der Grundrechnung extrahiert. Die Verdichtung der Daten und die Ermittlung von Kennwerten, z.B. Maschinenstundensätze oder Kapitalwerte, erfolgt über Algorithmen der Kosten- bzw. Investitionsrechnung. Je nach zeitlichem Horizont der Entscheidung, kurzfristig oder langfristig, werden Methoden der Kosten- oder der Investitionsrechnung angewandt (Bild 68).

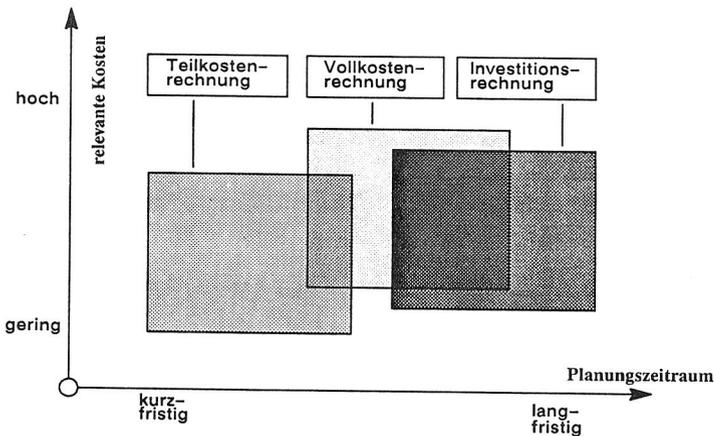


Bild 68: Zeitlicher Bezug von Kostenrechnungssystemen

Eine entscheidungsorientierte Kostenrechnung hat die Aufgabe, wertmäßige Informationen zur Entscheidungsunterstützung zu liefern. Diese Funktion kann ein Kostenrechnungssystem nur erfüllen, wenn es in der Lage ist, alle wesentlichen Konsequenzen einer betrieblichen Entscheidung abzubilden. Zur Bewertung der einzelnen Entscheidungsalternativen dürfen nur die durch die Entscheidung beeinflussten relevanten Kosten berücksichtigt werden.

Das System der Einzelkosten- und Deckungsbeitragsrechnung scheint am besten geeignet zu sein, die geschilderte Problematik zu lösen. Die Deckungsbeitragsrechnung ist eine retrograde Rechnung, in der ausgehend von

den Erlösen zunächst die Leistungskosten und dann die weiteren dem entsprechenden Bezugsobjekt zugeordneten Einzelkosten abgezogen werden (Bild 69). Die Reihenfolge und die Auswahl der abzurechnenden Kosten ist von der jeweiligen Fragestellung abhängig. Der Deckungsbeitrag wird von "Riebel" als Überschuß der Einzelerlöse eines Bezugsobjekts über dessen zurechenbare Einzelkosten definiert [92].

INVESTITIONS- UND KOSTENRECHNUNG

DATEI
END
Datenbank
Dateneingabe
Auswertung

Kostenstelle
--> manuelle Zelle

Alternative
Sensitivitätsanalyse

alternative
Kostenstelle
--> Montagezelle

Produkt/Produktgruppe
--> Schaltelement

Periode (von -> bis)
von --> 1
bis --> 2

Mengenänderung(%)
--> 0.00

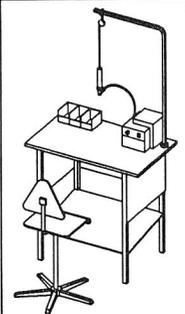
Preisänderung(%)
--> 0.00

gewünschter DB (DM)
--> 0.00

anfragen

Deckungsbeitrag

	Kostenstelle
ERLÖSE (DM)	--> 3.05E+006
./. Materialkosten	--> 734530.00
./. Maschinenkosten	--> 6380.00
./. Peripheriekosten	--> 37820.00
./. Personalkosten	--> 54300.00
./. sonstige Leistungskosten	--> 10270.00
S U M M E Leistungskosten	
D B 1	--> 2.21E+006
./. Betriebsmittel BK	--> 5300.00
./. Personal BK	--> 146920.00
./. sonstige BK	--> 9140.00
S U M M E BK	
D B 2	--> 161360.00
	--> 2.05E+006



Layout
naechste Seite

Bild 69: Benutzeroberfläche des realisierten Systems

Voraussetzung für die Berechnung von Deckungsbeiträgen nach den Prinzipien der Einzelkosten- und Deckungsbeitragsrechnung ist, daß sämtliche Kosten als Einzelkosten erfaßt, die Bereitschaftskosten nicht proportionalisiert und echte Gemeinkosten nicht geschlüsselt werden.

Auf welche Art die Deckungsbeitragsrechnung durchgeführt und wie der Block der Gemeinkosten verrechnet wird, hängt im wesentlichen von der Fragestellung und der Bezugsobjekthierarchie der Grundrechnung ab. Neben der Differenzierung der Deckungsbeiträge nach Kostenstellen und Kostenträgern kann auch eine Aufteilung nach Kostenkategorien vorgenommen werden. Die Bildung von Kostenkategorien in der Grundrechnung (Kostenartenhierarchie) erlaubt es, die Deckungsbeitragsrechnung so zu variieren, daß zunächst nur ganz bestimmte Kostenkategorien von den Bezugsobjekten abgedeckt werden.

Zur Bewertung langfristiger Entscheidungen werden in der betrieblichen Praxis die Methoden der statischen und dynamischen Investitionsrechnung angewandt. Auch diese Verfahren basieren auf den Daten der Grundrechnung.

Da Kennzahlen zur Lösung kurz- und mittelfristiger Entscheidungsprobleme über die Kostenrechnung ermittelt werden können, wird die Investitionsrechnung meist zur Unterstützung von langfristigen Entscheidungen herangezogen. Aus diesem Grund scheinen die dynamischen Verfahren wegen der Berücksichtigung der zeitraumbezogenen Entwicklung der Daten eines Investitionsobjekts für die Zwecke der langfristigen Planung besser geeignet zu sein.

Die dynamischen Methoden arbeiten im Gegensatz zu den statischen Verfahren grundsätzlich nicht mit Durchschnittswerten, sondern berücksichtigen auch längerfristige Wirkungen. Die Forderung Zinseffekte in die Berechnungen mit einzubeziehen, läßt sich darauf zurückführen, daß gleichhohe Zahlungen, die einer Investitionsalternative zu verschiedenen Zeitpunkten zugeordnet werden, nicht identisch bewertet werden können. Aus diesem Grund erfolgt bei den dynamischen Verfahren die Ermittlung von Barwerten, um Unterschiede im zeitlichen Anfall von Zahlungen auszugleichen.

Die verschiedenen Rechenalgorithmen der statischen und dynamischen Investitionsrechnung und deren jeweilige Vor- und Nachteile sind in der Finanzierungsliteratur ausführlich diskutiert worden, so daß an dieser Stelle auf eine erneute Darstellung verzichtet werden kann [93].

6.2.4 Abbildung von Planungsprozessen

Durch die flexible Automatisierung in der Produktion erfolgt eine Verschiebung von produktiven zu dispositiven Tätigkeiten. Mit der zunehmenden Variantenvielfalt gewinnen Planungsaufgaben wie die Konstruktion, Arbeitsplanung und Arbeitssteuerung immer mehr an Bedeutung. Verstärkt wird diese Situation für die Planung noch zusätzlich durch sinkende Produktlebensdauern.

Diese Entwicklung führt zu einem wachsenden Anteil der Kosten aus den planenden Bereichen an den Gesamtkosten. Die Verrechnung dieser Kosten erfolgt üblicherweise über Gemeinkostenzuschlagsätze auf der Basis von Fertigungslöhnen oder Maschinenlaufzeiten. Die eingesetzten Kostenrechnungsverfahren sind auf Entscheidungssituationen in der Produktion ausgerichtet und können die Anforderungen an Kostentransparenz in Gemeinkostenbereichen nicht erfüllen [94].

Der fortschreitende Einsatz von CIM-Systemen auch im Planungsbereich führt zu neuen Fragestellungen bei der Auswahl und Einführung dieser Systeme. In Kostenanalysen muß dabei auch berücksichtigt werden, daß infolge der Umstellung und des Lerneffektes Nutzenwirkungen meist verspätet einsetzen.

Bei der Bewertung von Planungssystemen kommt erschwerend hinzu, daß Nutzenpotentiale meist keine direkte Erlöswirkung aufweisen. Neben die Ermittlung der relevanten Einflußgrößen tritt somit das Problem der monetären Bewertung von Nutzengrößen.

Die genannten Anforderungen können von den derzeit eingesetzten Kostenrechnungssystemen nicht erfüllt werden. Dies gilt auch für Teilkostenrechnungssysteme, da die Gemeinkosten im Planungsbereich überwiegend Fixkostencharakter besitzen.

Ein entscheidungsorientiertes Kostenmodell muß daher über eine geeignete Strukturierung der Planungsprozesse verfügen, um bei Bedarf analog zur Fertigung eine Leistungszuordnung und -bewertung vornehmen zu können.

Zunächst ist daher eine Analyse und Strukturierung der auftretenden Planungsprozesse vorzunehmen. Die bisherige Kostenstellengliederung ist hierfür nicht ausreichend, da innerhalb einer Kostenstelle oder sogar eines Arbeitsplatzes mehrere Funktionen durchführbar sind. So kann die Layoutplanung und Roboterprogrammierung an einem graphischen Arbeitsplatz erfolgen. Die Bewertung von Planungssystemen erfordert eine Detaillierung bis zu den Funktionen, die durch den Rechnereinsatz veränderbar sind.

Die einzelnen Planungsfunktionen müssen über geeignete Bezugsgrößen bewertet werden, die einen direkten Bezug zur erbrachten Leistung aufweisen. Hierzu können Mengen- und Zeitgrößen verwendet werden [94]. Bild 70 zeigt hierzu die Bewertung der Funktion Robotereinsatzplanung über die Zeit und die entsprechenden Kostensätze von Personal und Maschinen. Die Häufigkeit der Funktionsausführung wird durch die Anzahl der Neuaufträge bestimmt, die mit Robotern zu bearbeiten sind.

Die Bewertung über Bezugsgrößen ermöglicht einen Vergleich manueller und rechnergestützter Planungsprozesse über Personal- und Maschinenkosten analog zur Fertigung. Anstelle der Werkstückkosten treten etwa Reduzierfaktoren von Planungszeiten. Die Bewertung von Planungsabläufen verschiedener Integrationsstufen erfordert zusätzlich die Berücksichtigung bereichsübergreifender Wirkungen.

Nutzenwirkungen rechnergestützter Abläufe entstehen nicht nur durch die Vermeidung der Mehrfachangeabe gleicher Daten, sondern zusätzlich durch eine verbesserte Informationsbasis. So ermöglicht die Datenübergabe bei der CAD/NC-Kopplung eine Simulation der erstellten Programme (vgl. 6.1).

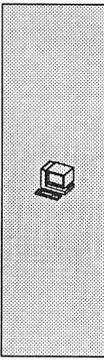
ARBEITSSCHRITT	KONVENTIONELL		GRAPHISCH		AUTOMATISIERT		
	Kostensatz	Zeit	Kostensatz	Zeit	Kostensatz	Zeit	
Ablaufplanung		●		●		●	
Modellierung	—	○		●			●
Layouttest	—	○		●	●		●
Programmierung Logik		●		●		●	
Programmierung Bewegung		●		●			●
Test Kollision/Taktzeit		●		●			●
Anpassung	—	○		●		●	
Optimierung		●		●		●	
							
	Lohnsatz Fertigung	Lohnsatz Planung	Systemsatz Fertigung	Systemsatz Planung	Systemsatz PC	Zeit- bewertung	

Bild 70: Kostenzusammenhänge verschiedener Integrationsstufen

Neben einer Strukturierung von Planungsprozessen mit geeigneten Bezugsgrößen muß daher ein entscheidungsorientiertes Kostenmodell auch Nutzenbeziehungen

der einzelnen Funktionen enthalten, um übergreifend auftretende Effekte abbilden zu können.

Die Anwendung des Kostenmodells wird im folgenden anhand der Bewertung von Planungsabläufen in der Montage und Werkzeughandhabung mit Robotern dargestellt.

7. Anwendung des Modells zur Bewertung von Planungskonzepten

7.1 Relevante Kosten- und Einflußfaktoren

Die Berechnung der Gesamtkosten erfolgt durch Aufsummieren über alle Anlagen und Produkte für die einzelnen Arbeitsschritte der ausgewählten Planungsalternative. Betrachtet man die Funktion aus Bild 71, so kann man in dieser Formel drei Hauptbestandteile erkennen, die für die Analyse der Einflußfaktoren wichtig sind. Demnach setzen sich die Gesamtkosten aus den Anteilen Planungszeit, Planungshäufigkeit und den entsprechenden Kostensätzen zusammen.

Die Planungskostensätze $\dot{P}K$ setzen sich aus den elementaren Kostenarten zusammen, die bei der Bewertung zu berücksichtigen sind. Die Planungszeit PZ ist der zweite Haupteinflußfaktor der Gesamtkosten und entspricht dem Zeitaufwand für die einzelnen Planungsschritte. Als dritter Posten geht die Häufigkeit der Planung PH in diese Strukturierung ein. Sie wird wesentlich von der vorhandenen Fertigungsflexibilität, Anzahl der Neuaufträge und der Lebensdauer der Produkte bestimmt.

Aufgrund der beschriebenen Wirkungen können die relevanten Kostensätze aus dem Planungs- und Fertigungsbereich stammen. Als elementare Kostenkomponenten sind die folgenden Größen in Betracht zu ziehen:

- Systemkosten s
- Personalkosten p
- Opportunitätskosten (Kosten für entgangenen Gewinn) o

Dabei können System- und Lohnkosten auch als direkte und Opportunitätskosten als indirekte Kosten bezeichnet werden. Indirekte Kosten entstehen nur mittelbar durch die Planung, wie z.B. Gewinnschmälerung durch Produktionsausfall.

Systemkosten s sind Aufwendungen für Geräte, Rechner und Maschinen, die unmittelbar zur Planung verwendet werden. Da die Programmerstellung von Industrierobotern online oder offline ausgeführt werden kann, können Systemkosten in der Fertigung und der Planung anfallen.

In den Personalkostensätzen für die Planungstätigkeiten sind neben den eigentlichen Lohn- und Gehaltskosten auch die Nebenkosten für Urlaub, Krankheit usw. enthalten. Spezielle Schulungsmaßnahmen, die bei Einführung neuer Technologien anfallen, werden dagegen mit den Systemkosten verrechnet.

Durch die Unterbrechung der Produktion zur Programmierung von Handhabungsgeräten entgeht dem Unternehmen der Deckungsbeitrag der an allen blockierten Anlagen gefertigten Produkte. Ebenso entstehen Gewinneinbußen durch verlorene Marktanteile infolge zu langer Planungszeiten. Diese zusätzlichen Erlöswirkungen werden den Opportunitätskosten zugerechnet.

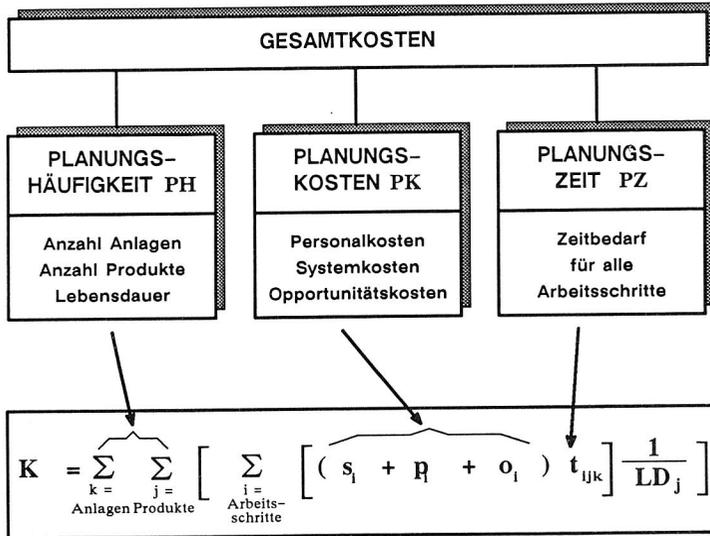


Bild 71: Zusammensetzung der Kostenfunktion

Es ist möglich, daß einbezogene Produkte eine längere Lebensdauer besitzen als der betrachtete Berechnungszeitraum. Um sinnvolle Vergleichswerte zu erhalten, sollten die einmaligen Kosten für die Planung und Programmierung auf die gesamte Lebensdauer verteilt werden. Ein Produkt mit dem Lebenszyklus 2 Jahre verursacht demnach jedes Jahr die Hälfte der Gesamtkosten. So wird berücksichtigt, daß Produktionsanlagen mit einer Produktpalette kurzlebiger Produkte einen höheren Planungsaufwand besitzen, als Anlagen, auf denen selten umgestellt wird.

Im folgenden werden die Einflußfaktoren auf die Kosten- und Nutzengrößen beschrieben. Diese Einflußfaktoren können sich direkt oder indirekt auswirken (vgl. Kap. 6.1). Anhand der Auswirkungen dieser Einflußfaktoren werden in Kap. 7.2 die Nutzenpotentiale in verschiedenen Roboteranwendungen bewertet (Bild 72).

Besondere Bedeutung für den Einsatz von Planungstechnologien für Industrieroboter besitzt die bestehende Struktur des Unternehmens. Zu untersuchen ist speziell, wie weit die EDV-Welt entwickelt und wie groß die Durchdringung der Fertigung mit flexibel einsetzbaren Handhabungsgeräten ist. Nicht zuletzt sind die vorhandenen Mitarbeiter ein Faktor, der den Erfolg oder Mißerfolg einer Investition entscheiden kann.

Die zu analysierende Produktionsanlage mit flexiblen Handhabungsgeräten oder Industrierobotern wirkt sich sehr stark auf die Kosten der Planung aus. Wie in Bild 72 zu erkennen ist, sind die Systemkosten der Fertigung, die Opportunitätskosten und auch die Planungszeit von der Produktionsanlage abhängig.

Die Größe der Anlage bestimmt einerseits die Höhe des gebundenen Kapitals und andererseits den Aufwand der Planung. Sie beeinflusst also durch die erforderliche Planungszeit die anfallenden Lohn-, System- und Opportunitätskosten. Da hier die Bandbreite sehr groß ist, und von einfachen Aufbauten zur Maschinenbeschickung mit Pick-and-Place-Geräten bis hin zu riesigen Anlagen mit vielen Handhabungsgeräten reicht, können die beeinflussten Kostenarten in ebenso großem Maße variieren.

Die anfallenden Systemkosten werden durch die Anlagengröße direkt beeinflusst. Durch die höhere Ausbringung großer Anlagen werden die Produktionsminderungs-, und durch die enge Verkettung die Stillstandskosten erhöht.

Der Einsatz eines Planungssystems wird in technischer und wirtschaftlicher Hinsicht von der gestellten Arbeitsaufgabe bestimmt. In Kapitel 5 wurden bereits die technischen Aspekte beschrieben. So werden einzelne Planungstechniken spezifisch für bestimmte Aufgabengebiete eingesetzt, andere wiederum decken ein breites Spektrum ab.

Die Arbeitsaufgabe beeinflusst alle Planungskosten über die benötigte Zeit. Umfang, Schwierigkeit und Dokumentation legen die Planungszeit fest. Anwendung und Struktur beeinflussen die Eignung von Planungssystemen.

Die größte Aussagekraft über das Rationalisierungspotential eines Planungskonzeptes hat die Planungshäufigkeit, denn sie bestimmt den Anteil der Wiederholkosten an den Gesamtkosten. Aus den Angaben Produktionszyklus, Variantenzahl, Teilespektrum und Losgröße läßt sich dieser Anteil bestimmen.

Die Bestimmungsgröße für die Häufigkeit der Wiederholkosten ist die Losgröße. Je kleiner sie ist, desto häufiger muß die Produktion umgestellt werden. Daraus läßt sich jedoch noch nicht ableiten, ob dabei auch Planungstätigkeiten entstehen. Dies ist dann erforderlich, wenn es sich um Neuaufträge handelt, oder wenn

Wiederholaufträge auf anderen Anlagen gefertigt werden. Eine wesentliche Einflußgröße in der flexiblen Fertigung ist hierbei die Fertigungssteuerung. Durch Maßnahmen zur Umdisposition kann sich der Planungs- und Programmieraufwand sehr stark erhöhen.

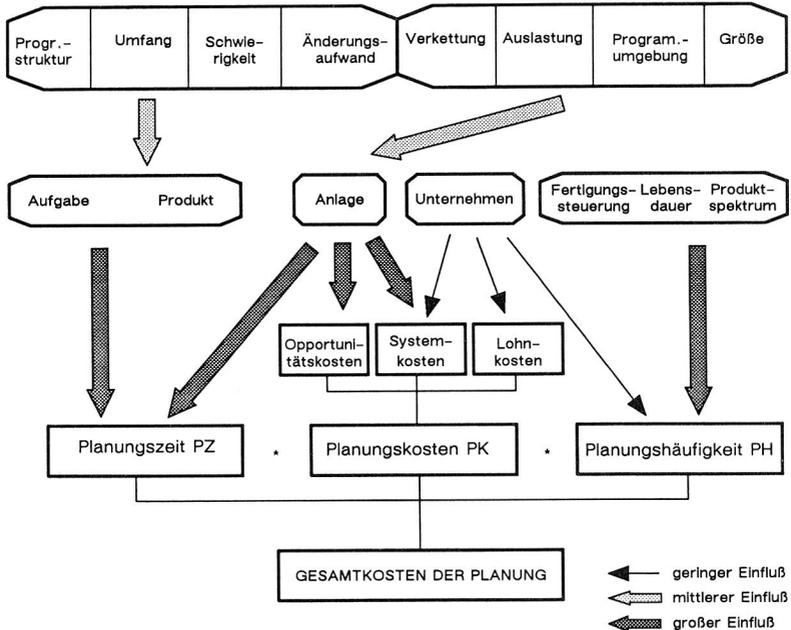


Bild 72: Einflussfaktoren auf die Kostenfunktion

Die Zeit, in der ein Produkt nahezu unverändert produziert und verkauft wird, die Produktlebensdauer, nimmt immer mehr ab. Dadurch steigt das Verhältnis von Vorbereitungszeit zur Produktionszeit auch mit an. Dieses Verhältnis bestimmt jedoch die Wirtschaftlichkeit einer Produktionsanlage. Zusammen mit der Anzahl der verschiedenen hergestellten Produkte erhält man ein Maß für die Planungshäufigkeit.

Im folgenden sollen die verschiedenen Integrationsstufen auf der Grundlage der beschriebenen Einflussfaktoren im Hinblick auf Kostenwirkungen und Gewinnpotentiale in konkreten Anwendungsfällen aus der Praxis bewertet werden.

Die in dieser Arbeit ermittelten Ergebnisse über Planungskonzepte, Bewertungsmethoden und Nutzenfaktoren werden hier anhand dreier typischer Anwendungsfälle demonstriert. Bild 73 zeigt dazu die Vorgehensweise auf.

Ausgehend von der Analyse charakteristischer Probleme bei der Planung von Handhabungsgeräten wird mit Hilfe der beschriebenen Einflußfaktoren das charakteristische Anforderungsprofil und typische Kennzeichen dieser Fälle definiert. Ausgehend von dieser Grundlage kann schrittweise ein technologisch machbares und wirtschaftlich sinnvolles Planungskonzept ausgewählt werden. Aus dem jeweiligen Gebiet entnommene Applikationen aus der Praxis zeigen die Lösungsvorschläge auf.

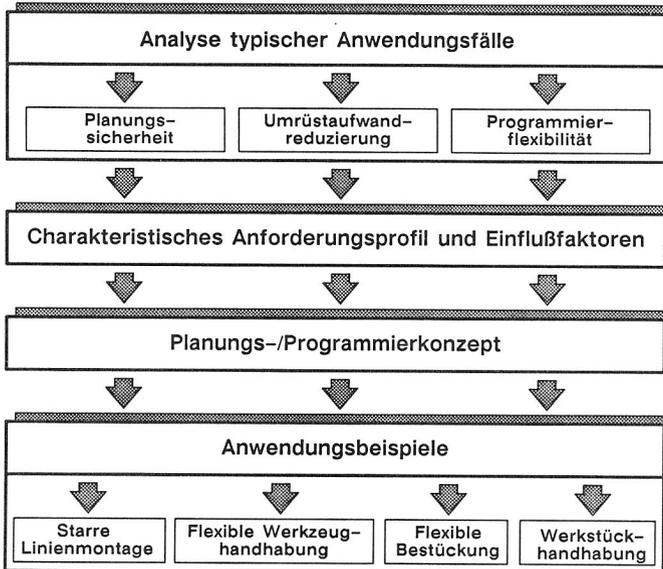


Bild 73: Vorgehensweise bei der Bewertung von Planungskonzepten

Die hier untersuchten Anforderungsprofile Programmierflexibilität, Planungssicherheit und Umrüstaufwandreduzierung demonstrieren häufig geforderte und kennzeichnende Bedingungen für die wirtschaftliche Fertigung. Für diese Profile kann besonders gut die Eignung eines bestimmten Planungskonzeptes gezeigt werden. Nicht berücksichtigte Anwendungsfälle können als Mischform behandelt werden. So können, folgernd aus den drei analysierten Fällen, auch für die Mischformen günstige Planungskonzepte ausgesucht werden.

Zur Klassifizierung und Verdeutlichung der Ausprägungen der Haupteinflußgrößen wird ein Dreibein, (Bild 74,77,82) mit den Achsen Planungszeit, Planungshäufigkeit und Planungskosten verwendet. Zusätzlich lassen sich aus

den eingeschlossenen Flächen rein qualitativ auch die Gesamtkosten ablesen. Da die Planungshäufigkeit meist fest vorgegeben ist, muß durch die Entscheidung für ein bestimmtes Planungskonzept dann versucht werden, vorherrschend die anderen Kostenfaktoren einzuschränken (entweder Planungszeit oder Planungskosten). Diese Intention wird durch einen Pfeil an der jeweiligen Achse graphisch dargestellt.

7.2 Nutzenbewertung in der Planungsphase von Anlagen

7.2.1 Anforderungen und Einflußfaktoren

Die Forderung nach Planungssicherheit nimmt mit den für die Anlage kalkulierten Investitionskosten zu. Dabei können die Risiken der Planung in technischer und wirtschaftlicher Hinsicht begründet sein.

Hohe Investitionskosten einer großen Anlage, die starre Verkettung der Stationen und die festvorgeschriebene Ausbringung an Fertigteilen erhöhen die Risiken. Der Erfolg solch einer Anlage hängt primär von der Qualität der Planung ab, denn die Anlage wird speziell für ein Produktspektrum realisiert. Die Lebensdauer der Anlage entspricht also dem Lebenszyklus der darauf gefertigten Produkte. Es gibt daher auch kaum die Möglichkeit, bei Produktumstellungen etwaige Fehler auszumergen.

Wesentlicher Faktor neben den Kosten ist somit die Planungszeit. Entsprechend den Ausführungen in Kapitel 5 muß ein Planungskonzept die Forderung nach beschleunigten Planungszyklen erfüllen. Dies ist dadurch zu gewährleisten, daß die Entscheidungsparameter der einzelnen Planungsphasen transparent gemacht werden. Neben verkürzten Zyklen durch Simultanplanung führt dies auch zu verbesserten Planungsunterlagen und damit zu höherer Planungsqualität.

Die beschriebenen Kennzeichen fordern von dem eingesetzten Planungskonzept Unterstützung bei der Planung (Bild 74). Dabei kann sich eine Rationalisierung durch kürzere Planungszeiten und vorgezogene offline-Programmierung ergeben. Die dadurch realisierbare kürzere Anlaufzeit für die Produktion sollte jedoch durch Simulation der geplanten Anlage zusätzlich abgesichert werden.

So sollten die Layoutmodelle und die offline erzeugten Programme bereits im Hinblick auf Erreichbarkeit, mögliche Kollisionen und erforderlicher Taktzeit getestet sein, ehe die verifizierten Planungsdaten an die Werkstatt weitergeführt werden.

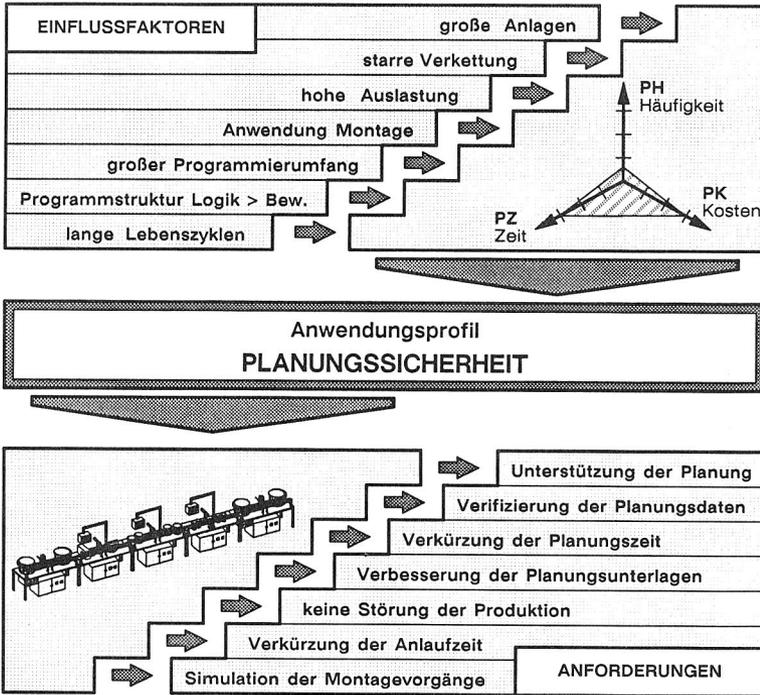


Bild 74: Kennzeichen und Einflussfaktoren des Anforderungsprofils "Planungssicherheit"

7.2.2 Projektierung einer Montagelinie für Schaltelemente

Beispielhaft für das Anforderungsprofil "Planungssicherheit" wird die Planung und Programmierung einer Produktionslinie für die Komplettmontage von Schaltelementen betrachtet. Für das Schaltelement (vgl. Kap. 5) besteht pro Jahr ein Bedarf von etwa 2,2 Millionen Stück. Bei einer geplanten Kapazität von ca. 2,4 Millionen Stück pro Jahr errechnet sich im zwei Schicht Betrieb und einem Nutzungsgrad von 92% die Taktzeit 3,5 Sekunden.

Bild 76 zeigt die dafür geplante Montagelinie im CAD-Layout. Sie besteht aus fünf über ein Rundriementransportsystem starr verbundenen Zellen. Die Einzelteile werden über Vibrationswendelförderer zugeführt. Von den fünf operierenden Handhabungsgeräten sind drei numerisch und zwei über SPS gesteuert.

Für die Anlage, deren wirtschaftliche Lebensdauer auf acht Jahre festgesetzt ist, wurden ca. 730 000 DM investiert. Ca. 260 000 DM Finanzmittelrückfluß pro

Jahr führen zu einer Rendite von über 30% und einer Amortisationszeit von 2,8 Jahren.

Von der ersten Konzeption bis zur Inbetriebnahme vergingen unter Einsatz konventioneller Planungswerkzeuge zwei Jahre.

Diese Zusammenhänge lassen sich graphisch in folgendem Diagramm veranschaulichen (Bild 75).

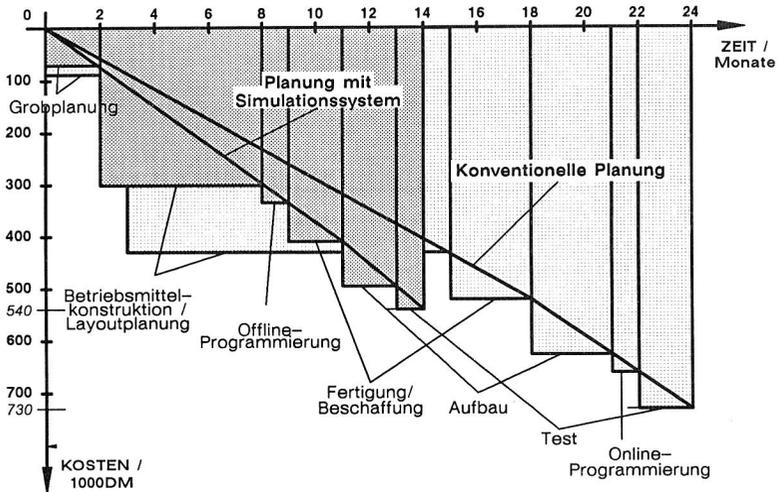


Bild 75 : Vergleich des Kostenverlaufes in der Planungsphase

In diesem Kostenverlaufs-Diagramm werden die Kosten über die Zeit aufgetragen. Der Einfachheit halber werden sie in Planung und Inbetriebnahme als kontinuierlich ansteigend angenommen. Dabei werden durch die stärkere Steigung in der Inbetriebnahme höhere Kosten pro Zeit repräsentiert. Dies ist darauf zurückzuführen, daß im Gegensatz zur Planungsphase alle anfallenden Arbeiten in der Werkstatt durchgeführt werden.

Der zusätzliche Aufwand durch das Simulationssystem verursacht einen steileren Kostenanstieg als bei der konventionellen Planung. Die Verkürzung des Zeitaufwandes für die Planung mit Hilfe der Simulation führt dennoch zu einer Einsparung des absoluten Betrages. Die Rationalisierung der einzelnen Schritte kann detailliert aus dem Diagramm in Bild 75 abgelesen werden.

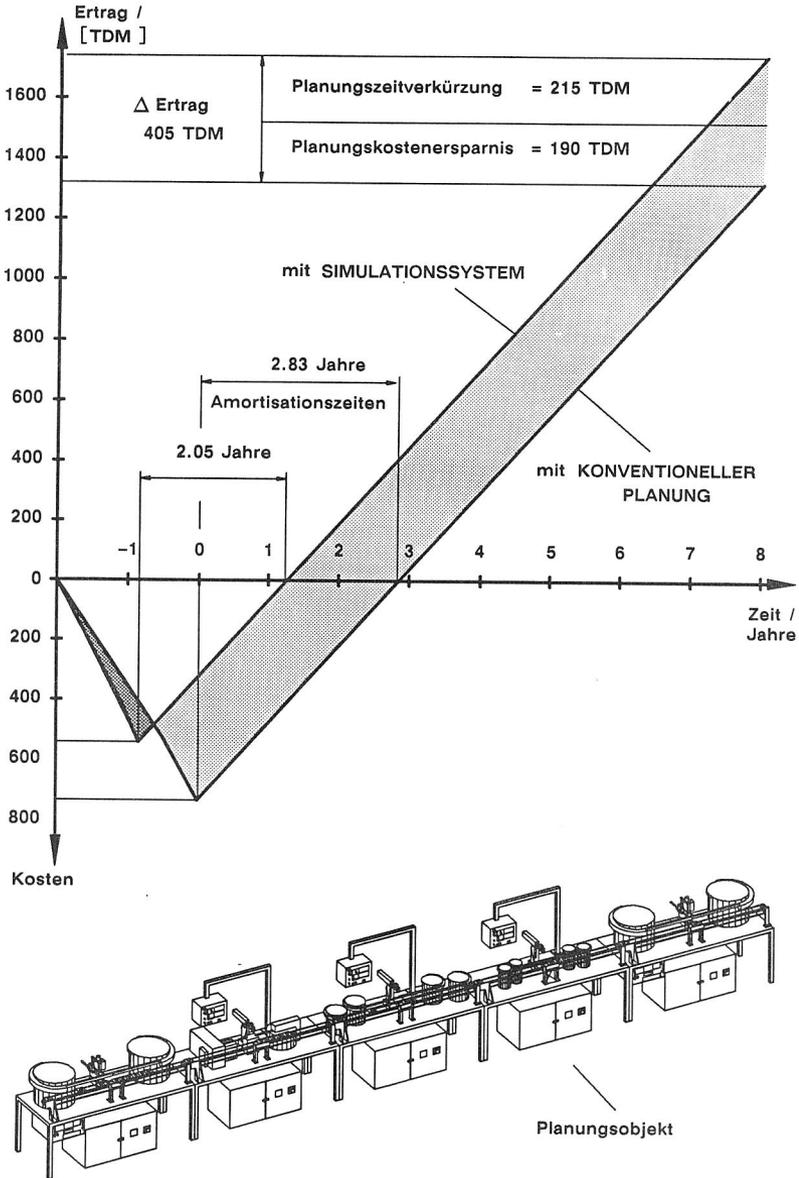


Bild 76: Aufwand-Ertrags-Diagramm mit Nutzenpotentialen

Die in Bild 76 verdeutlichten Auswirkungen einer rationalisierten Planung auf den Gewinn ergeben sich durch folgende Faktoren:

- durch Unterstützung bei der Konstruktion, Betriebsmittelauswahl und Layoutplanung mit CAD
- durch Parallelisieren der Aufgaben Planung, Programmierung und Test
- durch Einsparung unnötiger Korrekturzyklen aufgrund vorhergehender Simulation
- durch verbesserte Planungsunterlagen, abgetaktetem Layout und daraus folgendem schnelleren Aufbau
- durch gesicherte Planungsdaten und verkürzte Inbetriebnahme
- durch Einsatz von Standardkomponenten aufgrund einer verbesserten Informationsgrundlage

Ab dem Produktionsstart beginnt die Anlage Erträge zu erwirtschaften. Sie summieren sich im Beispiel der konventionellen Planung in 2,8 Jahren (= Amortisationszeit) zu dem aufgewendeten Investitionsbetrag. Erst danach kommt die Anlage in die Gewinnzone. Der Einsatz eines Simulationssystems führt aufgrund der geringeren Planungskosten schon nach ca. zwei Jahren zu einer Amortisation.

Wenn der Absatz über die geplanten acht Jahre gleichmäßig verläuft, ist nach der Lebensdauer der Anlage der in der Graphik ablesbare Gewinn aufgelaufen. Die Ertragsverbesserung durch Einsatz eines Simulationssystems begründet sich in diesem Beispiel zu etwa 50% auf die Kosteneinsparungen in der Planung und zu 50% auf die Planungszeitverkürzung (Bild 76).

Die dargestellten Verläufe der Kosten und Erträge können nur unter idealen Bedingungen in dieser Weise entstehen. Effekte, die auf beide Planungsverfahren gleichermaßen einwirken, wurden herausgefiltert. Auf diese Weise kristallisieren sich die Auswirkungen einer EDV-Unterstützung auf die Planung am besten heraus.

Die Absatzfunktion ist auf einen rechteckigen Verlauf der Nachfrage nach den zu produzierenden Gütern begründet, d.h. die Auslastung der Anlage vom Produktionsstart bis zur Stilllegung liegt immer auf dem geplanten Wert. In der Realität wird dies selten zu erreichen sein. Vielmehr verläuft die Nachfragefunktion im allgemeinen meist glockenförmig.

Spezielle Märkte (High-Tech, Mode) reagieren besonders kritisch auf verspätete Marktpräsenz. Durch die Einführung neuer Produkte mit zeitlichem Vorsprung vor den Konkurrenten können speziell hier Marktanteile besetzt werden, die schwer aufzuholen sind.

Ohne die Absicherung der Planungsdaten durch Simulation können anfangs gemachte Fehler bis zur Inbetriebnahme mitgeschleppt werden und erst nach dem Aufbau erkannt werden. Der zur Fehlerbeseitigung angestoßene Korrekturzyklus, der bis in die Planung zurückführen kann, blockiert die weitere Arbeit in der Werkstatt und verursacht neben immens verlängerter Anlaufzeit zusätzliche Kosten.

7.3 Nutzenbewertung in der Produktionsphase flexibler Anlagen

7.3.1 Anforderungen und Einflußfaktoren

Obwohl Industrieroboter zu den flexibelsten Produktionsmitteln zählen, wird für ihren Einsatz meist erst dann investiert, wenn große Stückzahlen oder lange Produktionszeiten einen sicheren Gewinn versprechen. Diese Diskrepanz liegt zu einem großen Teil noch an den verwendeten Techniken der Programmierung. Diese online-Verfahren sind sehr zeitintensiv, blockieren die Produktion, verursachen daher erhebliche Kosten und widersprechen damit exakt den Anforderungen der Anwendung "Umrüstaufwandreduzierung".

Geringe Stückzahlen, kurze Lebenszyklen und ein großes Produktspektrum führen zu häufigen Produktumstellungen. Dies erfordert Planungstechnologien, die eine schnelle Erstellung der notwendigen Steuerinformationen ermöglichen. Verstärkt wird diese Forderung noch, wenn Produktumstellungen einen großen Aufwand an Zeit und Kosten benötigen.

Großer zeitlicher Änderungsaufwand für die Programmierung einer Zelle wird durch verschiedenartige Produkte, umfangreiche Aufgabenstellung, genaue Dokumentation und vor allem durch bewegungsintensive Anwendungen verursacht. Relativ hohe Programmierkosten entstehen durch investitionsintensive Anlagen (Systemkosten), sowie große Wertschöpfung und hohe Auslastung (Opportunitätskosten). Die Haupteinflußgrößen werden in Bild 77 dargestellt.

Paradebeispiel für das Anforderungsprofil "Umrüstaufwandreduzierung" sind damit die IR-Anwendungen der Werkzeughandhabung. Punkt- und Bahnschweißen, Lackieren und zunehmend auch Entgraten spielen innerhalb des

Industrierobotereinsatzes eine entscheidende Rolle. Lange Planungszeiten, die bei der Programmierung von einem oder mehreren Industrierobotern, die sechs oder mehr Achsen, aufwendige Steuerung und Sensorik besitzen, und aufgrund komplexer und schwieriger Bewegungen entstehen, führen zu hohen Planungskosten.

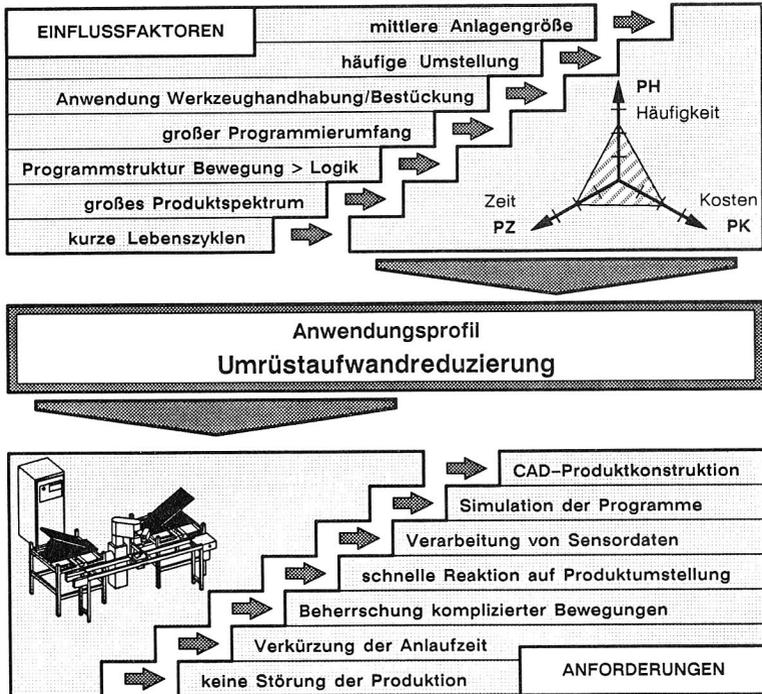


Bild 77: Anforderungen und Kennzeichen des Anwendungsprofils "Umrüstaufwandreduzierung"

Eine flexible Fertigung in diesem Anwendungsbereich ist mit Hilfe der online-Programmiermethoden nur schwer realisierbar. Zu langsam und zu teuer ist die häufige Produktionsumstellung. Dies macht es verständlich, wenn sich Roboter in der Werkzeughandhabung meist bei großen Stückzahlen und langer Lebensdauer der Produkte durchgesetzt haben. Die Automobilindustrie als Branche mit dem häufigsten Robotereinsatz ist ein gutes Beispiel dafür.

Ein weiteres Anwendungsgebiet für diesen Anforderungsbereich stellt die Montage elektronischer Bauteile dar. Aufgrund des zunehmenden Anteils elektroni-

scher Baugruppen an Produkten gewinnt die Bestückung zukünftig an Bedeutung. Für die automatisierte Bestückung in kleinen Losgrößen sind kurze Umrüstzyklen eine wesentliche Voraussetzung. Aufgrund der schwierigeren technologischen Bedingungen gilt dies in besonderem Maße für die Sonderbestückung.

7.3.2 Flexible Schweißzelle

Stellvertretend für das Anforderungsprofil "Umrüstaufwandreduzierung" wird hier eine flexible Roboterzelle zum Schweißen von Paletten betrachtet (Bild 78). Die nach Auftrag gefertigten Teile zeichnen sich durch geringe Stückzahlen und kurze Lebenszyklen aus. Die dadurch bedingte große Produktpalette verursacht sehr häufige Produktumstellungen. Es ergibt sich, daß einmal im Monat die Schweißzelle auf neue Teile umgestellt werden muß.

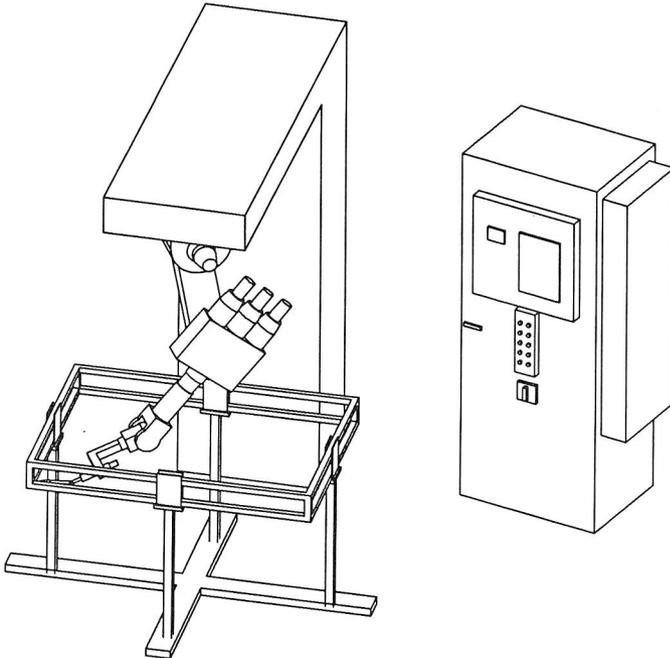


Bild 78: Flexible Schweißzelle

Da die Werkstücke von den verschiedensten Auftraggebern kommen, besitzen sie für die Programmierung keine nutzbare Ähnlichkeit. Der Zeitaufwand für die

Programmierstellung des 6-Achsen-Roboters ist sehr groß. Komplizierte Schweißnähte und große Teile sorgen für einen sehr hohen Bewegungsanteil im Roboterprogramm.

Die Schweißzelle kann so flexibel konstruiert werden (flexible Spannvorrichtung, flexibler Schweißroboter), daß sie die Möglichkeit bietet, die unterschiedlichsten Werkstücke einer bestimmten Größenordnung ohne großen mechanischen Umrüstvorgang positionieren und spannen zu können.

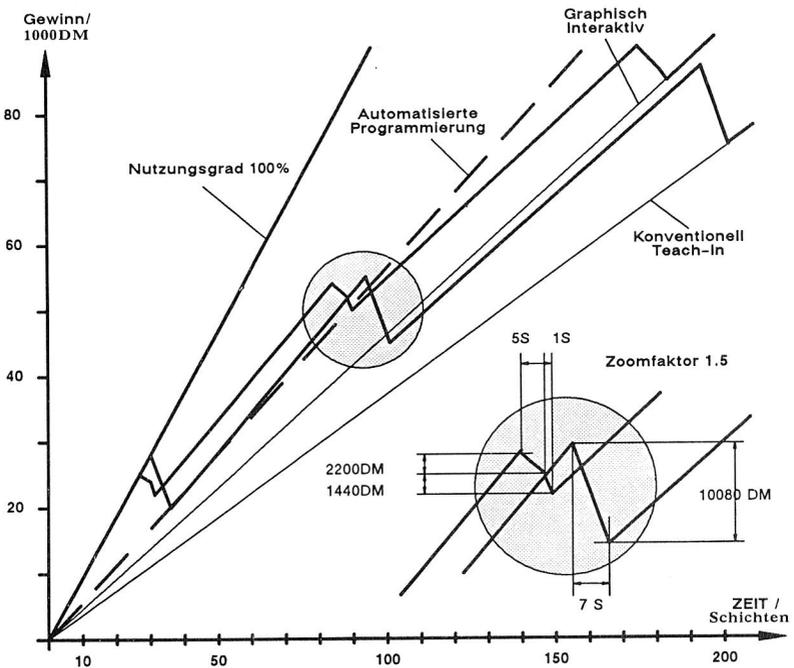


Bild 79: Gewinnverlauf unter Einfluss des Umrüstaufwandes

Die beschriebenen Anforderungen machen besonders eine flexible Programmierung notwendig. Daher ist eine genauere Betrachtung des Programmieraufwandes sinnvoll. Grundlage für den Vergleich zu anderen Systemen ist die Programmerstellung mittels eines konventionellen Teach-In-Verfahrens.

Da die Modellierung der Anlage über die Anlagenlebensdauer nur einmal durchgeführt werden muß, fällt sie hier nicht ins Gewicht.

Bei der Programmierung überwiegt der Bewegungsanteil. Mit Hilfe sensor-gestützter Verfahren kann dieser Teil wirkungsvoll verkürzt werden. Durch CAD-Einsatz lassen sich die dafür notwendigen Stützpunkte offline erzeugen. Schwieriger, aber dennoch denkbar, ist eine vollständige offline-Generierung des Roboterprogramms mit einem Simulationssystem, was jedoch aufgrund der komplexen Bewegungsbahnen zu längeren Planungszeiten führt.

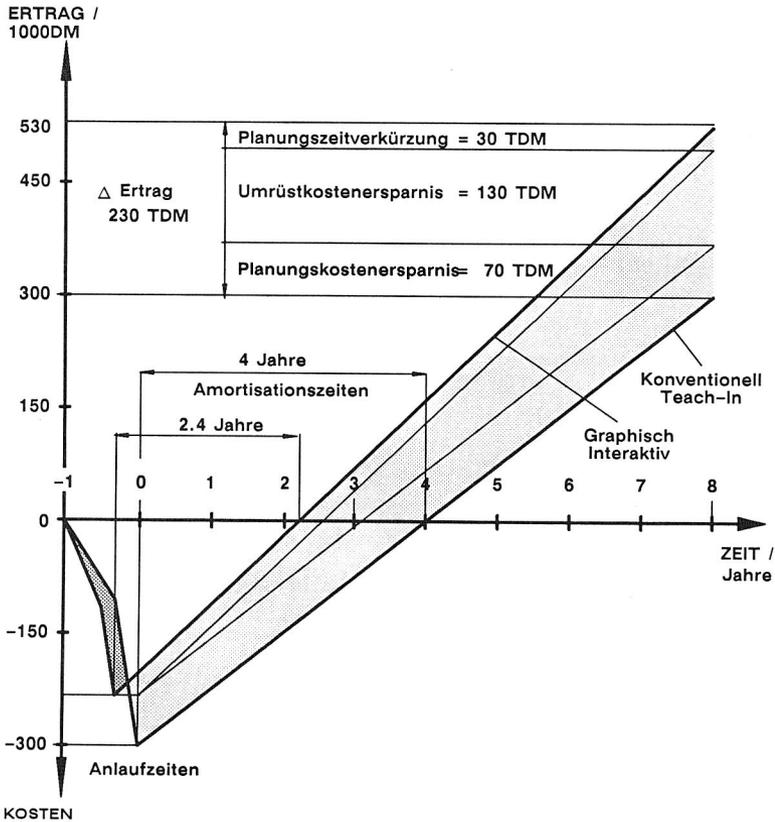


Bild 80: Umrüstkosten-Diagramm mit Nutzenpotentialen

Da die Zelle nicht starr mit anderen Fertigungsanlagen verkettet ist, spielt die Taktzeitprüfung keine dominierende Rolle. Tests auf Erreichbarkeit sind primär bei der Anlagenplanung durchzuführen, während die Ermittlung möglicher Kollisionen beim Bahnschweissen eine zentrale Rolle spielt. Eine automatische Kollisionskontrolle sowie das Anzeigen alternativer Bewegungsmöglichkeiten mit Hilfe von Simulationssystemen sind somit wesentliche Anforderungen.

Eine mechanische Umrüstung ist immer notwendig, während Programmanpassungen nur bei Neuaufträgen durchzuführen sind. Die kurzen Produktionszyklen erlauben keinen großen Aufwand bei der nachträglichen Optimierung. Dieser Arbeitsschritt wird daher hier nicht weiter berücksichtigt.

Die erforderlichen Zeiten für die online-Programmierung, offline-Programmierung und die online-Anpassung sind aus Bild 79 ersichtlich.

Bei Null beginnend erwirtschaftet die Anlage kontinuierlich Erträge. Die Steigung der Kurve für die online-Programmierung und offline-Programmierung mit Simulation ist gleich groß. Am Ende des Monats muß die Produktion auf ein neues Teil umgestellt werden. Bei Einsatz des Teach-In-Verfahrens steht die Produktion während der gesamten Programmierung still. Während dieser Zeit können keine Erträge mehr erwirtschaftet werden. Zusätzlich entstehen durch die Umrüstarbeiten Personalkosten und infolge geringerer Nutzung Systemkosten. Die Steigung der Kurve wird negativ. Nach der Umrüstung wird weiterproduziert.

Weitaus günstiger liegen die Verhältnisse beim Einsatz eines Simulationssystems. Da die Programmierung auch hier etwa die gleiche Zeit in Anspruch nimmt, entsteht auch zum gleichen Zeitpunkt ein Knick, der aus den Kosten für die offline-Programmierung resultiert. Da jedoch weitergefertigt werden kann, fangen die gleichzeitig entstehenden Erträge diese Kosten auf. Erst beim mechanischen Umrüsten und Anpassen der Programme muß die Produktion gestoppt werden, wodurch die Steigung der Kurve kurzzeitig negativ wird.

Insgesamt ergibt sich jedoch ein Unterschied in der Steigung der Ertragskurve. Dieses Ergebnis läßt sich in Bild 80 (Aufwand-Ertrags-Diagramm) darstellen.

Im Aufwand-Ertrags-Diagramm kristallisieren sich zwei Effekte heraus, die für ein Simulationssystem zur offline-Programmierung sprechen:

- Aus der Rationalisierung der Planungszeit um etwa 30% ergeben sich Einsparungen an Planungskosten und Gewinne wegen der verlängerter Produktionszeit. Diese Effekte sind tragend für den Einsatz im Anwendungsprofil "Planungssicherheit" und werden dort näher beschrieben.
- Die Verbesserung der Umrüstflexibilität läßt zusätzlich die beiden alternativen Ertragskurven auseinanderlaufen. Bei häufigeren Produktumstellungen ist dieser Vorteil dominierend und ermöglicht erst die flexible Werkzeughandhabung mit Industrierobotern.

7.3.3 Flexible Bestückzelle

Aus technologischer Sicht bietet sich für flexible Roboterzellen in der elektronischen Montage ein ideales Einsatzfeld, da die Problematik peripherer Einrichtungen wie Teilebereitstellung und Transport gegenüber der Montage mechanischer Komponenten stark vereinfacht ist. Der wirtschaftliche Einsatz bei kleinen Losgrößen hängt sehr stark von geeigneten Planungskonzepten ab, die durch schnelle Programmerstellung hohe Nutzungszeiten ermöglichen. Dieser Zusammenhang soll am Beispiel einer Sonderbestückzelle demonstriert werden.

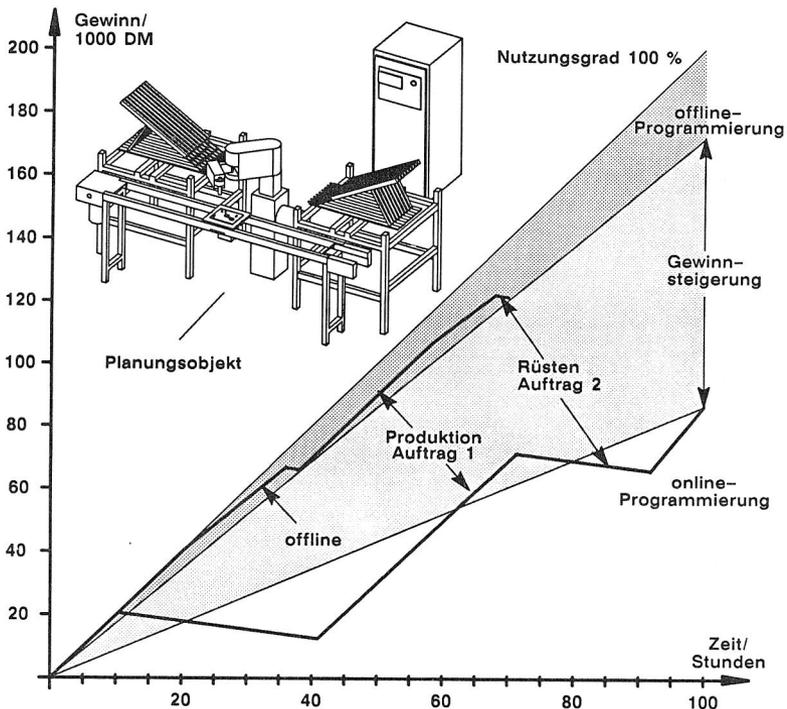


Bild 81: Gewinnsteigerung durch verkürzte Umrüstzeiten

Die untersuchte Roboterbestückzelle ist bei einem Unternehmen der Elektronikbranche im Einsatz, und wird zum Bestücken von Leiterplatten in kleineren bis mittleren Losgrößen eingesetzt. Die Bestückzelle, deren Aufbau in

Bild 81 dargestellt wird, ist zur Bestückung von Sonderbauelementen in eine Fertigungslinie integriert.

Aufgrund der hohen Ausbringung und den damit verbundenen Gewinnanteilen führt jede Verringerung des Nutzungsgrades sehr schnell zu Verlusten. Andererseits spielt die Projektierung der Sonderbestückzelle im Gegensatz zur mechanischen Montagelinie aufgrund der vorhandenen Flexibilität keine dominierende Rolle.

Die hohen Rückflüsse ermöglichen im Vergleich zur Schweißzelle sehr kurze Amortisationszeiten, so daß bei der Bewertung die Planungsphase vernachlässigt werden konnte und nur die Produktionsphase betrachtet wurde. Die Vermeidung unproduktiver Rüstzeiten steht dabei im Mittelpunkt.

Bei Auftragserteilung an den Zellenrechner wird überprüft, ob ein Bestückprogramm vorhanden ist. Handelt es sich um Neuaufträge, so müssen entweder komplette Programme erstellt oder zumindest Anpassungen in der Zelle vorgenommen werden. Dabei handelt es sich im Gegensatz zum Bahnschweissen überwiegend um Pick-and-Place Bewegungen mit hoher Genauigkeit.

Für die Programmerstellung auf Planungsebene sind zum einen Daten aus der Betriebsmittelplanung, wie Bauelementzuführungen mit Entnahmepositionen oder Greiferzuordnungen für definierte Bauteile, erforderlich. Zum anderen erfolgt innerhalb der Konstruktion der Leiterplattenentwurf, wobei die Bestückpositionen der Bauelemente auf der Leiterplatte festgelegt werden. Die erstellten Programme müssen in der Bestückzelle noch optimiert werden, wobei für eine Teilefamilie mit zehn Varianten ca. 2 Stunden benötigt werden.

In Bild 81 ist der Vergleich zu einer reinen Werkstattprogrammierung dargestellt, die ca. zwei Tage im Zweischichtbetrieb für die Programmierung einer Teilefamilie erfordert. Dies führt aufgrund der Stillstandszeiten und Umrüstkosten zu Verlusten.

Die parallel zur Produktion durchgeführte Planungsprogrammierung hingegen wirkt sich nur in einer geringen Gewinnsenkung aus. Zu Verlusten führt lediglich die kurze Anpaßphase innerhalb der Zelle. Der Nutzungsgrad der Bestückzelle kann durch eine Verlagerung der Programmier Tätigkeit auf die Planungsebene somit wesentlich gesteigert werden.

7.3.4 Einflußfaktoren in der Werkstückhandhabung

In den beiden Anwendungen "Planungssicherheit" und "Umrüstaufwandreduzierung" lag die Bedeutung der Analyse der Planungskonzepte in den

relativ hohen Kosten, die durch die Programmierung bzw. Planung entstehen, und dem damit verbundenen Rationalisierungspotential begründet. Anders verhält es sich beim Anwendungsprofil "Programmierflexibilität" (Bild 82). Da Industrieroboter und auch einfachere Handhabungsgeräte angesichts der hohen Lohnkosten für die manuelle Werkstückhandhabung eine Alternative darstellen, kann der Aufwand für die Programmierung in der Frage Robotereinsatz oder manuelle Lösung mitentscheidend sein.

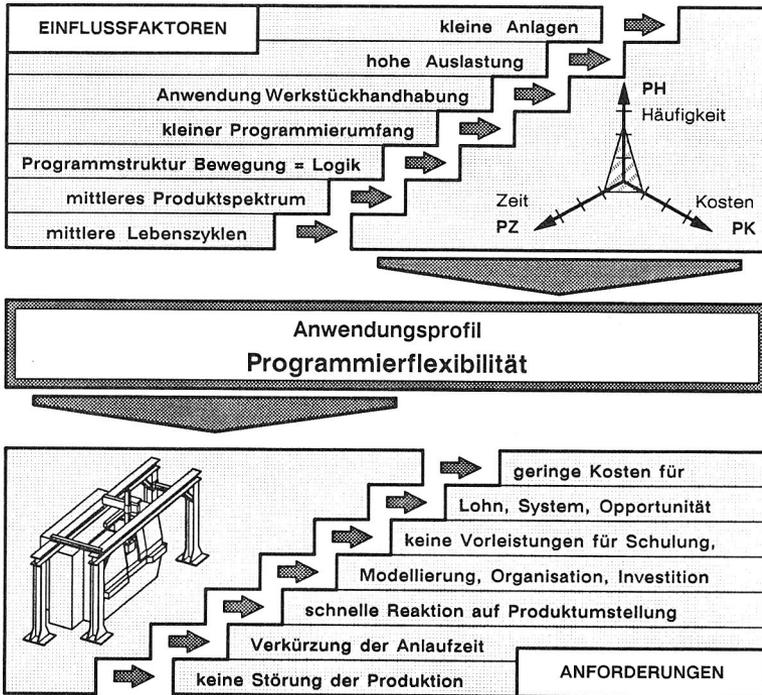


Bild 82: Anforderungen und Kennzeichen des Anwendungsprofils "Programmierflexibilität"

Die meist einfachen Handhabungsgeräte werden an Maschinen in Zellen mit geringen oder mittleren Systemkosten eingesetzt. Da bei einer Produktumstellung häufig auch die Bearbeitungsmaschinen umgestellt werden müssen (Formwechsel, Werkzeugwechsel), sind die wegen loser Verkettung ohnehin geringen Opportunitätskosten nur zum Teil dem Handhabungsgerät anzulasten.

Aufgrund des geringen Umfangs und Schwierigkeitsgrades der Steuerprogramme ist die eigentliche Programmierzeit nur gering. Die hohe Flexibilität in der Teilefertigung führt jedoch zu häufigen Umstellungen, was durch neue Entwicklungen im Bereich der Werkstattsteuerung noch verstärkt wird.

Wichtig ist daher ein möglichst geringer Aufwand für die Programmierung. Da man vom Programmiersystem keinen Zusatznutzen wie Planungssicherheit oder Verkürzung der Anlaufphase erwartet, dürfen auch keine Vorleistungen erbracht werden. Schulung für die Mitarbeiter, Aufwand für Modellierung, Zusatzinvestition für Hardware oder Software oder gar Änderungen in der Organisationsstruktur von Arbeitsvorbereitung oder Fertigung sollten nicht anfallen.

In den vorangegangenen Anforderungsprofilen hat sich herauskristallisiert, daß Planungssysteme in der Planungsphase und Produktionsphase Einsparungen bringen können. Während im Fall der Planungssicherheit die Rationalisierung der Planung wichtig ist, spielen im Fall der Umrüstaufwandreduzierung beide Bereiche eine Rolle. Bei der Werkstückhandhabung wiederum muß nur die Produktionsphase betrachtet werden, da der Planungsablauf über die wirtschaftliche Nutzungsdauer der Maschine nicht bedeutend ins Gewicht fällt.

Der Verlauf der Programmierkosten ist durch den Einsatz hybrider Verfahren ähnlich dem für den Anwendungsfall flexible Schweißzelle. Der wesentliche Unterschied besteht jedoch darin, daß er sich auf weitaus geringerem Niveau bewegt und damit das Rationalisierungspotential insgesamt geringer ist.

7.4 Einsatz des Kostenmodells zur Auswahl von Fertigungskonzepten

7.4.1 Ganzheitliche Bewertung von Fertigungssystemen

Die ermittelten Nutzenpotentiale sind bei einer Bewertung alternativer Fertigungskonzepte zu berücksichtigen. Dies betrifft sowohl Linienkonzepte in der Montage, als auch flexible Fertigungsstrukturen in der Werkzeughandhabung und Bestückung. In beiden Fällen wird durch den Einsatz von Planungstechnologien der Nutzungsgrad als wesentliches Entscheidungskriterium für die Auswahl von Fertigungskonzepten erhöht.

Durch eine Einbeziehung von Planungsprozessen in die Auswahl von Fertigungssystemen wird ein ganzheitlicher Bewertungsansatz möglich, der bei einem Vergleich manueller und rechnergesteuerter Systeme unumgänglich ist. Gerade bei unsicheren Planungsdaten müssen sämtliche relevanten Einflußfak-

toren berücksichtigt werden, um eine solide Entscheidungsgrundlage zu erhalten.

Um dies zu verdeutlichen, wird die automatisierte Montagelinie für Schaltelemente mit einer manuellen Montagelinie verglichen. Für die manuelle Montage werden geringere Investitionsausgaben angesetzt, denn alle Arbeitsplätze zur Fertigung des Schaltelements sind vorhanden und die Montage kann ohne wesentliche Kapitalkaufwendungen fortgeführt werden (Bild 83).

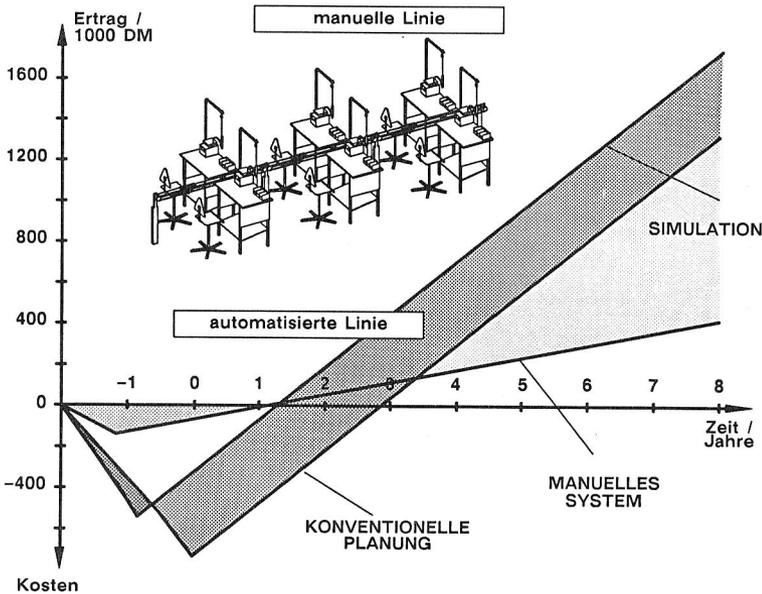


Bild 83: Manuelles Alternativsystem für die Schaltermontage in der integrierten Bewertung von Planungs- und Fertigungssystemen

Die Ergebnisse der dynamischen Investitionsrechenverfahren wurden auf der Grundlage eines Kalkulationszinsfußes von 6% ermittelt. Eine Wirtschaftlichkeitsanalyse auf dieser Basis ergibt, daß die automatisierte Montage im Vergleich zur manuellen Montage günstiger ist.

Bezieht man die Planungsprozesse mit ein, so erhöht sich der Überschuß über die Laufzeit entsprechend den Einsparungen aus Planungszeit und -kosten zugunsten der automatisierten Linie (vgl. Bild 76). Dieser Effekt fällt ins Gewicht, wenn man sich die Unsicherheit der Daten über die lange Laufzeit vor Augen führt.

Jede Wirtschaftlichkeitsanalyse zur Entscheidungsunterstützung basiert auf einer Reihe von Daten, wobei die Schwierigkeit ihrer Ermittlung mit wachsender zeitlicher Entfernung vom Planungszeitpunkt stetig zunimmt. Mit der Berücksichtigung von längerfristigen Wirkungen erlangt das Problem der Datensicherheit neben der Investitionsrechnung auch größere Bedeutung in der Kostenrechnung.

Die Zuverlässigkeit der Ergebnisse und damit die Güte der Entscheidung ist nicht von den gewählten Methoden abhängig, sondern in starkem Maße von der Qualität der eingehenden Daten.

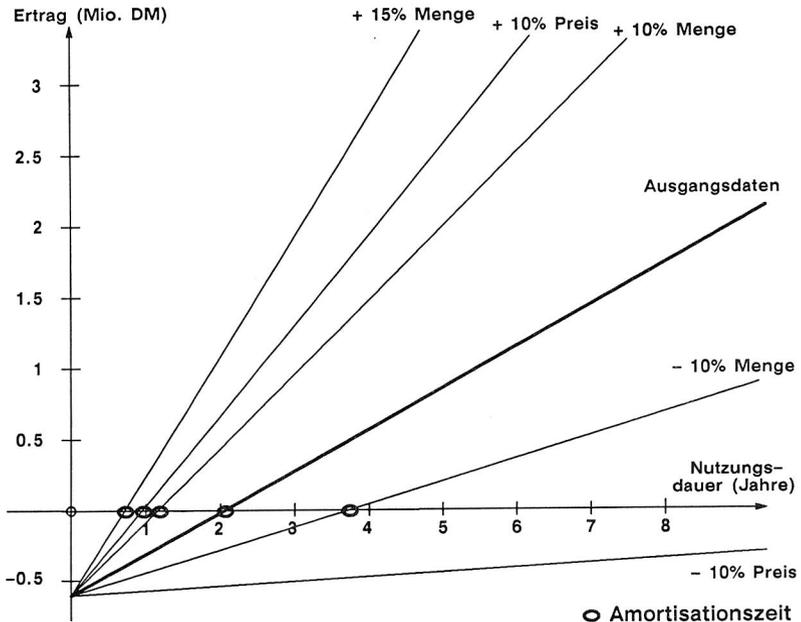


Bild 84: Sensitivitätsdiagramm in Bezug auf die Amortisationszeit

Mit Hilfe einer Sensitivitätsanalyse, die neben der Amortisationszeit als bedeutendstes Verfahren zur Beurteilung des Investitionsrisikos gilt, kann diese Gefahr nicht vollständig beseitigt, jedoch erheblich verringert werden. Die praktische Bedeutung einer Sensitivitätsanalyse besteht darin, Erkenntnisse über die Randbedingungen, die den größten Einfluß auf ermittelte Kennzahlen ausüben, zu liefern. Dadurch kann der Zusammenhang zwischen unsicheren Eingangsdaten und deren Auswirkungen auf das Ergebnis analysiert werden. Aufgrund der Ergebnisse der Sensitivitätsanalyse können dann Schlüsse gezogen

werden, bei welchen Einflußgrößen eine genauere Datenbeschaffung oder Prognose notwendig ist, und wo die spezifischen Risiken einer Entscheidung liegen.

Aufgrund der unsicheren Planungsdaten wurde eine Sensitivitätsanalyse, in der die Parameter Preis, Produktionsmenge und Nutzungsdauer variiert wurden, durchgeführt. Die Ergebnisse in Bezug auf die Amortisationszeit sind in Bild 84 dargestellt. Die Ergebnisse machen deutlich, wie stark die Amortisationsdauern von geringen Preisschwankungen beeinflusst werden können. Bei einer Preissenkung von zehn Prozent amortisiert sich die Anlage trotz rechnergestützter Planung bereits nicht mehr.

Das Investitionsrisiko kann durch den Einsatz rechnergestützter Planungswerkzeuge aufgrund der schnelleren Planungszeit und der damit verbundenen Erlöswirkungen wesentlich gesenkt werden. Diese Erkenntnisse können jedoch nur bei einer ganzheitlichen Betrachtungsweise in den Entscheidungsprozeß einbezogen und damit einer Bewertung zugänglich gemacht werden.

7.4.2 Planungsbegleitende Kalkulation

Die hohe Kostenbeeinflussung späterer Fertigungskosten während des Planungsprozesses wird in der Betriebswirtschaftslehre bisher kaum beachtet. Wirtschaftliche Bewertungen bei der Layoutauswahl oder Maschinenzuordnung in der Anlagen- und Arbeits/Montageplanung werden meist vor Ort, durch die Planer selbst, in Form von Sonderrechnungen durchgeführt.

Die klassische Kostenrechnung setzt in aller Regel erst bei einem fertig vorliegenden Produktionsprogramm und nach abgeschlossener Anlagenplanung ein. Das herkömmliche Controlling wird somit lediglich zur Planung und Kontrolle des laufenden Fertigungsprozesses einer fertiggestellten Anlage eingesetzt, nicht aber für die Planung der Kosten selbst. Aus diesem Grunde ist dem Planer kaum bewußt, in welchem Maße er durch seine Entscheidungen die Kosten beeinflusst, die nach abgeschlossener Planung in der Betriebsphase anfallen. Ein Kostenmodell muß daher die Forderung nach mehr Kostentransparenz im Planungsbereich erfüllen. Der Planer muß systematisch mit differenzierten Kosteninformationen versorgt werden, um das Kostenbewußtsein bezüglich der Planungsentscheidungen zu stärken. Dadurch wird ihm die Möglichkeit gegeben, unter bestimmten technischen Rahmenbedingungen, ein kostenoptimales Planungsergebnis zu erarbeiten.

Als Grundlage eines derartigen Kostenmodelles müssen alle relevanten Entscheidungsparameter des Planungsprozesses mit den entsprechenden Kostenwirkungen abgebildet werden. Die Entscheidungsparameter ergeben sich aus den

jeweiligen Planungsaufgaben, deren Ergebnisse Auswirkungen auf die nachfolgenden Planungsstufen haben. Durch eine Analyse der Datenflüsse zwischen Planungsfunktionen ergibt sich somit die Entscheidungsrelevanz der vom Planer veränderten Planungsparameter.

Neben der Entscheidungsrelevanz muß für jeden Parameter die Kostenrelevanz ermittelt werden. Die Vorgehensweise erfolgt analog zur Ermittlung von Nutzengrößen und ihrer Kostenwirkungen bei der Bewertung von Planungssystemen. Während dort jedoch die Bewertung des Ablaufs der Tätigkeiten an sich erfolgt, stehen bei der planungsbegleitenden Kalkulation die Kostenwirkungen der Planungsergebnisse im Vordergrund.

Die Kostenbeeinflussung durch die Planungsparameter kann wie bei den Nutzengrößen direkt und indirekt erfolgen. Jede Entscheidungsrelevanz, die sich auf Parameter mit direkter Kostenbeeinflussung bezieht, bedeutet gleichzeitig eine indirekte Kostenrelevanz. Die Darstellung einer Wirkungskette, die den Zusammenhang zwischen Entscheidungs- und Kostenrelevanz aufzeigt, ist in Bild 85 zu sehen.

Als Beispiel dient eine Wirkungskette, wie sie sowohl in der langfristigen Anlagenplanung, als auch in der kurzfristigen Arbeits/Montageplanung auftritt. Ausgangspunkt sind dabei die Mengengerüste aus der Auftragssteuerung, die über die Parameter Stückzahl die weitere Planung beeinflussen. Aus der Stückzahl ergeben sich Zeitrestriktionen, die als Taktzeit für die Betriebsmittelplanung oder als Vorgabezeit für die Maschinenzuordnung maßgebend sind.

Erst der Bezug auf Betriebsmittel und damit auf die Fertigungsebene ermöglicht eine direkte Kostenbeeinflussung langfristiger Kapital- und laufender Betriebskosten.

Die Quantifizierung der Kostenbeeinflussung ist einfacher gegenüber der Nutzenbewertung, da Planungsparameter mit direkter Kostenrelevanz Komponenten der jeweiligen Kosten- oder Erlösfunktion sind. Am Beispiel der Maschinenzuordnung im Rahmen der Arbeitsplanung sei dies verdeutlicht. Zu jeder Maschine existiert ein Maschinenstundensatz, der in direktem funktionalen Zusammenhang mit der Kostenart Betriebsmittelkosten steht. Für jede Maschine läßt sich nun ein Stückzahlbereich angeben, indem diese Maschine aufgrund der ermittelten Stückzeit am wirtschaftlichsten arbeitet. Durch Variation des Parameters Stückzahl kann somit der Übergang auf andere Maschinen und damit die direkte Veränderung der Betriebsmittelkosten ermittelt werden.

Die planungsbegleitende Kalkulation ist vorwiegend dort einzusetzen, wo eine hohe Kostenfestlegung durch die Planung erfolgt. Dies ist in der Montage der

Fall, wo im Rahmen der Auftragsabwicklung oftmals komplette Anlagen zu planen sind.

Weiterhin ist die Konstruktion als Schwerpunkt zu nennen, da dort der höchste Anteil der Kostenfestlegung zu verzeichnen ist. In diesem Bereich existieren deshalb bereits Ansätze für eine konstruktionsbegleitende Kalkulation [95] [96].

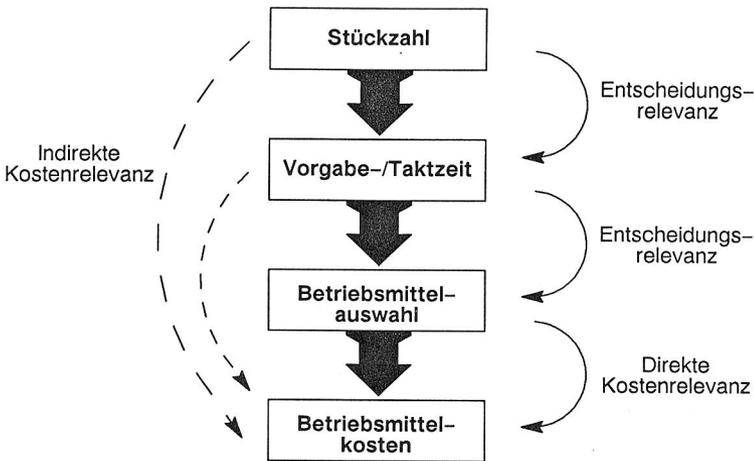


Bild 85: Darstellung einer Wirkungskette

Dabei wird versucht, dem Konstrukteur die Auswirkungen seiner Entscheidungen vor allem auf die Materialkosten deutlich zu machen. Bei eingeschränktem Produktspektrum mit standardisierten Fertigungsabläufen ist es auch möglich, den Einfluß auf die späteren Fertigungskosten aufzuzeigen. Dabei werden jedoch Entscheidungen der nachfolgenden Arbeitsplanung vorweggenommen.

Innerhalb der Montageplanung müssen teure Anlagen auf der Basis unsicherer Planstückzahlen konzipiert werden. Umso wichtiger ist daher das Aufzeigen von Kostenwirkungen in den einzelnen Planungsstufen, die durchlaufen werden müssen.

Durch den Einsatz rechnergestützter Planungssysteme bietet sich die Möglichkeit, Kosteninformationen in den Planungsprozeß einzubeziehen. Planungssysteme sind mit Kosteninformationssystemen zu koppeln, um Kostenwirkungen rechnergestützt ermitteln zu können.

Ein großes Problem besteht darin, daß die Planungsdaten erst im Verlaufe der Planung konkret werden, die wesentlichen Kostenentscheidungen, wie z.B. die Auswahl zwischen manueller oder automatisierter Fertigung, bereits in einer frühen Konzeptphase getroffen werden müssen. Kosteninformationen müssen daher so in Planungssysteme integriert werden, daß sie als Restriktionen von Stufe zu Stufe weitergegeben werden können. Restriktionen können beispielsweise die Vorgabe von Investitionsbudgets sein.

Bei der Sukzessivplanung erfolgt die Kostenkontrolle zwischen den Stufen, wobei bei Überschreitung von Restriktionen in die vorliegende Stufe zurückgekehrt werden muß. Konzepte der Simultanplanung ermöglichen gleichzeitig den Planungsvorgang und die Kostenkontrolle. Hierbei kann die Optimierung nach technischen und wirtschaftlichen Kriterien vorgenommen werden.

Für die Realisierung solcher Systeme bietet sich der Einsatz der rechnergestützten Simulation an. Bisherige Systeme optimieren meist nach indirekten Bezugsgrößen wie Nutzungsgrad, Verfügbarkeit oder Taktzeit. Durch die Integration von Kostenfunktionen könnten während des Simulationslaufs Kostenwirkungen berücksichtigt werden.

Graphische Planungssysteme auf der Basis von CAD sind wesentliche Werkzeuge für die Betriebsmittelkonstruktion und Layoutplanung. Dabei müssen Daten oder die einzelnen Betriebsmittel in Bibliotheken oder Datenbanken verwaltet werden. Durch die Einbeziehung von Kosteninformationen könnte der Planer seine Entscheidungen direkt kontrollieren.

Allerdings genügt es nicht, die Kosten einzelner Geräte abzuspeichern und bei Bedarf zu addieren. Eine sinnvolle Unterstützung ist nur über ein entscheidungsorientiertes Kosteninformationssystem in Verbindung mit dem graphischen Planungssystem möglich, da Wirkzusammenhänge über verschiedene Planungsstufen und Bezugsobjekte bestehen.

In Bild 86 sind die Zusammenhänge für die Geräteauswahl und Layoutplanung dargestellt. Bei der Geräteauswahl können über die Gerätealternativen direkt Investitions- und Energiekosten bestimmt werden. Die Entscheidungen der Geräteauswahl sind jedoch gleichzeitig für die Layoutplanung relevant. Für die Kostenrechnung wechselt dabei das Bezugsobjekt von der Geräteebene zur Zellebene.

Bei der graphisch-interaktiven Layoutplanung an CAD-Systemen können somit dem Planer beim Austausch von Geräten neben den direkten Kostenänderungen auch die Wirkungen auf Personal- und Rüstkosten auf Zellebene mitgeteilt werden.

Die Wirkungskette kann über Anlagen-, Fertigungs- bis hin zur Planungsebene reichen. Dies ist der Fall, wenn durch Auswahl eines NC-Achsgertes mechanische Rüsttätigkeiten reduziert und Programmierstätigkeiten in die Planung verlegt werden.

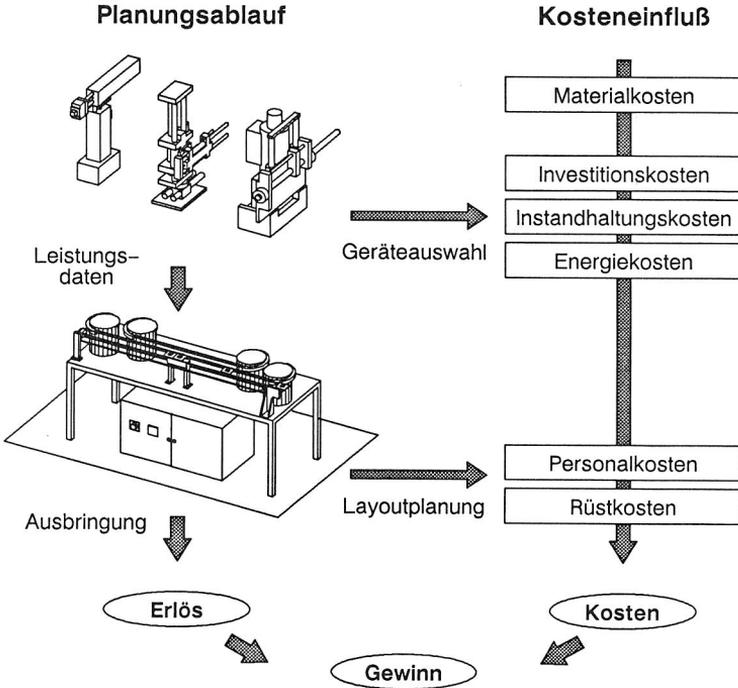


Bild 86: Planungsbegleitende Kalkulation in der Anlagenplanung

Durch die Bereitstellung von Kosteninformationen für die Planung kann die Planungsqualität wesentlich erhöht werden. Die Wirtschaftlichkeitsbewertung dient somit selbst als wirtschaftliche Planungstechnologie.

8. Zusammenfassung

In der vorliegenden Arbeit werden technologische und wirtschaftliche Anforderungen für den Einsatz rechnerintegrierter Planungswerkzeuge im Produktionsbereich dargestellt. Von wesentlicher Bedeutung sind dabei die Wechselwirkungen zwischen Planung und Fertigung einerseits und zwischen technischen und wirtschaftlichen Fragestellungen andererseits. Aufgrund der besonderen Bedingungen wird ein Schwerpunkt auf die Montage und den Einsatz von Industrierobotern als neuer Produktionstechnologie gelegt.

In der Montage ergeben sich für die Planung besondere Anforderungen, da im Gegensatz zur Teilefertigung der Gegensatz zwischen manueller Fertigung mit hoher Flexibilität und automatisierter Fertigung mit hoher Produktivität noch nicht überwunden ist. In der Montageplanung wurden bisher aufgrund der unterschiedlichen Fertigungskonzepte getrennte Ansätze für kurzfristige Funktionen wie die Montageplanerstellung oder Zeitermittlung in der manuellen Montage und langfristige Funktionen wie die Geräteauswahl und Layoutplanung in der automatisierten Montage verfolgt.

Für Planungssysteme in der Produktion ergibt sich damit die Zielsetzung, einerseits lang- und kurzfristige Funktionen in einem Konzept zu integrieren, andererseits müssen neue Planungsfunktionen wie die NC-Programmierung von Industrierobotern unterstützt werden.

Hierzu werden mögliche Integrationsstufen für durchgängige Planungskonzepte dargestellt. Zentraler Bestandteil ist das rechnerinterne Planungsmodell, das während des Planungsprozesses erstellt und genutzt wird. Konzepte, Methoden und Realisierungsansätze graphisch-interaktiver und automatisierter, aufgabenorientierter Verfahrensketten werden erläutert.

Zur Kennzeichnung des Integrationsgrades werden Abstraktionsebenen eingeführt, wobei der Übergang zu einer höheren Ebene mit zusätzlichen Modellinformationen und Planungsmechanismen verbunden ist. Die Wirkungen beim Einsatz von Planungssystemen auf die Auftragsabwicklung wird anhand dieser Modellinformationen analysiert.

Wesentlich ist hierbei der Zusammenhang zwischen Planungsumfang und Fertigungsflexibilität, die zu diesem Zweck im Hinblick auf die auszuführenden Planungsfunktionen definiert wird. Anhand von zwei Beispielen aus der elektronischen und mechanischen Montage mit hoher und geringer Fertigungsflexibilität werden die Wirkungen der Rechnerintegration auf den Planungs- und Programmierprozeß erläutert.

In der starr automatisierten Linienfertigung betrifft dies den umfangreichen Planungsprozeß vor der eigentlichen Produktion. Mit steigender Integration ergibt sich die Möglichkeit, verschiedene Aufgaben simultan durchzuführen, was gegenüber der konventionellen Sukzessivplanung eine größere Planungssicherheit mit kürzeren Planungszeiten und höherer Qualität ergibt.

In der flexiblen Fertigung wird der Einfluß der Werkstattsteuerung auf den Planungsprozeß aufgezeigt. Schnelle UmDispositionen erfordern die Bereitstellung maschinenunabhängiger Fertigungsunterlagen und einen verteilten Planungsprozeß auf Planungs- und Steuerungsebene. Am Beispiel einer Sonderbestückzelle wird gezeigt, wie durch steigende Integration die verteilte Planung und Modellbildung möglich ist.

Auf der Basis der beschriebenen Ausprägungen und Wirkungen der Integration im Planungsbereich wird im zweiten Teil der Arbeit die Wirtschaftlichkeit rechnergestützter Systeme untersucht. Hierzu wird eine differenzierte Kosten- und Nutzenbetrachtung durchgeführt, da Planungssysteme nicht über direkte Erlöswirkungen bewertet werden können. Für die Bewertung wird ein ablaforientiertes Kostenmodell herangezogen, das die Abbildung von Planungsprozessen ermöglicht, die über geeignete Bezugsgrößen analog zum Fertigungsbereich quantifiziert werden können.

Das Kostenmodell wird zur Nutzenbewertung der beschriebenen Planungskonzepte in konkreten Anwendungsfällen herangezogen. Nutzenpotentiale in der Planungs- und Produktionsphase von Fertigungssystemen werden aufgezeigt. Anhand der erzielten Ergebnisse werden die Möglichkeiten einer ganzheitlichen Bewertung kurz- und langfristiger Flexibilitätsstrukturen von Fertigungssystemen aufgezeigt. Alle verfügbaren Kosteninformationen sind im Sinne einer planungsbegleitenden Kalkulation generell in den Planungsprozeß zu integrieren.

Die Arbeit zeigt Ansätze für den Einsatz und die Bewertung zukünftiger Planungstechnologien auf. Im Mittelpunkt steht dabei die integrierte Betrachtung von Planungs- und Fertigungsprozessen im Rahmen der Auftragsabwicklung. Diese Sichtweise ermöglicht im Gegensatz zu bisherigen Konzepten auch die Einbindung und Bewertung langfristiger Planungsfunktionen hinsichtlich umfassenderer Flexibilitätsstrukturen in der Produktion.

Die Anwendung eines ablaforientierten Kostenmodelles zur Bewertung der Planungstechnologien macht die Notwendigkeit zur Weiterentwicklung bestehender Ansätze deutlich.

9. Literaturverzeichnis

1. Feldmann, K.: Sicherung der Produktivität durch angepaßte Automatisierung und verbesserte Planung, VDI Berichte 722, Praxis der Montageautomatisierung '88, VDI Verlag 1988, S. 1-14
2. Horvath, P.: Grundprobleme der Wirtschaftlichkeitsanalyse beim Einsatz neuer Informations- und Produktionstechnologien, Tagungsband Stuttgarter Controller-Forum, Poeschel Verlag, Stuttgart 1988
3. Scheer, A.-W.: CIM - Der computergesteuerte Industriebetrieb, Springer Verlag, Berlin 1987
4. Schultz-Wild, R.: An der Schwelle zur Rechnerintegration - zur Einführungsdynamik von CIM-Techniken in der Metallindustrie, Kernforschungszentrum Karlsruhe, Forschungsbericht KfK-PFT 137, Karlsruhe 1988
5. Wildemann, H.: Strategische Investitionsplanung für CAD/CAM, Bd. 1, Fachverlag für Wirtschaft und Steuern, Schäffer GmbH & Co., Stuttgart 1986
6. Lewandowski, S.: Programmsysteme zur Automatisierung des technischen Zeichnens, Reihe Produktionstechnik, Bd. 1, Hanser Verlag, München 1979
7. Scheer, A.-W.: Die neuen Anforderungen an PPS-Systeme, CIM Management 4/85, S. 32-36
8. Wiendahl, H.-P.: Belastungsorientierte Fertigungssteuerung, Hanser Verlag, München 1987

9. Helberg, P.: PPS als CIM-Baustein, Diss. TU Berlin, Erich Schmidt Verlag, Berlin 1987
10. Wedekind, H.: Die Problematik des Computer Integrated Manufacturing (CIM), Informatik Spektrum (1988) 11, S. 29-39
11. Zörnlein, G.: Flexible Fertigungssysteme: Belegung, Steuerung, Datenorganisation, Diss. Uni. Erlangen 1987
12. Fuchs, H.: Automatische Arbeitsplanerstellung. Ein Baustein im Rahmen der integrierten Fertigungsunterlagenerstellung, Diss. TH Aachen 1981
13. Spur, G.; Krause, F.-L.: CAD-Technik, Hanser Verlag, München 1984
14. Hüllenkremer: Rechnerunterstützte Arbeitsplanerstellung im CIM-Konzept, CIM Management 2 (1989), S. 10-15
15. Scholz, B.: CIM-Schnittstellen, Oldenbourg Verlag, München 1988
16. Grupe, U.; Hamacher, B.: Werkstattorientierte Auslegung und Entwicklung von CAD/CAM-Systemen, Kernforschungszentrum Karlsruhe, KfK-PFT 137, Karlsruhe 1988
17. N.N.: DIN-Bericht 15, Normung von Schnittstellen für CIM, Benth, Berlin 1987
18. Schweizer, M.: Maßvoller Roboterzuwachs, Roboter 2 (1989), S. 30-34
19. Feldmann, K.: Übersicht zu flexiblen Bestückungssystemen, Tagungsband zu Seminar, Flexibles Bestücken von Leiterplatten, Fürth 1989, S. 1-21

20. Spur, G.;
Auer, B.H.;
Sinnig, H.: Industrieroboter, Hanser Verlag, München 1979
21. Classe, D.: Beitrag zur Steigerung der Flexibilität automatisierter Montagesysteme durch Sensorintegration und erweiterte Steuerungskonzepte, Diss. Uni. Erlangen 1988
22. Gairola, A.: Montagegerechtes Konstruieren, Ein Beitrag zur Konstruktionsmethodik, Diss. Uni Darmstadt 1981
23. Ammer, E.-D.: Rechnergestützte Planung von Montageablaufstrukturen für Erzeugnisse der Serienfertigung, IPA-Bericht Band 81, Springer Verlag, Berlin 1985
24. Hirschbach, O.: Rechnergestützte Montageplanerstellung, IPA-Schriftenreihe Nr. 6, Krausskopf Verlag 1978
25. Nolting, F.-W.: Projektierung von Montagesystemen, Diss. Uni. Erlangen, Hanser Verlag 1988
26. Deutschländer, A.;
Severin, F.: Rechnerunterstützte Layout-Planung für Industrieroboteranwendungen, ZwF 81 (1986) 10, S. 515-522
27. Schlüter, K.: Simulation als Hilfsmittel für Planung und Betrieb von Produktionssystemen, atp 9 (1987), S. 416-422
28. Feldmann, K;
Eisele, R.;
Kleineidam, G.: Verfahrenskette zur Planung und Programmierung von Montagesystemen, ZwF 82 (1987) 9, S. 521-527
29. Feldmann, K.;
Eisele, R.: Optimierung von Montagezellen mit rechnergestützten Methoden, Fachseminar IFA, Nutzungsverbesserung flexibel automatisierter Montageanlagen, Fachtagung IFA Hannover 1988

30. Nagel, K.: Nutzen der Informationsverarbeitung, Oldenbourg Verlag, München Wien 1988
31. Blume, Ch.; Dillmann, R.: Freiprogrammierbare Manipulatoren: Aufbau und Programmierung von Industrierobotern, Vogel Verlag, Würzburg 1981
32. Zühlke, D.: Offline-Programmierung numerisch gesteuerter Industrieroboter, VDI-Verlag, Düsseldorf 1983
33. Duelen, G. et. al.: Offline-Programmierung von Industrierobotern, CAD/CAM-Report 4 (1987), S. 86-94
34. Hiller, M.; Wanner, M.-C.; Sallam, E.-M.: Programmsystem zur Behandlung der Rückwärtstransformation bei sechssachsigen Industrierobotern, Robotersysteme 3 (1986)
35. Paul, R.P.: Robot Manipulators: Mathematics, Programming, And Control, MIT Press Cambridge 1983
36. Wittenburg, J.; Wolz, U.: MESA VERDE, Ein Computerprogramm zur Simulation der nichtlinearen Dynamik von Vielkörpersystemen, Robotersysteme 1 (1985), S. 7-18
37. Desoyer, K; Kopacek, P.; Troch, I.: Industrieroboter und Handhabungsgeräte, Aufbau, Einsatz, Dynamik, Modellbildung und Regelung, Oldenbourg Verlag, München 1985
38. Dittrich, G.; Schopen, M.: Rechnergestützte graphische Darstellung der Arbeitsräume von Handhabungsgeräten als Hilfsmittel zur deren Auswahl für gestellte Handhabungsaufgaben, Robotersysteme 3 (1987), S. 17-26

39. Warnecke, H.-J.;
Altenheim, A.: Zwei Verfahren zur Kollisionserkennung und Vermeidung bei der Offline-Programmierung von Industrierobotern, Robotersysteme 2 (1986), S. 163-169
40. Milberg J.;
Wrba P.: Roboter-Einsatzplanung und Offline-Programmierung mit USIS, ZwF 81 (1986) 9, S. 484 - 488
41. Feldmann, K.: Ziele, Aufbau und Arbeitsweise des Kooperationsprojektes PAP, Fachtagung Rechnerintegrierte Produktionssysteme, Uni. Erlangen 1987
42. Rembold, U.;
et. al. Intelligente Roboter Teil 3: Aufgabenorientierte Programmierung, VDI-Z Bd. 127 (1985) Nr. 21, S. 871-876
43. N. N.: Siemens Benutzerhandbuch CADIS-BOFRAM September 1984
44. Hertzberg, J.: Planerstellungsmethoden der künstlichen Intelligenz, Informatik Spektrum Band 9, Juni 1986
45. Luck v., K.: Aspekte wissensgestützter Planung, Diss. Uni Hamburg 1985
46. Fikes, R.E;
Hart, P.E.;
Nilsson, N.J.: Some new directions in Robot Problem Solving, Tutorial on Robotics, IEEE Computer Society, New York 1983
47. Fahlmann, S. E.: A Planning System for Robot Construction Tasks, Tutorial on Robotics, IEEE Computer Society, New York 1983
48. Sacerdoti, E.D.: A structure for plans and behaviour, New York, Elsevier/North-Holland 1977

49. Sacerdoti, E.D.: Planning in a Hierarchy of Abstraction Spaces, Artificial Intelligence 5 1974
50. Lozano-Perez, T.; Brooks, R. A.: Task-Level-Manipulator Programming, Massachusetts Institute of Technology, Cambridge, Massachusetts, Stanford University, Stanford, California
51. Hörmann, K.: Planungssysteme in der Robotik, Informatik Fachberichte 118, S. 357-372
52. Levi, P.; Löffler, Th.; Foldenauer, J.: Robotik und Künstliche Intelligenz, Unterlagen zum Robotik-Kurs anlässlich der Frühjahrs-schule Künstliche Intelligenz 1985
53. Albus, J. S.: Robotics and Artificial Intelligence, Springer Verlag, NATO ASI Series 1984, S. 65-93
54. Liebermann, L.I.; Wesley, M. A.: AUTOPASS: An Automatic Programming System for Computer Controlled Mechanical Assembly, IBM Journal of Research and Development, Vol. 21 (1977), No.4, p. 321-333
55. Lozano-Perez, T.; Winston, P.H. et. al.: LAMA: A Language for Automatic Mechanical Assembly, Proc. of the 5th IJCAI 1977, p. 710-716
56. Eisele, R.; Kleineidam, G.: Entwicklungsschritte auf dem Weg zu impliziter, aufgabenorientierter Roboterprogrammierung (Teil 2), Moderne Fertigung 9 (1988)
57. Schneider-Hufschm., M.: Methoden und Werkzeuge zur Softwareentwicklung in einer objektorientierten Programmierumgebung, Diss. Uni Stuttgart 1986

58. Horvath, P.;
Mayer, R.: Produktionswirtschaftliche Flexibilität, WiSt 2
(1986), S. 69-76
59. Schäfer, F. W.: System zur Planung und Nutzung der
Flexibilität in der Fertigung, Diss. Uni.
Aachen 1980
60. Wiendahl, H.-P.; Produkt- und Produktionsflexibilität, wt-Z.
ind. Fert. 71 (1981), S.293-296
61. Maier, K.: Die Flexibilität betrieblicher Leistungs-
prozesse, Methodische und theoretische
Grundlagen der Problemlösung, Frankfurt am
Main 1982
62. Löhr, H.G.: Eine Planungsmethode für automatische Mon-
tagesysteme, Diss. Uni Stuttgart 1976
63. Weule, H.;
Friedmann, Th.: Rechnergestützte Produktanalyse in der Mon-
tageplanung, VDI-Z Bd. 129 (1987) 12,
S. 59-63
64. Lutz, L.: Abtakten von Montagelinien, Krausskopf Ver-
lag, Mainz 1973
65. VDI
Richtlinie 2860: Handhabungsfunktionen, Handhabungsein-
richtungen, Blatt 1: Begriffe, Definitionen,
Symbole, Entwurf, Oktober 1982
66. Scholz, W.: Modell zur datenbankgestützten Planung
automatisierter Montageanlagen, Diss. Uni.
Erlangen 1989
67. Hemberger, A.: Innovationspotentiale in der rechnergestützten
Produktion durch wissensbasierte Systeme,
Diss. Uni. Erlangen 1987
68. Hörmann, K.;
Werling, V.: Ein Verfahren zur Planung von Feinbewegun-
gen für Montageoperationen, Robotersysteme
5 (1989), S. 17-28

69. Whitney, D. E.: Force feedback control of manipulator fine motions, *Journal of Dynamic Systems, Measurement and Control* 1977
70. Huck, M.: Rechnerunterstützte Projektierung von Roboteranwendungen, VDI Berichte 723, VDI Verlag, Düsseldorf 1989
71. Warnecke, H.-J.; Schweizer, M.: Taktzeitprognose für flexible Montagestationen, VDI-Z Bd. 129 (1987) 3, S. 53-56
72. Eisele, R.; Geyer, G.: Montagesysteme aufgabenorientiert planen und programmieren, *ZwF* 84 (1989) 11
73. Feldmann, K; Eisele, R.; Geyer, G.: Wissensbasierte Ansätze zur Montageplanung, CIM-Komponenten zur Planung und Steuerung, GMFT-Verlag, München 1988
74. Weule, H.; Schmidt, E.; Weinbrecht, J.: Simulation erhöht die Planungsqualität, VDI-Z 131 (1989) 2, S.66-70
75. Maier, U.: Arbeitsgangterminierung mit variabel strukturierten Arbeitsplänen, Springer Verlag, Berlin 1980
76. Krause, F.-L.; Altmann, C.: Arbeitsplanung alternativer Prozesse für flexible Fertigungssysteme, *ZwF* 84 (1989) 5, S. 228-232
77. Pritschow, G.; et. al: Programmierung von roboterbestückten Produktionsanlagen, *Robotersysteme* 5 (1989), S. 47-56
78. Wolf, E.: Bestücken von Leiterplatten mit Industrierobotern, Diss. Uni Stuttgart 1988
79. Drexel, P.; Gross, K.-H.: Bestücken von Leiterplatten mit Industrierobotern, VDI Berichte 722, *Praxis der Montageautomatisierung '88*, S. 237-267

80. Eversheim, W. Organisation in der Produktionstechnik, Band 2 Konstruktion, VDI Verlag, Düsseldorf 1982
81. Schreuder, S.;
Upmann, R.: CIM-Wirtschaftlichkeit, Verlag TÜV Rheinland, Köln 1988
82. Schreuder, S.;
Fuest, N.: CAD/CAM für mittelständische Unternehmen, Verlag TÜV Rheinland, Köln 1988
83. Horvath, P.;
Mayer, R.: CIM-Wirtschaftlichkeit aus Controller-Sicht, CIM-Management 4/88, S. 48-52
84. Knoop, J.: Online-Kostenrechnung für die CIM-Planung, Betriebliche Informations- und Kommunikationssysteme, Bd. 5, Schmidt Verlag 1986
85. Miller, J. G.; The hidden factory, Harvard Business Review 63 (1985) S.84-89
86. Kaplan, R. S.: CIM-Investitionen sind keine Glaubensfrage, Harvardmanager (1986) 3, S. 78-85
87. Mertens, P;
Haun, P.: Die Nutzung von Daten- und Methodenbanken für das entscheidungsorientierte Rechnungswesen, HDM 136 (1986), S. 36-50
88. Sinzig, W.: Datenbankorientiertes Rechnungswesen, Springer Verlag, Berlin 1988
89. Hummel, S.;
Männel, W.: Kostenrechnung 2, Moderne Verfahren und Systeme, Gabler Verlag, Wiesbaden 1983
90. Horvath, P;
Kleiner, F.;
Mayer, R.: Differenzierte Kosteninformationen zur Entscheidungsunterstützung in der flexiblen Montage, KRP 4/86, S. 133 ff
91. Wedekind, H.;
Ortner, E.: Der Aufbau einer Datenbank für die Kostenrechnung, DBW 37 (1977) 4, S. 533-542

92. Riebel, P.: Einzelkosten- und Deckungsbeitragsrechnung, Gabler Verlag, Wiesbaden 1985
93. Kern, W.: Investitionsrechnung, Poeschel Verlag, Stuttgart 1974
94. Horvath, P
Mayer, R.: Prozeßkostenrechnung, Controlling 4 (1989), S. 214 -219
95. Erlenspiel, K.: Kostengünstig Konstruieren, Springer Verlag, München 1985
96. Kreisfeld, P.: Kostenbestimmung mit CAD-Systemen für Rotationsteile, Produktionstechnik - Berlin,1 Bd. 41, Carl Hanser Verlag, München 1982

Lebenslauf

- 1959 Rainer Eisele, geb. am 3. März 1959
in Biberach/Riß
Eltern: Viktor Eisele
Ursula Eisele, geb. Wanner
- 1966 – 1969 Besuch der Grundschule in Stuttgart
- 1969 – 1978 Besuch des Wagenburggymnasiums in Stuttgart
Abschluß Abitur
- 1978 – 1979 Wehrdienst
- 1979 – 1985 Studium des Wirtschaftsingenieurwesens
an der Universität Karlsruhe
Abschluß Diplom
- 1985 – 1990 Wissenschaftlicher Mitarbeiter am Lehrstuhl
für Fertigungsautomatisierung und Produktions-
systematik der Universität Erlangen-Nürnberg
Lehrstuhlinhaber: Prof. Dr.-Ing. K. Feldmann
Abschluß Promotion

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 rechnerintegrierter Planungssysteme
183 Seiten, 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, 85 Bilder. 1990. Kartoniert.

Band 12

Gerhard Kleineidam

CAD/CAP: Rechnergestützte Montagefeinplanung
203 Seiten, 107 Bilder. 1990. Kartoniert.

Band 13

Frank Vollertsen

**Pulvermetallurgische Verarbeitung eines übereutektoiden
verschleißfesten Stahls**
XIII + 217 Seiten, 67 Bilder, 34 Tabellen. 1990. Kartoniert.