

FAPS

Walter
Colombo

27.8.86

Friedrich-Wilhelm Nolting

Projektierung von Montagesystemen

Friedrich–Wilhelm Nolting

Projektierung von Montagesystemen

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 Universität Erlangen-Nürnberg

Tag der Einreichung:	20. Juli 1988
Tag der Promotion:	4. November 1988
Dekan:	Prof. Dr.rer.nat. F. Hofmann
Berichterstatter:	Prof. Dr.-Ing. K. Feldmann
	Prof. Dr.-Ing. H.-P. Wiendahl

CIP-Titelaufnahme der Deutschen Bibliothek

Nolting, Friedrich-Wilhelm:
Projektierung von Montagesystemen / Friedrich-Wilhelm
Nolting. - München ; Wien : Hanser, 1989
(Fertigungstechnik - Erlangen)
Zugl.: Erlangen, Nürnberg, Univ., Diss., 1988
ISBN 3-446-15541-4

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, Mikrofilme
oder ein anderes Verfahren), auch nicht für Zwecke der
Unterrichtsgestaltung - mit Ausnahme der in den §§ 53,
54 URG ausdrücklich genannten Sonderfällen -, reproduziert
oder unter Verwendung elektronischer Systeme verarbeitet,
vervielfältigt oder verbreitet werden.

© Carl Hanser Verlag München, Wien 1989
Herstellung: Druckerei Bresler, Erlangen
Printed in Germany

V O R W O R T

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

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

Herrn Professor Dr.-Ing. H.-P. Wiendahl, Leiter des Instituts für Fabrikanlagen der Universität Hannover, danke ich für seine Bereitschaft, das Korreferat zu übernehmen und die konstruktive Kritik sowie die fachlichen Anregungen zu meiner Arbeit.

Ferner gilt mein Dank allen Kollegen, Studenten und wissenschaftlichen Hilfskräften, die durch ihre Unterstützung zum Gelingen der Arbeit beigetragen haben. Das gilt insbesondere für Herrn Dipl.-Inf. R.-U. Knödtel, Herrn Dipl.-Ing. D. Krause, Herrn Dipl.-Inf. T. Gerhart, Herrn Dipl.-Ing. B. Böse sowie Frau C. Götschel und Frau L. Wahl für die Textverarbeitung und Bildgestaltung.

Friedrich-Wilhelm Nolting

Projektierung von Montagesystemen

Inhaltsübersicht

	Seite
1. Einleitung	1
2. Stand der Erkenntnisse und Problemstellung	6
2.1 Methoden zur Bearbeitung von industriellen Vorhaben	7
2.1.1 Planung	8
2.1.2 Projektierung	9
2.2 Planung von Montagesystemen	9
2.2.1 Verfahren zur Planung von Montagereihenfolgen	13
2.2.2 Verfahrensvergleich	20
2.3 Automatisierung von Montagesystemen	24
2.3.1 Rationalisierung durch automatisierte Montage	24
2.3.2 Projektierung von automatisierten Montagesystemen	27
2.4 Zielsetzung	29
3. Vorbereitende Maßnahmen zur Projektierung von automatisierten Montagesystemen	34
3.1 Methodik zur projektierungsunterstützenden Standardisierung	35
3.2 Ergebnisse aus einer exemplarischen Erhebung	37
4. Modell zur rechnerintegrierten Projektierung von automatisierten Montagesystemen	44
4.1 Modelltheorie und allgemeiner Modellansatz	46
4.1.1 Modellaufbau und Modellstruktur	47
4.1.2 Das reale Modell	48
4.1.3 Inkongruenzen zwischen System- und Modellverhalten	50

4.2	Vorhandene DV-Strukturen in Industriebetrieben	50
4.2.1	Einbindung der rechnergestützten Projektierung	52
4.2.2	Projektierungsmodell und CIM-Umfeld	53
4.3	Montagereihenfolgeplanung im Modell	54
4.3.1	Anforderungsprofil in der Projektierungsphase	55
4.3.2	Abschätzen der Rechenzeit	59
4.4	Aufbau von Funktionsstrukturen	63
4.4.1	Montagevorgabezeit und Funktionselementezeit	65
4.4.2	Alternative Modelle	66
4.4.3	Funktionsstrukturen im Modell	69
5.	Wirtschaftlichkeitsrechnung für automatisierte Montagesysteme	71
5.1	Geeignete Methoden und Ansätze	73
5.1.1	Statische Verfahren	78
5.1.2	Dynamische Verfahren	80
5.1.3	Angepaßtes Wirtschaftlichkeitsbeurteilungsmodell für integrierte automatische Montagesysteme	84
5.2	Problemstellung bei der Investitionsentscheidung	88
5.2.1	Kapitaleinsatzermittlung für Montagesysteme	89
5.2.2	Die wirtschaftliche Nutzungsdauer	90
5.2.3	Fixe und variable Kosten	91
6.	DV-technische Realisierung des Projektierungsmodells	92
6.1	Entwurf und Implementierung einer Datenbank	94
6.1.1	Datenbankmanagementsysteme	95
6.1.2	Begriffsdefinitionen für den Datenbankentwurf	96
6.1.3	Entwurf des konzeptionellen Datenbankschemas	98
6.1.4	Begriffe und Entitätenblockdiagramme der Projektierungsmodule	99
6.2	Das Programmpaket EDIPLAN	105
6.2.1	Teilverrichtungsermittlung	108

6.2.2 Berechnung der Planzeiten	112
6.2.3 Aufbau der Programmstruktur	120
6.2.4 Montageaufgabenanalyse mit EDIPLAN	122
6.3 Das Programmpaket DOGMA	126
6.3.1 Zielsetzung des Programmpaketes	128
6.3.2 Wirtschaftliche Bedeutung des Bandabgleichs	129
6.3.3 Aufbau und Funktionen von Dogma	131
6.3.4 Interne Datenstruktur und Fehlerbehandlung	135
6.3.5 Optimierungsablauf	136
6.4 Das Programmpaket PLASMA	138
6.4.1 Aufgaben und Zielsetzung der Funktionszuordnung	139
6.4.2 Programmaufbau und Menüstruktur	140
6.4.3 Funktionselementezuordnung	144
6.4.4 Funktionselementezuordnung bei Produktvarianten	147
6.5 Das Programmpaket KAPITAL	150
6.5.1 Ablaufstruktur des Programmsystems	151
6.5.2 Betrachtung der Rückflüsse	154
6.5.3 Kennzahlanalyse mittels Parametervariation	157
6.5.4 Sensitivitätsanalyse	159
6.5.5 Grenzen der Parameter- und Sensitivitätsanalyse	163
7. Anwendungsbeispiel für das Projektierungsmodell	165
7.1 Aufgabenstellung	167
7.2 Planvorgabezeitberechnungen und Abtaktungen	168
7.2.1 Heuristische und enumerative Abtaktungsergebnisse	172
7.3 Optimierter Montageumfang und Funktionslayout	175
7.4 Bewertung mit dem Wirtschaftlichkeitsbeurteilungsmodell	178
7.5 Modellvalidierung	186
8. Zusammenfassung	188
9. Literaturverzeichnis	191

1. Einleitung

Die exportorientierte Wirtschaft der Bundesrepublik Deutschland bietet auf einem Weltmarkt an, der durch eine Fülle von landesspezifischen Normen und Gesetzen gekennzeichnet ist, wodurch sich zwangsläufig bei den Exporteuren eine Steigerung der Produktvarianten einstellt. Die dadurch entstehenden Mehrkosten können in aller Regel nicht durch Preisanpassung bei diesen Produkten kompensiert werden.

Unternehmen der Elektro- und Feinwerktechnik stehen unter einem besonders starken Wettbewerbsdruck seitens in- und ausländischer Anbieter. Sie müssen sich auf ständige Veränderung der herzustellenden Produkte und auf technologische Innovationen in den Fertigungsverfahren einstellen, wobei insbesondere durch den Einsatz der Mikroelektronik einschneidende Strukturwandlungen auftreten. Damit wird der genannte Industriebereich sowohl seitens der Produkte als auch durch die Produktion selbst mit dieser sogenannten vierten industriellen Revolution konfrontiert [119].

Dabei rücken durch die Erfolge bei der Optimierung fertigungstechnischer Prozesse, wie etwa der Drehbearbeitung, die Reserven in der Montagerationalisierung und -automatisierung zunehmend in den Vordergrund [3,63,111]. Insbesondere die Projektierungs- und Entwicklungsabteilungen der betroffenen Industriebetriebe stehen unter starkem Zeit- und Kostendruck, um den Anforderungen zu genügen, da sich der durchgreifende Strukturwandel durch die Automatisierung und Rationalisierung in der Produktion nicht in gleichem Maße in den planerischen Ebenen fortgesetzt hat.

Darüber hinaus sind schon weitere Tendenzen in den Industriebetrieben zu berücksichtigen, welche die Zielsetzung einer integralen Produktion verfolgen. Hinter dem Begriff CIM (Computer Integrated Manufacturing) verbergen sich eine Reihe von Anforderungen, die bei Rationalisierungs- und Automatisierungsvorhaben beachtet werden müssen.

Die Projektierung unter CIM-Aspekten bedeutet neben der Komplexität der Aufgabenstellung auch die Bewältigung völlig neuer Aufgaben durch die betreffenden Mitarbeiter. Häufig müssen Techniken eingesetzt werden, über die nur wenige Erfahrungswerte vorliegen. Damit verbunden ist das unbefriedigend hohe Personalpotential, welches in Projektierungs- und Planungsteams eingesetzt werden muß.

Des weiteren ist die derzeitige Situation gekennzeichnet durch extrem kurze Innovationszyklen von der Produktentwicklung bis zur Markteinführung. Die Ursachen hierfür liegen zum Teil im Verhalten des Marktes, aber unter anderem auch in der schnellen Entwicklung der Mikroelektronik begründet.

Vielfach wird betont, daß die produzierte Variantenzahl höher ist als die marktseitig geforderte [26]. Die Gründe für die Produktion von überflüssigen Varianten sind in der deduktiven Fertigungsorganisation zu finden. Es werden in den meisten Betrieben Produkte entwickelt, die anschließend gefertigt werden sollen, dabei aber vielfach nicht auf die vorhandenen Produktionseinrichtungen abgestimmt sind [30].

Auch die mangelnde Organisation und Kooperation zwischen Unternehmensbereichen trägt dazu bei, zusätzliche Varianten und Abstimmungsfehler entstehen zu lassen.

Als besonderer Engpaß bei der Produktion von variantenreichen Produktpaletten in der Elektro- und Feinwerktechnik hat sich der Montagebereich erwiesen. Die Produkte verlangen häufig eine Reihe von anspruchsvollen Montageoperationen mit hohem sensorischen Aufwand. Dabei sind entsprechend der Variantenzahl die zu montierenden Teile an den Arbeitsplätzen bereitzustellen und Baugruppen oder Fertigteile abzutransportieren.

Die Möglichkeiten von Vertauschung oder Verwechslung sind auszuschließen. Besonders problemreich ist die Abtaktung von Fließmontagen bei Varianten, da die nicht zu eliminierenden Verlustzeiten mit der Variantenzahl überproportional steigen.

Ein wichtiger Standard bundesdeutscher Exporte ist das hohe Qualitätsniveau der Produkte. Im Zusammenhang mit der Montage in der Elektro- und Feinwerktechnik resultieren daraus die Forderungen nach ständiger Qualitätskontrolle und -sicherung. Damit verbunden ist ein entsprechend hoher Aufwand an Meß-, Prüf- und Kontrolleinrichtungen in der Produktion. Bei einigen Produkten dieser Branche übertrifft der Aufwand für Messen und Prüfen den für die eigentliche Fertigung [118].

Durch den Strukturwandel vom mechanischen zum elektrofeinwerktechnischen Produkt mit Mikroelektronik hat sich der Druck auf die Montage noch verstärkt. Bild 1-1 verdeutlicht dies am Beispiel des Fernschreibers.

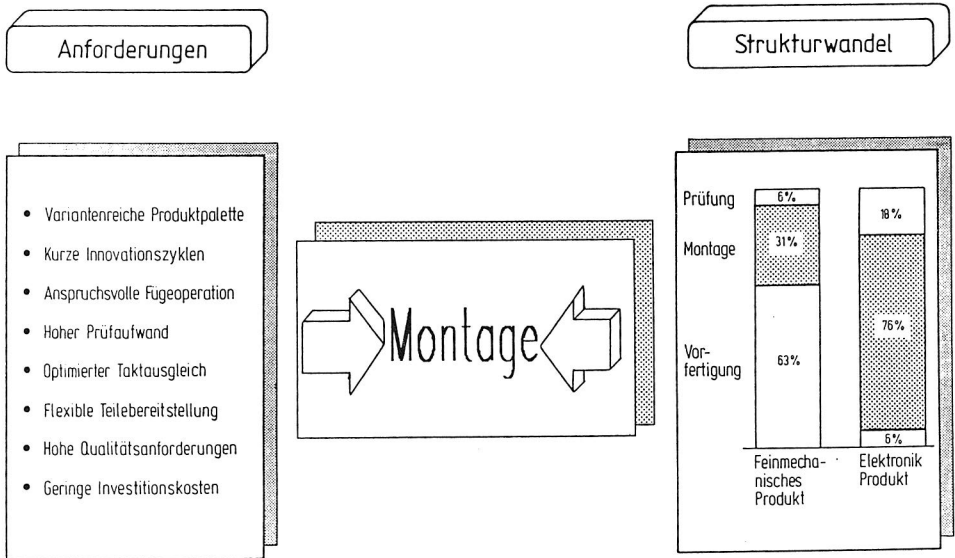


Bild 1-1: Veränderte Anforderungen und Strukturwandel in der Montage

Neben den genannten Anforderungen ist der Anteil der Montagestunden an der Gesamtfertigungszeit in dem im Bild gezeigten Beispiel zur bestimmenden Größe geworden. Die Fertigungsstun-

denstruktur beim mechanischen Produkt erklärt auch, warum sich bisher Forschung und Entwicklung vorzugsweise der Vorfertigung gewidmet haben, was dazu geführt hat, daß die Leistungsunterschiede zwischen Vorfertigung und Montage noch gravierender wurden.

Zur Erhaltung der Wettbewerbsfähigkeit sind die Unternehmen der Elektro- und Feinwerktechnik gezwungen, die sich ihnen bietenden Rationalisierungspotentiale zu nutzen.

Schwerpunkt der Rationalisierungsbestrebung ist dabei die Montage, da hier, analytisch betrachtet, die größten Einsparungen zu erwarten sind.

Bei den Produktionseinrichtungen werden in den Unternehmen der Elektro- und Feinwerktechnik zunehmend auch automatisierte Montagesysteme eingesetzt. Um deren Rationalisierungspotentiale optimal ausschöpfen zu können, müssen organisatorische Maßnahmen gezielt auf eine Verbesserung der innerbetrieblichen Information und Kooperation, insbesondere zwischen Entwicklungs- und Produktionsbereichen, gerichtet sein. So sollten z.B. neue Produktvarianten in ihrer Montagestruktur dem Montageablauf von vorhandenen automatisierten Montagesystemen für ähnliche Produkte angepaßt werden.

Zunächst bieten die Struktur der Produkte und deren Montage sowie das zugehörige Umfeld erste Ansatzpunkte für Rationalisierungsmaßnahmen. So gilt es, den bisherigen, deduktiven Entwicklungs- und Planungsablauf für die Produktion in Zukunft umzustellen auf eine integrale Projektierung. Hierbei sollten die vorhandenen Produktionseinrichtungen in die Produktentwicklung miteinbezogen werden, um den ständigen Produktinnovationen nicht auch noch unwirtschaftliche Produktionsinnovationen folgen zu lassen.

Kennzeichnend für den Erfolg von Rationalisierungen ist die Steigerung der Produktivität. Dabei sind die Investitions- oder Kapitalproduktivität und die Arbeitsproduktivität zu unterscheiden, wobei sich letztlich auch die Arbeitsprodukti-

vität in Geldwerten ausdrücken läßt.

Grundsätzlich steigt die Kapitalproduktivität mit sinkenden Kosten, die im Unternehmen entstehen. In der Montage sind durch Rationalisierung, Senkung der Bestände und Verkürzung der Durchlaufzeiten Kosten zu senken. Neben der Optimierung der Logistik kann zudem auch die flexible Montageautomatisierung einen wesentlichen Beitrag zur Produktivitätssteigerung leisten. Hier gilt es, die vorhandenen Rationalisierungspotentiale aufzudecken.

Im Bereich der Montagesystemgestaltung kann es mit Hilfe rechnergestützter Methoden gelingen, solche Reserven auszunutzen. Dies allerdings nur unter der Voraussetzung, daß die Wirtschaftlichkeit mitberücksichtigt wird und im Falle unsicherer Eingangsdaten Vorabschätzungen in Form von Sensitivitätsanalysen durchgeführt werden.

Den gesamten Aufgabenumfang optimal in eine Ablaufstruktur einzubinden und eine ganzheitliche Rechnerunterstützung bei wiederkehrenden Kalkulationsproblemen anzubieten, ist somit eine vordringliche Herausforderung für den Aufbau eines rechnergestützten Modells zur Projektierung von Montagesystemen in der Elektrofeinwerktechnik.

2. Stand der Erkenntnisse und Problemstellung

Der Aufgabenstellung, die Projektierung und Planung von Montageanlagen mit Hilfsmitteln auszurüsten, haben sich eine Reihe von Arbeiten gewidmet [2,74,83,127].

Unter rechnergestütztem Lösen von Ingenieuraufgaben wird im Zusammenhang mit der Anlagenplanung vielfach die rein mechanistisch mathematische Auseinandersetzung mit Detailproblemen verstanden [5]. Allerdings ist in der Regel bei der Montageanlagenplanung nicht die Beantwortung von Eigenfrequenzen und -formen, sondern von Konfiguration und Kosten ausschlaggebend [17]. In diesem Zusammenhang wird vielfach die reine Layout-erzeugung rechnergestützt erarbeitet, wobei dieser Anteil der Ingenieurleistung bei der Anlagengesamtplanung gering sein dürfte [9].

Der Arbeitsplatz des Planungsingenieurs weicht zudem von der in Bild 2-1 dargestellten Zielvorstellung in vielen Fällen noch deutlich ab.

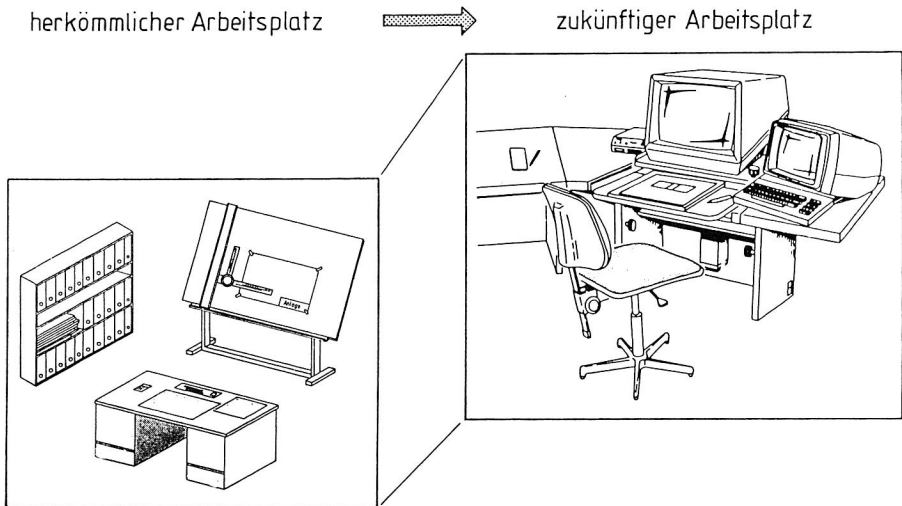


Bild 2-1: Bisheriger und künftiger Arbeitsplatz des Planungsingenieurs

Eine Problemstellung, die durchaus einer Rechnerunterstützung zugänglich gemacht werden kann, ist die Abtaktung von Montagelinien. So ermittelte CHASE in den USA bei 254 Unternehmen, daß nur 5% ein rechnergestütztes Abtaktungsverfahren anwenden. Als Erklärung findet sich hier unter anderem die festgestellte Inflexibilität bei den Planern [103].

Je nach Interessengebiet und Sichtweise der Autoren wird das Hauptaugenmerk auf sicher wichtige Aspekte aus dem gesamten Feld der Planung gelegt. So ist z.B. nur ein geringer Teil der Montageprozesse ohne Konstruktionsänderung zu automatisieren [134]. Soll also eine sinnvolle Rationalisierung durchgeführt werden, ist eine Einbindung der Produktentwicklung und -konstruktion in die Montageanlagenprojektierung unumgänglich.

Der Entwicklungsbereich wird in anderer Hinsicht zunehmend zu beachten sein, da auch bei gegenwärtig gesunder Fertigungsstruktur und Finanzlage des Betriebes zukünftige Entwicklungen in die Planungen mit einzubeziehen sind [55]. Insbesondere die immer kürzer werdenden Innovationszeiten bei neuen Produkten führen dazu, daß im Fertigungsbereich zunehmend vorher agiert und nicht wie bisher durch mehr oder weniger kurzfristige Umstrukturierungen reagiert werden muß. Daraus folgt eine mehr fertigungs- und prozeßorientierte Technik im Gegensatz zu vormaliger Produktorientierung in den Betrieben.

Eine Quintessenz dürfte die Bildung von Projektteams sein, die bei der Montageanlagenprojektierung aus Vertretern unterschiedlicher Unternehmensbereiche zusammengesetzt sind. Dabei werden diese naturgemäß in den Phasen der Projektbearbeitung mehr oder weniger stark beteiligt sein [132].

2.1 Methoden zur Bearbeitung von industriellen Vorhaben

Zum besseren Verständnis der Methoden zur Bearbeitung von industriellen Vorhaben erscheint es von Bedeutung, die beiden

Begriffe Planung und Projektierung in ihrer Definition gegenüberzustellen. Dabei soll verdeutlicht werden, daß nicht so sehr allein die Wortwahl, sondern die damit verbundene Problemstellung und Vorgehensweise voneinander zu unterscheiden sind.

2.1.1 Planung

Beschränkt man das menschliche Handeln auf den bewußten und zielgerichteten Bereich, also z.B. die berufliche Tätigkeit, so läßt sich jedes Vorgehen in die vier Phasen **Planung, Entscheidung, Durchführung** und **Kontrolle** gliedern [89]. Es findet also eine klare Abgrenzung der Phasen Planung und Entscheidung statt, denn die Planung soll der Entscheidungsvorbereitung dienen und somit alle notwendigen Maßnahmen enthalten, eine optimale Entscheidung zu treffen.

Ohnehin liegt die Zielsetzung in einem optimalen Handeln, d.h. auch die Planung selbst verfolgt ein Optimierungsziel. Welches Ziel im jeweiligen Planungsablauf angestrebt wird, ist für die Durchführung zunächst unbedeutend. Wird ein Optimierungsziel erreicht, gilt auch die folgerichtige Entscheidung als optimal. Die Optimierung in der Planungsphase ist in der Regel nur mit mathematischen Methoden durchführbar. Diese Anwendung von mathematischen Methoden zur Vorbereitung optimaler Entscheidungen wird als **Optimalplanung** bezeichnet [89].

Da es sich bei diesen Bezeichnungen nicht um allgemeingültige Definitionen handelt, sei hier die essentielle Aussage der Optimalplanung zusammengefaßt: "... nicht die Methode der Planung ist optimal, sondern die Entscheidung aufgrund der erzielten Ergebnisse..." [89]. Daraus ergibt sich für die Durchführung von betrieblichen Planungen ein hohes Verantwortungspotential, denn wie geplant wird und mit welchen Methoden hat entscheidenden Einfluß auf das Ergebnis der Planungsphase. Eine sich anschließende Entscheidung wird letztendlich zugunsten des optimalen Planungsergebnisses zu treffen sein, gleichgültig auf welchen Wegen dieses erreicht wurde.

2.1.2 Projektierung

Der Begriff der Projektierung hat sich in Wirtschaft und Industrie seit etwa 1960 durchgesetzt [21]. Zunächst verstand man und versteht man zum Teil heute noch unter Projekt ein Vorhaben dessen Ablauf zumindest weitgehend einmalig ist, dessen Struktur eine bestimmte Komplexität aufweist und dessen festgelegte Zielsetzung in vorgegebener Zeit und mit gegebenen Mitteln zu erreichen ist [18,21]. Bearbeitet werden Projekte im Team, bestehend aus Mitarbeitern der verschiedensten Fachgebiete.

Es gilt also, ein Projekt im Gegensatz zur Planung ganzheitlich zu betrachten und das Vorhaben mit den geforderten Leistungsmerkmalen im Team zu bearbeiten. Durch die Definition von Teilzielen und die Heraushebung der Bedeutung für das Gesamtprojekt ergeben sich für die Teammitglieder autarke Verantwortungsbereiche mit Gesamtprojektüberblick und entsprechender Motivation. Mit diesen Organisationsformen und Methoden können Rationalisierungspotentiale in den Planungsabteilungen ausgeschöpft werden. Dabei soll kein verstärkter Leistungsdruck ausgeübt, sondern durch Einbindung eines geschlossenen Aufgabengebietes in ein Gesamtprojekt die Identifikation des Mitarbeiters mit dem Vorhaben und damit die Motivation entscheidend verbessert werden.

Somit kann die Bearbeitung von industriellen Vorhaben mit der Methode der Projektierung im Gegensatz zur Planung als erfolgversprechenderes Instrument angesehen werden. Im folgenden werden die bisher bekannten Methoden zur Planung und Projektierung von Montagesystemen gegenübergestellt.

2.2 Planung und Projektierung von Montagesystemen

Die Basis für die Aktivitäten aller Unternehmensbereiche ist das Produkt. Die Eigenschaften des Produktes, insbesondere

Größe, Komplexität, Empfindlichkeit, Wert, Varianten, Stückzahlen uvm. sind ausschlaggebend für die Ziele der einzelnen Abteilungen und strukturbestimmend für das Unternehmen. Die Struktur des Produktes selbst ist dagegen nahezu ausschließlich funktionsbedingt [26], denn die Güte der Funktionserfüllung ist weitgehend der Gradmesser für den Markterfolg.

Die Funktion des Gesamtproduktes wird in der Regel in Subfunktionen mit wiederum hierarchisch geordneten Teilfunktionen untergliedert, die mit Einzelteilen und Baugruppen realisiert werden. Aus Stücklisten werden in der Produktionsplanung Arbeitspläne und Produktionseinrichtungen aufbereitet sowie Baugruppen den Fertigungsstufen und -einrichtungen zugeteilt. In der Arbeitsvorbereitung werden Vorgabezeiten für die Baugruppen- und Produktmontage ermittelt und zu Aufträgen zusammengefaßt. Das Material- und Lagerwesen organisiert die Teilebereitstellung und Terminierung der Beschaffungsaufträge sowie die baugruppenbezogene Bereitstellung. Im Rechnungswesen schließlich werden Kalkulationsdaten zusammengestellt und eine verursachungsbezogene Nachkalkulation, ebenfalls wieder auf Baugruppen bezogen, durchgeführt. Es zeigt sich somit die deduktive Organisation und Produktion bei herkömmlicher Unternehmensstruktur. Das Produkt steht im Mittelpunkt, und die Produktion ist Erfüller im Herstellungsprozeß [98]. Mit der Abnahme der Stückzahlen bei gleichzeitig gestiegener Variantenzahl ergeben sich nun Probleme, die einerseits durch die Vielfalt der zu montierenden Teile, andererseits durch die Schwierigkeit der Automatisierung solcher Produktpaletten entstehen. Insbesondere die internationale Kostensituation zwingt in der Produktionsebene die Betriebe zur Rationalisierung auch solcher Produkte und Stückzahlen, die vormalig zu den sogenannten Sonderbaureihen zählten.

Zur Planung und Bewertung von Montagesystemen wurden in der Vergangenheit Methoden vorgestellt, die von den bekannten Planungsschritten nach VDI [92] oder der 6-Stufen-Methode nach REFA [90] ausgehen. Sämtliche an die Aufgaben und Rand-

bedingungen der Montage angepaßte Planungsmethoden sind in ihrer Grobstruktur sehr ähnlich aufgebaut. Dabei werden Einzelschritte mit Aufgabenschwerpunkten und Zielen vorgegeben, wie sie Bild 2-2 prinzipiell wiedergibt.

Im Bereich der Einzel- und Kleinserienmontage sind spezielle Vorgehensweisen entwickelt worden, die Montagetätigkeiten funktional betrachten, und den Planungsablauf in eine Grob- und Feinplanung abstufen [2,82,74]. Ein besonderer Aspekt ist in diesem Zusammenhang die ergonomische Gestaltung von Handmontagearbeitsplätzen sowie der zugehörigen Betriebsmittel. Hierzu sind Ausführungsmethoden und Bewertungsverfahren entwickelt worden, die sich dieser Problematik widmen [81].

Thematisch zuzuordnen sind ebenfalls Arbeiten zur rationellen Montageplanerstellung [54]. Hier wird das Problemfeld aufgegriffen, daß Zeichnungen und Stücklisten in der Regel keine ausreichenden Arbeitsunterlagen für das Montagepersonal darstellen. Montageplandatenerstellung, -auswertung und -verarbeitung werden dabei unter Einsatz der EDV durchgeführt.

Da nicht nur Größe und Komplexität der Montageanlagen gestiegen ist, sondern sich auch die Anzahl möglicher Ausführungsvarianten vergrößert hat, wäre für das gesamte Aufgabenfeld eine Rechnerunterstützung wünschenswert.

Im Angebotswesen für flexible Fertigungssysteme sind Verfahren zur rechnerunterstützten Projektierung vorgestellt worden [108]. Aufgrund der vergleichsweise hohen Investitionssummen für flexible Fertigungssysteme muß hier ein besonderer Schwerpunkt auf den Nachweis der Wirtschaftlichkeit im Vergleich zu herkömmlichen Systemen gelegt werden. Die Vorgehensweise ist hierbei naturgemäß abgestimmt auf das Problemfeld der flexiblen Fertigungssysteme. Ausgehend von einem umfassenden Fragebogen, der vom Anwender zu beantworten ist, werden die technisch erforderlichen Anlagenkomponenten konfiguriert. Sofern Alternativen zur Verfügung stehen, werden diese berücksichtigt und anschließend einer kostenmäßigen

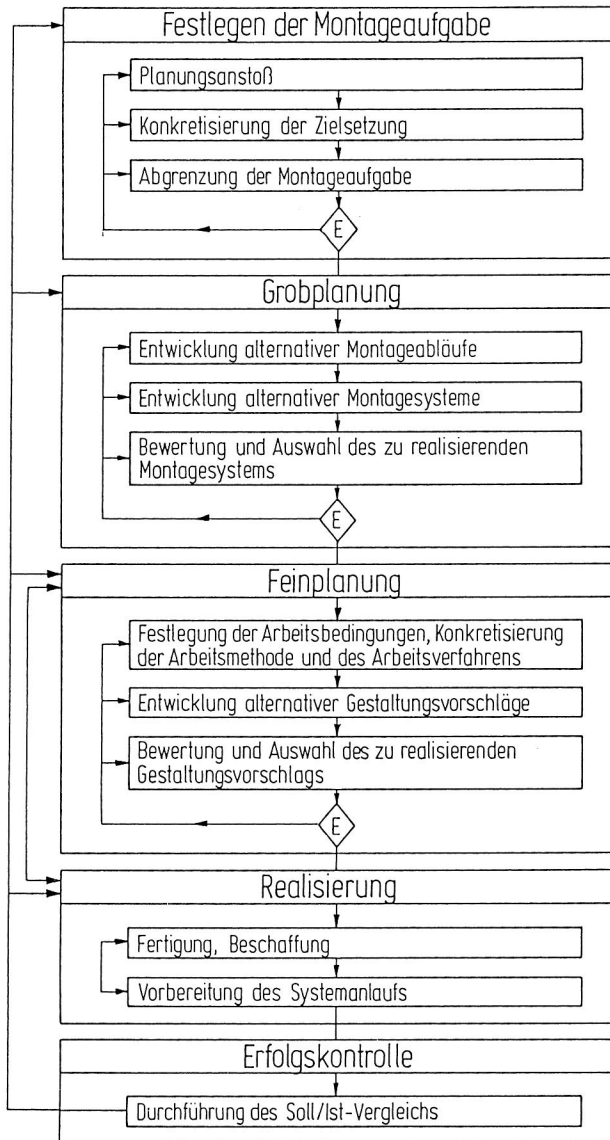


Bild 2-2: Grobstruktur von Montageanlagenplanungsverfahren

Bewertung unterzogen. Als Entscheidungshilfsmittel liegen dem Anwender abschließend Systemkonfigurationen, Kapazitäts- und Auslegungsplanung sowie Wirtschaftlichkeitsberechnungen vor. Eine Übertragung auf die Projektierung von Montageanlagen läßt sich nur sehr bedingt vornehmen, zumal die spanende Fertigung, ausgehend von einem vorgegebenen Produktspektrum, prozeßorientiert aufgebaut wird. Montagesysteme dagegen müssen in ihrer Konfiguration auf produktnahe Montageschritte abgestimmt werden und sind somit produktorientiert auszulegen. Bevor auf die Projektierung von Montagesystemen eingegangen wird, sollen im folgenden für das verbreitete Problem der Montagereihenfolgebildung geeignete Planungsmethoden vorgestellt werden.

2.2.1 Verfahren zur Planung von Montagereihenfolgen

Aus dem Zusammenbau von Produkten nach dem Fließprinzip haben sich neben der Gestaltung der Anlagen noch weitere Planungsaufgaben ergeben. So ist die exakte lokale und terminliche Abstimmung der Einzeltätigkeiten aufeinander und die Zergliederung der Arbeitsgänge auf produktionsflußangepaßte Montagevorrichtungen zu einer bedeutenden Herausforderung geworden [76].

Die zeitliche Organisationsaufgabe wird in diesem Zusammenhang als Bandabgleichung, Kapazitätsausgleich, Leistungs- oder Fließbandabstimmung, Abtaktung und auch Leerzeitminimierung bezeichnet [65]. Man versteht unter diesem Organisationsproblem die Zuordnung der Montagetätigkeiten zu den Stationen eines Systems, wobei eine vorgegebene Zielfunktion möglichst optimal erfüllt werden soll. Die Zielfunktion selbst ist abhängig von der Planungsaufgabe. Soll eine Gesamtlinie abgetaktet werden, liegt die Zielsetzung im Erreichen einer möglichst geringen Gesamtverlustzeit. In anderen Fällen kann auch das Einhalten einer Vorgabetaktzeit gefordert sein.

Zur Veranschaulichung der bestehenden Planungsmethoden müssen vorab einige Begriffe vereinbart sein. Dazu werden die aus der Literatur bekanntesten Definitionen im folgenden gegenübergestellt. Die Einzeltätigkeiten, die zur Montage eines Produktes erforderlich sind, werden als Teilverrichtungen, Arbeitselemente, Arbeitsvorgänge oder Elementartätigkeiten bezeichnet [45,46,63,76,102]. Um den Begriff von der reinen manuellen Montage zu lösen, wird in dieser Arbeit der Montageeinzelvorgang mit **Teilverrichtung** V_i bezeichnet. Jeder dieser Teilverrichtungen muß eine Durchführungszeit, die sogenannte **Vorgabezeit** t_{vi} zugeordnet werden. Der Begriff Vorgabezeit entstammt den Zeitermittlungsverfahren für manuelle Montagetätigkeiten (z.B. Refa, MTM, Work Faktor), wird aber hier aufgrund seiner Verbreitung auch für automatische Teilverrichtungsausführungen eingesetzt.

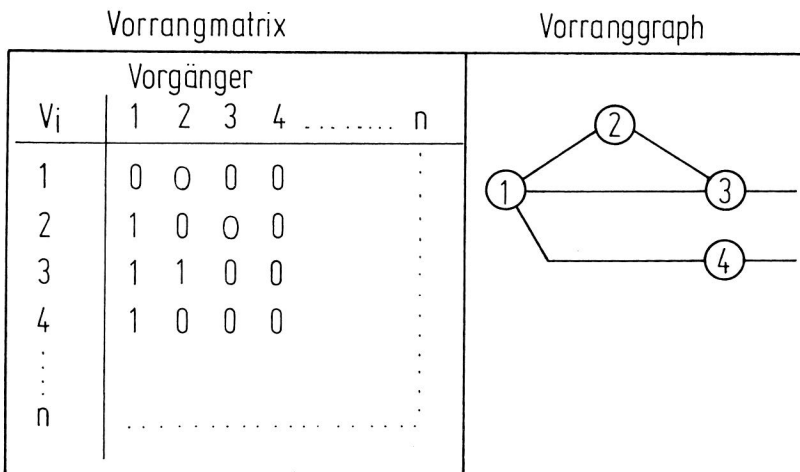


Bild 2-3: Vorranggraph und Vorrangmatrix

Neben Informationen über Teilverrichtungsart und Durchführungszeit sind für alle bekannten Planungsmethoden Angaben über die produktbedingte technologische Reihenfolge der einzelnen Teilverrichtungen erforderlich. Diese Reihenfolgebeziehungen lassen sich in Form einer Matrix, der sogenannten

Vorrangmatrix, oder in Form des Vorranggraphen darstellen.
(Bild 2-3).

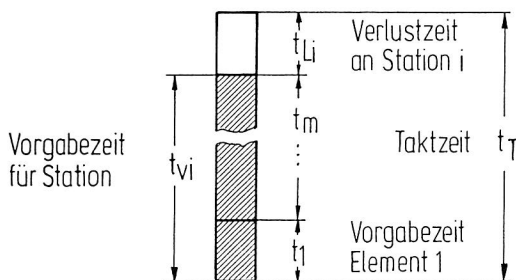
Allerdings existieren auch Produkte, die aufgrund ihres Aufbaus eine eindeutige Beschreibung der Reihenfolgebeziehungen mittels Vorranggraph nicht zulassen [59]. Demzufolge müssen für symmetrische Produkte entweder zwei Vorranggraphen bzw. -matrizen aufgebaut oder die Montageaufgabe muß mit Hilfe eindeutiger Beschreibungsverfahren analysiert werden. KALDE schlägt in diesem Zusammenhang den Aufbau von Petri-Netzen vor [59]. Da sich in der Arbeitsvorbereitung und bei den Planungsingenieuren die Montageaufgabenbeschreibung in Form des Vorranggraphen durchgesetzt hat, soll dieser im weiteren als eine mögliche Art zur Montageaufgabenanalyse verfolgt werden. Ausschlaggebend für die weiteren Planungsergebnisse ist ohnehin die Stationszuordnung und Abtaktung, die wiederum unabhängig vom Beschreibungsverfahren durchzuführen ist.

Im Vorranggraphen werden die Teilverrichtungen durch Knoten und die Reihenfolgebeziehungen durch Kanten repräsentiert. Weisen Pfeile auf eine Teilverrichtung hin und führen solche von ihr weg, so hat diese direkte Vorgänger bzw. Nachfolger.

In der Praxis wird der Vorranggraph häufig von Hand erstellt und bildet die Grundlage für die weitere Montagereihenfolgenplanung [76]. Zur Bearbeitung auf EDV-Systemen ist die Vorrangmatrix naturgemäß besser geeignet.

Ausgehend von Vorranggraph bzw. Vorrangmatrix wird die Abtaktung durchgeführt (Bild 2-4). Ihr Ziel ist es, hinsichtlich der jeweiligen Zielkriterien (Verlustzeit, Stationszahl, Taktzeit u.ä.) eine optimale Zuordnung der Teilverrichtungen zu Stationen, an denen diese ausgeführt werden, vorzunehmen.

Die mathematischen Zusammenhänge lassen sich zunächst für sämtliche Problemstellungen gleichermaßen darstellen.



Zusammensetzung der
abtaktrelevanten Zeiten
an einer Station



Aufteilung von 4 Teilverrichtungen
auf 3 Stationen

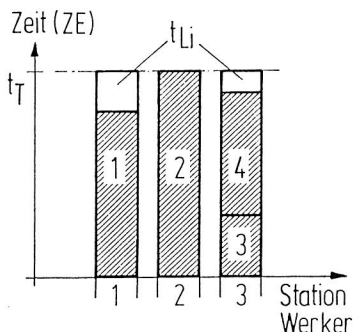


Bild 2-4: Prinzip der Abtaktung

Ziel der Abtaktung ist es, den Differenzbetrag zwischen der Summe der Vorgabezeit t_{vi} pro Station und der Taktzeit t_T der Montagelinie zu minimieren:

$$\sum_{i=1}^s (t_T - t_{vi}) \rightarrow \min \quad (1)$$

Mit:

s = Stationsanzahl

Bei vorgegebener Taktzeit, die sich theoretisch aus der geforderten Stückzahl pro Schicht und der Schichtdauer ergibt, läßt sich die Forderung umformulieren in:

$$t_{TA} = s \cdot t_T - \sum_{i=1}^s t_{vi} \rightarrow \min \quad (2)$$

Dabei ist:

t_{TA} = Taktausgleich (Summe der Verlustzeiten) [ZE/Stck]

S = Anzahl der Stationen

Zur Beurteilung der kostenmäßigen Auswirkungen verschiedener Taktzeiten müssen zunächst die bei der jeweiligen Taktzeit entstehenden Montagekosten berechnet werden.

Für die manuelle Montage gilt:

$$K_{ML} = K_{Lt} \cdot MA \cdot t_T \quad (3)$$

Mit:

K_{ML} = Montagelohnkosten pro Stück [DM/Stck]

K_{Lt} = Lohnkosten pro Zeiteinheit [DM/ZE]

MA = Summe der Arbeitskräfte

Vereinfachend läßt sich für die automatisierte Montage ableiten:

$$K_{AM} = K_{MH} \cdot AS \cdot t_T^* \quad (4)$$

Mit:

K_{AM} = Montagemaschinenkosten pro Stück [DM/Stck]

K_{MH} = Maschinenstundensatz (pauschal) [DM/ZE]

AS = Summe der Montageautomaten

t_T^* = Taktzeit bei automatischer Montage [ZE/Stck]

Damit lassen sich sowohl für die manuelle als auch für die automatische Montage Taktausgleichskosten berechnen, die einen Kostenwert liefern über die nicht genutzte Montagezeit, da hierin die Summe der Verlustzeiten in Form des Taktausgleiches berücksichtigt wird.

Da ein Gesamtmontagesystem immer mit der vorgegebenen Taktzeit arbeitet, entstehen für die Differenzzeiten zwischen Montagetätigkeiten (Summe der Teilverrichtungszeiten je Station) und der Taktzeit Kosten an den Stationen, die nicht voll ausgelastet sind. Diese Kosten lassen sich für manuelle

und automatische Montagesysteme wie folgt berechnen:

$$K_{TAM} = K_{ML} \cdot t_{TA} \quad (5)$$

$$K_{TAA} = K_{MH} \cdot t_{TA}^* \quad (6)$$

mit:

K_{TAM} = Taktausgleichskosten für die manuelle Montage [DM]

K_{TAA} = Taktausgleichskosten für die automatisierte Montage [DM]

t_{TA}^* = Taktausgleich bei automatischer Montage [ZE/Stck]

Diese beiden Kostenwerte lassen bereits Aussagen über die Güte einer durchgeführten Abtaktung zu. Darüberhinaus hat sich für die Beurteilung einer Abtaktung der sogenannte Bandwirkungsgrad durchgesetzt [77]. Er gibt in Form eines Auslastungsgrades das Verhältnis zwischen der Summe der Vorgabezeiten und der Gesamtmontagezeit an:

$$\eta_B^* = \frac{S \cdot t_T - t_{TA}}{S \cdot t_T} \quad (7)$$

oder als Prozentausdruck:

$$\eta_B = \frac{\sum_{i=1}^N t_{vi}}{S \cdot t_T} \cdot 100 \quad [\%] \quad (8)$$

mit:

η_B = Bandwirkungsgrad

N = Summe der Teilverrichtungen

Somit ist eine Montagelinie 100% abgeglichen, wenn kein Takt- ausgleich auftritt und der Bandwirkungsgrad 100% ist. Um dieses Ziel zu erreichen, sind seit den 60er Jahren eine Reihe von Arbeiten, insbesondere aus dem amerikanischen Raum, veröffentlicht worden, die mathematische Verfahren und Metho-

den zur Abtaktung vorstellen [6,64,117,121,122]. Vom Ansatz lassen sich die Verfahren in empirische, exakte und heuristische Typen unterteilen (Bild 2-5).

Die exakten Verfahren prüfen mit ihren Algorithmen sämtliche mögliche Zuteilungen der Teilverrichtungen zu Stationen. Insbesondere von LUTZ [77] wurden diese Abtaktungsmethoden mit dem Manko eines zu großen Speicherplatzbedarfs und zu langer Rechenzeiten beim EDV-Einsatz belegt. Hier werden spätere Ausführungen zeigen, daß aufgrund der gestiegenen Rechnerleistung diese Aussage aus dem Jahre 1974 revidiert werden muß.

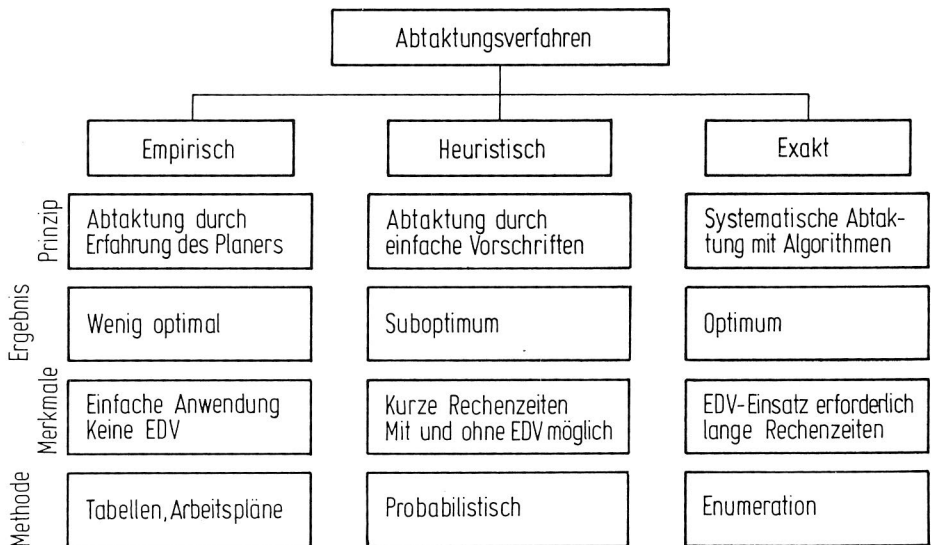


Bild 2-5: Abtaktungsverfahren

Die heuristischen Verfahren benutzen meist einfache Regeln, um einige wenige Abtaktungen durchzuführen. Kennzeichnend sind hierfür der geringe Speicherbedarf und die kurzen Ausführungszeiten auf Rechnern.

Empirische Verfahren schließlich sind durch die rein intuitive Bearbeitung durch den Planer gekennzeichnet. Auf der Basis von Arbeitsplänen und Zeittabellen verteilt der häufig in der Arbeitsvorbereitung tätige Planer entsprechend seines Erfahrungsschatzes Teilverrichtungen auf Stationen.

Häufig anzutreffen sind noch Mischformen zwischen empirischer und heuristischer Abtaktung, wobei der Planer mit einfachen Berechnungen erste Abtaktungen vornimmt und die Ergebnisse anschließend empirisch zu optimieren sucht.

2.2.2 Verfahrensvergleich

Aufgrund ihrer Verbreitung und der bisher durch die Rechnerleistung und -kapazität bedingten Möglichkeiten werden im folgenden die fünf wichtigsten heuristischen Verfahren gegenübergestellt.

Rangwertregel (Vorrangregel)

Bei der Rangwertregel wird jeweils diejenige Teilverrichtung auf der zur Zeit bearbeiteten Station eingeplant, die aufgrund der Vorrangbeziehung möglich ist und den höchsten Rangwert hat. Der Rangwert einer Teilverrichtung berechnet sich aus der Vorgabezeit der Tätigkeit und aus den Rangwerten der im Vorranggraphen unmittelbar nachfolgenden Teilverrichtungen. Ausgehend vom Vorranggraphen werden von dessen Endknoten rückwärts die Rangwerte der Teilverrichtungen berechnet. Diese Vorgehensweise bewirkt, daß Teilverrichtungen mit kurzen Vorgabezeiten geringe Rangwerte bekommen und demzufolge spät eingeplant werden. Damit können sie bei der Abtaktung als "Fülltätigkeiten" verwendet werden, wodurch eine Voraussetzung für einen guten Bandabgleich geschaffen wird.

Zur Stationszuteilung werden die Teilverrichtungen unter Berücksichtigung der Vorrangbeziehungen in der Reihenfolge abnehmender Rangwerte bis zur vorgegebenen Taktzeit aufad-

diert. Da die Rangwerte nur einmal berechnet werden müssen, verringert sich der Aufwand für alle weiteren Abtaktungsrechenläufe. Mathematisch wird durch mehrere Abtaktungsläufe in jedem Fall nur ein Suboptimum erzielt, was allerdings in Grenzfällen nahe am Optimum liegen kann.

Maximal-Vorgabezeit-Regel

Insbesondere bei der manuellen Abtaktung ist die Vorgabezeitregel ein häufig angewendetes Verfahren. Hier werden keine Rangwerte vergeben, sondern bei der Zuteilung der Teilverrichtungen zu Stationen jeweils diejenige eingeplant, die aufgrund der Vorrangbeziehung möglich ist und die größte Vorgabezeit besitzt.

Das Ergebnis der Abtaktung kann nur durch Vertauschen von Teilverrichtungen zwischen den Arbeitsstationen verbessert werden. Da bei diesem Abtaktungsverfahren keine Berücksichtigung von Nachfolgern und Fülltätigkeiten erfolgt, ergeben sich im allgemeinen schlechtere Ergebnisse als beim Rangwertregelverfahren.

Verfahren von Hoffmann [57]

Bei diesem Probiervverfahren werden stationsweise alle zulässigen Teilverrichtungen zugeteilt, bis entweder die Verlustzeit zu Null wird oder keine Zuteilung mehr möglich ist. Im letzteren Fall wird die Zuteilung vorgeschlagen, welche die geringste Verlustzeit besitzt und an der nächsten Station mit dem Abtaktungsverfahren fortgesetzt.

Mit dieser Methode wird also nur jede einzelne Station optimiert, was dazu führt, daß die ersten Stationen in einer Linie besser abgetaktet werden als die letzten. Auch hierdurch wird nur ein Suboptimum bei der Abtaktung erzielt.

Verfahren von Arcus [6]

Nur auf EDV-Anlagen ist das Verfahren von Arcus anwendbar, da hier mit Zufallsgeneratoren gearbeitet werden muß.

Vor jeder Zuordnung einer Teilverrichtung wird eine Liste von Arbeitselementen aufgestellt, deren direkte Vorgänger bereits zugeteilt und deren Vorgabezeiten nicht größer als die verfügbare Zeit sind. Mit Hilfe des Zufallsgenerators wird von diesen Teilverrichtungen eine ausgewählt und zugeteilt. Beliebige viele dieser Monte Carlo Simulationen können durchgeführt werden, wobei diejenigen mit dem besten Bandwirkungsgrad letztendlich ausgewählt werden.

Eine Verfeinerung des Verfahrens stellt die von Arcus vorgestellte Möglichkeit dar, bei der Auswahl der möglichen Teilverrichtungen mit Gewichtungen und Wahrscheinlichkeiten zu arbeiten, um schneller zu guten Abtaktungsergebnissen zu kommen.

Verfahren von Tonge [121]

Das Verfahren von Tonge stellt in gewisser Weise eine Kombination aus den Regelverfahren und der Wahrscheinlichkeitsmethode dar.

Bei der Abtaktung werden die Teilverrichtungen aufgrund von mehreren Regeln den Stationen zugeteilt. Dabei besitzen die Regeln am Anfang gleiche Wahrscheinlichkeiten mit denen sie ausgewählt werden. Entsprechend der jeweiligen Zuteilungsergebnisse (Bandwirkungsgrade) werden die Wahrscheinlichkeiten geändert und ein neuer Abtaktungslauf beginnt. Es handelt sich also um ein lernendes Verfahren. Die Anwendung von verschiedenen Regeln bei der Abtaktung beruht auf der Erfahrung, daß eine Regel für sich weniger gute Ergebnisse liefert als eine Kombination mehrerer obiger Verfahren.

Bekannte Verfahrensvergleiche

Die aus der Literatur [120,76] bekannten Vergleiche beurteilen ausschließlich heuristische Verfahren.

Es werden jeweils für eine Reihe von Praxisbeispielen Abtaktungsläufe auf EDV-Anlagen absolviert und die erzielten Bandwirkungsgrade den benötigten Rechenzeiten (CPU-Zeiten) gegenübergestellt.

Hierzu ist anzumerken, daß bei den Praxisbeispielen keine Rücksicht auf die Produktionsstruktur genommen wurde und somit für den Anwender kein übertragbares Ergebnis vorliegt. Ferner ist eine möglichst kurze Rechenzeit als Zielfunktion äußerst kritisch zu betrachten, da nicht nur die ständig sich verbesserte Rechnerleistung sondern auch in erheblichem Umfang die Programmiermethode sich auf das Ergebnis niederschlägt. So ist es durchaus möglich, daß bei anderer Übertragung der oben beschriebenen Verfahren in Rechneralgorithmen völlig andere Rechenzeiten das Ergebnis wären.

Einen Überblick zur historischen Entwicklung der rechnergestützten Montagereihenfolgeermittlung in den USA gibt folgende Tabelle:

- | | |
|------|--|
| 1954 | Benjamin Bryton erstellt erste Analyse zum Abtaktungsproblem |
| 1956 | James R. Jackson konzipiert einfaches Abtaktungsverfahren |
| 1956 | Maurice D. Kilbridge kritisiert Jackson als unpraktisch |
| 1958 | erstes IBM-Programm zur Abtaktungsproblematik |
| 1961 | Kilbridge und Western Method verwendet Vorranggraphen |
| 1961 | Ranked-Positional-Weight Method (RPW) entwickelt von Helgeson und Birnie (Gewichtung nach Position und Ausführungsdauer) |
| 1964 | Optimierung der RPW Methode durch Mansoor |
| 1964 | Regel des größten Elements |

- 1965 Rechnerprogramm COMSOAL von Arcus (Simulationsprogramm)
- 1969 Erste Entwicklung des EDV-Programms CALB vom Illinois Institut of Technology

Neben den vorgestellten planerischen Methoden zur Bearbeitung von industriellen Vorhaben existieren auch Methoden zur Projektierung von Montagesystemen, die sich aus der allgemeinen Projektbearbeitung in den Industriebetrieben ableiten lassen.

2.3 Automatisierung von Montagesystemen

2.3.1 Rationalisierung durch automatisierte Montage

Die in vielen Betrieben der elektrotechnischen und feinwerktechnischen Industrie vorhandene Herstellkostenstruktur ergab zwangsläufig den bereits angesprochenen Rationalisierungsdruck auf die lohnkostenintensive Montage. Die Beispiele in Bild 2-6 mit den Verhältnissen von Lohn- und Material-

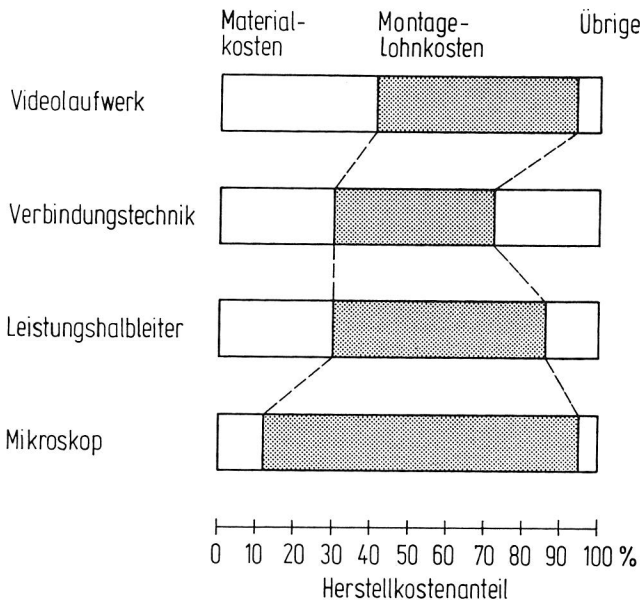


Bild 2-6: Herstellkostenanteile am Beispiel elektrotechnischer Erzeugnisse

kosten zu den gesamten Herstellkosten verdeutlichen diese Situation. Soll die Wettbewerbsfähigkeit erhalten und das Angebot um Produktvarianten erweitert werden, folgen zwangsläufig Automatisierungsprogramme in den Montageabteilungen.

Montageautomatisierung war in der Vergangenheit nahezu ausschließlich bei einfachen Produkten mit hohen Stückzahlen möglich [39]. Durch die Entwicklung immer leistungsfähigerer Industrieroboter, freiprogrammierbarer NC-Achsen und flexibler Sensoren sind nun die Randbedingungen gegeben, um auch Montageabläufe zu automatisieren, die bisher nur personell realisiert werden konnten. Die starr automatisierten Montagesysteme werden zunehmend umgestellt und erweitert mit Hilfe freiprogrammierbarer Handhabungsachsen, die "anschlaggesteuerte" Operatoren ersetzen. Somit sind technologische Vorgehensweisen vorgegeben, deren Verwirklichung in der Praxis allerdings unter wirtschaftlichen Aspekten gemessen werden muß.

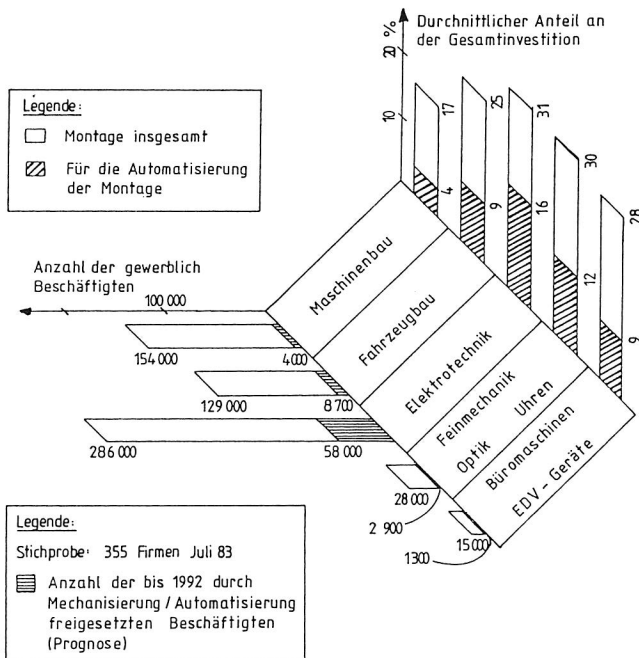


Bild 2-7: Kennwerte zur Beschäftigten- und Investitionssituation in der Montage [1]

Betrachtet man die Rationalisierungsprogramme rein quantitativ, so zeigt Bild 2-7, daß 1983 etwa 670 Tsd. Arbeitskräfte in der Montage beschäftigt und 71 Tsd. Montageanlagen installiert waren [1]. Die statistisch erhobenen Zahlen lassen erkennen, daß sich die geplanten Investitionen für die Rationalisierung der Montage auf rund 30% der Gesamtinvestitionen belaufen. Häufig werden die bereitgestellten Investitionsmittel jedoch nicht in Anspruch genommen, da die Fertigungsqualität der Einzelteile, die geringe Fertigungssicherheit automatisierter Systeme und die Unsicherheit über die Entwicklung des Produktprogrammes von großer Bedeutung für den bisher geringen Einsatz von automatisierten Montageeinrichtungen sind.

Neben den genannten Unwägbarkeiten bei der Montageautomatisierung war der eigentliche Wirkvorgang in vielen Fällen das ausschlaggebende Automatisierungshemmnis [96]. Die häufig nicht beherrschbaren Prozesse beim Fügevorgang in der Montage haben zu verstärkten Bemühungen geführt, hier technologische Grundlagenuntersuchungen anzustellen [85].

Vorangetrieben wurde die Entwicklung von automatisierten Fügeeinrichtungen vor allem in den Techniken: Schrauben, Nieten, Schweißen und Bestücken. Erfahrungsberichte weisen dennoch auf Schwachstellen dieser automatisierten Füge- und Montageeinrichtungen hin [37,86,95,119,128].

Anspruchsvolle Fügeverfahren, die komplexe Fugebewegungen bei hoher Variantenzahl erfordern, werden daher weiterhin an manuellen Arbeitsplätzen ausgeführt. Der zur Automatisierung dieser Fügeprozesse notwendige Aufwand schlägt sich naturgemäß in den Kosten für derartige Einrichtungen nieder. Häufig sind aber nicht die hohen Kosten an sich für die geringe Montagautomatisierung verantwortlich, sondern das Nichtvorhandensein technischer Lösungen und das mangelnde Automatisierungsknowhow in den planenden Abteilungen.

2.3.2 Projektierung von automatisierten Montagesystemen

Projektierung wird als die vorausschauende Produktionsvorbereitung für noch in Forschung bzw. Entwicklung befindliche Produkte definiert [21]. Im Zuge von Rationalisierung und Automatisierung ist insbesondere die Projektierung im Montageanlagenbau zu einer zentralen Aufgabe geworden.

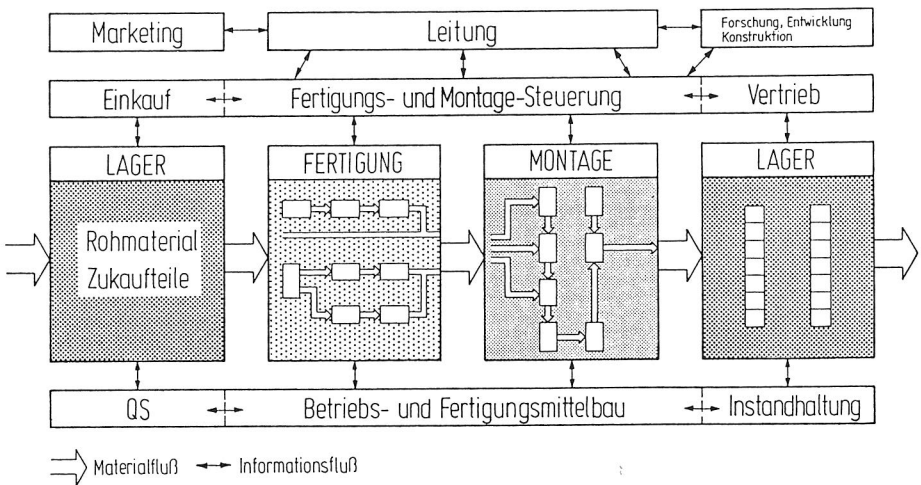


Bild 2-8: Blockschaltbild eines fertigungs- und montageorientierten Industrieunternehmens

Durch die im Bild 2-8 gezeigte Vernetzung der Betriebsbereiche wird deutlich, daß die Projektierung von Montagesystemen Umfeldaufgaben mit berücksichtigen muß. Materialfluß und Informationsverarbeitung sind neben der rein technischen Problemstellung zu beachten. Erschwerend kommt hinzu, daß die Montage den Teilbereich des Produktionsprozesses darstellt, in dem zahlreiche Informations- und Materialflußkomponenten vereint werden, um dem Ziel, ein Fertigerzeugnis termingerecht zu produzieren, gerecht zu werden. Montageanlagen oder Montagesysteme sind dabei Arbeitssysteme, die eine oder mehr-

ere Produktvarianten bzw. -baugruppen zusammenbauen. Als Elemente des Arbeitssystems wirken Mensch und Arbeitsmittel in einer gemeinsamen Arbeitsumgebung zusammen.

Die späteren Eigenschaften des Montagesystems werden in Projektierungs- und Gestaltungsphase festgelegt. Sie beeinflussen das Betriebsverhalten des Arbeitssystems und die Arbeitsbedingungen für die Mitarbeiter.

Bei gemischt verketteten Montagesystemen, in denen Menschen und automatisierte Betriebsmittel zusammenwirken müssen, sind durch die verstärkten Bemühungen um humanere Arbeitsplätze die reinen "Fließbandmontagen" weitgehend abgebaut worden. Diese arbeitsteiligen Taylorlinien hatten neben ihrer Belastung für die Mitarbeiter auch den Nachteil der starken Qualitäts- und Ausbringungsschwankungen.

Damit kommt auf die Projektierung neben der Beachtung o.g. Zusammenhänge insbesondere die Erarbeitung von alternativen Lösungskonzepten zu, die unter Berücksichtigung aller Parameter die Unternehmensziele am besten erfüllen. Die Projektierung von Montagesystemen wird in der Regel nach einem allgemein gültigen System ausgeführt (Bild 2-9).

Ein Projektteam legt dabei nach der verbalen Projektbeschreibung eine Gliederung fest, die auch die Systemgrenzen des zu bearbeitenden Aufgabenfeldes näher festlegt. Sind Termin- und Investitionsplan aufgestellt, wird das Projekt zur Planungsfreigabe vorgelegt.

Nach der Freigabe kommt es zur eigentlichen Projektbearbeitung, wobei sich hier die Grenzen zwischen Projektierungs- und Planungsaufgaben stark überschneiden. Vor der eigentlichen Feinplanung erfolgt der Entwurf von Montagesystemalternativen. Die Auswahl des bestgeeignetsten Montagesystems sollte dabei neben technischen Aspekten in verstärktem Maße unter Berücksichtigung der wirtschaftlichen Rahmenbedingungen erfolgen.

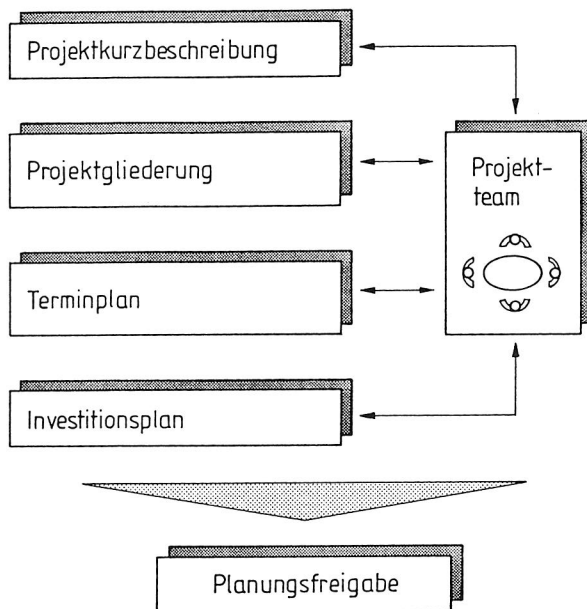


Bild 2-9: Projektierungsaufgabenfelder

Für die rechnergestützte Projektierung von Montagesystemen steht in diesem Zusammenhang kein ganzheitliches Modell zur Verfügung, das in der Lage wäre, von der Montageaufgaben- bis zur Investitionsanalyse eine durchgängige Unterstützung bei Routineaufgaben zu leisten.

2.4 Zielsetzung

Elektro- und feinwerktechnische Industriebetriebe aus den Investitions- und Konsumgüterbranchen stehen in einem ständig schärfer werdenden Wettbewerb. Neben dem wachsenden internationalen Druck sind auch ökonomische und soziale Bedingungen in der Bundesrepublik Deutschland dafür verantwortlich, daß zunehmend Rationalisierungszwänge entstehen. Als ein bedeutendes Rationalisierungsfeld erweist sich dabei der Montagebereich in der Produktion.

Die Gestaltung immer rationellerer Montagesysteme und -ver-

fahren hat in der Vergangenheit die folgenden wichtigsten Stufen beschritten:

- "Taylorisierung",
- Teilautomatisierung,
- Vollautomatisierung und
- Flexible Automatisierung der Montage.

Angesichts wirtschaftlicher und arbeitsmarktpolitischer Hintergründe muß allerdings die häufig angestrebte höchste Automatisierungsstufe - in Verbindung mit kostenintensiver Flexibilität - in Frage gestellt werden.

Auch die von ABELE aufgezeigten Tendenzen in der Montageautomatisierung zeigen, daß neben der zu erwartenden Reduktion des Montagepersonals um 40% bis 1992 dennoch über die Jahrtausendwende hinaus etwa 270 000 Montagearbeitsplätze in der Elektrofeinwerktechnischen Industrie bestehen bleiben [1]. Ein Potential, das nur zum Erhalt der Wettbewerbsfähigkeit beitragen kann, falls insgesamt die Rationalisierungsmöglichkeiten optimal ausgeschöpft werden. Damit wird für die wirtschaftliche Effektivität angesichts der zunehmenden Produkt- und Produktionsänderungsfrequenzen auch die Leistungsfähigkeit der Planungsabteilungen entscheidend sein.

Bei der bisher in der Regel durchgeführten Planung von Montagesystemen wird eine komplexe Montageaufgabe in Teilaufgaben und diese wiederum in Problemfelder zergliedert bis schließlich die Detaillierung durch einen entsprechenden Planer erfolgt (Bild 2-10).

Da die Aufgabenverteilung an die Fachabteilungen und Spezialisten erfolgt, wird mit den zunehmenden Planungsaufgaben bei gleichbleibender Personalkapazität der parallele Bearbeitungsaufwand stark ansteigen. Es werden also aus verschiedenen Planungsaufgaben Problemfelder und Details mehr oder weniger gleichzeitig zu bearbeiten sein.

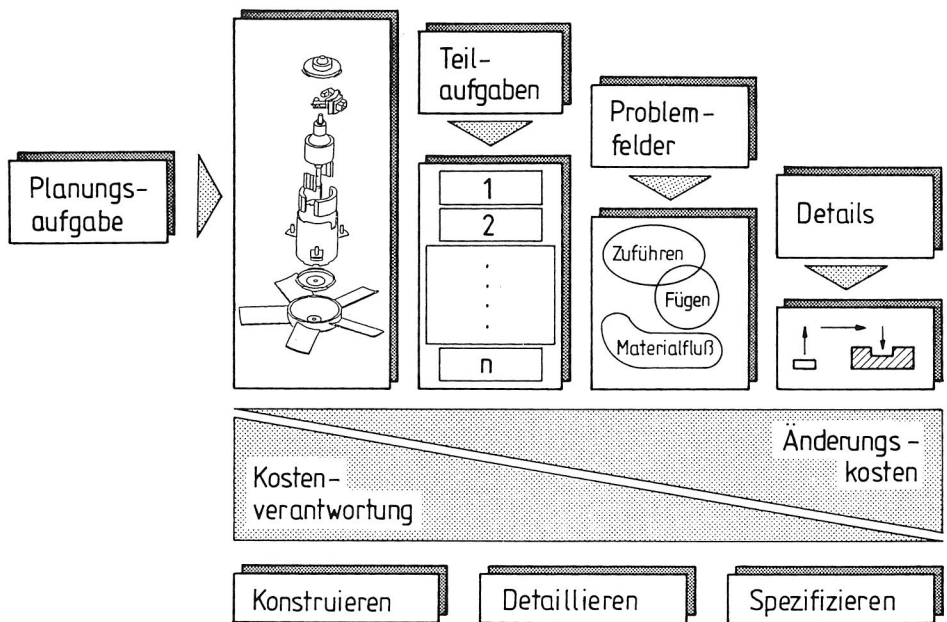
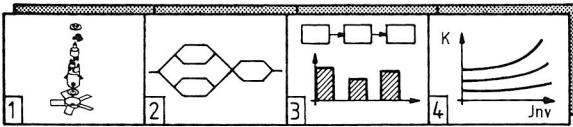


Bild 2-10: Problemfeld "Montageplanung"

Im zeitlichen Ablauf von der Planungsaufgabe bis zur Detailierung werden daneben die entstehenden Kosten maßgeblich beeinflusst. In der hierarchieangepaßten Montageplanung trägt die aufgabenstellende Abteilung die höchste Kostenverantwortung, während nach Erstellung der Detailkonstruktionen für das geplante Montagesystem die größten Änderungskosten auftreten. Der zeitkontinuierliche Ablauf und die selten eingehaltenen Konformitätsschritte zwischen Planungsaufgabe und Systemlösung ergeben bei den naturgemäß ständig auftretenden Produktänderungen einen unbefriedigenden Zustand, der durch nichtoptimale Planungsergebnisse und Demotivation der Mitarbeiter gekennzeichnet ist. Auch Rechnersysteme für Konstruktion und andere Aufgaben, die als Insel-Workstations betrieben werden, können die grundsätzlichen organisations- und ablaufspezifischen Nachteile der herkömmlichen Montageanlagenplanung nicht aufwiegen. Planzeitverkürzung, Planungskonformität und Rechnerintegration bilden die wichtigsten Krite-

Projektierungsumfang



Herkömmliche Projektbearbeitung

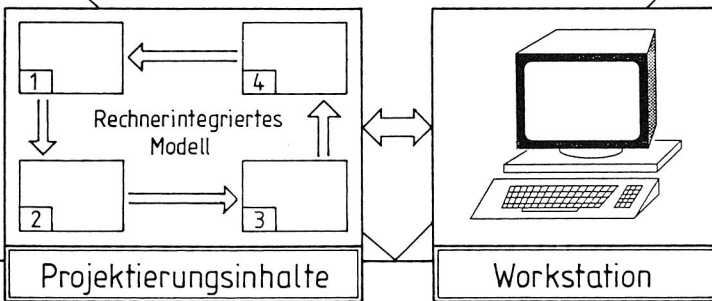


Nachteile:

- Projektdiskussion kann in Details abschweifen
- Benötigte Daten sind nicht immer verfügbar
- Detailfragen werden ohne Gesamtzusammenhang an Fachabteilungen gegeben

Neue Methode:

Abbildung der Projektarbeit unter Ausnutzung der Vorteile einer durchgängig rechnergestützten Betrachtungsweise



Ziel : Modell zur rechnerintegrierten Projektierung von automatisierten Montagesystemen

Bild 2-11: Zielsetzung für ein Modell zur rechnergestützten Projektierung von automatisierten Montagesystemen

rien der Zielsetzung für die Erstellung eines Modells zur rechnergestützten Projektierung von Montagesystemen. Im Gegensatz zur Planung soll durch die Projektierung von Montagesystemen eine Montageaufgabe ganzheitlich betrachtet werden.

Schon bei der herkömmlichen Projektierung steht die Teambearbeitung des gesamten Projektierungsumfanges im Vordergrund. Allerdings ergeben sich bei nicht disziplinerter und konsequenter Teamführung eine Reihe von Nachteilen, die das Projektergebnis gefährden oder sogar in Frage stellen können (Bild 2-11). Dagegen soll mit einem Modell zur rechnerintegrierten Projektierung von automatisierten Montagesystemen nachgewiesen werden, daß erhebliche Zeit- und Kostenersparnisse erzielt werden können, indem eine konsequente Teamführung angestrebt wird und algorithmierbare Aufgaben dem Rechner übertragen werden. Dabei sollen Projektierungs- und Planungserfahrungen des Montagesystemherstellers und -betreibers in den Modellaufbau und die Datenhaltung einfließen, um neben verallgemeinerbaren Wissen auch branchen- und firmenspezifisches Knowhow in die Projektierung aufzunehmen. Neben der Implementierung des Modells auf einem Rechnersystem ist die Berücksichtigung der veränderten Kostensituation in den Betrieben durch Einführung von flexiblen automatisierten Montagesystemen von großer Bedeutung. Ein angepaßtes Wirtschaftlichkeitsbeurteilungsmodell soll dem Projektierer während der groben Montagesystemplanung erste Analysewerte und Trends angeben, die ihm schon frühzeitig Aussagen über die zu erwartende Kostensituation liefern.

Unter Ausnutzung der Modulbauweise soll die rechnerintegrierte Projektierung dem Programmnutzer jederzeit den Einstieg in verschiedene Planungsstufen ermöglichen, um mit veränderten Randbedingungen oder Aufgabeninhalten kurzfristig den realen innerbetrieblichen Wandlungen gerecht zu werden. Schließlich ist das Modell und die zugehörige Software so auszulegen, daß der Einsatz auf modernen leistungsfähigen aber kostengünstigen Workstations gewährleistet ist.

3. Vorbereitende Maßnahmen zur Projektierung von automatisierten Montagesystemen

Mit dem Ziel, die Montage in der feinwerk- und elektrotechnischen Produktion zu rationalisieren, ergeben sich gleichzeitig eine Reihe von Hemmnissen (Bild 3-1). Da zunehmend die Zwänge zur Rationalisierung die Hinderungsgründe überwiegen, gilt es, Maßnahmen zu ergreifen, die eine sinnvolle und wirtschaftliche Montageautomatisierung ermöglichen.

Im organisatorischen Ablauf ist insbesondere unter dem Aspekt der schnellen und kurzzyklischen Projektbearbeitung die Bildung von Projektteams zu forcieren, da hiermit der integrale Arbeitscharakter der beteiligten Planungsabteilungen berücksichtigt werden kann [105]. Weiterhin ist es sinnvoll, sowohl einzelne Planungsaufgaben als auch das Planungsobjekt modellhaft zu betrachten, um die Vorteile dieser Abstraktionsmethodik zu nutzen (Kap. 4.1).

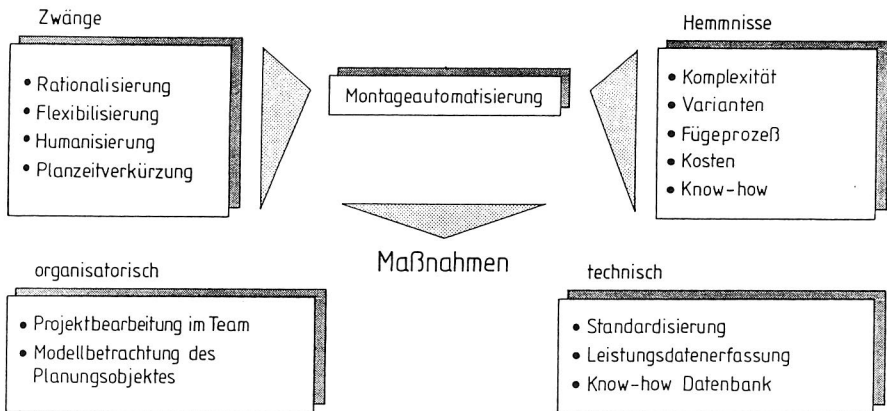


Bild 3-1: Hemmnisse, Zwänge und Maßnahmen bei der Montageautomatisierung

Die technischen Maßnahmen zur Projektierung von automatisierten Montagesystemen sollten einerseits bereits vorbereitend

andererseits produktionsbegleitend ablaufen. Hierzu zählen die Standardisierung der Betriebsmittel, die Leistungsdatenerfassung der Montagesysteme und der Aufbau einer Knowhowdatenbank zur Speicherung betriebsinterner Erkenntnisse und Daten.

Insbesondere die Standardisierung der Betriebsmittel und die damit verbundenen Erfahrungen über Leistungsdaten stellen ein wertvolles Hilfsmittel dar, um in der Projektierungsphase für neue Planungsobjekte auf verlässliche Erkenntnisse aus vorangegangenen und verwirklichten Montagesystemen zurückgreifen zu können.

3.1 Methodik zur projektierungsunterstützenden Standardisierung

Eine Steigerung der Produktivität in der Montage ist generell durch eine technologische Weiterentwicklung der Montage- und Hilfsmittel sowie durch organisatorische Maßnahmen zur effektiveren Gestaltung des Montageablaufs erreichbar. Hierzu stehen im Planungsablauf dem Projektierer eine Reihe von Lösungsmöglichkeiten zur Verfügung, die er aufgrund technischer Daten, Einsatzverhalten, Kosten und nicht zuletzt Erfahrungswerten auswählt.

Entscheidend bei der Beurteilung von automatischen Montageanlagen bleibt die Einhaltung vorgegebener wirtschaftlicher Kriterien. Die Wirtschaftlichkeit steigt mit günstigerem Kosten-Leistungsverhältnis, wobei diese Aussage gleichermaßen für die Anlage wie für die Projektierung selbst zutreffend ist.

Dabei umfassen die Kosten Investitionen, Löhne und Instandhaltungsaufwendungen. Die Verringerung dieser Kosten kann durch Abbau von Arbeitskräften in der Produktion, durch veränderten Materialeinsatz, durch Produktionsflächenreduktion und durch Ausschußminimierung erzielt werden. Eine Reduzie-

rung des Investitionsrisikos wird durch hohe Flexibilität und Wiederverwendbarkeit der Montageanlagenkomponenten erreicht. Dies setzt voraus, daß Einsatzdaten über die erforderlichen Baugruppen und Geräte vorliegen.

Für die Montage von feinwerktechnischen Produkten wurde eine Erfassung durchgeführt mit dem Ziel, Möglichkeiten zur Standardisierung aufzudecken (Bild 3-2).

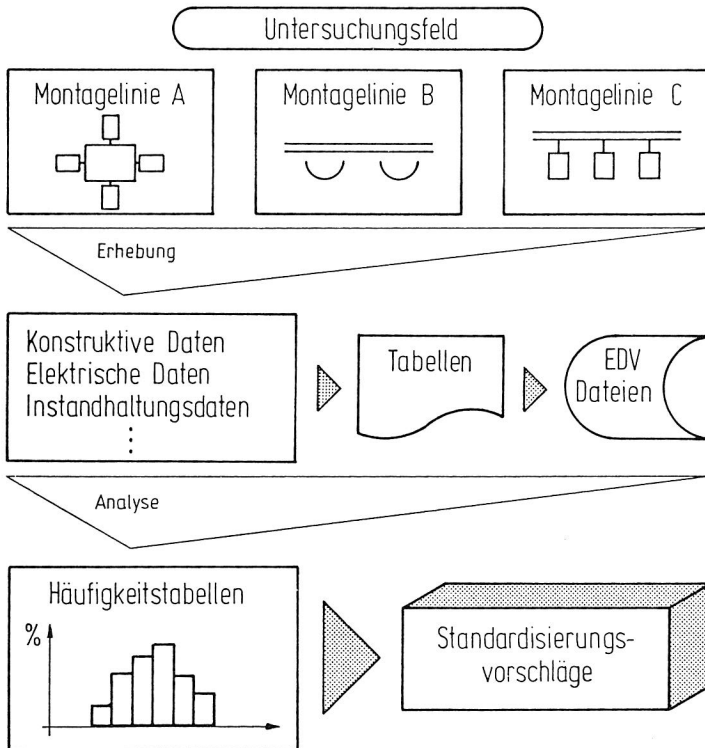


Bild 3-2: Methodik zur Aufnahme von Standardkomponenten in flexiblen Montagesystemen

Mit den aus Häufigkeitstabellen abgeleiteten Standardkomponenten kann die Projektierung neuer Anlagen durchgeführt werden. Hierdurch verkürzt sich einerseits der Projektierungsablauf, andererseits wird das Investitionsrisiko stark reduziert, da bereits einsatzerprobte Erfahrungswerte vorliegen. Ferner werden Aufstellungs- und Umrüstzeiten verkürzt,

Störungen im Vorfeld beseitigt sowie die Kosten für Entwicklung, Konstruktion und Erprobung verringert.

3.2 Ergebnisse aus einer exemplarischen Erhebung

In Betrieben der feinwerktechnischen und elektrotechnischen Industrie wurden flexibel automatisierte Montagelinien einer Erhebung unterzogen. Die erzielten Ergebnisse können keinen Anspruch auf Repräsentativität erheben, weisen aber in wichtigen Punkten eindeutige Trends nach. Daher kann ausgehend von dieser Methodik dem Anwender ein Werkzeug an die Hand gegeben werden, welches es ihm ermöglicht, produkt- und branchenspezifisch erforderliche Differenzierungen vorzunehmen.

Zur Erhebung wurden an den Anlagen Maß- und Zeitaufnahmen vorgenommen, Zeichnungen und Stücklisten ausgewertet sowie Einrichter, Bedienpersonen und Konstrukteure befragt. Insgesamt wurden je Montagezelle, das heißt pro kleinstes autark arbeitendes Element der Montagelinie, circa 200 Daten aufgenommen und Skizzen angefertigt. Eine Übersicht zu den ausgewerteten Daten und Beispiele zeigt Bild 3-3.

ERHEBUNGSDATEN	# Anzahl der Werte pro Zelle	
1. Geometrische Daten	50	
2. Zuführung des (vormontierten) Basisteils zum Fügebaum	5	
3. Zuführteile	15	
4. Zuführgeräte	25	
5. Positionierung	5	
6. Fügebaum	10	
7. Handhabungs-/Montagegerät	10	
8. Fügeart	5	
9. Fügebewegungsfolge	1	
10. Greifer und Werkzeuge	20	
11. Sonstige Bauelemente	7	
12. Steuerung	25	
13. Flexibilitätsprofil	10	
14. Instandhaltung	6	
15. Kosten	5	

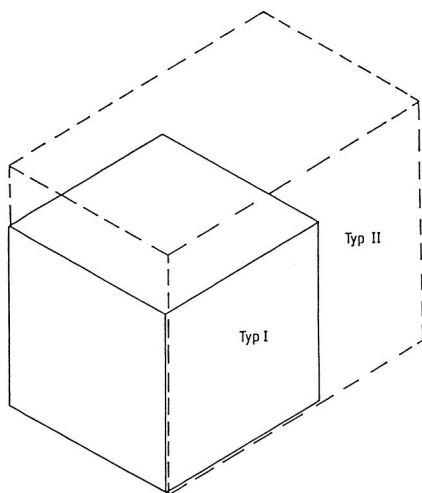
Funktionsname:	Doppelrundriemen
Max-WT-Gewicht:	2 kg
Max-WT-Breite:	150 mm
Weitergabezeit:	5 ZE
Lebensdauer:	8 a
Verfügbarkeit:	99 %
Lieferzeit:	70 d
Investition/Station:	5 000 GE
Flexibilitätsgrad:	80 %

Funktionsname:	Löten
Max. Kraft:	- N
Max-WZ-Weg:	50 mm
Kürzester Takt:	10 ZE
Lebensdauer:	5 a

Bild 3-3: Erhebungsdaten

Aus den Ergebnissen der Erhebung lassen sich für das umhüllende Volumen von Montagezellen in der Feinwerktechnik zwei Standardtypen ableiten (Bild 3-4). Sowohl für das Groblayout z.B. mittels CAD-System als auch für Flächenplanungen besitzen diese Standardgrößen den Vorteil einer einheitlichen Planungsgrundlage.

Werden zudem die Konsequenzen aus den recht unterschiedlichen Montage- und Grundgestellhöhen, wie sie in Bild 3-5 dargestellt sind, gezogen, vereinheitlichen sich auch die mechanischen Schnittstellen zwischen den Zellen.



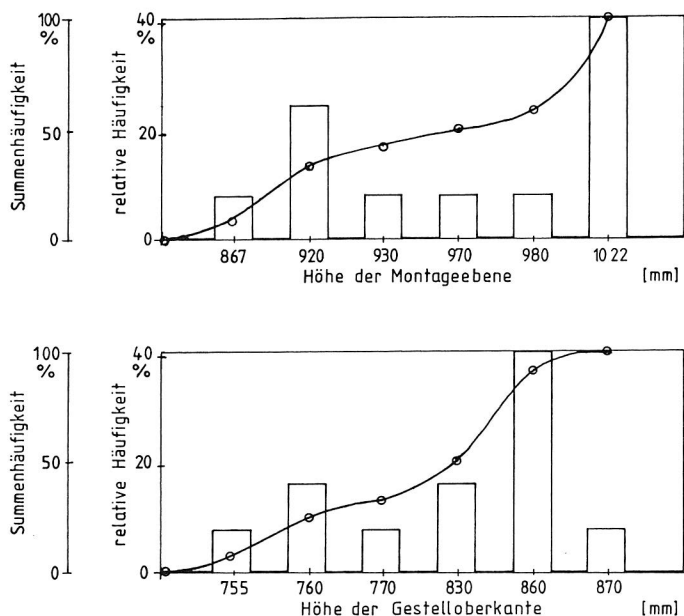
Umhüllendes Volumen
von Fügezellen für die
Feinwerktechnik

$l \times b \times h$
Typ I : $1500 \times 1500 \times 1500 \text{ mm}^3$
Typ II: $2000 \times 1500 \times 2000 \text{ mm}^3$

Bild 3-4: Beispielhafte Abmessungen für Montagezellen-
standardtypen

Um Standardtypen für die automatische Handhabungs- und Montageaufgabe festlegen zu können, sind insbesondere die Anforderungen seitens der Bewegungswege und der geforderten Taktzeiten zu analysieren. Die Werkstückgewichte spielen in der elektrofeinwerktechnischen Montage dagegen kaum eine Rolle, da durch die sehr geringen Gewichtsbelastungen kein

Einfluß auf das dynamische Verhalten der Handhabungs- und Montagegeräte zu erwarten ist.



Datenbasis: 3 Montagelinien, 15 Montagezellen

Bild 3-5 : Montage- und Grundgestellhöhen

In der Erhebung (Bild 3-6) wurden die Verfahrenwege der Handhabungs- und Montageautomaten hinsichtlich geräteseitig möglicher (GM) und der tatsächlichen Montagebewegungen (TM) ausgewertet. Zunächst zeigt sich, daß die untersuchten Zellen nur Bewegungen in x- und z-Richtung aufweisen. Dabei liegen die geräteseitig möglichen Verfahrenwege insbesondere in der x-Achse deutlich über den erforderlichen Werten. Es liegt also nahe, auf Geräte mit kleineren Verfahrenwegen und damit einhergehend verbesserter Positioniergenauigkeit zurückzugreifen. Ebenso kann auf die Komplexität der meisten Roboter verzichtet werden, da sowohl Handhabungs- als auch Montageanforderungen wesentlich geringer sind, als die Leistungsfähigkeit dieser Geräte.

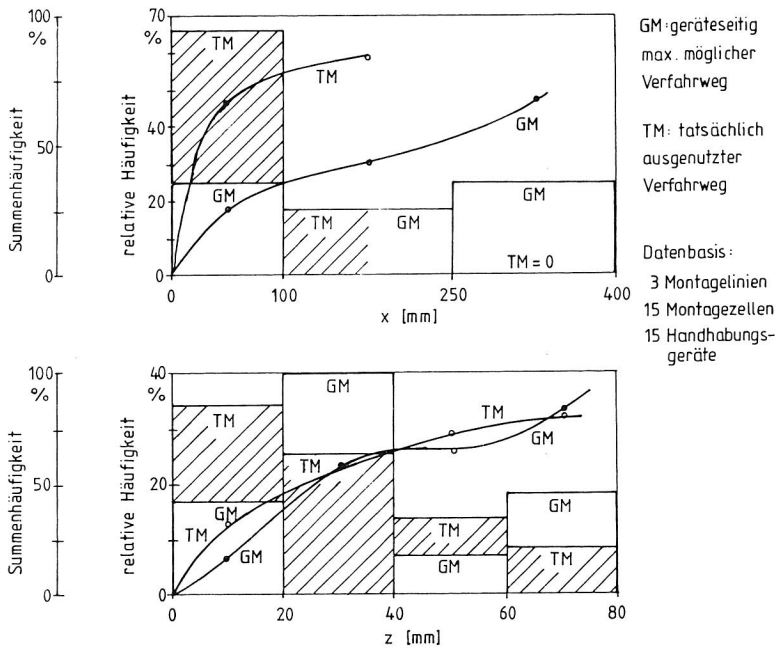


Bild 3-6: Verteilung der Verfahrwege in x- und z-Richtung

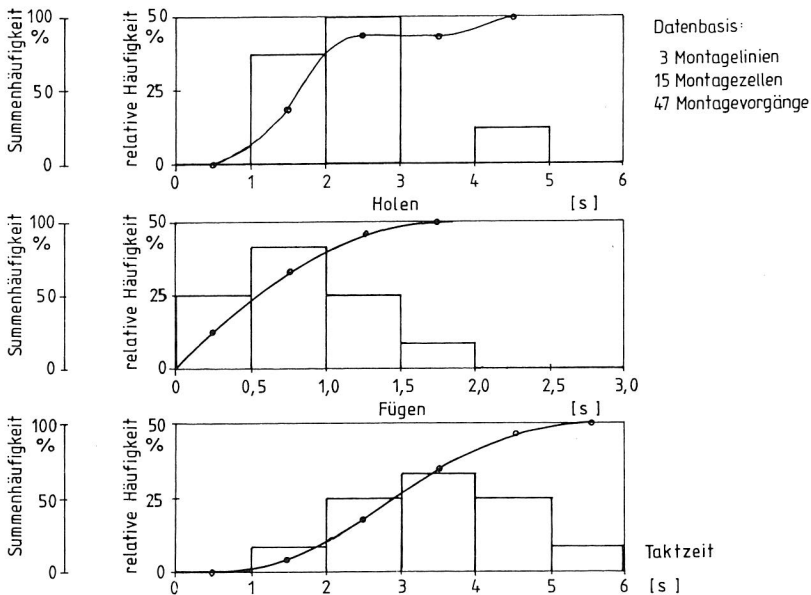


Bild 3-7: Zeitverteilung in der Kleinteilemontage

Die Verteilungen der Zeiten für Holen, Fügen und Gesamttaktzeit nach Bild 3-7 verdeutlichen in besonderem Maße die hohen Anforderungen an die Handhabungs- und Montagegeräte in der Elektrofeinwerktechnik. Bekannte Lösungskomponenten zur Automatisierung der Bewegungs- und Montageabläufe in der Feinwerktechnik sind anschlussgebundene pneumatische Mehrachsensysteme [12,130] und kurvengesteuerte Geräte, die den genannten Forderungen weitestgehend genügen. Bei zunehmender Flexibilisierung kommen darüber hinaus programmierbare Handhabungs- und Montagegeräte zum Einsatz, deren Leistungsdefizit allerdings in den zu realisierenden Handhabungs- und Montagezeiten begründet ist.

Zur Ausstattung von Montagelinien gehören bereits eine Vielzahl von industriellen Standardkomponenten. Hierzu ist auch das Zubehör für die Druckluftaufbereitung, -steuerung und -anwendung zu zählen. Ihr Einsatz in den Montagezellen weist entsprechend Bild 3-8 eine homogene Verteilung auf, wobei die ermittelten Daten in der Projektierungsphase insbesondere für Aufwandsabschätzungen herangezogen werden können.

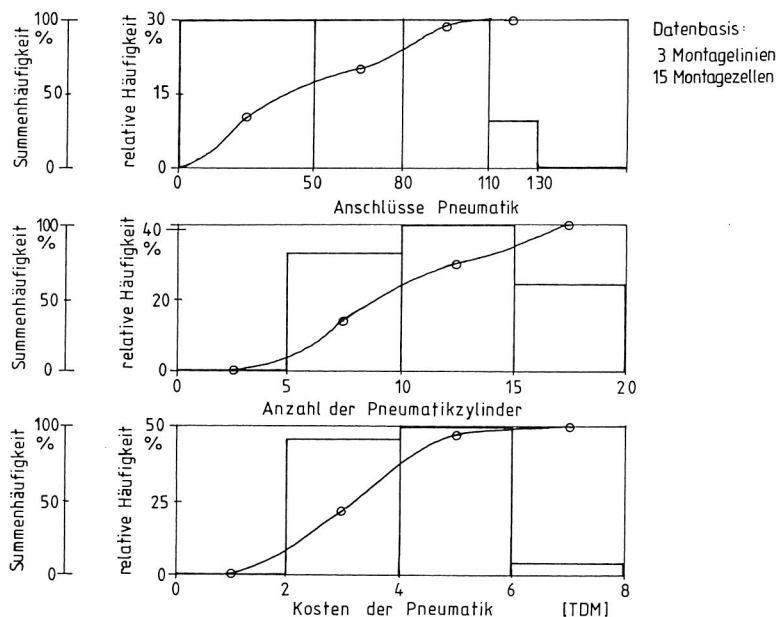


Bild 3-8: Pneumatikinstallationen in Montagezellen

Die Verwendung von Sensoren in flexibel automatisierten Montagesystemen hat in der Vergangenheit stark zugenommen [73].

Meist sind die durch Ausnutzung besonderer physikalischer Effekte recht aufwendigen Sensoren nur bedingt für den praktischen Einsatz geeignet. Dies liegt zum einen in ihren teilweise sehr hohen Kosten, zum anderen in ihrer zu geringen Verarbeitungsgeschwindigkeit begründet [97].

Die am häufigsten eingesetzten Sensoren sind induktive Näherungsschalter sowie optische Lichttaster. Das Bild 3-9 gibt eine recht hohe Anzahl von eingesetzten Sensoren je Montagezelle bei allerdings gleichzeitig geringem Kosteneinsatz wieder. Das legt die Schlußfolgerung nahe, daß durch Gestaltungs- und Konstruktionslösungen bei der Montageaufgabe und in der Montagezelle die Verwendung komplexer Sensoren nicht notwendig wurde.

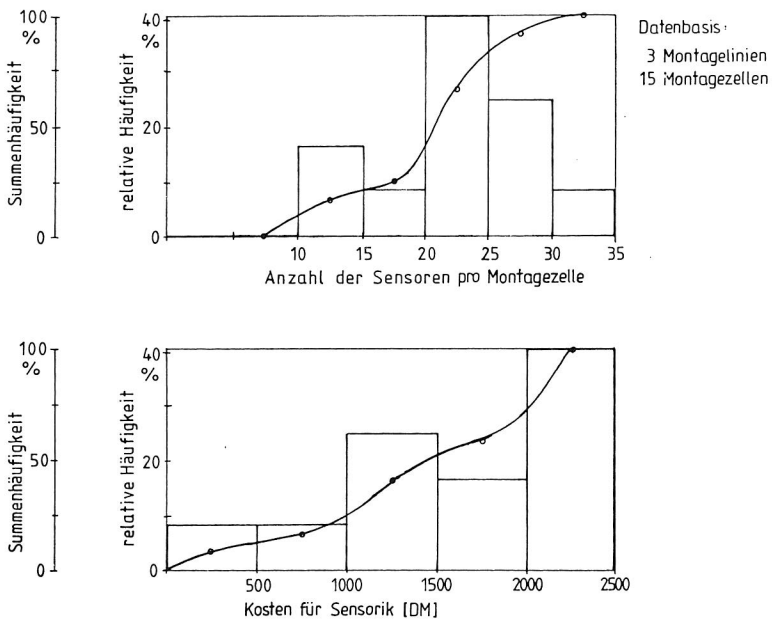


Bild 3-9: Sensoraufwand in Montagezellen

Durch sinnvolle Vereinheitlichungen, die sich durch die Erkenntnisse aus diesen Erhebungen ableiten lassen, können für die Projektierung von automatisierten Montagesystemen Standardelemente festgelegt werden, die bei einer rechnergestützten Bearbeitung der Montageaufgabe Lösungselemente darstellen und somit zu einer entscheidenden Zeitverkürzung bei der Suche nach geeigneten Komponenten führen. Diese Komponenten sollten in Form von Funktionselementen abgelegt sein, da die funktionale Lösungsbetrachtung zu einer gestellten Aufgabe in der Projektierungsphase die am bestgeeignetste ist. Es können hiermit in einem weiteren Schritt Funktionsstrukturen aufgebaut werden, die für die Umsetzung der Projektierungsergebnisse und damit zur Entscheidungsvorbereitung benötigt werden.

Ausschlaggebend für den erfolgreichen Einsatz der Standardisierungsmaßnahmen ist die ständige Bereitstellung der Daten und Erkenntnisse während des Projektierungsprozesses. Beim Aufbau einer Rechnerunterstützung für die Projektierung von automatisierten Montagesystemen sollten diese Standardisierungsergebnisse einfließen. Das macht allerdings eine ständige Pflege und Wartung der Standardkomponenten im DV-System erforderlich, um unter anderem den neuesten technologischen Stand aufrecht zu halten.

4. Modell zur rechnerintegrierten Projektierung von automatisierten Montagesystemen

Die Darstellung der wirtschaftlichen Entwicklung im Produktionsbereich der Industriebetriebe hat gezeigt, daß auf die Planungsebenen zunehmend Aufgaben im Rahmen der Projektierung von automatisierten Montagesystemen zukommen werden. Es werden dabei insbesondere die Montageaufgabenanalyse, ein erstes Groblayout und ein Investitionsplan zu erstellen sein.

Da von hohen Planungsfrequenzen auszugehen ist, bietet es sich an, für diese Projektierungsschritte eine gezielte Rechnerunterstützung aufzubauen. Entsprechend dem Projektbearbeitungsgedanken ist es für derartige EDV-Hilfen unabdingbar, in Modulbauweise einem Planungsteam zur Verfügung zu stehen. Die Konsequenz aus den genannten Anforderungen stellt das Modell zur rechnerintegrierten Projektierung von automatisierten Montagesystemen dar (Bild 4-1).

Hintergründe zur Aufbauweise als Modell werden im folgenden dargelegt. Entscheidend ist dabei die möglichst konforme Abbildung des realen Projektierungsablaufes in die Modellwelt. Die Module des Projektierungsmodells umfassen:

- Montageaufgabenanalyse,
- Montagereihenfolgeplanung,
- Funktionsfolgeplanung,
- Funktionslayout,
- Kostenplanung,
- Sensitivitätsanalyse und
- Parametervariation.

In der Abbildung wurden diese Module zu Blöcken zusammengefaßt, um die Struktur des Modells zu verdeutlichen und die Arbeitsschritte des Projektteams darzustellen. Zunächst ist eine Montageaufgabenanalyse durchzuführen, wobei hier die Übertragung der Aufgabenstellung in eine rechnerverarbeitbare Form stattfindet. Anschließend erfolgt eine Kapazitätsab-

schätzung durch Reihenfolgeoptimierungen mit Abtaktungen für verschiedene Taktzeiten. Zu den bis dahin ermittelten Anforderungen an das zu projektierende Montagesystem werden funktionale Lösungselemente zugeordnet.

Nach Grenzwertbetrachtungen und Sensitivitätsanalysen im Wirtschaftlichkeitsbeurteilungsmodul greift das Projektierungsteam wiederum optimierend auf die Montageaufgabe ein. Somit schließt sich die Bearbeitungsfolge der Projektierungsmodule. Daneben existiert die Möglichkeit, daß das Projektteam die Module selektiv bearbeitet, womit gleichzeitig der wesentliche Unterschied zu den herkömmlichen rechnergestützten Planungsverfahren deutlich wird. Diese schreiben in der Regel eine feste Folge von aufeinander aufbauenden Planungsschritten vor, wobei Änderungen in einzelnen Planungsebenen einen vollständig neuen Planungsdurchlauf erforderlich machen [2,33,82,127].

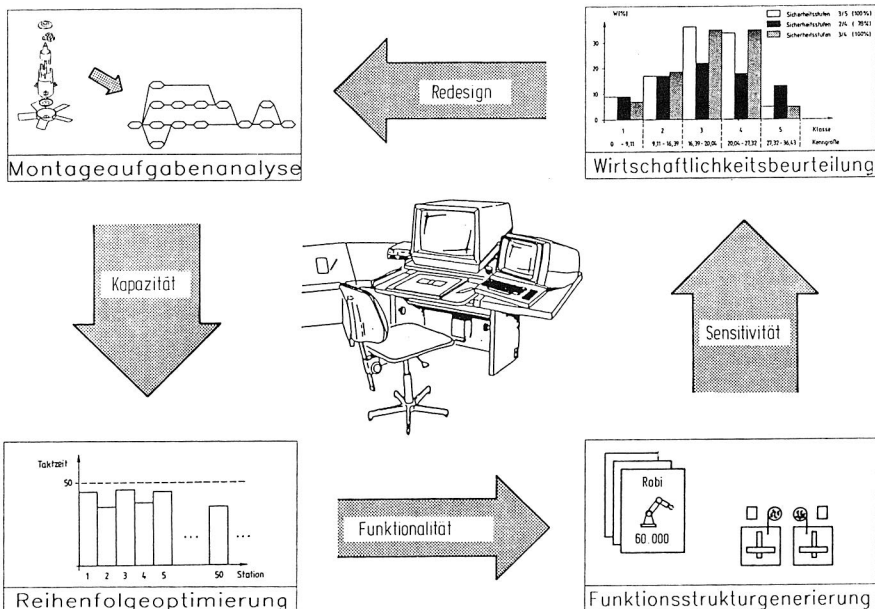


Bild 4-1: Modell zu rechnerintegrierter Projektierung von automatisierten Montagesystemen

Neben der Modelltheorie werden im folgenden die Montageaufgabenanalyse mit Montagereihenfolgeplanung (Kap. 4.3) und der Aufbau von Funktionsstrukturen (Kap. 4.4) als Voraussetzung zum Groblayout eingehender betrachtet. Auch das DV-technische Umfeld in den Industriebetrieben (Kap. 4.2) wird berücksichtigt, um die Projektierungssoftware optimal in den vorhandenen Strukturen zu platzieren. Dadurch erhöht sich in der Regel stark die Akzeptanz durch Programmnutzer.

Schließlich wird die Wirtschaftlichkeitsrechnung für automatisierte Montagesysteme (Kap. 5) eingehend analysiert und ein Wirtschaftlichkeitsbeurteilungsmodell erarbeitet.

Damit sind die theoretischen Voraussetzungen geschaffen, um die DV-technische Realisierung des Projektierungsmodells (Kap. 6) anzugehen.

4.1 Modelltheorie und allgemeiner Modellansatz

Die Vielfalt der Elemente und Erscheinungen in der realen Umwelt führten in den frühen Jahren der Wissenschaft zu einer Flut von Hypothesen und Anschauungen über die physikalischen, mathematischen und sozialen Zusammenhänge dieser Welt. Dabei war und ist die ganzheitliche Betrachtungsweise in vielerlei Hinsicht zum Scheitern verurteilt, da weder menschliche noch künstliche Intelligenz in der Lage sind, alle Einflüsse und Erscheinungen auf ihre gegenseitigen Wechselwirkungen hin zu untersuchen oder sogar zu erklären. Aus dieser Situation heraus entwickelte sich der Begriff des Systems, der nur einen Teilaspekt der realen Umwelt widerspiegelt.

Bewußt werden dabei um eine Teilmenge der Umwelt in sinnvoller Weise Grenzen gezogen, die sich dadurch auszeichnen, daß über die Energie-, Material- und Informationsflüsse, die diese Grenzen passieren, Untersuchungen gemacht werden können oder schon wurden.

Das Denken in Systemen und die Erkenntnisse aus dem Verhalten im gesamten Umfeld führte zu den ersten großen Schritten in Wissenschaft und Forschung. Für eine Vielfalt von Systemen reichen Empirik und Meßreihen aus, um Aussagen über gewünschte Zusammenhänge zu erhalten. So bekommt man z.B. durch Versuchsreihen und Messungen gute Ergebnisse zum Verhalten eines einfachen Feder-Masse-Schwingers oder über die Eigenschaften von Verbrennungsmotoren.

Es gibt allerdings eine Reihe von Problemen, die eine eingehende Betrachtung eines realen Systems nicht ermöglichen. Solche Probleme sind beispielsweise die mögliche Zerstörung des Systems bei Messungen oder die Unzugänglichkeit, weil das gewünschte Objekt zu klein ist oder auch der hohe Aufwand, der für ein Experiment zur Erkenntnisgewinnung betrieben werden müßte.

Sollen dennoch Aussagen über das reale System gemacht werden, muß das System weiter strukturiert und aus der Menge der beobachteten Phänomene einige wesentliche ausgewählt werden. Dieser Prozeß der Systemanalyse ist zwingende Voraussetzung für die sich anschließende Modellbildung. Der Schritt der Modellbildung im wissenschaftlichen Erkenntnisprozeß wird vollzogen, wenn das reale System keine weiteren gewünschten Einsichten zuläßt.

4.1.1. Modellaufbau und Modellstruktur

Ausgehend von Beobachtungen und Erscheinungen des realen Systems liegen zunächst eine Vielfalt von unstrukturierten Daten und Vorstellungen vor. Die Interpretation der Daten und die damit verbundene Vorstellung der inneren Zusammenhänge im realen System stellen die erste Stufe der Modellbildung dar. Befaßt sich eine Fachwissenschaft mit der Modellbildung, so werden den Daten und Erscheinungen Objektnamen und Attribute zugeordnet und Zusammenhänge in Form von Strukturen aufgebaut. Dabei werden im Modell unwesentliche Objekte und

Attribute weggelassen und das reale System mit offenen Grenzen in ein geschlossenes Modell übertragen.

4.1.2. Das reale Modell

Ein abstraktes Modell kann nicht in allen Fällen die gewünschten Aussagen über das Verhalten des realen Systems liefern. Daher muß ein Modell aufgebaut werden, welches diese Aussagen zuläßt. Solche Modelle repräsentieren einen Teil der Wirklichkeit des realen Systems und sind für diesen Bereich auch zugänglich. Reale Modelle sind entsprechend einer einfachen Klassifikation physikalischer, graphischer oder rechnergestützter Natur. In der Struktur des realen Modells werden Modellobjekte definiert. Sie repräsentieren Objekte des realen Systems und werden mit Attributen im realen System näher beschrieben.

Wichtig für die Aussagefähigkeit des Modells sind die Relationen zwischen den Modellobjekten und deren Stellung in der Gesamtstruktur des Modells. Es sind also nicht nur die Modellobjekteigenschaften, sondern gerade deren Beziehungen untereinander beim Modellaufbau genauestens zu analysieren. Für ein reales System gibt es in der Regel unterschiedliche abstrakte und reale Modelle. Diese haben ihre Berechtigung in der Aufgabenstellung und somit im Zweck, den das Modell erfüllen soll. Beispielhafte Zweckbestimmungen sind:

- Zeitverkürzung
- Sensitivitätsbetrachtung
- Hypothesenprüfung
- Versuchssteuerung
- Metasystemersatz

Zur Verdeutlichung möge hier das reale System Kraftfahrzeug dienen. Zur Zeitverkürzung in der Entwicklungsphase eines Automobils werden eine Reihe von verschiedenen Modellen aufgebaut. Ein Finite-Elemente-Modell der Karosserie und des

Fahrwerks dient dem Zweck, die Sensitivität des Fahrverhaltens und der mechanischen Eigenschaften in unterschiedlichen Belastungsfällen zu überprüfen. Ein Modell der Außenkonturen des Fahrzeugs wird zu Windkanalversuchen eingesetzt, um die Hypothesen bezüglich des Windwiderstandes und von Verschmutzungseigenschaften zu analysieren. Das Metasystem Mensch-Maschine wird in einem anderen Modell durch die Verwendung von Puppen bei Crashtests ersetzt. Diese verschiedenartigen Modelle verdeutlichen bereits, daß ein Modell allein nicht in der Lage ist, alle Fragestellungen zu beantworten. Daher müssen die Ergebnisse aus dem Modell ständig an der Problemstellung im realen System gemessen werden.

Das Bild 4-2 verdeutlicht den zirkularen Ablauf des wissenschaftlichen Erkenntnisprozesses. Systemanalyse, Modellaufbau und Modelluntersuchung lassen sich aus den oben genannten Beispielen ableiten. Bleibt die Validierung, das heißt die Überprüfung, inwieweit man der Problemlösung durch die Modellergebnisse nähergekommen ist. Zur Untersuchung der Modellergebnisse werden die Übereinstimmungen zwischen System- und Modellverhalten beobachtet.

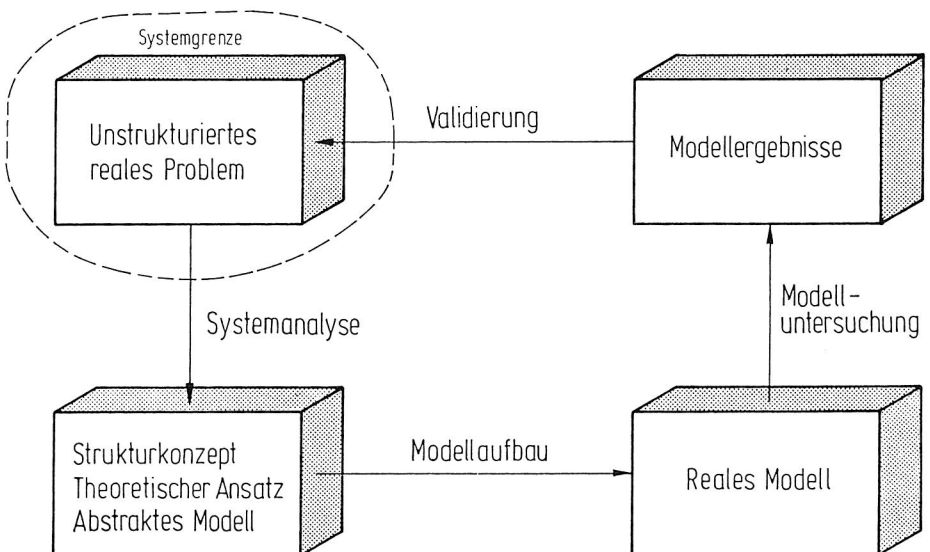


Bild 4-2 : System- und Modellaufbau

Je mehr Kongruenz zwischen den abgegrenzten Verhaltensbereichen festzustellen ist, desto größer wird das Vertrauen in das Modell. Diese Verifikation ist jedoch nicht gleichbedeutend mit dem Beweis der Korrektheit des Modells. In Fällen der Nichtübereinstimmung von System und Modell spricht man von Falsifikationen. Diese können in der Regel durch Einschränkungen und Zusatzhypothesen zurückgewiesen werden. Denn zur Abbildung einer realen Struktur ist immer auch ein bedingt fehlerhaftes einem nicht vorhandenen Modell vorzuziehen [110].

4.1.3 Inkonvergenzen zwischen System und Modell

Durch die Filterung im Abstraktionsprozeß werden unwesentlich erscheinende Zusammenhänge eliminiert. Da diese Zusammenhänge als nicht entscheidend eingestuft wurden, fehlt im Modell eine kausale Wirkkette, die im realen System in Grenzfällen zu schwerwiegenden Veränderungen führen kann.

Daraus folgt, daß für ein System, in dem kleine Ursachen große Wirkungen haben können, Modellbildung prinzipiell nicht möglich ist [110].

4.2 Vorhandene DV-Strukturen in Industriebetrieben

Seit Beginn der 70er Jahre dieses Jahrhunderts hat sich die organisatorische Struktur der meisten Industriebetriebe durch die Einführung der EDV verändert. Zunächst wurden große Rechenanlagen installiert, um in den Verwaltungsbereichen der Unternehmen die immer wieder anfallenden Rechenleistungen und Formularbearbeitungen auszuführen (Bild 4-3).

Die Anwendungsbreite und der Leistungsumfang haben bis zum heutigen Zeitpunkt ständig zugenommen. Dies führte zu einer wirtschaftlichen Bedeutung der EDV im Verwaltungsbereich, zum anderen aber auch zu einer Fixierung der meist

zentralen Rechendienste auf die Anforderungen der genannten Abteilungen. Als Folge dieser Entwicklung sind in den meisten Unternehmen neben der Organisationsdatenverarbeitung technische Rechenzentren entstanden, die speziell auf die Anforderungen von Entwicklung und Produktion ausgelegt wurden. Typisch für diese Systeme ist der Einsatz von Inselrechnern für definierte Problemfelder, wie etwa Bauteilprüfung (FEM) in der Entwicklung oder Fertigungssteuerung (PPS) in der Produktion. Auch Systeme zum rechnergestützten Konstruieren (CAD) mit anschließender Generierung von NC-Programmen (CAM) für die NC-Fertigungseinrichtungen entsprechen dieser Strategie.

In der Produktionsebene werden zudem verstärkt Rechnersysteme eingesetzt. Werkzeugmaschinen in der Fertigung sind in der Regel mit Direct Numerical Control-(DNC)Rechnern und Speicherprogrammierbaren Steuerungen (SPS) ausgerüstet. Moderne Montagesysteme verfügen über Robot-Control-Rechner, die der Ansteuerung von NC-Achssystemen oder Robotern dienen.

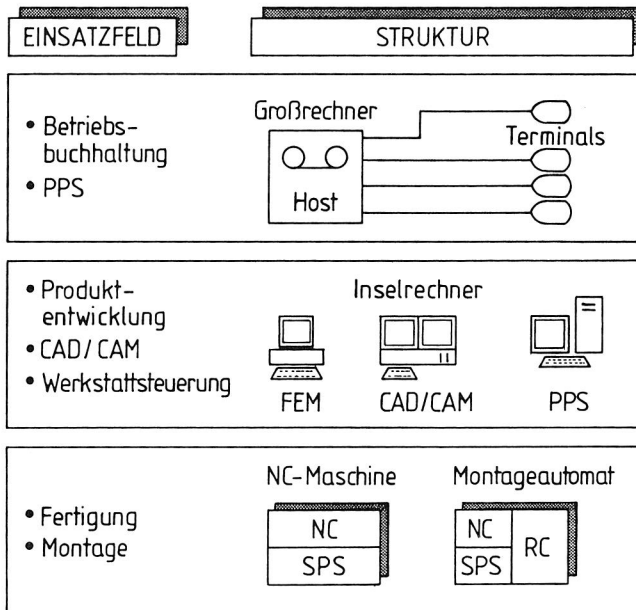


Bild 4-3: DV - Strukturen im Produktionsbetrieb

Eine Verknüpfung der funktionalen Rechnerhierarchien miteinander war bisher kaum realisierbar, da hierzu sowohl die hard- als auch softwaremäßigen Schnittstellenstandards nicht vorhanden waren. Seit etwa Mitte der 80er Jahre sind nun in verstärktem Umfange Bestrebungen im Gange, um die Rechnerinseln in den Produktionsbetrieben zu integrieren.

Diese mit Computer Integrated Manufacturing (CIM) bezeichnete Entwicklung ist durch genormte Verbindungssysteme und einheitliche Übertragungsprotokolle vorangetrieben worden. Damit steigt aber auch der Anspruch, nicht vernetzte Anwendungsfelder, wie etwa in den Planungsabteilungen, der Rechnerintegration zugänglich zu machen.

4.2.1 Einbindung der rechnergestützten Projektierung

Die rechnergestützte Projektierung und Planung von Montagesystemen steht unter dem Zwang, als relativ neues Anwendungsfeld sich in bereits vorhandene Rechneranwendungen einpassen zu müssen. Dabei sollte berücksichtigt werden, daß auch die Planungs- und Projektierungssoftware in ein CIM-Konzept integriert werden muß. Für die Einbindung des Projektierungsmodells sind folgende Punkte zu beachten:

- Aufbau eines globalen Datenbankmanagementsystems (DBMS),
- Differenzierung in lokale und globale Datenbestände,
- Einsatz von Workstations und
- Integration in vorhandene Systemstrukturen.

Der Aufbau eines Datenbankmanagementsystems für die Projektierung von automatisierten Montagesystemen wird in Kap.6 eingehend betrachtet. Neben der Einführung von relationalen Datenbanken sind weitere Aspekte ausschlaggebend für einen sinnvollen Einsatz der Projektierungssoftware in CIM-Umgebungen. So sollte das Projektierungsmodell auf Workstations implementierbar sein, die ein günstiges Preis-Leistungsverhältnis bieten. Hierzu stehen umfangreiche Software-Tools zur

Verfügung, die Programmierung und Handhabung des Systems erleichtern.

4.2.2 Projektierungsmodell und CIM - Umfeld

Entsprechend der genannten Anforderungen an CIM - Konzepte gilt es für die Projektierung, eine sinnvolle Einbindung von Hard- und Software zu realisieren. Das Modell zur rechnerintegrierten Projektierung von Montagesystemen verfolgt dabei die Strategie, vorhandene Strukturen zu berücksichtigen und gleichzeitig neue Zielvorstellungen weitgehend zu verwirklichen. Die hardwaremäßige Anbindung ist weitgehend durch die vorhandenen Strukturen präjudiziert. Existieren Netzwerke, so bietet es sich an, die Projektierungssoftware auf Workstations zu implementieren und über Fileserver (sofern notwendig) mit den vorhandenen Rechnern zu verknüpfen.

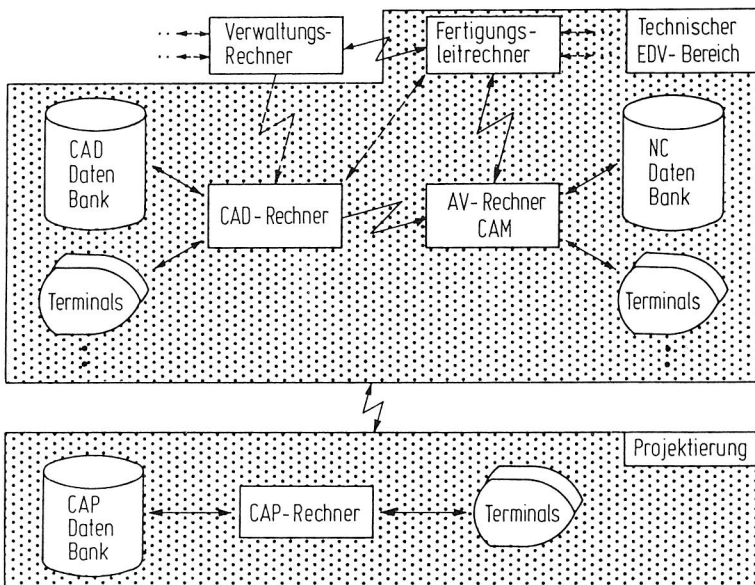


Bild 4-4: Technische EDV und Projektierung

Sind noch keine Rechnerverknüpfungen vorhanden, so kann die Projektierungssoftware auf Workstations betrieben werden, die direkt (Sternstruktur) mit den übrigen Planungsrechnern verbunden werden. Für die Softwareinstallation bietet es sich an, das Projektierungsmodell auf einer Workstation einzurichten. Insbesondere die damit verbundene Möglichkeit, gleichzeitig eine Datenbank zu installieren, bringt eine Reihe von Vorteilen mit sich. So ergibt sich eine erhöhte Konsistenz der verwendeten Datenbestände, Pflege und Wartung redundanter Datenbestände entfällt und die mehrmalige Eingabe der gleichen Daten in verschiedenen Softwaresystemen verbleibt.

4.3 Montagereihenfolgeplanung im Modell

In der Projektierungsphase für Montagesysteme werden in aller Regel die geforderten Stückzahlen und damit die erwartete Ausbringung der Anlage vorgegeben. Ausgehend von diesem Wert und der betriebsinternen jährlichen Arbeitszeit kann die Taktzeit für das geplante Montagesystem in Grenzen bestimmt werden.

$$t_{\text{proj}} = \frac{h_s \cdot s_k \cdot d_a \cdot 3600}{s_p \cdot \eta} \quad [\text{sec}] \quad (9)$$

mit:

- t_{proj} = projektierte Taktzeit [sec]
- h_s = Stunden pro Schicht [h]
- s_k = Schichtzahl pro Tag
- d_a = Arbeitstage pro Jahr
- s_p = Planstückzahl
- η = Nutzungsgrad des Montagesystems

Damit ergibt sich für die Montagereihenfolgeplanung die Aufgabenstellung, notwendige Teilverrichtungen hinsichtlich einer vorgegebenen Taktzeit unter dem Zielkriterium Verlustzeitminimierung den Arbeitsstationen zuzuordnen.

Die dabei einzusetzenden Teilverrichtungszeiten lassen sich bei manuellen und automatisierten Tätigkeiten mit den Systemen vorbestimmter Zeiten ermitteln. Darüber hinaus sind für automatische Teilverrichtungen entsprechende Teilverrichtungszeiten aus Datenbanken oder Durchschnittswerten sowie Versuchsreihen entnehmbar (Bild 4-5).

Nach der so erfolgten Montageaufgabenanalyse wird die rechnergestützte Abtaktung initialisiert. Bevor sich hier der Planer für ein Verfahren entscheidet, ist die Abschätzung des Rechenaufwandes sinnvoll und bei größeren Projekten, die mit vollständiger Enumeration bearbeitet werden, auch notwendig.

Der Planer soll von Routinetätigkeiten entlastet werden und durch systematisch aufbereitete Informationen seine kreativen Aktivitäten entwickeln können. Dabei ist zu beachten, daß die Schnittstellen der eigentlichen Rechnerprogramme zu den Datenbasen so flexibel gestaltet sind, daß diese den Entwicklungen in der Technik auf einfache Weise angepaßt werden können.

4.3.1 Anforderungsprofil in der Projektierungsphase

Bei der Neu- und Umplanung von Automatisierungsprojekten in der Montagetechnik sind zunächst Zeichnungen, Stücklisten und in einigen Fällen Prototypen der Produkte vorhanden, die auf dem Montagesystem gefertigt werden sollen. Diese in noch fast allen Industriebetrieben herrschende Ausgangssituation erlaubt es nicht, Informationen aus der Produktentwicklung direkt in die Anlagenprojektierung EDV-verarbeitbar zu übertragen.

Für die modellhafte Betrachtung der Projektierung in Industrieunternehmen ergibt sich daraus die Notwendigkeit, die Systemgrenze und damit die Anwenderschnittstelle zwischen Produktentwicklung und Anlagenentwicklung vorzusehen.

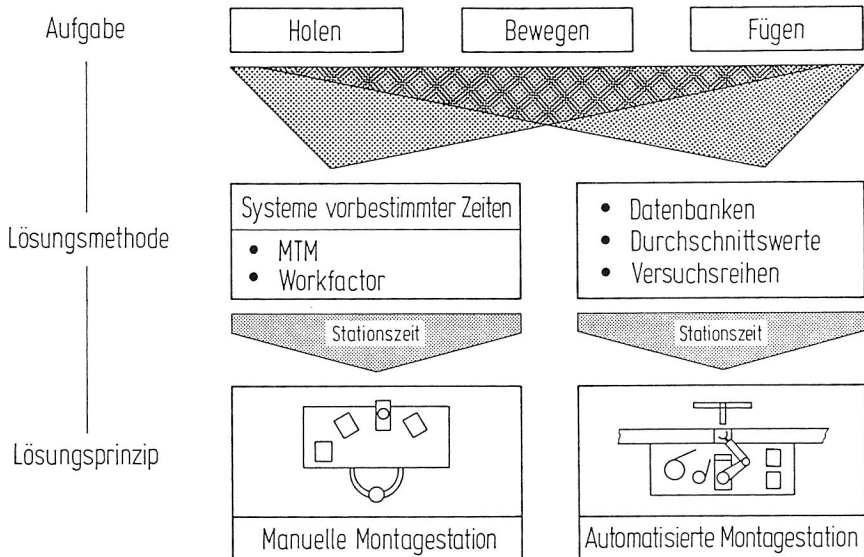


Bild 4-5 : Aufgaben und Lösungen der Teilverrichtungszeitermittlung

Somit ist zunächst die Aufbereitung von Ausgangsdaten der Entwicklungsabteilungen als Eingangsinformation für die rechnerunterstützte Projektierung durchzuführen.

Damit eine Montagereihenfolgeplanung vollzogen werden kann, ist im ersten Schritt die Übertragung der Stückliste mit einigen Zusatzinformationen notwendig. Die Stückliste enthält sämtliche zu einem Produkt gehörende Einzelteile und Baugruppen.

Ein wichtiger Schritt bei der Modellbildung ist die Abstraktion des realen Systems. Es ist zu untersuchen und zu entscheiden, in welchem Maße Einflußparameter des realen Systems für das Modell von Bedeutung sind.

Bei der Projektierung von Montagesystemen sind in der Praxis zunächst beliebig viele Einflußgrößen auf den Planungsprozeß zugelassen und werden auch dementsprechend berücksichtigt. In einem Rechenmodell ist diese Vorgehensweise global unzulässig und daher nur in Grenzen übertragbar. Hinzu kommt, daß Projekte untereinander schwer vergleichbar werden, falls die Eingangsdaten aus beliebig differierenden Größen bestehen.

Darüber hinaus ist für die Montage von Bedeutung, in welchen möglichen Reihenfolgen und Kombinationen die Einzelteile zu einem Ganzen gefügt werden können.

Die Fügeprozesse bedingen weitere Informationsparameter, deren Einbindung in die Projektierung erforderlich ist, da z.B. durch den Fügeparameter "Toleranz" die Montagezeit erheblich beeinflusst wird.

Die wesentlichen zeitbeeinflussenden Faktoren, die sich im ersten Projektierungsschritt bereits ermitteln lassen, sind neben dem Fügen die Zeitanteile für das Holen und Bewegen der Einzelteile und Baugruppen von der Bereitstellungsposition zum Montageort.

Im Bereich der manuellen Montage sind für die Aufgabenstellung der Zeitermittlung einige Lösungsmethoden bekannt. Die sogenannte Planvorgabezeit, die ein geschulter Werker benötigt, um eine entsprechende Tätigkeit auszuüben, kann mit den Verfahren der vorbestimmten Zeiten ermittelt werden [90,47]. Für diese Verfahren müssen die einzelnen Tätigkeiten soweit reduziert werden, daß sie nicht mehr zergliederbar sind. Man spricht hier von Elementartätigkeiten, die nicht mit den in Kapitel 2.2.1 beschriebenen Teilverrichtungen gleichzusetzen sind. Die beiden bekanntesten Systeme vorbestimmter Zeiten sind das Workfactor und MTM-Verfahren [47,90]. Bei diesen Verfahren werden die Elementartätigkeiten auf Blockelemente verteilt, denen jeweils eine Tabelle von Funktionen mit verschiedenen Bedingungen zugeordnet ist.

Um auch die Taktzeit für automatische Montagestationen in der Projektierungsphase vorbestimmen zu können, sind eine Reihe von Entwicklungen in dieser Richtung vollzogen worden [112]. In den meisten Fällen handelt es sich dabei um EDV-Programme, die eine Animation des Bewegungsablaufs durchführen und durch Simulation das Konzept auch hinsichtlich der Ausführungszeiten überprüfen [35]. Wesentliche Voraussetzung zur Ausführung dieser Programme ist die graphische Aufbereitung des Konzepts in eine rechnerverarbeitbare Form.

In der Projektierungsphase ist allerdings abzuwägen, ob nicht weniger aufwendige Verfahren zum Ziel führen, zumal die umfangreichen Informationen, die zur graphischen Anlagenaufbereitung notwendig sind, noch nicht vorhanden sind. Für die Montagereihenfolgeplanung im Projektierungsmodell ergeben sich somit folgende Anforderungen:

- Aufgabenanalyse
- Teilverrichtungsermittlung
- Abtaktung
- Optimierung

Für besondere Montagevorgänge ist es von Bedeutung, daß sie auf festgelegten Vorrichtungen ausgeführt werden. Die Codierungen hierfür in Verbindung mit dem Automatisierungsgrad stellen für die anschließende Montagereihenfolge restriktive Parameter dar, deren Funktion in Kap. 6.2 näher beschrieben wird. Danach wird der Teilverrichtung eine Planvorgabezeit zugeteilt, die sich für manuelle Tätigkeiten aus den Systemen vorbestimmter Zeiten und für automatische Vorrichtungen aus Datenbanken oder empirisch-experimentellen Werten ermitteln läßt.

Bevor die eigentliche Reihenfolgeplanung ausgeführt werden kann, muß der Planer festlegen, in welchen möglichen und zulässigen Folgebeziehungen die einzelnen Teilverrichtungen ausgeführt werden können bzw. müssen. Da die Tätigkeiten durch ihre Numerierung eindeutig identifizierbar sind, genügt

es, im Modell die Teilverrichtungsnummern der Tätigkeiten anzugeben, die unbedingt vor der gerade zu bearbeitenden Teilverrichtung durchgeführt werden müssen. Alle übrigen, nicht aufgeführten Vorgangsnummern bleiben weiterhin zulässig als Vorgänger einplanbar. Mit diesen insgesamt 8 verschiedenen Parametern für jede Montagetätigkeit werden die Teilverrichtungen im Modell ausreichend beschrieben, um die anschließenden Berechnungen durchführen zu können. Unabhängig hiervon ist das Modell so aufgebaut, daß eine Erweiterung um mögliche weitere Einflußgrößen jederzeit vollzogen werden kann.

4.3.2 Abschätzen der Rechenzeit

Ein besonderes Merkmal des Projektierungsmodells, das es von den herkömmlichen Programmen zur Lösung des Bandabgleichungsproblems unterscheidet, ist das Auffinden der exakten Lösung durch vollständige Enumeration der Anordnungsmöglichkeiten für die Teilverrichtungen. Die dabei benötigte Rechenzeit hängt zum einen von der Anzahl der zu kombinierenden Tätigkeiten und zum anderen von den im Vorranggraphen getroffenen Restriktionen sowie dem betrachteten Taktzeitintervall ab.

Eigene Erfahrungen haben gezeigt, daß es ratsam ist, den Rechenaufwand vor dem endgültigen Start eines Optimierungslaufes abzuschätzen. Die enormen Rechenzeiten werden verständlich, wenn man bedenkt, daß sich die Kombinationsmöglichkeiten für eine Anzahl beliebig hintereinander ausführbarer Tätigkeiten aus deren Fakultät berechnet. Eine Gleichung zur Berechnung der exakten Anzahl der Anordnungsmöglichkeiten für Knoten gerichteter Graphen gibt es in der Kombinatorik nicht. Deshalb wurden einige Gleichungen hergeleitet, mit denen zwar nicht immer exakte Lösungen möglich sind, die aber zumindest eine brauchbare obere Schranke zum Abschätzen des Rechenaufwandes liefern.

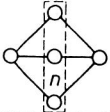
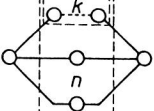
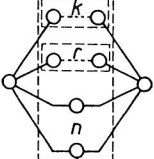
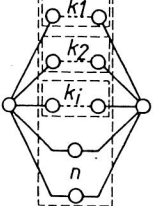
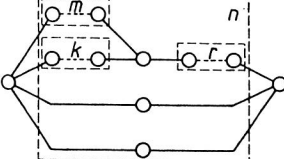
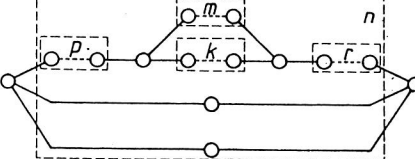
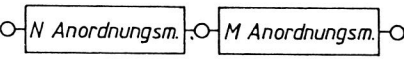
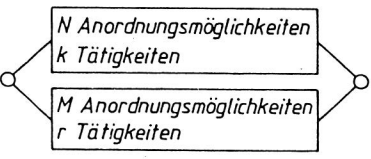
VORRANGGRAPHEN	ANORDNUNGSMÖGLICHKEITEN
<p>1</p> 	$n!$
<p>2</p> 	$\frac{n!}{k!}$
<p>3</p> 	$\frac{n!}{k! \cdot r!}$
<p>4</p> 	$\frac{n!}{k_1! \cdot k_2! \cdot \dots \cdot k_i!}$
<p>5</p> 	$\sum_{i=k+m}^{n-r-1} \frac{i!}{k! \cdot m!} \cdot \frac{(n-i-1)!}{r!}$
<p>6</p> 	$\sum_{i=p}^{n-k-r-m-2} \frac{i!}{p!} \cdot \sum_{j=k+m}^{n-i-r} \frac{j!}{k! \cdot m!} \cdot \frac{(n-j-2)!}{r!}$
<p>7</p> 	$N \cdot M$
<p>8</p> 	$N \cdot M \cdot \frac{(k+r)!}{k! \cdot r!}$

Bild 4-6: Gleichungen zur Berechnung der Anordnungsmöglichkeiten von Tätigkeiten in Graphen

Die Ergebnisse zu den nun folgenden Berechnungen sind zusammengefaßt in Bild 4-6. Zunächst wird der einfachste Fall eines Vorranggraphen diskutiert (Graph 1). Es liegen Tätigkeiten vor, die in beliebiger Reihenfolge ausgeführt werden können. Der Anfangs- und Endknoten sind nur der Vollständigkeit halber eingezeichnet. Sie haben keinen Einfluß auf die Zahl der möglichen Anordnungen.

Es bedarf keines weiterführenden Beweises, um zu zeigen, daß es $n!$ mögliche Reihenfolgen zum Durchführen der Tätigkeiten gibt. Nimmt man eine erste Tätigkeit, gibt es n Möglichkeiten, sie in der Reihenfolge zu platzieren. Für eine zweite Tätigkeit bleiben dann noch $(n-1)$ Plazierungen offen. Die n -te Tätigkeit kann schließlich nur noch auf einen freien Platz in der Folge eingeordnet werden. Damit ergibt sich für die Zahl der möglichen Anordnungen folgende Gleichung:

$$N_{\text{Graph1}} = n \cdot (n-1) \cdots 1 = n! \quad (10)$$

mit:

$$\begin{aligned} N_{\text{Graph1}} &= \text{Enumerationsobergrenze für Graph 1} \\ n &= \text{Knoten} \end{aligned}$$

In der Kombinatorik spricht man von einer Permutation ohne Wiederholung. Die Gleichung (10) ist zugleich eine obere Schranke, die für alle Graphentypen gilt. Eine erste einfache Restriktion an die Austauschbarkeit der Reihenfolge ist die Bedingung, daß k von n Tätigkeiten in einer festgelegten Folge auszuführen sind (Graph 2).

Für die Herleitung der Gleichung gilt, daß zunächst k der n Plazierungsmöglichkeiten mit reihenfolgeabhängigen Tätigkeiten besetzt werden. Es bleiben dann $(n-k)$ Plätze frei, auf denen die restlichen Tätigkeiten frei permutiert werden können. Das Herausgreifen einer k -elementigen Teilmenge aus einer n -elementigen Grundmenge ist in der Kombinatorik als Kombination ohne Wiederholung von n Elementen der Ordnung k definiert [15]. Das entspricht dem Vorgang, k der n Plätze

mit den reihenfolgeabhängigen Tätigkeiten vorzubesetzen. Ein Hauptsatz der Kombinatorik besagt, daß die Anzahl aller voneinander verschiedenen Kombinationen ohne Wiederholung gleich dem Binominalkoeffizienten "n über k" ist. Damit gilt für $k \leq n$:

$$\begin{aligned} N_{\text{Graph2}} &= (n \text{ über } k) \cdot (n-k) & (11) \\ &= n! / (k! \cdot (n-k)!) \cdot (n-k)! \\ &= n! / k! \end{aligned}$$

Gibt es weitere r Tätigkeiten, die nacheinander ausgeführt werden müssen (Graph3), leitet sich die Zahl der möglichen Anordnungen aus den folgenden Überlegungen her. Für die k Elemente der ersten Tätigkeitskette gibt es "n über k" Möglichkeiten, sie zu plazieren. Den r Elementen der zweiten Tätigkeitskette bleiben dann "(n-k) über r" Variationen. Die restlichen (n-k-r) Tätigkeiten können auf den freigebliebenen Plätzen beliebig permutiert werden. Somit gilt für $k + r \leq n$:

$$\begin{aligned} N_{\text{Graph3}} &= (n \text{ über } k) \cdot (n-k \text{ über } r) \cdot (n-k-r)! & (12) \\ &= n! / (k! \cdot (n-k)!) \cdot (n-k)! / (r! \cdot (n-k-r)!) \cdot (n-k-r)! \\ &= n! / (k! \cdot r!) \end{aligned}$$

Es ist unschwer zu erkennen, daß jede weitere Folge nacheinander auszuführender Tätigkeiten innerhalb der zu ordnenden Menge durch Division des Terms mit der Fakultät aus der Ordnung der Untermenge zu berücksichtigen ist (Graph 4).

Mit Kenntnis dieses Zusammenhanges läßt sich schnell eine Gleichung für Graph 5 finden. Entscheidender Gedanke dabei ist, daß sich das Ergebnis aus der Summe der Variationen zusammensetzt, die sich für die Anordnungsmöglichkeiten der gekennzeichneten Tätigkeiten ergeben. Diese kann frühestens nach der (k+m)-ten Tätigkeit und spätestens vor der r-ten Tätigkeit ausgeführt werden. Ein Index i, der die Zahl der vorher ausgeführten Tätigkeit beschreibt, läuft damit von (k+m) bis (n-t-1). Für jede dieser Plazierungsmöglichkeiten gibt es dann $[i! / (k! \cdot m!)]$ Variationen für die vorausgehenden

Tätigkeiten und $[(n-i-1)!/r!]$ Variationen für die nachfolgenden Tätigkeiten. Diese Gleichung gilt auch für spiegelbildliche Graphen.

Die Anordnungsmöglichkeiten für die Tätigkeiten aus Graph 6 lassen sich analog der vorausgegangenen Überlegungen als Doppelsumme darstellen. Die bisher besprochenen Gleichungen sollen für die Beschreibung spezieller Graphentypen ausreichend sein. Jeder Vorranggraph läßt sich in eine Anzahl solch einfacher Graphen zerlegen.

Den einfachsten Fall der Aufteilung eines Graphen in zwei Teile zeigt Graph 7. Sämtliche Kanten des ersten Teilgraphen münden in einen Knoten, der Ausgangspunkt ist für die Kanten des zweiten Teilgraphen. Die Gesamtzahl der Anordnungsvarianten für alle Tätigkeiten des kompletten Graphen berechnet sich aus dem Produkt der Variationen der Teilgraphen.

Eine zweite Problemstellung zeigt Graph 8. Die Teilgraphen liegen im Vorranggraphen parallel zueinander und werden durch keine Kante miteinander verbunden. Der erste Teilgraph enthält k Tätigkeiten, die in N unterschiedlichen Reihenfolgen durchführbar sind, der zweite Teilgraph r Tätigkeiten mit M Variationen. Für jede der $(N \cdot M)$ Kombinationen der beiden Variationen gibt es " $[(k+r) \text{ über } k]$ " unterschiedliche Lösungen, die Tätigkeiten nacheinander auszuführen.

Anhand der Graphen und der zugehörigen Gleichungen läßt sich somit eine Abschätzung der zu erwartenden Enumerationsobergrenzen in Abhängigkeit der zur Verfügung stehenden Rechnerleistung und damit der zu erwartenden Rechenzeit durchführen, da diese sich proportional zur Enumerationszahl verhält.

4.4 Aufbau von Funktionsstrukturen

In den beschriebenen vorangegangenen Projektierungsschritten wurde eine Montageablaufanalyse durchgeführt, wobei im we-

sentlichen die Fugesituation und die Fügerangfolge bestimmt wurden. Die weitere Projektierung eines Montagesystems verlangt nun eine Zuordnung von Funktionsträgern zur Aufgabenstellung. Hierzu gehören Angaben zum Umfang der Funktionen, die zur Durchführung des jeweiligen Montagevorgangs notwendig sind. Für die Lösung dieser Aufgabenstellung bieten sich Funktionsstrukturen an, bei denen durch Abstraktion von immer gleichen Anforderungen lösungsunabhängige Profile erstellt werden können. Dazu wird die Gesamtfunktion eines zu projektierenden Montagesystemes in Teilfunktionen, wie sie in Bild 4-7 wiedergegeben sind, zerlegt.

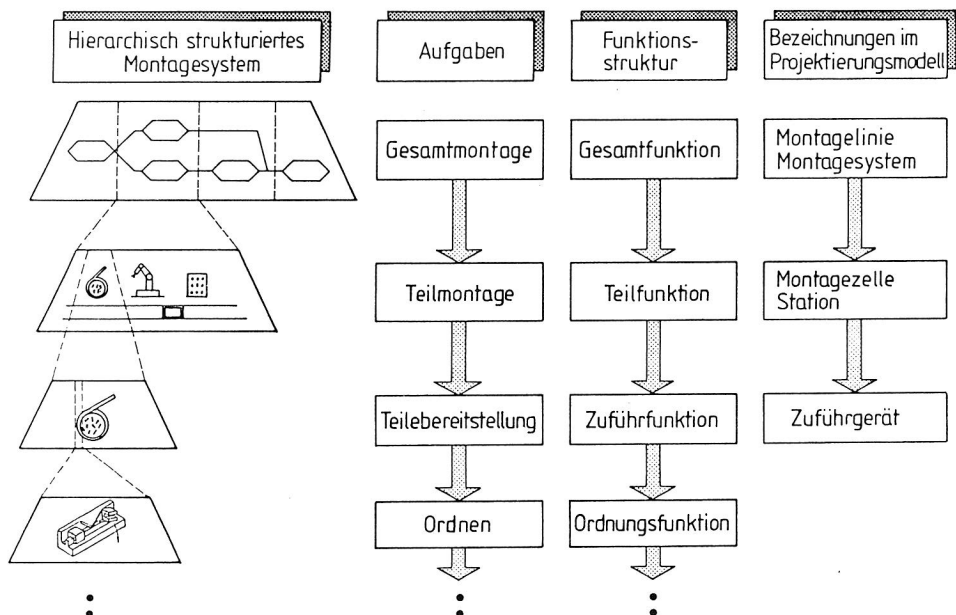


Bild 4-7: Aufbau von Funktionsstrukturen

Dieser Zergliederungsprozeß entspricht einem hierarchischen Aufbau von Funktionselementen, in dem jeder Teilfunktion beliebig viele Unterfunktionen zugeordnet werden können. Das hier vorgestellte Modell ist in drei Ebenen aufgebaut, da eine möglichst geringe Gliederungstiefe anzustreben ist, um

den Funktionsstrukturaufbau zu erleichtern. Auch kann die Gliederungstiefe nicht größer sein, da im Projektierungsstadium noch nicht genügend Informationen vorliegen, um detaillierte Aussagen über die jeweiligen Funktionselemente machen zu können.

Es wird also im Modell zunächst das Ziel sein, mit den zur Verfügung stehenden Daten Teilfunktionen zu ermitteln und in Form von Funktionsketten aneinander zu fügen. Unterstützt wird diese Strukturierung durch die bereits vorgegebene Montagereihenfolge mit der Montagezeitvorgabe. Aus der insgesamt zur Verfügung stehenden Montagezeit ergeben sich Einschränkungen bezüglich der Auswahl von Teilfunktionselementen aus der Gesamtheit der Funktionselemente, wobei die Zeitvorgabe per definitionem in diesem Modell die restriktive Größe darstellt.

4.4.1 Montagevorgabezeit und Funktionselementezeit

Zur Lösung der Montageaufgabe sind eine Reihe von Teilfunktionen erforderlich. Diese Einzelfunktionen werden in dem hier vorgestellten Modell durch Funktionselemente repräsentiert, die sich wiederum untereinander durch verschiedenartige Parameter unterscheiden.

In der ersten Projektierungsstufe wurden bereits die Montage-
teilverrichtungen analysiert und mit einem Zeitwert belegt. Nun gilt es, durch einerseits logische, andererseits arithmetische Verknüpfungen die Teilverrichtungszeit in entsprechende Funktionselementezeiten aufzuspalten. Dazu ist die Betrachtung der Zeitanteile, wie in Bild 4-8 dargestellt, erforderlich. Die Teilverrichtungszeit gliedert sich somit in die Anteile, welche auf die Bewegungsfunktionselemente und auf die eigentliche Fügefunktion entfallen. In Summe ergeben die Zeitanteile für Bewegungs- und Fügefunktion die gesamte Teilverrichtungszeit, wobei unterschiedliche Anteile zulässig und auch in der Praxis die Regel sind.

Die Zeiten für die Zuführefunktionen sind als Untermenge der gesamten Teilverrichtungszeit zu betrachten. Das setzt allerdings voraus, daß die Zuführzeit pro Bauteil nicht größer sein darf als die Teilverrichtungszeit.

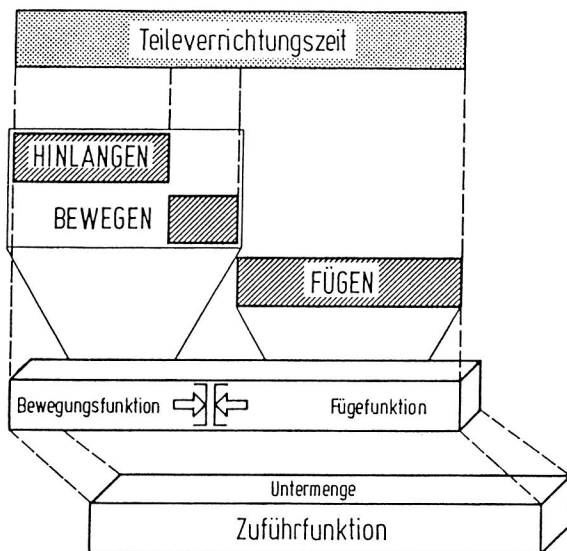


Bild 4-8: Funktionselementezeiten als Bestandteil der Teilverrichtungszeit

4.4.2 Alternative Modelle

Mit den bestehenden Methoden zur Planung von Montagesystemen werden, ausgehend von der Montageaufgabenstellung, Montagekonzepte und Gerätelösungen erarbeitet. Dabei basiert die Zeitanalyse und Geräteauswahl im wesentlichen auf den Erfahrungswerten des Planers. Einige Arbeiten [54,70,77,82] befassen sich mit der Systematisierung dieser Abläufe und geben verschiedene Möglichkeiten vor, die Montagezeitermittlung und -zuordnung vorzunehmen. Sämtlichen Methoden gelingt es nicht, die verschiedenen Arten der Zeitermittlung zu integrieren, da sie entweder auf die Systeme vorbestimmter Zeiten oder auf

externe Zeitvorgaben bauen. Auch neuere, rechnergestützte Planungsverfahren verzichten auf die Zeitermittlung oder überlassen sie dem geübten Anwender dieser Systeme [51].

Darüber hinaus sind die bekannten Methoden mit einer Beschränkung ihrer Gültigkeit auf vordefinierte Problemfelder versehen (Bild 4-9). Dies erscheint zumeist dann sinnvoll, wenn spezifische Verfahren bewußt die Randbedingungen des Problemkreises berücksichtigen.

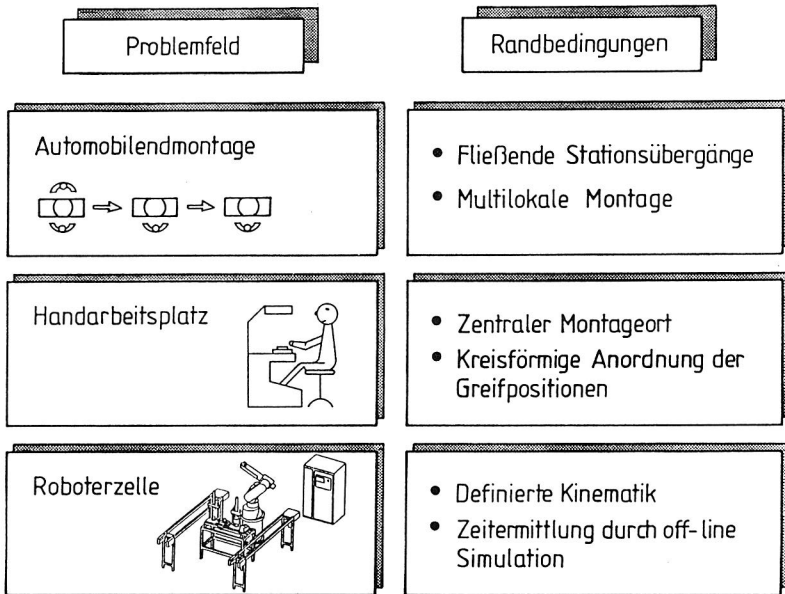


Bild 4-9: Problemfeldabhängige Planungsverfahren

Das hier vorgestellte Modell zur rechnerintegrierten Projektierung von automatisierten Montagesystemen berücksichtigt bei der Montagevorgabezeitermittlung und dem Aufbau der Funktionsstrukturen die spezifischen Belange der elektrofeinwerktechnischen Gerätemontage. Es integriert allerdings im Gegensatz zu bekannten Ansätzen die verschiedenen Möglichkeiten der Planvorgabezeitbestimmung und den anschließenden

Funktionsstrukturaufbau mit einer Wirtschaftlichkeitsanalyse. Die Kleinteilmontagen in der elektrofeinwerktechnischen Produktion sind gekennzeichnet durch Montagesysteme, die zumeist in Form gerichteter Fließfertigungen mit Montagestationen und dazwischen geschalteten Weitergabeeinrichtungen aufgebaut sind.

Unter Berücksichtigung dieser Randbedingungen und der statistischen Erhebungen läßt sich für das Modell eine Funktionsstrukturbeschreibung ableiten.

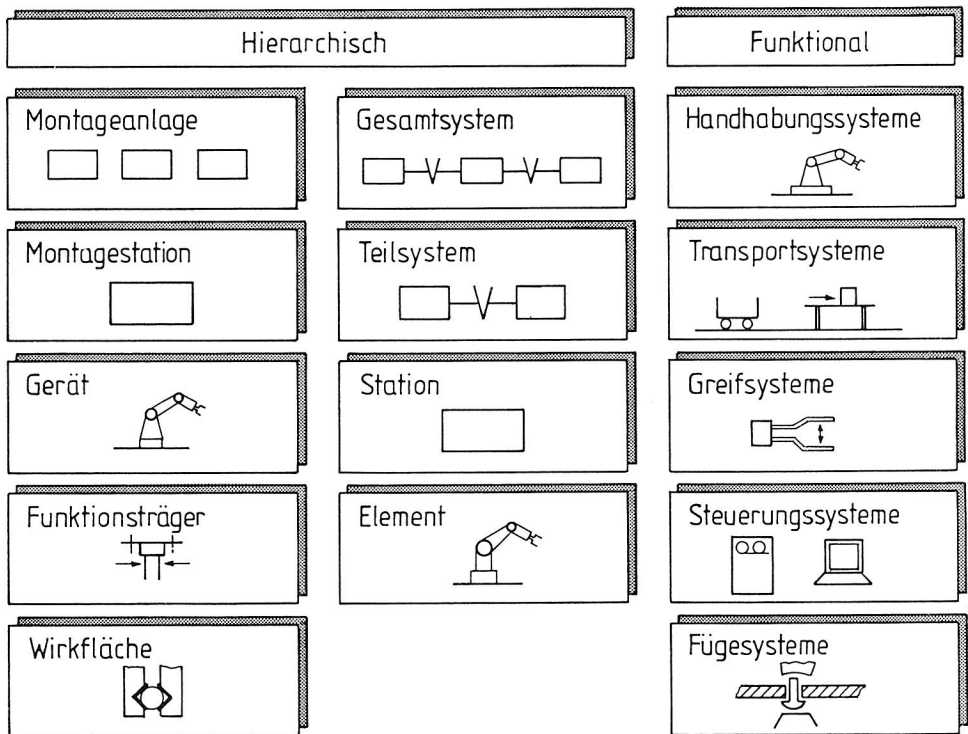


Bild 4-10: Beispiele hierarchischer und funktionaler Strukturen

4.4.3 Funktionsstrukturen im Modell

Das wesentliche Differenzierungsmerkmal der bekannten Strukturierungskonzepte ist ihr entweder hierarchischer oder funktionaler Aufbau (Bild 4-10) [109,131,136]. Zu diesen Funktionsklassen existieren eine Reihe von Funktionsträgern. Das sind Geräte, die in der Lage sind, den Funktionsumfang einer Funktionsklasse auszuführen. Es wird im Projektierungsstadium also nicht verlangt, daß der Planer detaillierte Funktionsketten etwa mit Hilfe der VDI-Symbole (Richtlinie 2860) aufstellt [92].

Möglich wird diese Vorgehensweise allerdings nur, wenn ein gewisser Standardisierungserfolg bei den Funktionsträgern erreicht wurde. Das Bild 4-11 soll in diesem Zusammenhang qualitativ verdeutlichen, inwieweit für die rechnergestützte Projektierung von automatisierten Montagesystemen eine Standardisierung sinnvoll und notwendig ist. Grundsätzlich sinkt der Projektierungsaufwand mit zunehmender Standardisierung auch bei nur geringer Anzahl von Projekten pro Planungsperiode.

Allerdings nimmt mit steigender Standardisierung auch der Aufwand zu, der betrieben werden muß, um Standardelemente zu klassifizieren und sie einer Rechnerverarbeitung zugänglich zu machen. Je nach Projektierungsfrequenz und Gleichartigkeit der Projekte wird ein betriebsspezifisches Aufwandsminimum zu suchen sein.

Die Ergebnisse aus den statistischen Erhebungen, die in ähnlicher Form Gültigkeit für sämtliche Montageaufgaben der elektrofeinwerktechnischen Produktion haben, tragen dazu bei, Basiselemente für die Funktionsklassen zu erstellen. So fließen Standards in die Bildung von Montagezellendimensionen und Ausstattungen ein. Ebenso lassen sich für Zuführlösungen und Weitergabeeinrichtungen entsprechend der Produktspektren Vereinheitlichungen ableiten.

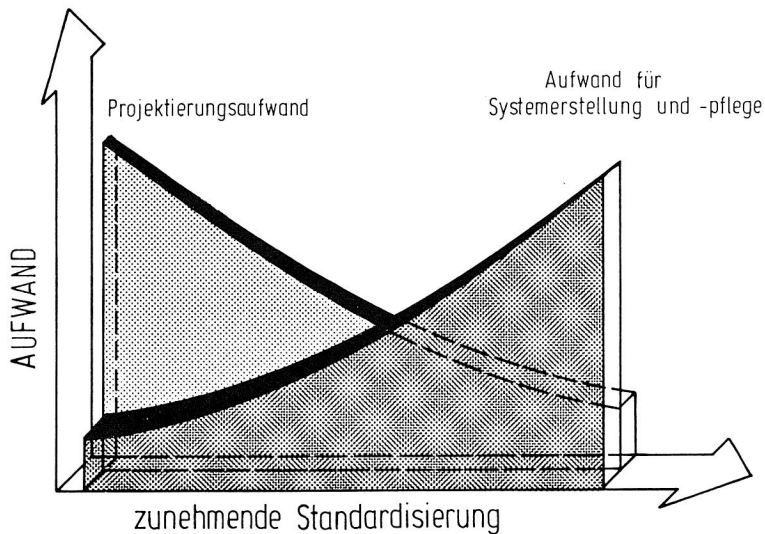


Bild 4-11: Projektierungs- und Standardisierungsaufwand

Damit ist nach der Montageaufgabenanalyse mit der Bildung von Funktionsstrukturen ein wichtiger weiterer Schritt getan, um in Form von Funktionslayouts Zwischenergebnisse des Projektierungsmodells darstellen zu können. Entsprechend der vielfältigen Lösungsmöglichkeiten ergeben sich auch eine Reihe von Funktionslayouts für eine Montageaufgabe. Im nächsten Schritt muß also eine Bewertung und Auswahl der ermittelten Layouts erfolgen. Hierzu sind in aller Regel die Wirtschaftlichkeitsbeurteilungsverfahren am geeignetsten.

5. Wirtschaftlichkeitsrechnung für automatisierte Montagesysteme

Automatisierte Montagesysteme gehören zu den Technologien, die in vielen Industriebetrieben zunehmend eingesetzt werden. Bei Unerfahrenheit mit der Montageautomatisierung verbindet sich damit eine Ungewißheit über den wirtschaftlichen Erfolg dieser Technik; insbesondere dann, wenn mehrere Investitionsprojekte um ein begrenztes Budget konkurrieren.

Die Problematik bei der betriebswirtschaftlichen Beurteilung von Investitionen liegt in dem Anspruch der neuen Techniken begründet. Es soll nicht mehr das Einzelprojekt, sondern die integrierte Lösung betrachtet werden, womit konventionelle Investitionsrechnungsverfahren überfordert sind. Um hier einerseits den Bestrebungen nach Einführung neuer Produktionstechnologien (z.B. automatisierte Montagesysteme) und andererseits der Verpflichtung zum wirtschaftlichen Handeln gerecht zu werden, ist der Begriff der strategischen Investitionsplanung geprägt worden [138].

Bisher erwarben die meisten Industriebetriebe ihre Produktionsmittel auf dem freien Markt, der wiederum allen anderen Betrieben, also auch den Mitwettbewerbern, offen stand. Damit mußten diese Einzelinvestitionen als eigenständige Projekte mittels eines dynamischen Wirtschaftlichkeitsberechnungsverfahrens beurteilbar sein. Für die Zukunft zeichnet sich dagegen jetzt der Trend ab, daß steigende Automatisierungsgrade auch zu gesamtheitlich strukturellen Veränderungen in den Industriebetrieben beitragen.

Integration, Komplexität und steigender Kapitalbedarf widersprechen der herkömmlichen Einzelprojektbetrachtung, zumal innerbetriebliche Umstrukturierungen nicht auf dem freien Markt erhältlich sind. Die strategische Investitionsplanung versucht nun, diesen steigenden innerbetrieblichen Aufwand, aber auch den kalkulierbaren Erfolg, zu berücksichtigen.

Als Einflußfaktoren bei Wirtschaftlichkeitsrechnungen sind in diesem Zusammenhang zu nennen:

- Kapitalbedarf für Strukturmaßnahmen,
- Lebensdauer des Systems,
- Lebensdauer des Produktes,
- Loswechselhäufigkeit, Variantenzahl,
- Wiederverwendbarkeitsgrad,
- Personalbedarf,
- Technische Verfügbarkeit und Nutzungsgrad.

Um automatisierte Montagesysteme zeitlich auszunutzen, ist es erforderlich, in der Peripherie, so z.B. beim Materialfluß, strukturelle Veränderungen vorzunehmen, die naturgemäß mit einem Kapitalbedarf verbunden sind. Es genügt demnach nicht, nur die Automatisierung des jeweiligen Systems einzuplanen, sondern es müssen strategische Gesamtbereiche erfaßt werden.

Da die Produktlebenszyklen heutiger Waren aus den feinwerk- und elektrotechnischen Branchen immer kürzere Perioden aufweisen, besteht die Wahrscheinlichkeit, daß die technische Lebensdauer eines automatisierten Montagesystems größer wird als die wirtschaftliche Produktlebensdauer. Ein heute geplantes automatisches Montagesystem muß dementsprechend eine gewisse Flexibilität aufweisen, da die Amortisationszeiten mit nur einem Produkt zu kurz werden.

Um eine konkrete Flexibilitätsspanne einplanen zu können, müssen Voraussagen zur Produktentwicklung getroffen werden, die dann wiederum im konkreten Montagesystem verwirklicht werden können. Ist die Variantenzahl und Loswechselhäufigkeit für ein automatisches Montagesystem bekannt, so können, ausgehend vom Ist-Zustand im Rahmen der strategischen Investitionsplanung, Aussagen über den Kapitalmehrbedarf gemacht werden, falls Veränderungen gegenüber der Ausgangssituation auftreten.

Häufig lassen sich jedoch derartige Aussagen nicht genau

quantifizieren, was insbesondere auf die Bewertbarkeit der Flexibilität großen Einfluß hat [10,30,58,59,108]. Die Konsequenz aus diesem Mangel führte zur Installation des **Wiederverwendbarkeitsgrades** bei neuen Technologien. Der Wiederverwendbarkeitsgrad kennzeichnet dabei den Anteil der Investition an den gesamten Anschaffungskosten, der nach einem ungeplanten Produktionswechsel weiterverwendet werden kann [72,113]. Damit werden die Auswirkungen der Flexibilität eines Montagesystems für spätere Perioden quantifizierbar und lassen sich in das Investitionskalkül einbeziehen.

Ein weiterer Einflußfaktor ist der geplante Personalbedarf für automatisierte Montagesysteme. Bei rein manuellen Montagen waren recht exakte Aussagen über das Verhältnis von Personalkapazität zu Produktionsleistung möglich. Für gemischt automatisierte oder rein automatisierte Montagesysteme können diese Vorhersagen außerordentlich schwierig sein [16,24]. Das hängt in erster Linie mit dem schwer kalkulierbaren Betreuungsaufwand von automatischen Montageeinheiten zusammen. Untersuchungen an solchen Anlagen haben gezeigt, daß die durchschnittliche Zeit zwischen zwei Störungen, die Personaleinsatz erfordern, nur ein bis zwei Minuten betragen [136]. Daraus resultiert eine entsprechend hohe Personalbindung an verketteten automatisierten Montagesystemen, die im Investitionskalkül berücksichtigt werden muß. Daneben beeinflussen technische Verfügbarkeit und Nutzungsgrad eines Montagesystems in erheblichem Umfange die Produktionsleistung. Auch hier haben repräsentative Untersuchungen ergeben, daß im Durchschnitt die Werte für die technische Verfügbarkeit von Montagesystemen bei 92% und für den Nutzungsgrad bei 85% liegen [136].

5.1 Geeignete Methoden und Ansätze

Erste Ansätze zur Beurteilung der Wirtschaftlichkeit von manuellen Montagesystemen sind aus der Literatur seit Beginn der 70er Jahre bekannt [84]. Dabei werden die bewährten

Verfahren (Bild 5-1) der Kosten- und Investitionsvergleichsrechnung herangezogen. Die dazu benötigten Daten sind überschlägig mit Hilfe von Kennzahlen ermittelt worden, die in den Unternehmen im wesentlichen aus den Fertigungsbereichen schon vorlagen. Betont wird bei allen Betrachtungen die Beschränkung auf den "Montagebereich" als Rahmen und Abgrenzung für die Wirtschaftlichkeitsrechnung.

Mit zunehmender Mechanisierung der Handmontagen taucht das Problem auf, den Kostenvorteil solcher Maßnahmen gegenüber der manuellen Montage zu beurteilen. BOOTHROYD [12] erkannte in diesem Zusammenhang, daß die einfachsten Montageoperationen zuerst mechanisiert werden und die schwierigen aufgrund der hohen Kosten übrig bleiben. Er stellt in seinen Ausführungen einen Zusammenhang zwischen Mechanisierungsgrad, Ausschuß- und Qualitätskosten sowie Puffergrößen zwischen den Montagestationen her.

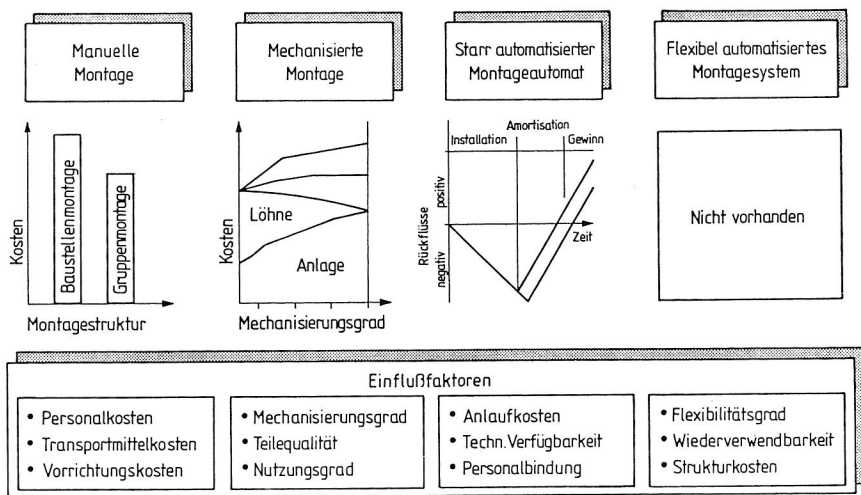


Bild 5-1: Problemfeldangepaßte Kostenmodelle

Mit zunehmender Automatisierung der Montage entstand das Problem, Sondermaschinen für nur begrenzte Montageaufgaben in

ihrer Wirtschaftlichkeit zu beurteilen. Hierzu weist LOTTER [74] auf die wesentlichen Bestandteile einer Wirtschaftlichkeitsrechnung hin. Es sind der Maschinenstundensatz, die gebundenen Personalkosten und die erzielbare Produktionsleistung. Als schwer quantifizierbar werden dabei die Nutzungsdauer der "Sondermaschine", die Höhe der Anlaufkosten und das Verhältnis von geplanter zu erreichbarer Verfügbarkeit gewertet.

Auch auf die indirekt auftretenden Kosten bei der Montageautomatisierung wird bereits verwiesen. Dazu gehören in erster Linie die Kosten für die Produkteinzelteile, da diese mit erheblich höherer Qualität gefertigt werden müssen, um Störungen bei der automatischen Montage, die zu 80% auf die Teilequalität zurückzuführen sind, zu vermeiden [118].

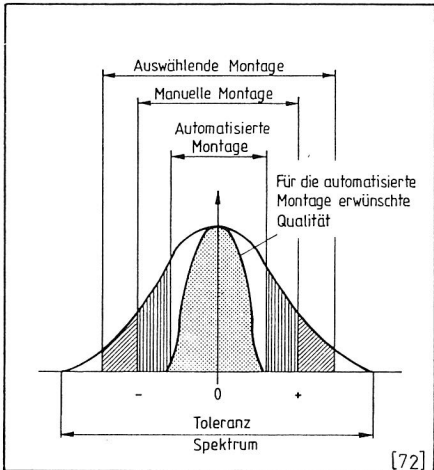
Hieraus läßt sich ein Kostenmodell aufstellen, welches einerseits die sinkenden Montagekosten und andererseits die steigenden Fertigungskosten mit steigender Teilequalität berücksichtigt (Bild 5-2). Zu ähnlichen Ergebnissen kommt auch KUMAGAI [49], der zudem die Gesamtkosten noch in Abhängigkeit der Taktzeiten darstellt, wobei naturgemäß mit kürzer werdenden Taktzeiten sehr hohe technische Verfügbarkeiten anzustreben sind, um kostenoptimal zu produzieren.

Im Gegensatz zur konventionellen Montageautomatisierung kann nach EVERSHEIM [30] die flexibel automatisierte Montage diese ausreichenden Stückzahlen durch Zusammenfassen mehrerer Produktvarianten erreichen. Die Beurteilung flexibler, automatisierter Montagesysteme erfolgt bei EVERSHEIM mit Hilfe des Automatisierungs- und Flexibilitätsgrades, die allerdings eine direkte Übertragung in ein Investitionskalkül nicht zulassen, da die Bewertung nur qualitativ erfolgt.

Eine praxisnahe Methode stellt LOTTER [72] mit Einführung des Wiederverwendbarkeitsgrades bei flexiblen Montageautomaten vor. Er zergliedert ein Montagesystem in standardisierte Baugruppen, die weiterverwendet werden können bis ihre techni-

sche Nutzungsdauer erschöpft ist und in solche Komponenten, deren Nutzungsdauer mit der Produktlebensdauer endet.

ANFORDERUNGEN



[72]

Abbildung in ein Kostenmodell

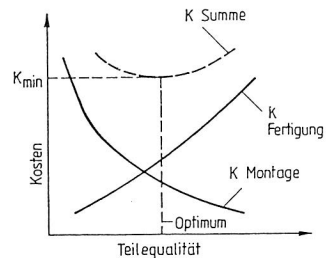


Bild 5-2: Produktionskosten in Abhängigkeit der Teilequalität

Das Bild 5-3 verdeutlicht die verschiedenen Betrachtungsmöglichkeiten mit Restwertkalkulation oder differierenden Nutzungsdauern. Der Ansatz unterschiedlicher Nutzungsdauern ist allerdings betriebswirtschaftlich bedenklich, da auf den kürzeren Horizont exakter der Restwert kalkulierbar als auf den längeren Zeitraum die Nutzungsdauer vorhersagbar ist.

Die Umsetzung des Wiederverwendbarkeitsgrades in das Investitionskalkül sollte also in Form eines zu berücksichtigenden Restwertes erfolgen. Hierzu leitet SCHÜNEMANN [113] die Auswirkungen von Produktwechselhäufigkeit und Wiederverwendbarkeitsgrad auf den Kapitalwert ab. Am Beispiel zweier Investitionsalternativen verdeutlicht er, daß die zunächst ungünstiger erscheinende Alternative bei häufigeren Produktwechseln aufgrund ihres höheren Wiederverwendbarkeitsgrades durchaus vorteilhafter werden kann.

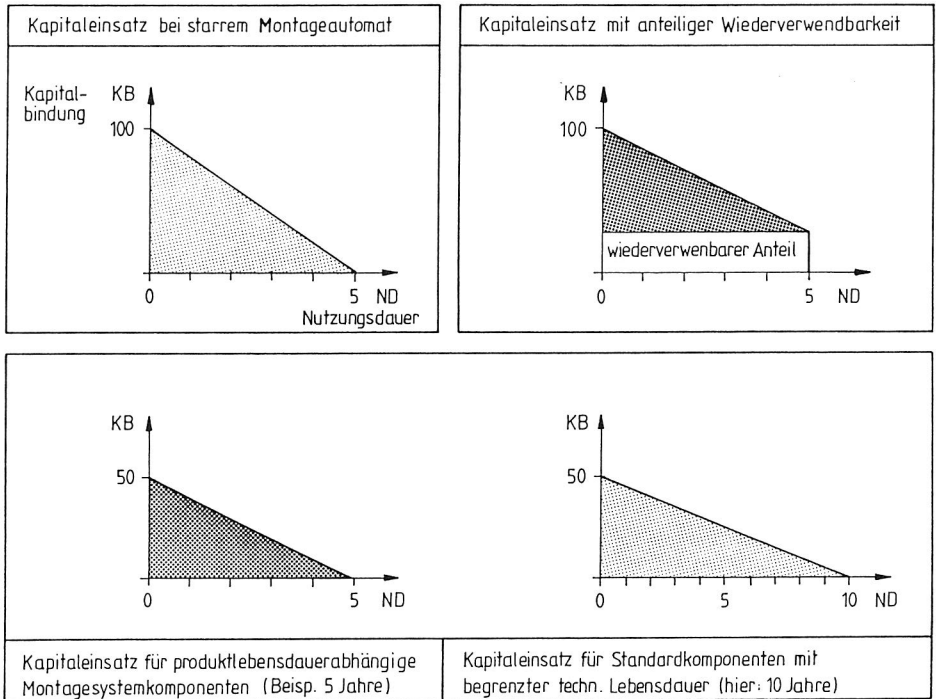


Bild 5-3: Kapitaleinsätze bei unterschiedlicher Bewertung der Nutzungsdauern und des Wiederverwendbarkeitsgrades

SCHÜNEMANN wie auch LUKAS [75] weisen in diesem Zusammenhang auf die Bedeutung einer Sensitivitätsanalyse hin. Da zahlreiche Einflußfaktoren und Eingabedaten bei der Wirtschaftlichkeitsberechnung mit Unsicherheiten verbunden sind, liegt es nahe, durch Variation der Eingabewerte die Auswirkungen dieser Unsicherheiten auf das Ergebnis zu betrachten.

Beide Autoren beschränken sich dabei auf ein sehr begrenztes Beobachtungsspektrum und variieren z.B. nur Wiederverwendbarkeitsgrad oder Nutzwerte in ihrer Sensitivitätsanalyse. Zusammengefaßt zeigen sich in den vorgestellten Methoden und Ansätzen folgende Schwachpunkte:

- Montagestrukturbezogenes Investitionskalkül,
- Optimierung von Mechanisierungsgrad und Kosten,

- Sondermaschinenbetrachtung mit eingeschränkter Nutzungsdauer,
- Singuläre Erfassung der Qualitätskosten,
- Erhöhung der technischen Verfügbarkeiten zur Optimierung der Ausbringungsleistung,
- Differierende Betrachtung von Wiederverwendbarkeit und Restwert,
- Sensitivitätsanalyse für begrenztes Beobachtungsspektrum.

Einer eingehenden Analyse der Lösungsmöglichkeiten, um ein angepaßtes Wirtschaftlichkeitsbeurteilungsmodell für flexibel automatisierte Montagesysteme aufzustellen, soll im folgenden ein Überblick zu den gebräuchlichsten Wirtschaftlichkeitsberechnungsverfahren vorangestellt werden.

5.1.1 Statische Verfahren

Kennzeichnend für die statischen Wirtschaftlichkeitsberechnungsverfahren ist, daß zeitliche Unterschiede beim Anfall der Kosten und Erträge wie auch des Kapitaleinsatzes nicht berücksichtigt werden. Es gelten jeweils die jährlichen Durchschnittswerte auf die gesamte wirtschaftliche Nutzungsdauer bezogen.

Die im technischen Rechnungswesen gebräuchlichsten und in der Literatur am ausführlichsten diskutierten Verfahren ermitteln die Kosten pro Jahr, den Maschinenkostensatz und die Stückkosten [129].

Werden zwei Alternativen verglichen, so werden die statische Rentabilität und die Amortisationszeit als Kennzahlen für die Vorteilhaftigkeit einer Differenzinvestition verwendet [69,84,100]. In die Berechnung der Kennzahlen gehen die Kostengrößen nach Bild 5-4 ein. Diese Kostengrößen werden für die Ermittlung der Wirtschaftlichkeitsfaktoren auf die jährliche Nutzungszeit bezogen.

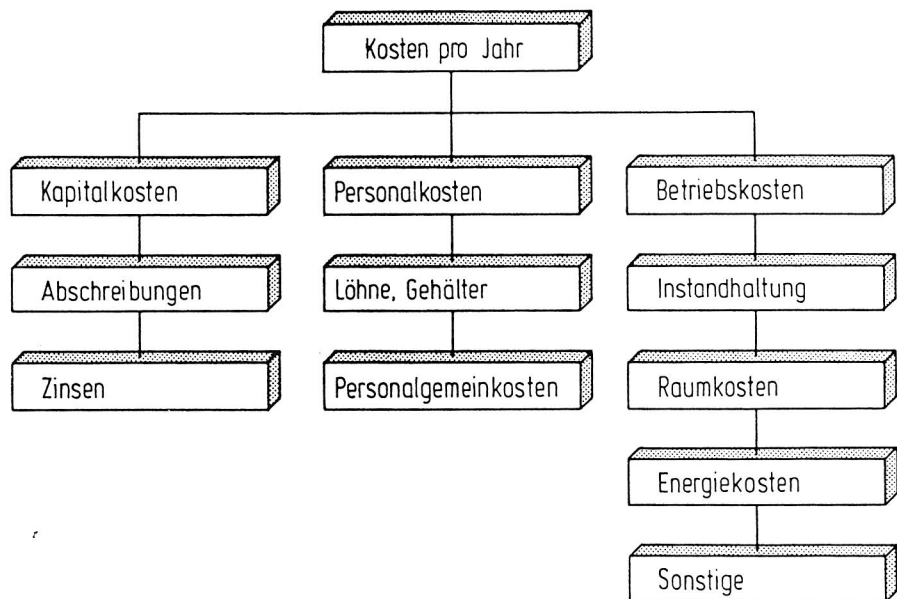


Bild 5-4: Kostengrößen bei der Wirtschaftlichkeitsrechnung

Die wichtigsten Kenngrößen berechnen sich wie folgt:

$$N_Z = B_Z \cdot \eta \quad (13)$$

mit:

N_Z = Jährliche Nutzungszeit [ZE/a]

B_Z = Effektive Bereitschaftszeit [ZE/a]

η = Nutzungsgrad

Der Maschinenstundensatz ergibt sich aus:

$$k_M = \frac{K_J}{B_Z} \quad (14)$$

mit:

k_M = Maschinenstundensatz [DM/ZE]

K_J = Kosten pro Jahr [DM/a]

Die Stückkosten, die im allgemeinen zur Vorabkalkulation und Preisgestaltung des Produktes von Bedeutung sind, lassen sich wie folgt ermitteln:

$$K_{St} = \frac{K_J}{N_Z \cdot St_L} \quad [DM/St] \quad (15)$$

mit:

K_{St} = Stückkosten [DM/St]

St_L = Stückleistung der Anlage [St/ZE]

Die statische Rentabilität ergibt sich aus dem Quotienten von durchschnittlicher jährlicher Kostenersparnis und durchschnittlichem zusätzlichem Kapitaleinsatz. Sie gibt die Verzinsung des Kapitals pro Jahr an, wobei zeitlich unterschiedliche Kosten und Einsparungen nicht berücksichtigt werden. Dadurch unterscheidet sich der Betrag meist erheblich vom Internen Zinsfuß.

Eine zweite Kennzahl beim Vergleich zweier alternativer Investitionsobjekte ist die statische Amortisationszeit. Sie wird aus dem Quotienten von zusätzlichem Kapitaleinsatz und durchschnittlichem jährlichen Rückfluß gebildet. Da die Amortisationszeit die Rücklauffrist für den Kapitaleinsatz angibt, muß sie kleiner als die wirtschaftliche Nutzungsdauer des Investitionsobjektes sein.

5.1.2 Dynamische Verfahren

Arbeiten die statischen Wirtschaftlichkeitsberechnungsverfahren mit Durchschnittswerten, so berücksichtigen im Gegensatz dazu die dynamischen Verfahren die zeitlichen und wertmäßigen Unterschiede im Anfall der Kosten und Erträge [129]. Durch entsprechende Auf- und Abzinsung wird dem Zeitpunkt des Kapitalrückflusses Rechnung getragen, womit die dynamischen Verfahren exaktere Ergebnisse liefern und den statischen

Verfahren vorzuziehen sind. Für die Wirtschaftlichkeitsbeurteilung von Montagesystemen eignen sich Kapitalwertmethode und Interner Zinsfuß besonders, da sie unter Berücksichtigung geeigneter Parameter eine Rentabilitätskennzahl über eine Mehr- oder Differenzinvestition liefern.

Allerdings ist der Kapitalwert in seiner Aussage nur bedingt anwendbar, da die Kennzahl nicht auf das eingesetzte Kapital bezogen (Relativgröße) und somit nicht die realistische Kapitalknappheit berücksichtigt wird. Zur weiteren Berechnung des Internen Zinsfußes ist der Kapitalwert wiederum notwendig, so daß auch dieser Kennwert Einzug in das später vorgestellte Wirtschaftlichkeitsbeurteilungsmodell nimmt.

Die Berechnung des Kapitalwertes erfolgt durch die Differenzbildung von diskontierten Einsparungen einer Mehrinvestition und der Kapitaleinsatzdifferenz (Bild 5-5). Um dem Anspruch eines dynamischen Verfahrens gerecht zu werden, entsprechen die diskontierten Einsparungen dem Barwert zum Anschaffungszeitpunkt, das heißt, es wird abgezinst.

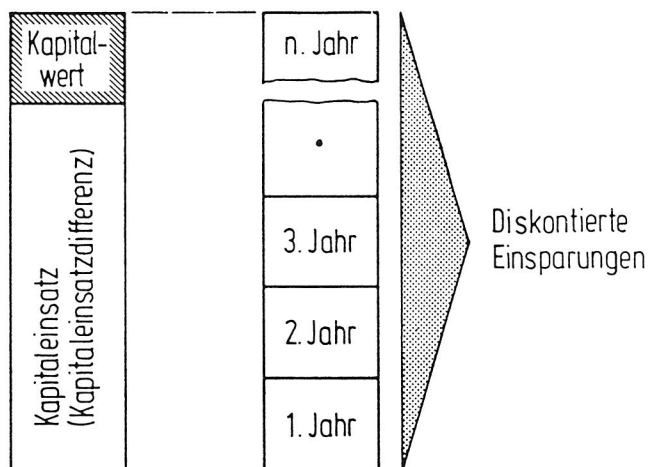


Bild 5-5: Kapitalwertberechnung

Somit berechnen sich die diskontierten Einsparungen wie folgt:

$$E_D = \sum_{i=1}^n \frac{E_J(i)}{(1 + p_K)^i} \quad [DM] \quad (16)$$

mit:

E_D = Diskontierte Gesamteinsparung [DM]

$E_J(i)$ = Einsparungen am Ende des Nutzungsjahres (i) [DM]

p_K = Kalkulatorischer Zinssatz [%]

n = Anzahl der Nutzungsjahre

Sollen erste Kennwerte für Montagesysteme in der Projektierungsphase gebildet werden, so ist es zweckmäßig, die jeweiligen Einsparungen nicht auf die Nutzungsjahre aufzuschlüsseln, sondern eine Gesamteinsparung mit Berücksichtigung von Preis- und Kostensteigerungsraten arithmetisch auf die Nutzungsjahre zu verteilen.

Die absolute Aussage des Kapitalwertes wird aus Bild 5-5 deutlich. Übersteigen die diskontierten Einsparungen nicht den Kapitaleinsatz, so ergibt sich ein **Kapitalwert** < 0. Die Investition ist also beim angesetzten kalkulatorischen Zinssatz unvorteilhaft. Andererseits übersteigt ein **Kapitalwert** > 0 um diesen Betrag das Ergebnis eines Kapitaleinsatzes mit kalkulatorischen Zinsen und verweist somit auf eine vorteilhafte Investition. Schwachpunkte der Kapitalwertmethode sind die bereits genannte Vernachlässigung der Investitionshöhe und die Vorabschätzung eines kalkulatorischen Zinssatzes. Diesen Nachteilen tritt die Berechnung des Internen Zinsfußes entgegen. Dabei wird derjenige Zinssatz bestimmt, der bei der Berechnung des Kapitalwertes anzusetzen ist, damit letztendlich der Kapitalwert zu Null wird. Daraus folgt, daß immer dann eine Investition sinnvoll ist, wenn der Interne Zinsfuß mindestens gleich oder größer als der Zinssatz ist, der am freien Kapitalmarkt zu erzielen ist [129].

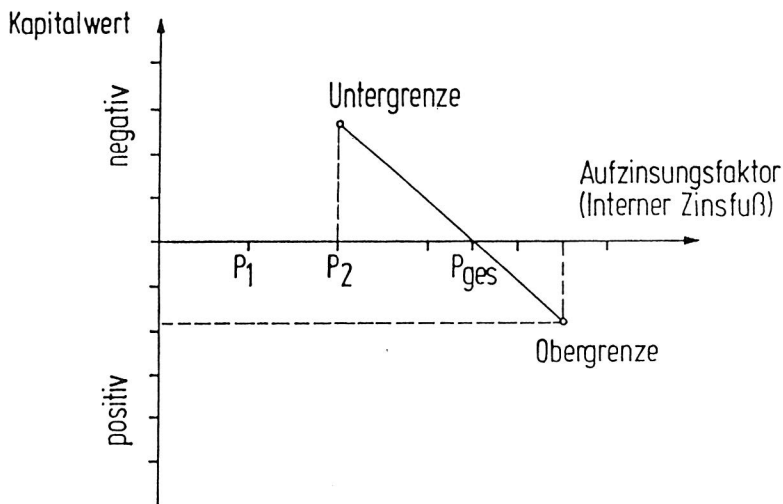


Bild 5-6: Berechnung des Internen Zinsfußes durch Interpolation

Als Kenngröße hat der Interne Zinsfuß in vielen Industriebetrieben Verbreitung gefunden und wird hier meist in einer betriebsinternen Untergrenze festgelegt, die bei Investitionsprojekten nicht unterschritten werden sollte. Zur Berechnung des Internen Zinsfußes muß entsprechend Bild 5-6 folgende Gleichung gelöst werden:

$$\lim_{K_W \rightarrow 0} \sum_{i=1}^n \frac{E_D(i) - E_J(i)}{p_A} - K_E \quad [\text{DM}] \quad (17)$$

mit:

K_W = Kapitalwert [DM]

p_A = Aufzinsungsfaktor [-]

K_E = Kapitaleinsatz (Kapitaleinsatzdifferenz) [DM]

Ermitteln läßt sich der Interne Zinsfuß mit Hilfe einer Iteration, die durch Eingrenzung mit Versuchszinssätzen und entsprechender Interpolation letztlich zum gesuchten Zinssatz führt, der den gewünschten Kapitalwert von Null ergibt.

5.1.3 Angepaßtes Wirtschaftlichkeitsbeurteilungsmodell für integrierte automatische Montagesysteme

Wie die ausführlich diskutierten Schwächen der in der Literatur vorgestellten Methoden und Ansätze zur Wirtschaftlichkeitsberechnung neuer Technologien zeigten, ist eine singuläre Betrachtung der Einflußgrößen und Kostenwirkungen nicht sinnvoll. In die Betrachtungen müssen vielmehr die strukturellen Veränderungen, die sich innerbetrieblich bei zunehmender Komplexität und Integration zwangsläufig ergeben, mit einbezogen werden. Darüberhinaus müssen unter Anwendung geeigneter Berechnungsverfahren die Eingabegrößen im Planungsstadium variierbar und mittels Sensitivitätsanalysen Auswirkungen beobachtbar sein.

Die Einbettung eines angepaßten Wirtschaftlichkeitsbeurteilungsmodells in die Projektierung von automatisierten Montagesystemen gibt das Bild 5-7 wieder.

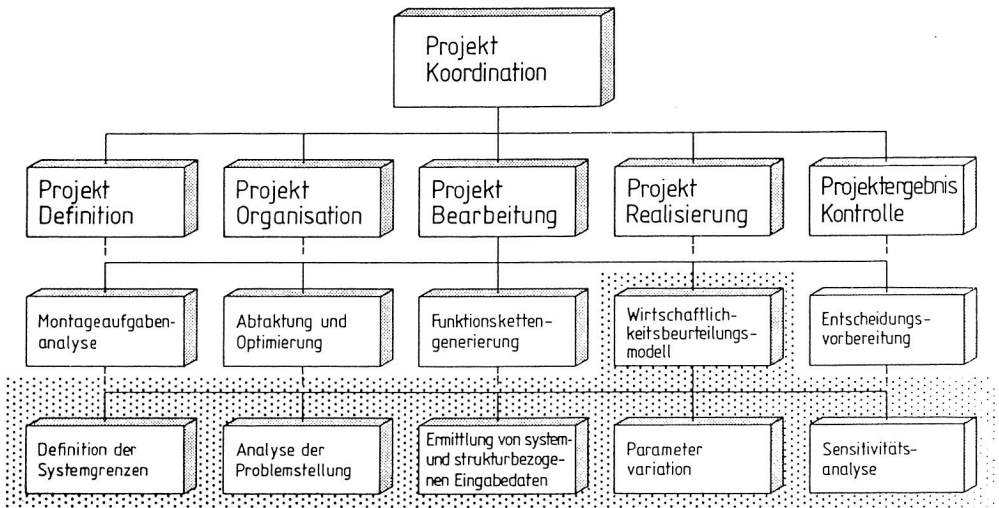


Bild 5-7: Wirtschaftlichkeitsbeurteilungsmodell in der Projektierung

Die Definition der Systemgrenzen für das Kostenmodell umfaßt die Klärung der Fragestellung, inwieweit durch das betrachtete Projekt angrenzende Produktions-, Planungs- oder Steuerungsbereiche berührt werden. Dabei ist von besonderer Bedeutung, den Informations- und Materialfluß, der die Systemgrenzen kreuzt, genauestens zu ergründen und wenn möglich zu quantifizieren.

Die Analyse der Problemstellung ergänzt die Projektdefinition um Angaben über wirtschaftlichkeits- und kostenrelevante Größen. Auch die Art der Problemstellung muß hier geklärt werden. Bei der Ermittlung von system- und strukturbezogenen Daten müssen einerseits die direkt in das Projekt durch Investitionen einfließenden Auszahlungen und andererseits die indirekten Auszahlungen und Erlöse durch Strukturmaßnahmen aufgenommen werden.

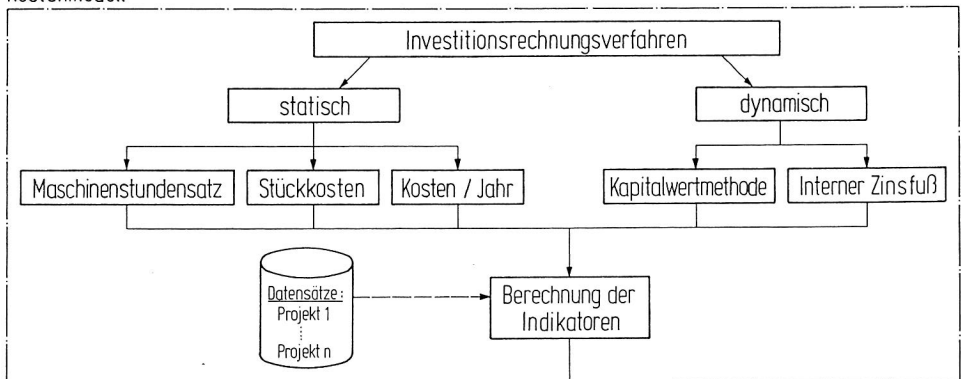
Beispielsweise lassen sich schon in der Projektierungsphase relativ exakte Angaben zu Investitionen für Montagesystemkomponenten (s.S.90, Pos.1-9) machen, die für die Automatisierung einer bestimmten Montageaufgabe vorgesehen sind. Diese Werte können innerbetrieblichen Standarddateien oder Lieferantenangeboten entnommen werden. Ungleich schwieriger ist die Datenquantifizierung in den durch die Montageautomatisierung indirekt betroffenen Bereichen. Ein angepaßter Materialfluß ist mit erhöhten Aufwendungen ebenso verbunden wie der Aufbau eines rechnergestützten Produktionsplanungs- und Steuerungssystems. Hier tauchen zudem noch die Schwierigkeiten auf, die indirekten Strukturveränderungskosten anteilig korrekt zu verteilen.

Ebenso sind umgekehrt die anteilig auftretenden Erlöse, die sich durch Einsparungen im Planungs- oder Materialflußbereich z.B. durch Umlaufvermögensreduzierung ergeben, nur äußerst schwierig und meist ungenau einem Montagebereich zuzuordnen. Einen Ausweg aus dieser Situation sehen viele Unternehmen in der Trennung der direkten Produktionsprojekte von den indirekten Strukturmaßnahmen. Der Nachteil dieser Vorgehensweise

liegt allerdings in der dann auch getrennt durchgeführten Wirtschaftlichkeitsbeurteilung, wobei in der Regel an die Produktionsprojekte härtere Maßstäbe angelegt werden als an Strukturprojekte, die z.T. aus Imagegründen auch bei schwacher Wirtschaftlichkeit durchgesetzt werden.

Da diese Methode dem Integrationsgedanken moderner Technologien widerspricht, muß die Zielsetzung eines angepaßten Wirtschaftlichkeitsbeurteilungsmodells für flexibel automatisierte Montagesysteme einerseits die Schwächen bisheriger Berechnungsverfahren beseitigen oder zumindest verringern und andererseits die singuläre Projektbetrachtung durch Einbettung des Projekts in eine integrierte Struktur ersetzen. Den Aufbau des angepaßten Wirtschaftlichkeitsbeurteilungsmodells gibt das Bild 5-8 wieder.

Kostenmodell



Sensitivitätsanalyse

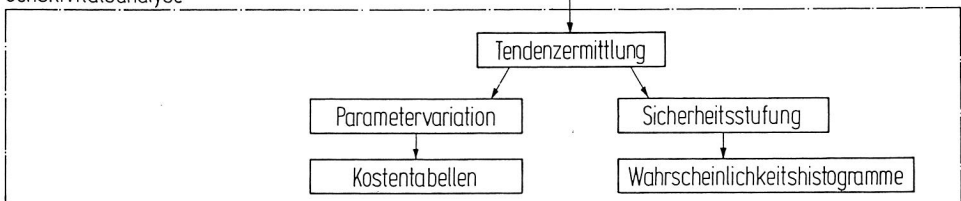


Bild 5-8: Wirtschaftlichkeitsbeurteilungsmodell

Nach konventionellem Muster werden auch in diesem Wirtschaftlichkeitsbeurteilungsmodell zunächst die direkt projektbezogenen Auszahlungen und Erlöse dem EDV-System zugänglich gemacht. Dabei können einige Investitionsparameter aus den Daten der zuvor projektierten Montagesystemkomponenten übertragen werden.

Mit Hilfe statischer oder dynamischer Wirtschaftlichkeitsberechnungsverfahren lassen sich aus diesen Eingabedaten Kennzahlen wie Stückkosten oder Interner Zinsfuß ableiten.

Der wesentliche weitere Schritt besteht bei dem vorgestellten Wirtschaftlichkeitsbeurteilungsmodell in der durch den Bediener gesteuerten Interpretation der zunächst ermittelten Daten. Dazu werden in Form einer Sensitivitätsanalyse Eingabeparameter mit Unsicherheitsbereichen belegt. Das heißt, entsprechend der Ungewißheit im Projektierungsstadium werden die Parameter mit einer Spanne versehen, in der sie als Kostenfaktor auftreten können.

Das Ergebnis einer solchen Sensitivitätsanalyse stellt sich als Wahrscheinlichkeitsverteilung über einer zuvor gewählten betriebswirtschaftlichen Kennzahl dar.

Deuten die Verteilungsfunktionen auf eine zufriedenstellende Projektabwicklung hin, kann eine argumentativ gut abgesicherte Planungsfreigabe erfolgen. Andernfalls steht es nun dem Benutzer offen, die Eingabeparameter zu variieren und ihre Auswirkungen auf die gewählte betriebswirtschaftliche Kennzahl zu diskutieren.

Da in dem Wirtschaftlichkeitsbeurteilungsmodell insbesondere die Aspekte der Komplexität und Integration neuerer Projekte enthalten sind, steht somit ein geeignetes Werkzeug zur Verfügung, um bei strategischen Investitionen schon in der Projektphase Entscheidungshilfe anzubieten.

5.2 Problemstellung bei der Investitionsentscheidung

Die in diesem Modell betrachteten automatisierten Montagesysteme lassen sich entsprechend der Art der auftretenden Investitionen in drei Alternativen unterscheiden:

- Einzelinvestition,
- Ersatzinvestition oder
- Auswahlproblem

Einzelinvestition

Einzelinvestitionen erheben die Fragestellung, inwieweit Gewinn durch eine Investition erzielt wird und wie sich die Gewinnhöhe in Bezug auf die Investitionshöhe darstellt.

Der Gewinn ist jedoch eine Größe, die man im allgemeinen nicht einer einzelnen Maschine (z.B. einer Montageanlage) sondern nur dem Produkt, das den gesamten Produktionsbetrieb durchläuft, zuordnen kann. Eine Aufteilung des Produktgewinns auf die Produktionsbereiche ist dabei nicht sinnvoll, da die Verteilung sehr willkürlich erfolgen müßte. Andererseits ist es notwendig, die Wirtschaftlichkeit und damit die Herstellkosten eines Produkts zu kennen. Das erfordert wiederum auch die Kenntnis über die an den einzelnen Stationen verursachten Kosten, d.h. auch über die Montagestückkosten, die sich mit dem Maschinenstundensatz errechnen lassen.

Ersatzinvestition

Das Ersatzproblem muß die Fragestellung beantworten, ob eine vorhandene Anlage/Maschine z.B. überholt werden oder eine Neuanschaffung getätigt werden sollte.

Es wird dabei nur die Wirtschaftlichkeit einer Investition im Vergleich zu einer anderen festgestellt, also die bestmögliche Lösung zu ermitteln versucht.

Auswahlproblem

Das Auswahlproblem unterscheidet sich von der Ersatzinvestition nur insofern, als nicht nur die Wirtschaftlichkeit gegenüber einer Alternative (alte Anlage/Maschine) sondern unter beliebig vielen in Frage kommenden Systemen zu überprüfen ist. Hier wie beim Ersatzproblem gilt die Voraussetzung, daß es überhaupt günstig ist zu investieren.

Können z.B. durch eine Investition von 150 TDM für einen Montageautomaten Lohnkosten in Höhe von 50 TDM jährlich eingespart werden, so hätte sich die Investition nach 3 Jahren (ohne Verzinsung) zunächst amortisiert. So betrachtet erscheint die Investition für das automatisierte System durchaus sinnvoll. Es muß jedoch sichergestellt sein, daß das Produkt, welches auf der Anlage montiert wird, gewinnbringend ist.

Zum Zeitpunkt der Investitionsentscheidung müssen neben der Ermittlung der günstigsten Herstellungsalternative (Montagesystem) ebenfalls die Selbstkosten bestehend aus Materialkosten, Maschinenstundensätzen, Lohn-, Gemein- und Vertriebskosten bestimmt werden. Damit läßt sich letztendlich feststellen, ob der Preis, der für das Produkt am Markt durchsetzbar, höher als die Selbstkosten ist.

5.2.1 Kapitaleinsatzermittlung für Montagesysteme

Zur Ermittlung der Rentabilität einer Investition ist es vorab erforderlich, die Höhe der Investition und damit den notwendigen Kapitaleinsatz zu ermitteln. Als Kapitaleinsatz werden dabei sämtliche Kosten bezeichnet, die bis zur Herstellung der Leistungsbereitschaft einer Anlage entstehen [129].

Entsprechend der Funktionselemente einer Montageanlage werden

folgende Positionen erfaßt:

1. Grundsystem, Unfallschutz
2. Transportsystem (Transport-, Weitergabefunktion)
3. Zuführsystem (Zuführefunktion)
4. NC-Achsen, Roboter (Bewegungsfunktion)
5. Greifer (Fügefunktion)
6. Sensorik
7. Steuerung, Elektrik
8. Pneumatik
9. Vorrichtungen (Fügefunktion)
10. Einführung, Schulung, Anlauf
11. Strukturmaßnahmen
12. Demontage einer alten Anlage
13. Erlös aus einer alten Anlage

Die Position 11 ermöglicht die Aufnahme von Erlösen, die sich z.B. durch Qualitätsverbesserungen, Rechnerintegration oder Gemeinkostenreduzierung ergeben. Die Kosten zu Punkt 1 bis 9 lassen sich aus den innerbetrieblichen Standardisierungen ableiten. Auch Einführungs-, Schulungs-, Forschungs- und Entwicklungsaufwendungen liegen in den Betrieben als Investitionskennzahlen vor.

5.2.2 Die wirtschaftliche Nutzungsdauer

Die Ausführung der im Kapitel 5.1 vorgestellten Wirtschaftlichkeitsberechnungsverfahren setzt die Angabe der wirtschaftlichen Nutzungsdauer voraus. Diese ist für Montageanlagen bestimmt durch:

- die Produktlebensdauer,
- die technische Lebensdauer der Anlage sowie
- die Lebensdauer und Wirtschaftlichkeit des Herstellungsverfahrens.

Sollen zwei Alternativen auf ihre Wirtschaftlichkeit hin betrachtet werden, so wird generell von einer gleichen wirtschaftlichen Nutzungsdauer ausgegangen. Für Montageanlagen

ist dies aus folgenden Gründen zulässig:

- Die wirtschaftliche Nutzungsdauer ist in der Montage in der Regel durch die Produktlebensdauer und nicht durch die Maschinenlebensdauer gegeben.
- Im Falle des Vergleichs zwischen manueller und automatischer Montage ist die technische Lebensdauer der automatischen Anlage anzusetzen, falls nicht ohnehin die Produktlebensdauer ausschlaggebend ist.
- Wird eine alte mit einer neuen Anlage verglichen (Ersatzproblem), so wird vorausgesetzt, daß durch eine Generalinstandsetzung der alten Anlage eine gleiche Nutzungsdauer erreicht würde.
- Differieren zwei Anlagen stark in ihrer technischen Lebensdauer bei gleichzeitig längerer Produktlebensdauer, so muß eine Ersatzinvestition für die kurzlebigere Anlage in der Wirtschaftlichkeitsrechnung vorgesehen werden.

5.2.3 Fixe und variable Kosten

Viele der bekannten Wirtschaftlichkeitsberechnungsverfahren benutzen eine Differenzierung in fixe und variable Kosten. In dem hier vorgestellten Modell wird auf diese Unterscheidung verzichtet. Dies erscheint deshalb sinnvoll, weil z.B. eine Klassifizierung der Lohnkosten in fix und variabel für die Montage nicht eindeutig nachvollziehbar und auch praxisfremd ist. Bei den statischen Berechnungsverfahren für Kosten pro Jahr, Stückkosten und Maschinenstundensatz sind die Lohnkosten relevant, die im jeweiligen angenommenen Betriebszustand entstehen. Dabei bleibt die Möglichkeit bestehen, verschiedene Fallbeispiele durchzurechnen. So z.B. die Ermittlung der Höhe der Stückkosten bei Kurzarbeit. Allerdings wird in der Regel im Projektierungsstadium von einer vorgegebenen Auslastung des Montagesystems ausgegangen, die dann ohnehin eine Differenzierung in fixe und variable Kostenanteile überflüssig macht, da letztendlich die Kennwerte der Wirtschaftlichkeitsrechnung entscheidend sind.

6. DV-technische Realisierung des Projektierungsmodells

Aufgrund der immer kürzer werdenden Produktlebensdauern und der Erhöhung der Rationalisierungszwänge ergeben sich in den Industriebetrieben auch ständig kleinere Projektierungsfrequenzen. Ein Ziel des vorgestellten Projektierungsmodells für flexibel automatisierte Montagesysteme ist es, den Planungsablauf zu vereinheitlichen und überschaubar zu machen. Ein weiterer Effekt kann durch die Entlastung von Routinetätigkeiten bei der Projektierung erzielt werden. Damit bietet sich für die algorithmisch darstellbaren Teilaufgaben im Projektierungsmodell die Realisierung auf einer EDV-Anlage an.

Zweckmäßigerweise wird der Modellansatz in vier thematisch abgeschlossene Module zerlegt (Bild 6-1). Es entstehen dabei Programmpakete zur:

- | | |
|---|-------------|
| - Vorgangsfolge- und Montagezeitplanung | (EDIPLAN) |
| - Abtaktung und Optimierung | (DOGMA) |
| - Funktionszuordnung und Nutzenanalyse | (PLASMA) |
| - Wirtschaftlichkeits- und Sensitivitätsanalyse | (KAPITAL) |

Soll eine Planungssoftware in einem Industrieunternehmen eingeführt werden, so ist unabhängig vom Einsatzfeld der Software den betriebsinternen Randbedingungen Rechnung zu tragen. Erfolgreich eingesetzt wird eine Planungsmethodik immer dann, wenn das vorhandene Know-how in die Softwaremodule mit einfließen kann und keine großen strukturellen Umstellungen betriebsintern zu erwarten sind. Für die Anwender der Programme ist eine übersichtliche Bedienoberfläche und eindeutige Benutzerführung unabdingbar. Zur Verfolgung der Projektierungsergebnisse ist die Transparenz bei jedem Planungsschritt maßgeblich, damit gegebenenfalls auch eine Reproduzierbarkeit gewährleistet ist.

Ein wichtiger Aspekt bei der Einführung von Softwarepaketen ist die EDV-Systemunabhängige Gestaltung der Programmodule. In Kapitel 4.2 wurde bereits darauf verwiesen, daß in den Be-

trieben EDV-Anlagen existieren, die sich durch Merkmale wie Hersteller, Zentralisierung/Dezentralisierung, Leistungsfähigkeit, Ausbaubarkeit und Koppelbarkeit unterscheiden. Dadurch ergeben sich bereits Anforderungen nach modularem Aufbau von Planungssoftware und einer gewissen Portabilität.

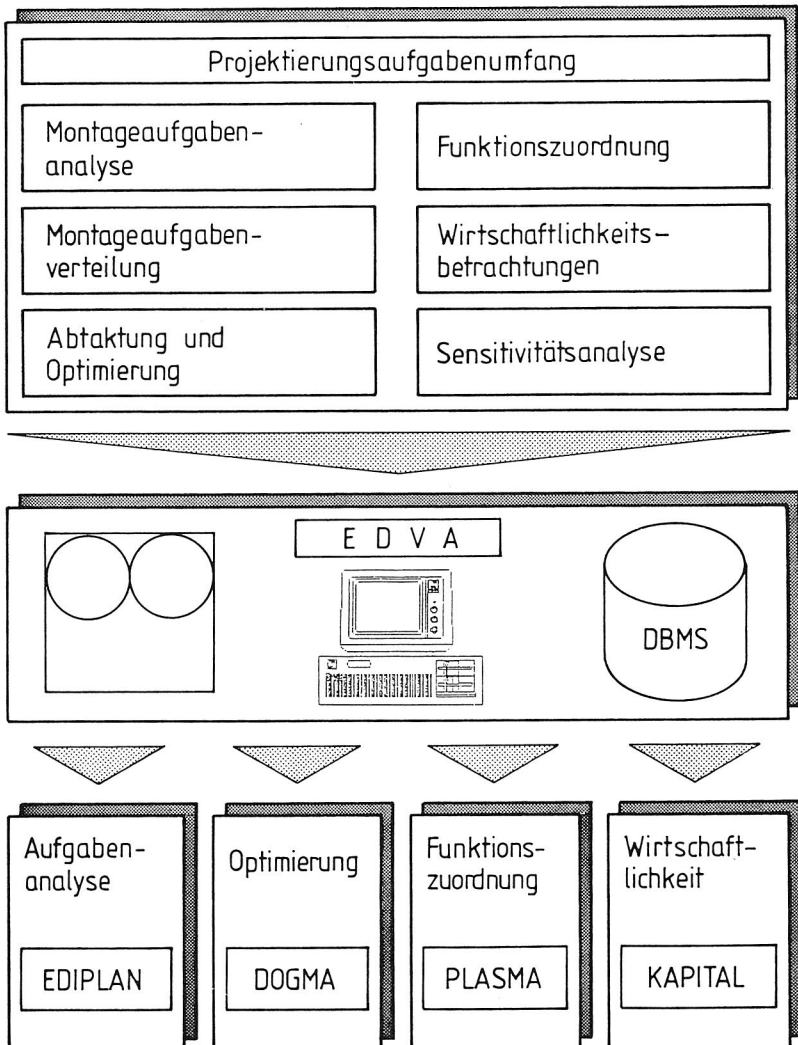


Bild 6-1: Aufgabenfeld der Rechnerunterstützung

Das heißt, daß für die Software eine Programmierhochsprache gewählt werden muß, die sowohl auf zentralen Großrechenanlagen als auch auf dezentralen Workstations betrieben werden kann.

Mit dem Aufbau von modularer Projektierungssoftware ergibt sich naturgemäß das Problem, den Datenaustausch sicherzustellen. Ein Softwaremodul, das eine bestimmte Teilaufgabe bearbeitet, benötigt Eingangsdaten und liefert am Ende der Berechnungen Ergebnisdaten zurück, die wiederum Eingangsdaten für ein anderes Modul darstellen können.

Um dem Problem der Dateninkonsistenz von vornherein zu begegnen, wird im folgenden die Zielsetzung und der Aufbau der verwendeten Datenbankstrukturen beschrieben.

6.1 Entwurf und Implementierung einer Datenbank

Die Planungsschritte bei der Projektierung von Montagesystemen greifen auf Datenbestände zu und verändern diese, um sie anschließenden Planungsschritten wieder zur Verfügung zu stellen. Dadurch werden Ergebnisdaten eines bestimmten Programmes zu den Eingangsdaten eines darauf aufbauenden Pro-

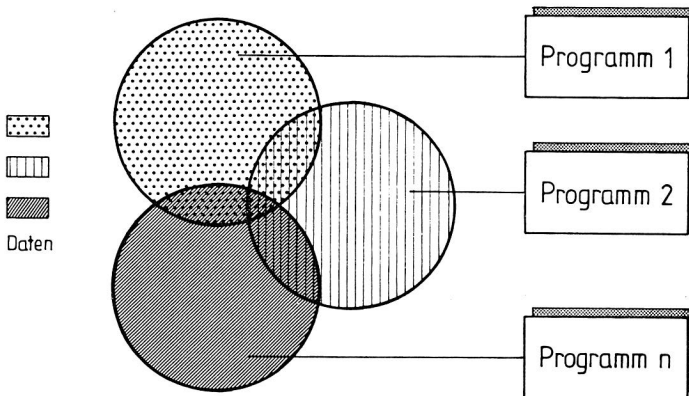


Bild 6-2: Schnittmengen bei herkömmlicher Datenhaltung

grammes. Bei mehreren Programmodulen ergibt sich so ein Bereich von Teil- und Schnittmengen im Datenbestand (Bild 6-2).

Werden diese gemeinsamen Datenbestände ohne Datenverwaltungssystem gehalten, so ergibt sich das Problem, daß die Programmodule nicht mehr unabhängig sind und Änderungen eine Reorganisation sämtlicher Zugriffsmodule erforderlich machen.

Zur Absicherung der Datenkonsistenz muß darüberhinaus jedes beteiligte Programmodul eine Eingabekontrolle durchführen und zur Abspeicherung die Daten gegen Verlust oder Verfälschung sichern.

Die bezeichneten Schwächen herkömmlicher Datenhaltung können durch Verwendung eines Datenverwaltungssystems eliminiert werden. Dabei wird ein auf Dauer angelegter Datenbestand durch eine Softwareumgebung organisiert, geschützt und verschiedenen Anwendungsprogrammen zugänglich gemacht. Datenverwaltung und Datenbasis bilden dabei eine Datenbank.

Der Ausführung und Implementierung des verwendeten Datenverwaltungssystems kommen dabei besondere Bedeutung zu. Datenverwaltungssysteme sind geläufiger unter der Bezeichnung **Datenbankmanagementsysteme** (DBMS) und in dieser Form als Anwendersoftware bei EDV-Systemen verbreitet.

6.1.1 Datenbankmanagementsysteme

Ein Datenbankmanagementsystem (DBMS) hat im wesentlichen drei Aufgaben zu erfüllen:

- Darstellung der Datenzusammenhänge (Relationen)
- Aufbereitung der Daten für den Nutzer (Formulardienst)
- Speichern und Verwalten auf Speichermedien (Plattendateien u.ä.)

Zur Realisierung dieser Aufgabenstellung existieren drei bekannte Datenmodelle:

- Hierarchisches Modell,
- Vernetzungsmodell und
- Relationales Modell.

Bevor der Datenbankentwurf an das Datenmodell angepaßt wird, welches gerade auf der EDV-Anlage verfügbar ist, sollte ein unabhängiges konzeptionelles Datenmodell entworfen werden. Für die vorliegende Implementierung der Projektierungssoftware für automatische Montagesysteme dient als Basis das **Relationenmodell**. Es vereint gegenüber den anderen Modellen folgende Vorteile:

- Tabellarische Definitionen im Relationenmodell
- Mathematische Beschreibbarkeit (Theoretisch abgesichert)
- Gleichzeitige konzeptionelle und physische Datenmodellerstellung

Bevor der Aufbau des konzeptionellen Datenbankschemas für die Programmodule erstellt wird, sollen an dieser Stelle einige wichtige Begriffe definiert werden, die später Anwendung finden.

6.1.2 Begriffsdefinitionen für den Datenbankentwurf

Bedeutende Elemente im Rahmen der Projektierung von Montagesystemen sind zum Beispiel Projekte, Teilverrichtungen, Einzelteile, Stationen usw.. Diese Elemente werden im Datenmodell als **Entitäten** bezeichnet [141]. Die Entitäten dienen dabei der Diskretisierung der realen Welt und werden durch Merkmale (synonym: Attribute) näher beschrieben.

Da die Entitäten in ihrer Bedeutung zumindest gruppenweise inhaltlich zusammengefaßt werden können, verwendet man **Entitätsmengen**. Ihre Bedeutung im Datenschema erhalten die Enti-

tätsmengen durch die Beziehungen untereinander, die durch gerichtete **Assoziationen** zum Ausdruck kommen. Durch die Assoziationstypen:

l: einfache Assoziation,
c: konditionelle Assoziation,
m: multiple Assoziation und
mc: multipel-konditionelle Assoziation

lassen sich sämtliche Beziehungen zwischen den Entitätsmengen beschreiben. Im Datenmodell werden diese Entitätsmengen durch Relationen dargestellt. Dabei wird jede Entitätsmenge durch eine Relation und jede Entität durch eine Gruppe von Merkmalen repräsentiert.

Damit läßt sich eine Relation R definieren zu:

$$R : W_1 \times W_2 \times \dots \times W_i \quad (18)$$

mit:

W_i = Wertebereiche,

wobei der Bereich eine Menge von Tupeln der Form:

$$(w_1, w_2, \dots, w_n) \quad \text{mit } w_i \in W_i \quad (19)$$

ist. Jede Zeile einer Relation bildet ein **Tupel** (disjunkt), welches gleichbedeutend mit einer Entität ist. Die gesamte Relation bildet eine Entitätsmenge. Ein weiterer wichtiger Begriff ist der **Schlüssel** (häufig engl.: key). Durch einen Schlüssel werden Elemente oder Merkmale aus einer Menge besonders hervorgehoben, um spätere Suchalgorithmen zu vereinfachen. Man unterscheidet:

- Identifikationsschlüssel,
- Primärschlüssel und
- Fremdschlüssel,

die in ihrer Bedeutung ähnlich sind, allerdings unterschiedliche Stellungen bei der Identifikation in den Relationen einnehmen.

Nach dem theoretischen Entwurf des Projektierungsmodells und der Entscheidung zur Einführung einer relationalen Datenbank kann im nächsten Schritt das konzeptionelle Datenbankschema entworfen werden.

6.1.3 Entwurf des konzeptionellen Datenbankschemas

Der Entwurf eines konzeptionellen Datenbankschemas umfaßt im wesentlichen sieben Aufgabenschwerpunkte, die im Bild 6-3 zusammengefaßt und eingeordnet sind. Zur Anwendung kommt beim Entwurf ein **erweitertes Relationenmodell**, das sich durch eine weitgehende Unabhängigkeit von der physikalischen Datendarstellung auszeichnet.

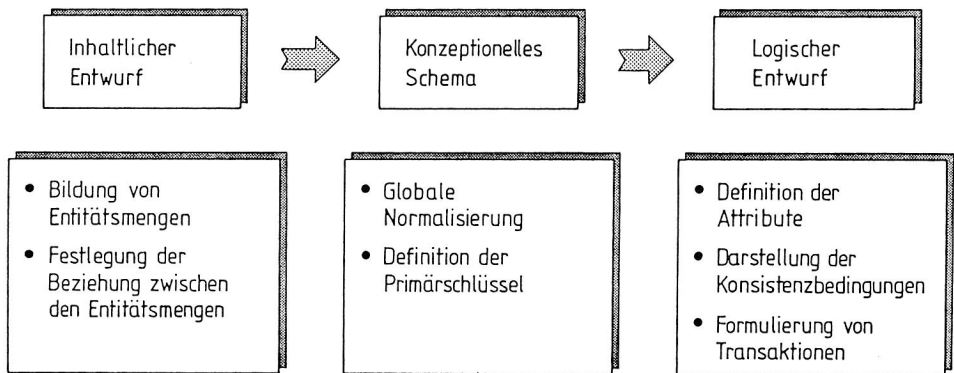


Bild 6-3: Aufgabenschwerpunkte bei der Erstellung eines konzeptionellen Datenbankschemas

Die Bildung von Entitätsmengen und die Festlegung ihrer Beziehungen untereinander erfolgt mit Hilfe sogenannter **Entitätenblockdiagramme**. Der Aufbau der Entitätenblockdiagramme wird aus Gründen der Übersichtlichkeit für die vier Projektierungsabschnitte der Montagesystemplanung beschrieben:

- Planzeitermittlung,

- Verlustzeitminimierung und Optimierung,
- Funktionsträgerzuordnung sowie
- Wirtschaftlichkeits- und Sensitivitätsanalyse.

Mit dieser Darstellung soll allerdings nicht darüber hinweggetäuscht werden, daß die Projektierung von automatisierten Montagesystemen als ein ganzheitliches Modell zu betrachten ist.

Im folgenden Kapitel werden die in den Modulen verwendeten Projektierungsbegriffe definiert und ihre Beziehungen in normalisierten Entitätenblockdiagrammen dargestellt. Der abschließende logische Entwurf, das heißt im wesentlichen das Füllen des Schemas, erfolgt durch die Anwendung der Programme selbst.

6.1.4 Begriffe und Entitätenblockdiagramme der Projektierungsmodule

Die Planzeitermittlung stellt im Modell zur Projektierung von automatisierten Montagesystemen die Primärstufe bei neu zu bearbeitenden Projekten dar. Hier werden Projektverwaltungsdaten und die Teilverrichtungen entsprechend der gestellten Montageaufgabe eingegeben.

Für den Aufbau des Datenbankschemas sind die anfallenden Daten von Bedeutung, um entsprechende Reservierungen im DBMS vorzusehen. In der folgenden Liste sind die verwendeten Begriffe und Daten mit einer Bedeutungserläuterung für die Planzeitermittlung aufgeführt:

- | | |
|----------------------------|---------------------------------------|
| - Projekt-Nr., Projektname | Betriebsinterner Projektbezeichner |
| - Funktionsbereich | Zuordnung der Fügefunktionen nach DIN |
| - Geräte, Vorrichtungen | Komponenten zur Fügeoperation |
| - Teile, Basisteile | Montageobjekte |

- Funktion Fügefunktionen bei der Montage
- Plantabellen Montageplanzeitermittlungstabellen für manuelle oder automatische Fügeoperationen
- Vorgänger Teilverrichtung, die unbedingt vorher ausgeführt werden muß

Die Beziehungen dieser Daten untereinander stellt das normalisierte Entitätenblockdiagramm (Bild 6-4) her. Verwendung finden die Assoziationstypen bei der Darstellung zwischen den Entitätsmengen. Damit kommt das DBMS der gestellten Anforderung nach Eindeutigkeit und Verfälschungssicherheit nach. Daten, die den implementierten Assoziationstypen widersprechen, werden systemseitig nicht akzeptiert.

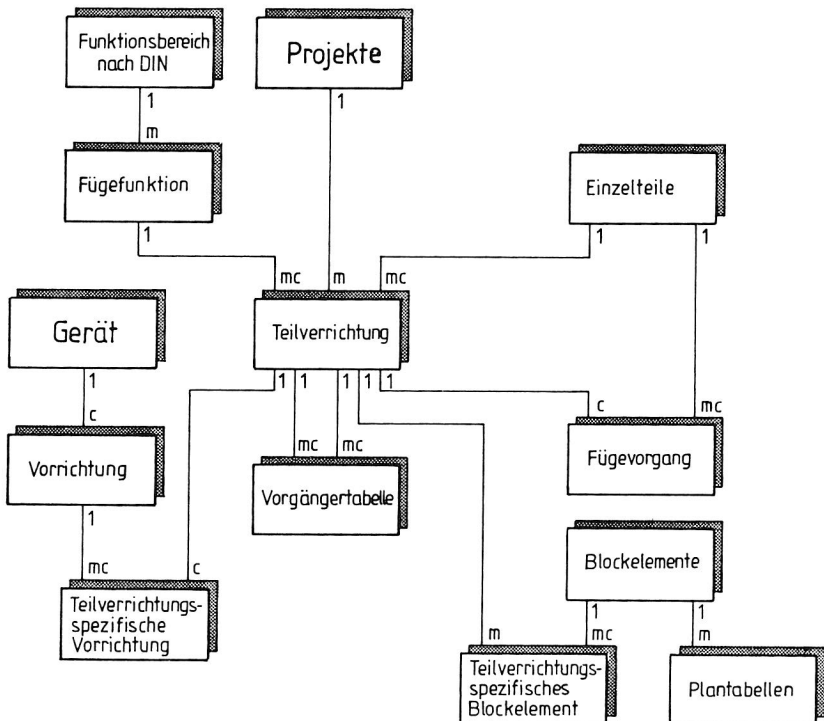


Bild 6-4: Entitätenblockdiagramm der Planzeitermittlung

Aus Stücklisten und Zeichnungen werden bei Projektierungsbeginn zunächst die kleinsten noch sinnvoll auflösbaren Montageschritte ermittelt, die im Projektierungsmodell anschließend als Teilverrichtungen weiterverwendet und manipuliert werden können.

Nach dem Aufbau der Montageaufgabenbeschreibung in Form von Teilverrichtungstabellen erfolgt im Projektierungsmodell die rechnergestützte Aufbereitung des Vorranggraphen und anschließend die Stations- sowie Verlustzeitminimierung durch algorithmische Abtaktungsverfahren.

Die im DBMS verwendeten Entitätsmengen und ihre Bedeutung sind in der folgenden Tabelle zusammengefaßt:

- VorGra	Projektvorranggraph
- ProjAlt	Projektalternativen
- Operator	Fügefunktionsausführer
- ProjStat	Projektstation
- PAltSt	Projektalternativestation
- Station	Allgemeine projektunabhängige Station
- VorgStat	Vorgängerstation
- StVorr	Zuordnung der Vorrichtungen zu Stationen

Jedes Projekt kann nur einen Vorranggraphen besitzen, allerdings treten Projektalternativen durch die unterschiedlichen möglichen Zuordnungen von Teilverrichtungen zu Stationen auf. Die Hilfsentitätsmenge PAltSt enthält als Entitäten für jede Alternative eines Projektes alle möglichen Zuordnungen von Stationen zu einer Projektstation. Die Hilfsentitätsmenge StVorr wiederum enthält für jede projektunabhängige Station die Identifikationsschlüssel der auf ihr verfügbaren Vorrichtungen (Bild 6-5).

Den Projektstationen ist weiterhin jeweils ein Operator zugeordnet, der Teilverrichtungen, die für die Station ermittelt wurden, auszuführen hat. Mit den für jede Projektalter-

native erstellten Stationsinhalten kann im folgenden Schritt die Funktionsträgerzuordnung erfolgen. Über die Identifizierung der Projektstationen durch die Anwahl eines bestimmten Projektes wird die Funktionsträgerzuordnung angestoßen.

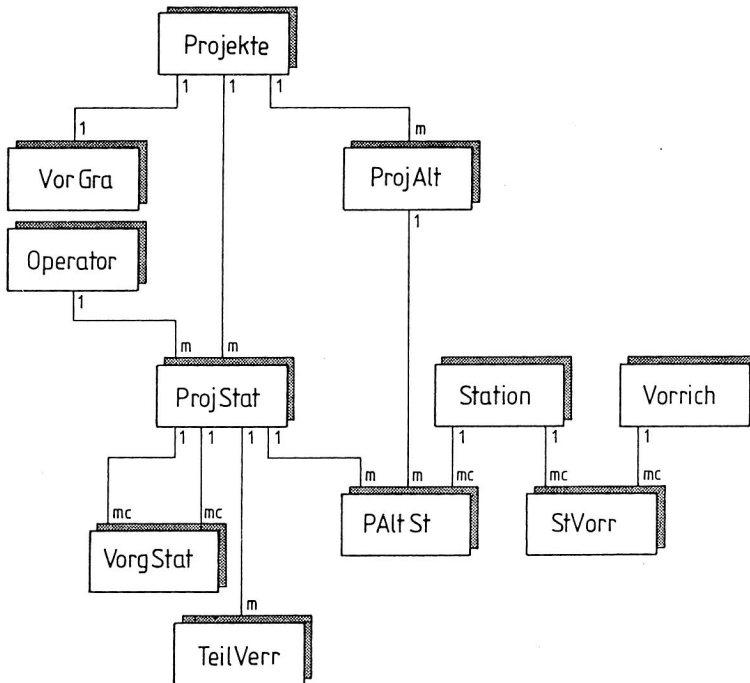


Bild 6-5: Entitätenblockdiagramm des Optimierungssystems

Die Bezeichnungen der verwendeten Entitätsmengen sind in folgender Liste zusammengefaßt:

- PSFunk Zuordnung von Fügefunktionen zu Projektstationen
- GeFunk Zuordnung von Geräten zu den Fügefunktionen
- GeStat Verfügbare Geräte auf projektunabhängigen Stationen

Die Hilfsentitätsmenge PSFunk gibt an, welche Projektstation welche Funktionen erbringen muß (Bild 6-6). Zu den auszufüh-

renden Funktionen werden durch die Hilfsentität **GeFunk** die entsprechenden Geräte zugeordnet. Sind die Geräte aus technischen Gründen stationsgebunden, erfolgt diese Zuordnung mit der Hilfsentität **GeStat**. Das Ergebnis der Funktionsträgerzuordnung umfaßt dementsprechend die vollständige Ermittlung von Funktionen und Geräten, um die projektierten Teilverrichtungen ausführen zu können.

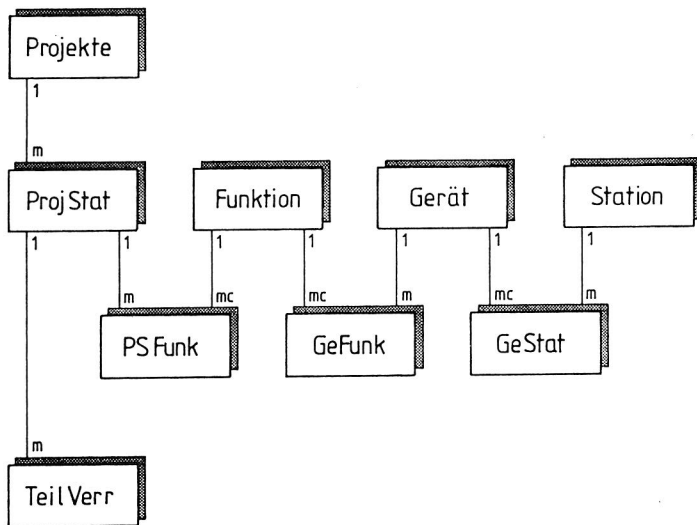


Bild 6-6: Entitätenblockdiagramm der Funktionszuordnung

Projekt- und damit Kostenalternativen werden im Wirtschaftlichkeitsbeurteilungsmodul gegenübergestellt. Zentrale Bedeutung findet im Entitätenblockdiagramm des Wirtschaftlichkeitsberechnungs- und Sensitivitätsanalysemoduls (Bild 6-7) die Entitätsmenge **Kostenvariante**. Jeder Projektalternative werden also jeweils mehrere Kostenkonstellationen gegenübergestellt, um den in Kapitel 5 erläuterten Variationsmöglichkeiten nachzukommen. Den Kostenvarianten wiederum stehen mehrere Sensitivitäts- und Parametervariationen gegenüber, da sich aus der Attributliste der Kostenvarianten zahlreiche Variationsmöglichkeiten kombinieren lassen. Zu den Sensitivitätsanalysen und Parametervariationen werden jeweils eine Ergebnistabelle und ein Ergebnisplot abgelegt.

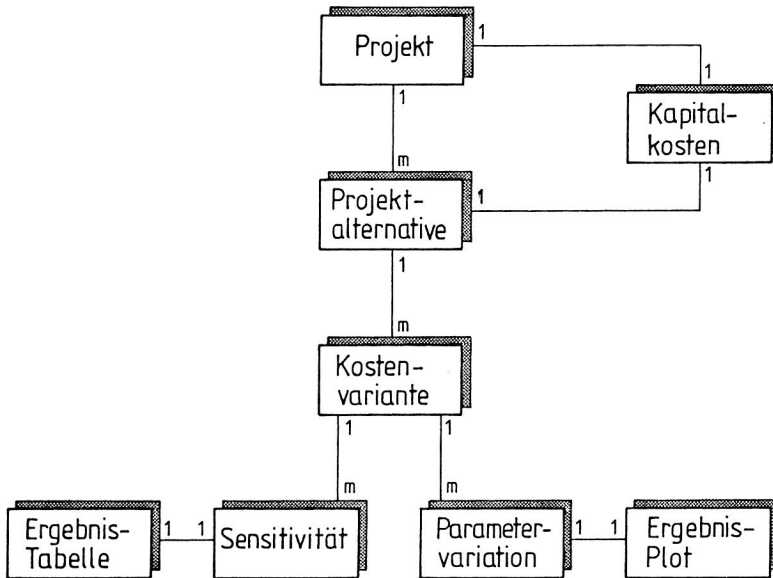


Bild 6-7: Entitätenblockdiagramm der Wirtschaftlichkeits- und Sensitivitätsanalyse

Mit dem oben beschriebenen Aufbau eines DBMS für die Projektierung von automatisierten Montagesystemen ist somit die Basis geschaffen, die Implementierung der eigentlichen Projektierungsmodule zu realisieren.

6.2 Das Programmpaket EDIPLAN

Das Programmmodul EDIPLAN stellt im Projektierungsmodell für automatische Montagesysteme die Schnittstelle zur Arbeitsvorbereitung dar.

Die Ausgangssituation bei der Projektvorbereitung ist je nach Art des Projektes durch unterschiedliche Rahmenbedingungen gekennzeichnet (Bild 6-8).

Bei einem erstmals für ein neues Produkt angesetzten Projekt liegen in der Regel dem Projektierer Stücklisten, Produktionszahlen, Zeichnungen und eventuell auch Prototypen vor. Ist zu einem geplanten Projekt eine Alternative zu entwickeln, so sind darüberhinaus bereits Planungsdaten über Stationsbelegung, Produktionsdaten und Auslastung bekannt.

Weitergehende Informationen liegen vor, wenn die Rationalisierung einer bestehenden Anlage (Manuelle Montagelinie) angestrebt wird.

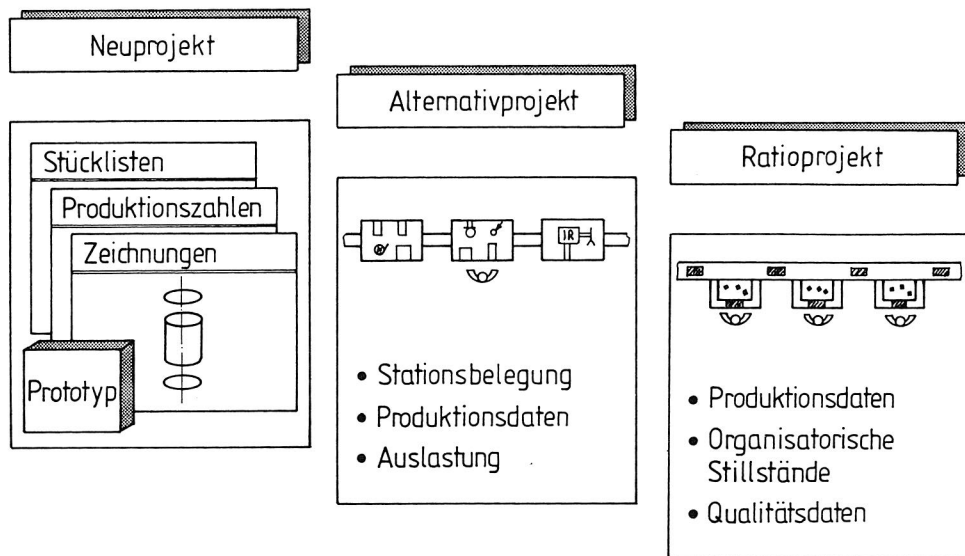


Bild 6-8: Rahmenbedingungen beim Projektstart

In diesem Fall sind Produktionsdaten, Aussagen über organisatorische Stillstände und Qualitätsdaten der laufenden Montageanlage zu erwarten.

Generell ist die Situation in der Arbeitsvorbereitung gekennzeichnet durch kurzfristige Planänderungen, die wiederum Umstrukturierungen bei den Montagesystemen erforderlich machen. Die Aufgabeninhalte der Arbeitsvorbereitung umfassen dabei die Zuordnung und zeitliche Bewertung der Montagetätigkeiten (Teilverrichtungen) auf Stationen im Montagesystem.

Die dynamische Betrachtung des gesamten Montageaufgabenumfanges wird erforderlich, da folgende Störeinflüsse die Projekt-ausgangssituation maßgeblich verändern können:

- Produktionsstückzahlschwankungen
- Variantenprogrammänderungen
- Neue Varianten
- Technische Änderungen bestehender Varianten
- Fertigungstechnische Entwicklungen
- Personalveränderungen

Bevor die Zuordnung der Teilverrichtungen auf Stationen und damit eine Optimierung des Montageumfanges erfolgen kann, ist die eindeutige Identifizierung und Analyse der Montageschritte erforderlich.

Hierzu ist die Eingabe im Programmodul EDIPLAN in vier Identifikationsstufen gegliedert (Bild 6-9):

- Projektidentifikatoren
- Teilidentifikatoren
- Operationsidentifikatoren
- Restriktionsidentifikatoren

Mit den Projektidentifikatoren erfolgt die übliche Bezeichnung für die zu bearbeitende Montageaufgabe.

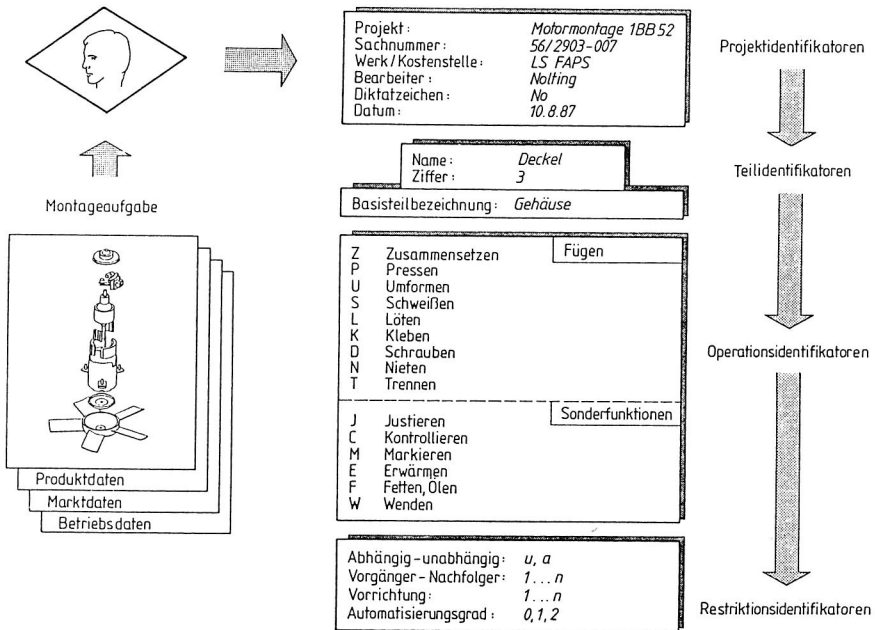


Bild 6-9: Identifikationsstufen in EDIPLAN

Die Teilidentifikatoren bestehen in der Regel aus einem Montageobjekt, das gleichzusetzen ist mit dem Bauteil (bzw. der Baugruppe), das montiert werden soll, und einem Basisteil.

Zur vollständigen Beschreibung einer Teilverrichtung ist neben den Teilidentifikatoren noch die Eingabe eines Operationsidentifikators notwendig. Die durchführbaren Operationen lassen sich in Fügefunktionen und Sonderfunktionen gliedern.

In der abschließenden Beschreibungsstufe umfaßt das Modell zur rechnergestützten Projektierung die Möglichkeit, durch Restriktionsidentifikatoren die zulässigen Kombinationen bei der Stationszuordnung einzuschränken.

Damit wird erreicht, daß durch technisch bedingte Restriktionen die rein mathematisch zulässige Anordnungsvielfalt von

Teilverrichtungen auf Stationen erheblich vermindert wird.

Da die sich anschließende Verlustzeitminimierung eine zeitliche Bewertung der Teilverrichtungen verlangt, wird im Programmmodul EDIPLAN entsprechend der im Projektierungsstadium zur Verfügung stehenden Informationen eine Planvorgabezeit für jede Teilverrichtung bestimmt.

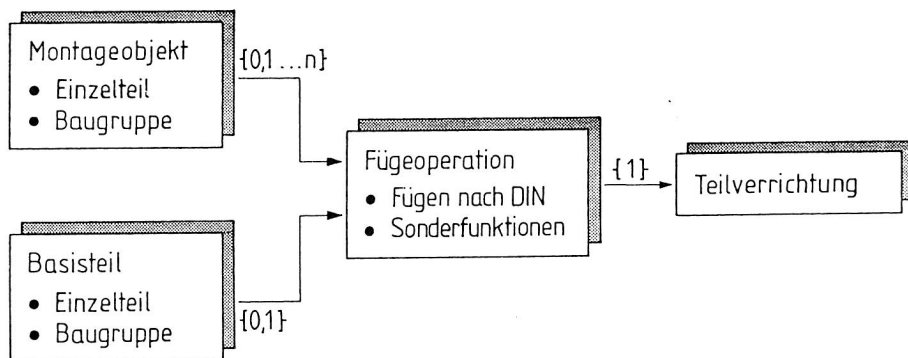


Bild 6-10: Zusammensetzung einer Teilverrichtung

Damit setzen sich die Ziele des Programmmoduls im wesentlichen aus folgenden Schwerpunkten zusammen:

- Projektverwaltung
- Teilverrichtungsermittlung
- Planvorgabezeitberechnung

Insbesondere die Lösung der Problemfelder Teilverrichtungsbeschreibung und Planvorgabezeitkalkulation mit rechnergestützten Methoden wurde im hier vorgestellten Modell bearbeitet.

6.2.1 Teilverrichtungsermittlung

Betrachtet man die Aufgabenstellung in der elektrofeinwerktechnischen Montage, so gilt es in der Regel, Teile und Funktionen zu beschreiben, die notwendig sind, um einen Montage-

vorgang auszuführen.

Die kleinste zu analysierende Einheit ist dabei die Teilverrichtung, deren Zusammensetzung in Bild 6-10 dargestellt ist.

Es gilt zunächst ein Montageobjekt, das entweder aus einem Einzelteil oder einer Baugruppen besteht, zu definieren, wobei eine Teilverrichtung Montageobjekte aus der Menge $\{0,1,\dots,n\}$ enthalten kann.

Die zweite Komponente einer Teilverrichtung ist das Basisteil, das wiederum nicht oder nur einmal in der kleinsten Montageeinheit vorhanden sein kann.

Schließlich ist noch eine Fügeoperation zu beschreiben, die entweder aus einer Fügefunktion nach DIN 8593 [94] oder einer Sonderfunktion bestehen kann (Bild 6-11).

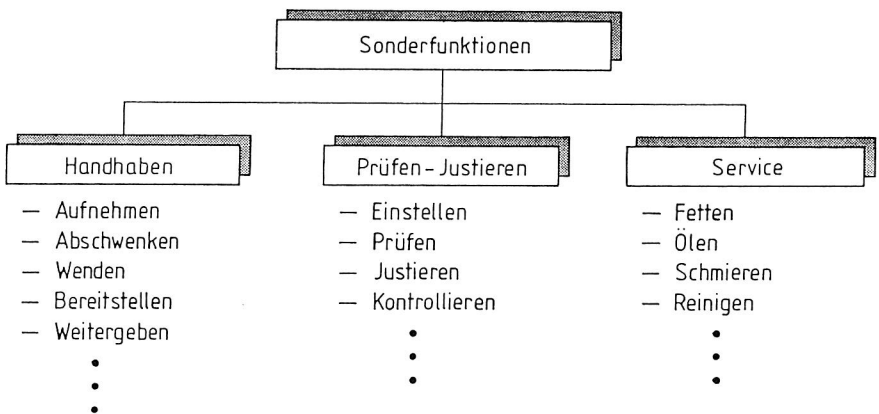


Bild 6-11: Sonderfunktionen in der Projektierung

Im Gegensatz zu den bekannten Planungsmethodiken für Montageanlagen [2,27,36,70] wird hier auf eine Trennung zwischen Teilverrichtungen mit Fügeoperationen und Handhabungsfunktionen verzichtet, da noch nicht die Montagegerätetechnik impliziert werden soll, sondern in der Projektierung die

durchzuführende Tätigkeit mit ihrer Planzeit im Vordergrund steht. Insofern können Handhabungs- bzw. Sonderfunktionen auf die gleiche Weise wie die reinen Fügefunktionen betrachtet werden.

Für die weitere Beschreibung der Operationen steht allerdings im Planungsablauf der Weg offen, die Handhabungsfunktionen entsprechend VDI-Richtlinie 2860 [92] in Hauptfunktionen, Unterfunktionen und Elementarfunktionen zu gliedern oder für die Fügefunktionen eine Zuordnung in die Normuntergruppen (DIN 8593) vorzunehmen.

Die Analyse der Teilverrichtungen ist abhängig von der Ausgangssituation beim Projektstart. Soll für ein neues Produkt ohne bereits vorhandene Montageeinrichtungen die Tätigkeitsanalyse durchgeführt werden, so bedarf es seitens des Projektierers einer eingehenden Beschreibung der durchzuführenden Montageschritte.

Als Hilfsmittel steht ihm dazu ein Erfassungsbogen für Teilverrichtungen zur Verfügung (Bild 6-12).

Für den Fall der Projektierung eines alternativen Montagesystems liegen bereits Ergebnisse aus der Teilverrichtungsanalyse vor. Ausgehend hiervon erlaubt das Erfassungsformular:

- Arbeitsinhalte,
- Fügeeinrichtungen,
- Positioniergenauigkeiten und
- Peripherieeinflüsse

mit zu berücksichtigen oder zu verändern und damit einen alternativen Arbeitsumfang aufzubauen.

Ist ein Montagesystem für ein Produkt bereits vorhanden (z.B. manuelle Montagelinie), so kann der Erfassungsbogen zunächst zur Analyse des Istzustandes vor Ort genutzt werden. Auch hier ist anschließend die Möglichkeit gegeben, die Eingabepa-

FAPS Uni Erlangen	Erfassungsbogen für Teilverrichtungen	lfd. Nr. Station			
Beschreibung: _____ _____ _____					
Teilbezeichnung: _____ Basisteilbezeichnung: _____ Fügefunktion: _____ Vorrichtung: _____ Automatisierungs- kennzeichen: _____ Vorgänger: _____					
Planvorgabezeit: Manuell Empirik Gemessen Automatik <div style="display: flex; justify-content: space-around;"> <input style="width: 60px; height: 20px; border: 1px solid black;" type="text"/> <input style="width: 60px; height: 20px; border: 1px solid black;" type="text"/> <input style="width: 60px; height: 20px; border: 1px solid black;" type="text"/> <input style="width: 60px; height: 20px; border: 1px solid black;" type="text"/> </div>					
Aufnehmen	Entfernung		Fügen	Toleranz	
	Greifen			Drehen	
	Kleinteile < 6mm			Blindfügen	
	Vorrichten			Endlage	
Ablegen	Wurfbewegung		Empirik	Bewegen	
	Anschlag			Positionieren	
	Zieltoleranz			Fügen	
	Entf. >100+ m > 3 kg			Greiferbetätigung	
	Sonstiges			Peripheriefunktionen	
Sonderfunktion	Andrehen		Automatik	$\Delta x, y$ Position	
	Eindrehen			Δz Position	
	Schrauben mit Handwz.			Fügetoleranz	
	Ablesen			Greifweg	
	Prüfen			Peripheriefunktionen	
	Schreiben			Hindernisse	

Bild 6-12: Erfassungsbogen für Teilverrichtungen

parameter zu ändern und sie z.B. einem Nachfolgeprodukt anzupassen.

Damit ist für die Eingabe der Teilverrichtungen als Aufgabenbasis zunächst das vorliegende Informations- und Datenmaterial ausgenutzt.

Für die weiteren Projektierungsschritte ist die Ermittlung der Planvorgabezeiten von großer Bedeutung, da diese ein wichtiges Optimierungskriterium für die Stationszuordnung bilden.

6.2.2 Berechnung der Planzeiten

Das Programmmodul EDIPLAN sieht für die Analyse des Montageaufgabenumfanges die rechnergestützte Kalkulation der Planzeiten für Teilverrichtungen vor.

Die Ermittlung der Durchführungszeiten kann in den vier Versionen:

- Manuelle Montage (Systeme vorbestimmter Zeiten)
- Empirik (Vergleichbare Zeiten aus statistischen Erhebungen)
- Automatik (Berechnung der Planzeiten aus Parametern)
- Zeitaufnahme (Gemessene Ausführungszeiten bei manueller oder automatischer Montage)

durchgeführt werden.

Mit diesen Möglichkeiten steht es dem Projektierer frei, für jede Teilverrichtung entsprechende Planzeitalternativen aufzubauen.

Manuelle Montage

Zur Bestimmung der Planvorgabezeiten bei manuellen Montage­­tätigkeiten eignen sich die beiden Systeme Workfactor und MTM [47,90].

Insbesondere im Hinblick auf die Rechnerintegration in der Projektierungsphase ist das Workfactor-Blockverfahren vorzu­ziehen, da es bereits schematisiert aufgebaut ist und Bear­beitungsanforderungen stellt, die mit Hilfe der EDV gut er­füllt werden können.

Mit dieser Methode wird für jede Teilverrichtung der Arbeits­ablauf analysiert und die Zeit aus den vier Blockelementen:

- Aufnehmen,
- Fügen,
- Sonderfunktionen und
- Ablegen

ermittelt (Bild 6-13).

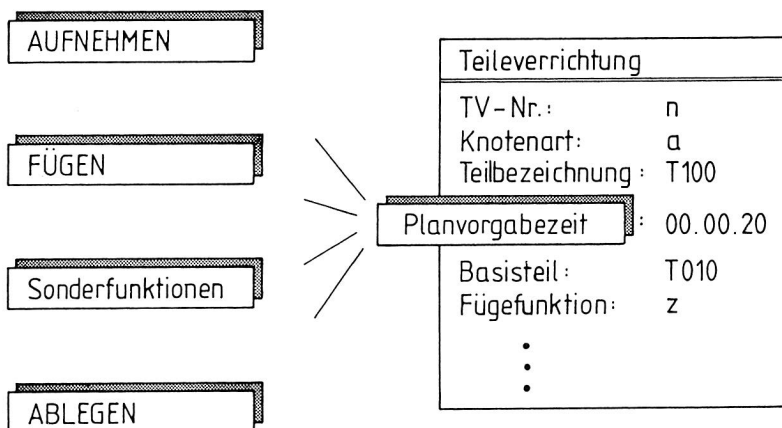


Bild 6-13: Blockelemente für die Planvorgabezeit

Die Kalkulation der Planvorgabezeiten erfolgt im Mensch-Maschine-Dialog, wobei die Rechnereingabemasken entsprechend der normierten Analyseformulare gestaltet sind, so daß die Programmanwendung durch einen geschulten Arbeitsvorbereiter problemlos erfolgen kann [47].

Zahlreiche Praxisanwendungen von EDIPLAN zeigten, daß mit der rechnergestützten Kalkulation der Planvorgabezeiten wesentlich exaktere Ergebnisse erzielt werden können als mit den herkömmlichen manuellen Zeitbestimmungen, da die rechnergestützte Planvorgabezeitermittlung nicht den Beeinflussungsmöglichkeiten des Arbeitsplaners unterliegt. Im Bild 6-14 ist eine Gegenüberstellung der Planzeiten mit den tatsächlich gemessenen Istzeiten wiedergegeben, wobei eine Auswahl von 5 manuellen Arbeitsstationen aus einem Gesamtumfang von 80 Stationen in einem gemischt verketteten Montagesystem der Elektrofeinwerktechnik getroffen wurde.

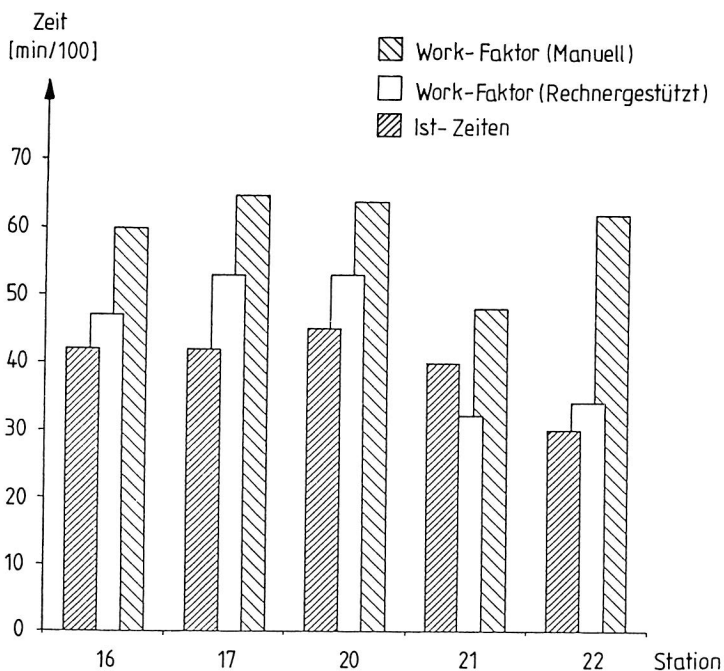


Bild 6-14: Gegenüberstellung von Planvorgabezeiten bei verschiedenen Kalkulationsmethoden

Die Ergebnisse zeigen, daß die rechnergestützten Planzeiten exakter den tatsächlichen Arbeitsumfang nachbilden als die manuell eingeplanten Vorgabezeiten. Neben der Zeitverkürzung beim Planungsprozeß ergibt sich somit gleichzeitig eine Qualitätsverbesserung der Planungsergebnisse.

Empirik

Um den Erfahrungsschatz der Programmanwender hinsichtlich der Taktzeiten in Automatisierungseinrichtungen ausnutzen zu können, erlaubt das Programmmodul EDIPLAN, die Planvorgabezeit für automatische Montageoperationen mittels eines empirisch aufgebauten Kalkulationsmoduls zu bestimmen.

Die Ausführungen in Kapitel 3.2 werden an dieser Stelle aufgegriffen und fließen in die rechnergestützte Projektierung ein.

Dabei wird zunächst entsprechend der geplanten Teilverrichtung die zu montierende Teileanzahl ermittelt (Bild 6-15).

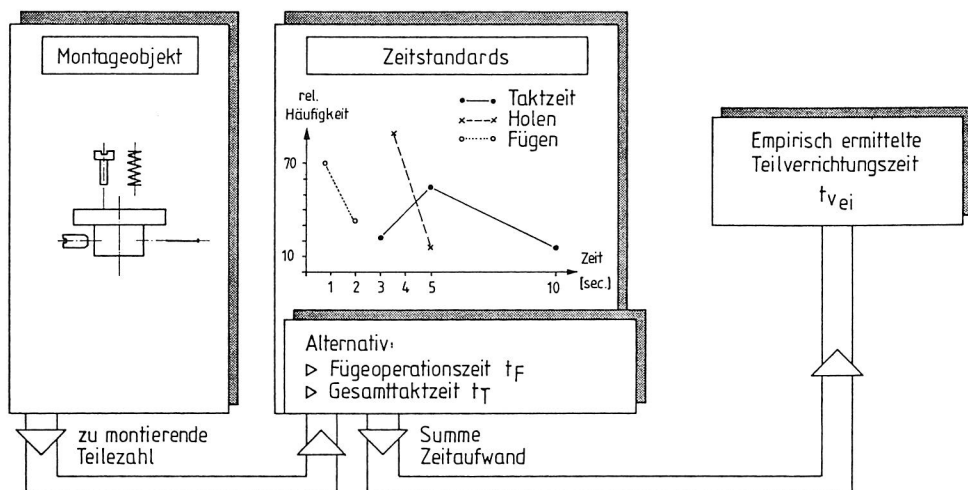


Bild 6-15: Empirische Planvorgabezeitermittlung

Die Anzahl der Montageobjekte N_M ist:

$$N_M \in \{0, 1, \dots, n\} \quad (20)$$

Im weiteren Kalkulationsablauf kann der Anwender für die Montagebewegung (Holen) und für die Fügefunktion aus relationalen Standards Zeitinkremente bestimmen, die durch Addition die Teilverrichtungszeit ergeben.

Alternativ steht es dem Programmnutzer frei, aufgrund seiner Erfahrungen Fügeoperationszeiten oder die Gesamtteilverrichtungszeit einzugeben, da für immer wiederkehrende Teilverrichtungen (z.B. automatisches Verschrauben) in der Regel sehr genaue Kenntnisse über die zu erwartenden Ausführungszeiten vorliegen.

Somit berechnet sich die Teilverrichtungszeit t_{ve} zu:

$$t_{ve} = \sum_{i=1}^n (t_H(i) + t_F(i)) \quad [ZE] \quad (21)$$

mit:

n = Montageobjektanzahl

t_H = Montagebewegungszeit [ZE]

t_F = Fügefunktionszeit [ZE]

t_T = Empirisch ermittelte Gesamttaktzeit [ZE],

wobei der Ausdruck $(t_H + t_F)$ alternativ durch t_T ersetzt werden kann.

Anmerkung:

Die Definition der Teilverrichtung läßt zu, daß kein Montageobjekt vorhanden sein kann; allerdings muß eine Fügefunktion deklariert sein.

Somit muß in der Gleichung (21) $n > 0$ sein.

Automatische Montage

Für automatische Montageeinrichtungen, zu denen noch keine gesicherten Erkenntnisse über die zu erwartenden Planzeiten vorliegen, bietet dieses Modul die Möglichkeit, aufgrund bestimmter geometrischer Standards und mit Hilfe von Verfahrenszeitprofilen von Roboter- bzw. NC-Systemen, die Teilverrichtungszeiten zu kalkulieren.

Auch hier wird ein Modell vorgestellt, das Projektierungen von automatischen Montagesystemen im Hinblick auf eine effiziente Zeitnutzung rationeller gestalten kann.

Der Programmanwender greift bei Anwahl dieses Moduls auf die vereinbarten Geometriestandards aus den Erhebungen im eigenen Betrieb oder der in Kapitel 3.2 vorgestellten Ergebnisse zurück.

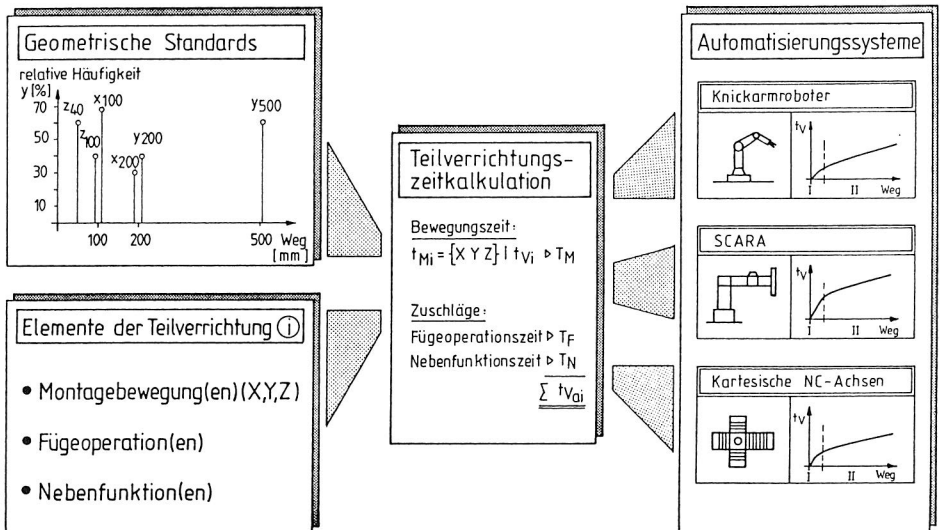


Bild 6-16: Berechnungsvorgang bei automatischen Teilverrichtungen

Im Bild 6-16 sind typische geometrische Standards für automatisierte Montagesysteme in der Elektrofeinwerktechnik zusammengefaßt worden. Die Koordinaten (x,y,z) entsprechen dabei den jeweiligen Entfernungen vom Abholort des Montageobjektes bis zum Fügeort im kartesischen System.

Zur Durchführung der Montageoperation ist es für die Projektierungsphase qualitativ und quantitativ ausreichend, mit drei verschiedenen Automatisierungssystemen zu kalkulieren.

Knickarmroboter, SCARA-Roboter (Selectiv-Compliance-Assembly-Robot-Arm) und kartesische NC-Achsen werden im Modell angeboten. Ihre Verfahrszeitdiagramme sind als parametrisierte Funktionen abgelegt, so daß herstellerspezifische Unterschiede den jeweiligen Automatisierungssystemen zugeordnet werden können.

Herstellerneutral ist allerdings der Funktionsverlauf. So lassen sich die Verfahrszeitverläufe grundsätzlich in zwei Abschnitte teilen. Im ersten liegt ein exponentieller Verlauf vor, der sich durch die Gleichung:

$$t_{v_I} = g_1 \cdot (g_2 \cdot s_v)^{0.5} \quad [\text{sec}] \quad (22)$$

mit:

$$t_{v_I} = \text{Verfahrszeit im I. Abschnitt} \quad [\text{sec}]$$

$$g_{1,2} = \text{Herstellerspezifische Korrekturfaktoren} \quad [\text{sec}]_1, [1/\text{mm}]_2$$

$$s_v = \text{Verfahrweg (Montagebewegung)} \quad [\text{mm}]$$

beschreiben läßt.

Für den zweiten Abschnitt gilt:

$$t_{v_{II}} = g_3 \cdot s_v + g_4 \quad [\text{sec}] \quad (23)$$

mit:

$t_{V_{II}}$ = Verfahrzeit im II. Abschnitt [sec]

$\mathfrak{J}_{3,4}$ = Herstellerspezifische Korrekturfaktoren [sec/mm]₃,
[sec]₄

Die Grenze zwischen den beiden Abschnitten liegt bei einem
Verfahrweg $s_{V_{\text{grenz}}} = 100 \text{ mm}$ [112].

Die gesamte Teilverrichtungszeit wird durch Addition aus den
Bewegungszeiten und Zuschlagszeiten gebildet:

$$t_{va} = \sum_{i=1}^n (t_M(i) + t_F(i) + t_N(i)) \quad [\text{sec}] \quad (24)$$

mit:

t_{va} = Teilverrichtungszeit für automatische
Montageoperationen [sec]

n = Anzahl der Bewegungen und Montageobjekte je
Teilverrichtung

t_M = Montagebewegungszeit [sec]

t_F = Fügefunktionszeit [sec]

t_N = Nebenzeit. [sec]

Fügefunktionszeiten und Nebenzeit werden vom Projektierer den
jeweiligen Bewegungselementen zugewiesen.

Zeitaufnahme

Neben manueller Montage, empirischer Kalkulation und Teilverrichtungszeitberechnung für die automatische Montage erlaubt das Planzeitberechnungsmodul auch die Eingabe der Teilverrichtungszeiten im Mensch-Maschine-Dialog. Hierbei können in der Produktion oder im Versuchsfeld gemessene Ausführungszeiten für Montageoperationen berücksichtigt werden und

kurzfristig in neue Projektierungsvorhaben mit einfließen.

Zusammengefaßt bietet somit das Programmodul EDIPLAN mit dem Planzeitberechnungsmodul eine situationsgerechte Basis, um sowohl reproduzierbare Ergebnisse zu erzielen, als auch effektive Projektierungen durchführen zu können.

Die Einbindung des Planzeitberechnungsmoduls in die Programmstruktur verdeutlicht das folgende Kapitel.

6.2.3 Aufbau der Programmstruktur

Mit dem Programmpaket EDIPLAN steigt der Projektierer im Regelfall in eine neue Planungsaufgabe ein. Daher enthält das Einstiegsmenü sämtliche Projektbearbeitungsmodi (Bild 6-17).

Für die vier Hauptmenüpunkte sind in der Darstellung jeweils beispielhafte Untermenüs und, soweit vorhanden, deren Submenüs aufgeführt. So kann der Benutzer z.B. über die Stufen:

- Projekt auswählen, (Projekt kreieren),
- Projekt bearbeiten und
- Ändern des Vorrangfiles

schließlich in die Bearbeitung der Teilverrichtungen einsteigen. Hier können neue Teilverrichtungen eingegeben oder bestehende verändert werden. Auch die Berechnungsweise der Planvorgabezeit für die Teilverrichtung wird hier festgelegt.

Um mit dem Projektierungsmodell nicht nur Planungen zielgerichtet und eindeutig präjudizieren, sondern auch interaktiv Montageoperations-, Teilverrichtungs- und Arbeitsstationsoptimierungen ausführen zu können, ist es von Bedeutung, z.B. die Zeitanteile der Teilverrichtungen zu erkennen.

Ähnlich der Analyse und iterativen Optimierung von Handarbeitsplätzen mit der MTM - Methode erlaubt das Programmpaket

EDIPLAN diese Vorgehensweise auch für automatische Montagestationen.

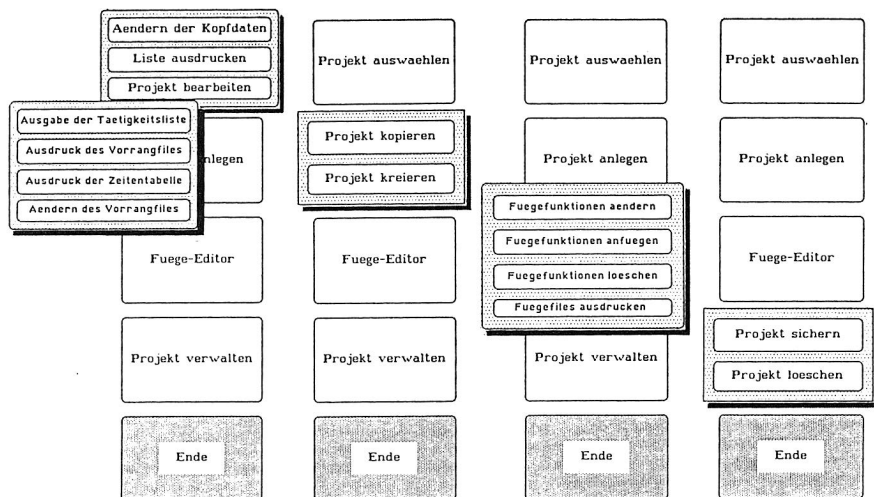


Bild 6-17: Grundmenü und Submodule in EDIPLAN

Mit dem Submenü "Ausdruck der Zeittabelle" werden je Teilverrichtung die taktzeitbestimmenden Komponenten am Bildschirm wiedergegeben. Der Projektierer erkennt so schnell, inwieweit Nebenfunktionen starken oder nur schwachen Einfluß auf die Teilverrichtungszeiten nehmen und kann gegebenenfalls iterativ Arbeitsstationsoptimierungen einleiten.

Einen weiteren Menüpunkt bildet die Eingabe und Verarbeitung der Fügefunktionen (Bild 6-18). Hier erfolgt die Vervollständigung, Ergänzung oder Änderung der Fügefunktionsparameter, die in der Datenbank abgelegt wurden. Auf das gleiche Modul kann auch aus dem Programmpaket DOGMA (Kapitel 6.3) zugegriffen werden.

Ein kurzes Beispiel soll im folgenden Kapitel die Vorgehensweise und die Möglichkeiten bei der Anwendung des Programmoduls EDIPLAN darstellen.

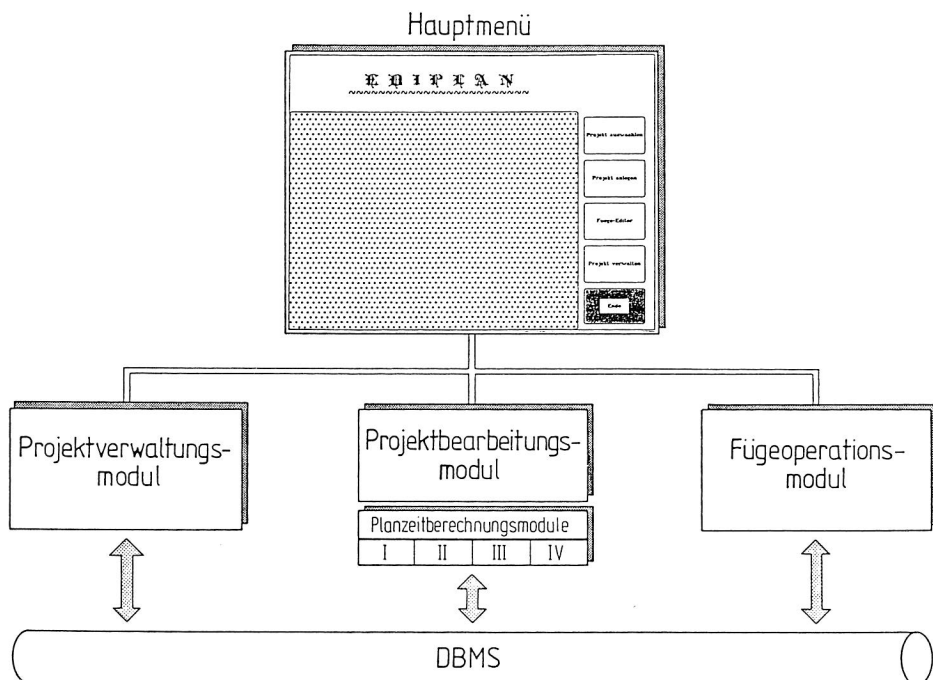


Bild 6-18: Interne Programmstruktur

6.2.4 Montageaufgabenanalyse mit EDIPLAN

Der Ablauf der Montageaufgabenanalyse entspricht der vorgestellten rechnergestützten Abarbeitung sämtlicher für die Projektierung wichtiger Erkenntnisse, die aus den zur Verfügung stehenden Informationsmaterialien gewonnen werden können.

Als Montageaufgabenbeispiel möge ein Elektromotor dienen (Bild 6-19).

Nach Eingabe der Projekt- und Teilidentifikatoren muß der Projektierer angeben, welche Füge- oder Sonderoperationen zur Erfüllung einer Teilverrichtung ausgeführt werden müssen. Im Beispiel besteht der Motor aus 10 Einzelteilen bzw. Baugrup-

pen, die miteinander verbunden werden und zwei Sonderfunktionen, die unabhängig von den Montageoperationen ausgeführt werden müssen.

Das Beispiel verdeutlicht bereits, daß durch den Produktaufbau die Montageaufgabenanalyse nicht determiniert wird. Die Explosionszeichnung legt zunächst eine Montagefolge von unten nach oben nahe.

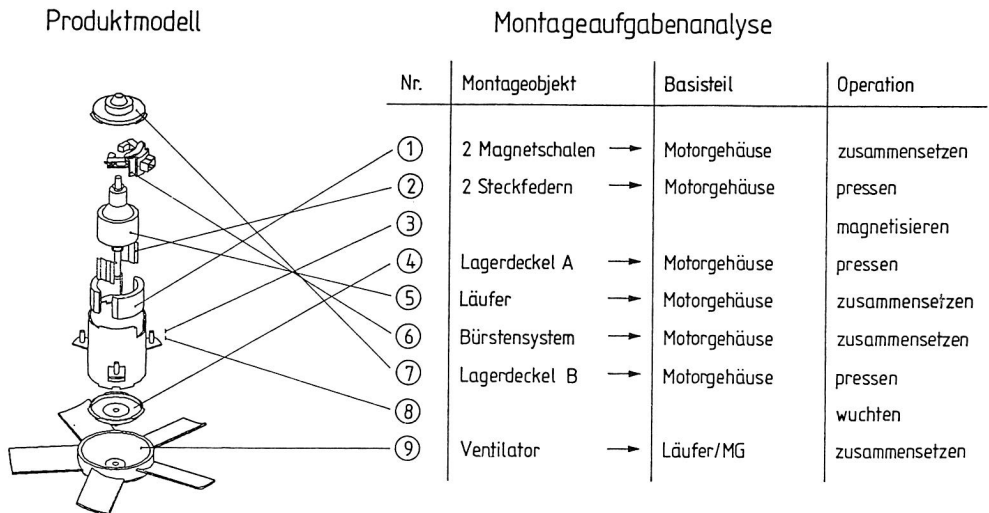


Bild 6-19: Beispielhafte Montageaufgabenanalyse

Die Analysetabelle zeigt dagegen, daß der Projektierer aufgrund seiner Kenntnisse das Produktmodell unter anderen als nur den rein grafischen Gesichtspunkten betrachtet. Die Tabelle wird auch vielfach als umgekehrte Demontagefolge betrachtet, wobei die Sonderoperationen wie Magnetisieren und Wuchten nur in der Vorwärtsanalyse ermittelt werden können.

Nach der Teilverrichtungsanalyse folgt die Planvorgabezeitbestimmung. Hierbei kann von zwei verschiedenen Vorgehensweisen ausgegangen werden.

Vorhandene Produktlinie

Liegen bereits Erfahrungen zu ähnlichen Projekten vor, so bietet es sich an, mit den Methoden der Zeitaufnahme die Teilverrichtungszeiten im Istzustand zu ermitteln.

Dabei fallen auch Erkenntnisse über spezielle Gestaltungsmerkmale der Montageoperationsvorrichtungen ab. Im Beispiel sind für das Magnetisieren, Pressen und Wuchten bereits Vorrichtungen vorhanden, die mit einer Codierung versehen in der Analyse mit aufgenommen werden können.

Anhand der Codierung wird für die spätere Montageaufgabenzuordnung zu Stationen diese Restriktion berücksichtigt, so daß z.B. das Magnetisieren nur auf der Station ausgeführt werden kann, auf welcher die dazugehörige Vorrichtung platziert wurde. Dadurch vermindert sich beim Abtasten die Anzahl der möglichen Kombinationen erheblich.

Neue Produktlinie

Für neuartige Montageaufgabeninhalte müssen Zeitanalysen durchgeführt werden. Hierzu stehen dem Projektierer im EDV-Modell die Planvorgabezeitkalkulationsmodule für Hand- und Automatismontage zur Verfügung. Die Module können alternativ angewendet werden, um so eine Varianz von möglichen Montageaufgabeninhalten bzw. -zeiten zu bekommen.

Die so gewonnenen Teilverrichtungen sollten im weiteren Schritt entsprechend des gewählten Montageverfahrens mit einer Restriktion für den Automatisierungsgrad versehen werden.

Voreingestellt ist immer die Stufe "leicht automatisierbar". Für ausgesprochene Handmontagen ist die Stufe "schwer automatisierbar" vorgesehen.

Damit wird wiederum bewirkt, daß die Anzahl der Kombinationen bei der Abtaktung reduziert wird, da nur Tätigkeiten mit ähnlichem Automatisierungsgrad einer Station zugeordnet werden.

Die vollständige Montageaufgabenanalyse für das Beispiel "Motor" umfaßt im Projektierungsmodell:

- Projektidentifikation,
- Teilverrichtungsbestimmung,
- Planvorgabezeitkalkulation und
- Restriktionszuordnung.

Für die weitere Bearbeitung steht somit eine Montageaufgabenbeschreibung in rechnerverarbeitbarer Form zur Verfügung.

6.3 Das Programmpaket DOGMA

Mit der Montageaufgabenanalyse im Softwarepaket EDIPLAN ist die Projektbasis geschaffen, um weitere Schritte im Planungsablauf rechnerunterstützt durchführen zu können (Bild 6-20).

Die Anwenderschnittstelle beim Wechsel von der ersten Projektierungsstufe zur zweiten soll dem Benutzer verdeutlichen, daß sich die folgenden Arbeitsschritte jeweils auf eine spezifische Montageaufgabenfolge beziehen. Werden mit EDIPLAN mehrere verschiedenartige Montagefolgen - z.B. aufgrund von Varianten - erstellt, so sind diese getrennt zu bearbeiten.

In der Datenbank werden zu den Projektvarianten die entsprechenden Daten gehalten. Zur Schaffung einer Projektbasis müssen diese Daten nun so aufbereitet werden, daß einerseits eine weitere Rechnerverarbeitung erfolgen kann und andererseits dem Benutzer noch Gelegenheit bleibt, die Daten interaktiv zu optimieren, ohne dabei die Aussagen der Montageaufgabenanalyse zu verletzen.

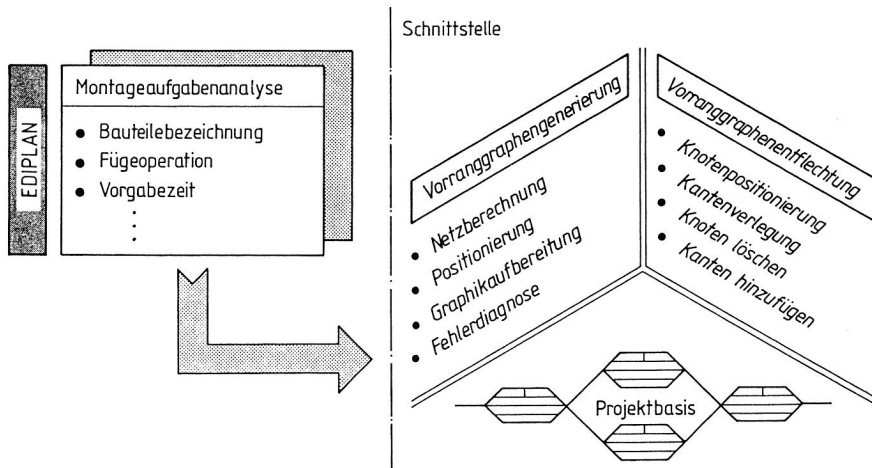


Bild 6-20: Rechnergestützte Vorranggraphengenerierung

Die interaktive Bearbeitung kann erleichtert werden, wenn die tabellarischen Daten aus EDIPLAN graphisch aufbereitet werden (Bild 6-21). Hierzu baut DOGMA automatisch den Vorranggraphen auf, wobei zunächst eine Netzberechnung erfolgt, die zum Ziel hat, die Knotenelemente gleichmäßig auf den Graphikbildschirm zu positionieren.

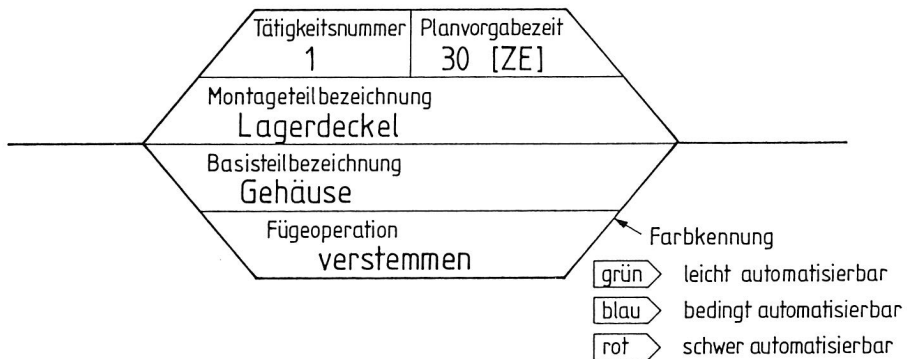


Bild 6-21: Aufbau eines Knotens im Vorranggraphen

Ebenfalls im Zuge der Vorranggraphengenerierung erfolgt eine Fehlerdiagnose (Kapitel 6.3.4).

Die sich anschließende Vorranggraphenentflechtung wird interaktiv durchgeführt. Dabei muß berücksichtigt werden, daß es dem Anwender sehr leicht fällt, das Layout des Graphen zu optimieren, da durch einfache Befehle Kanten verschoben, Knoten umpositioniert oder vertauscht werden können.

Die automatische, rechnerintegrierte Aufbereitung von Knoten- und überschneidungsfreien Netzstrukturen erfordert die Implementierung umfangreicher Algorithmen [111], die zudem anwenderspezifische Layoutwünsche nicht berücksichtigen können. Daher wurde hierauf bei der Implementierung von DOGMA verzichtet.

Ausgehend von der Projektbasis folgen im weiteren die sich

anschließenden Planungsschritte, die im wesentlichen eine Zuordnung von Montageoperationen zu Stationen und deren Auslastungsabgleich bei Linienanordnung umfassen.

6.3.1 Zielsetzung des Programmpaketes

Nach der Montageaufgabenanalyse und Vorranggraphengenerierung umfassen die folgenden Projektierungsschritte die Berechnung der Anlagenausbringung, der Stationsanzahl und des Systemauslastungsgrades (Bild 6-22).

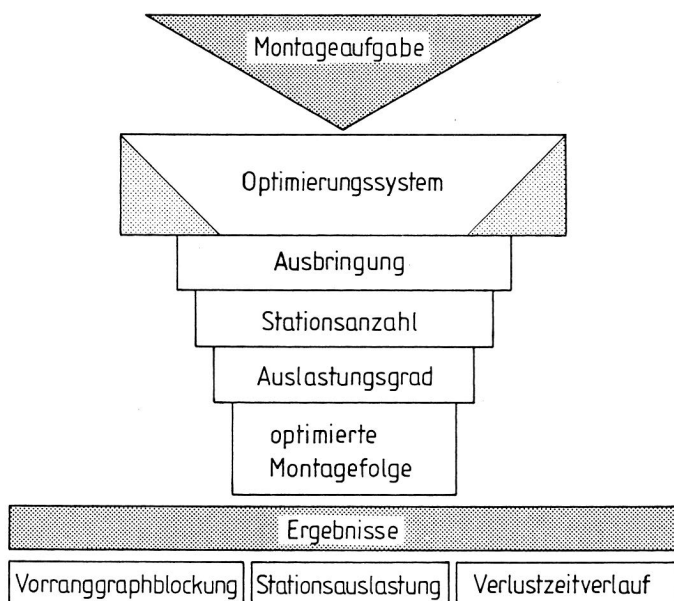


Bild 6-22: Zielsetzung und Ergebnisse von Dogma

Zielsetzung des Programmpaketes DOGMA ist es, eine optimierte Montagefolge zu erstellen.

Die Kurzbezeichnung DOGMA steht dabei für Dialogorientiertes Optimierungs- und Graphiksystem für Montageabläufe. Damit

wird deutlich, daß die Programmablaufschritte zum Teil in einem Mensch-Maschine-Dialog abgearbeitet werden sollen.

Dem Benutzer steht zur Veranschaulichung der Aufgabenstellung die graphische Darstellung der Vorrangbeziehungen zur Verfügung.

Alle weiteren Berechnungs- und Optimierungsschritte erfolgen durch Benutzereingaben oder werden automatisch angestoßen.

Mit den Ergebnissen aus DOGMA soll für die Projektierung von Montagesystemen grundlegendes Analyse- und Informationsmaterial aufbereitet werden. Gelingt es, eine optimale Stationsbelegung bei geringen Verlustzeiten zu berechnen, und entspricht die Ausbringung den seitens der Planzahlen geforderten Stückzahlen, so ist die mit DOGMA berechnete Abtaktung in summa mit dem Auslastungsgrad des Systems als Basis für weitere Projektierungsschritte hervorragend geeignet.

6.3.2 Wirtschaftliche Bedeutung des Bandabgleiches

Seine Bedeutung hat die Berechnung von Bandauslastung und -abgleich mit Einsetzen der Fließmontagen in der Industrie erlangt.

Schon frühzeitig wurde erkannt, daß durch eine gleichmäßige Belastung der vorwiegend manuellen Arbeitsplätze sowohl ein kontinuierlicherer Montagefortgang als auch eine gerechtere Entlohnung erwirkt werden konnte [16].

Mit den nun vorhandenen gemischt verketteten Montagesystemen, die zu einem mehr oder minder überwiegenden Anteil aus automatischen Stationen und noch verbliebenen Handarbeitsplätzen bestehen, ist das Problem des Bandabgleiches nach wie vor aktuell.

War es früher Zielsetzung des Abgleiches, die Verlustzeiten

an den manuellen Arbeitsplätzen möglichst klein und gleich verteilt zu halten, so gilt auch bei den zunehmend kapitalintensiveren Automaten die Forderung nach einer Auslastung nahe am Leistungsmaximum, um den gesteckten Amortisationszielen gerecht werden zu können. An einem Beispiel entsprechend Bild 6-23 kann die wirtschaftliche Bedeutung des Bandabgleiches hervorgehoben werden.

In einer empirisch abgetakteten Montagelinie mögen 50 Stationen in Reihe angeordnet sein. 20 dieser Stationen sind mit je einem Werker besetzt, die übrigen Stationen entsprechen jeweils einem Automaten. Wird mit einer rechnergestützten Abtaktung eine Reduzierung der Verlustzeit um durchschnittlich 1 Sekunde pro Station ermöglicht, so ergeben sich schließlich beträchtliche Jahreseinsparungen, die eine rechnergestützte Abtaktung rechtfertigen.

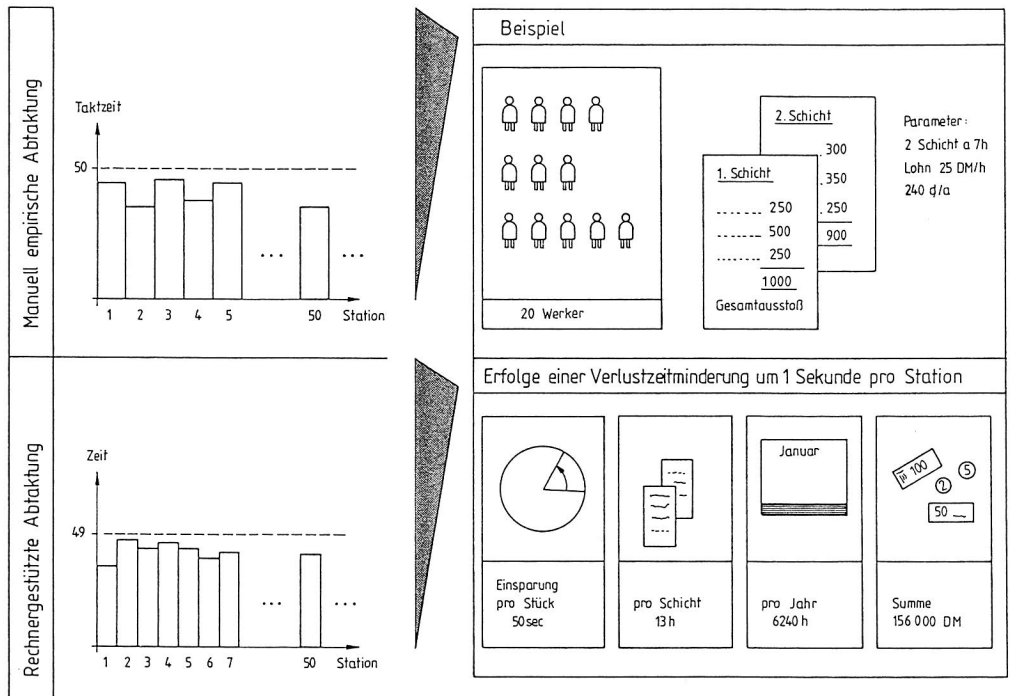


Bild 6-23: Wirtschaftliche Bedeutung des Bandabgleichs

6.3.3 Aufbau und Funktionen von DOGMA

Das Softwarepaket DOGMA ist in vier wesentliche Blöcke gegliedert. Es sind dies der Graphikeditor, die Vorranggraphenausgabe, der Stationeneditor und das Optimierungssystem. Bild 6-24 zeigt den Funktionsumfang der Blöcke.

Im Graphikeditor wird das Netz für die Graphikausgabe berechnet, es erfolgt eine algorithmische Fehlerdiagnose und dem Benutzer wird eine Schnittstelle zur Verfügung gestellt, um Veränderungen und Optimierungen an der graphischen Ausgabe vorzunehmen.

Die Vorranggraphenausgabe dient zur Dokumentation der bearbeiteten Graphen. Hierbei wird die Bildschirmausgabe auf eine Plotausgabe umgerechnet und der Plotter angesteuert.

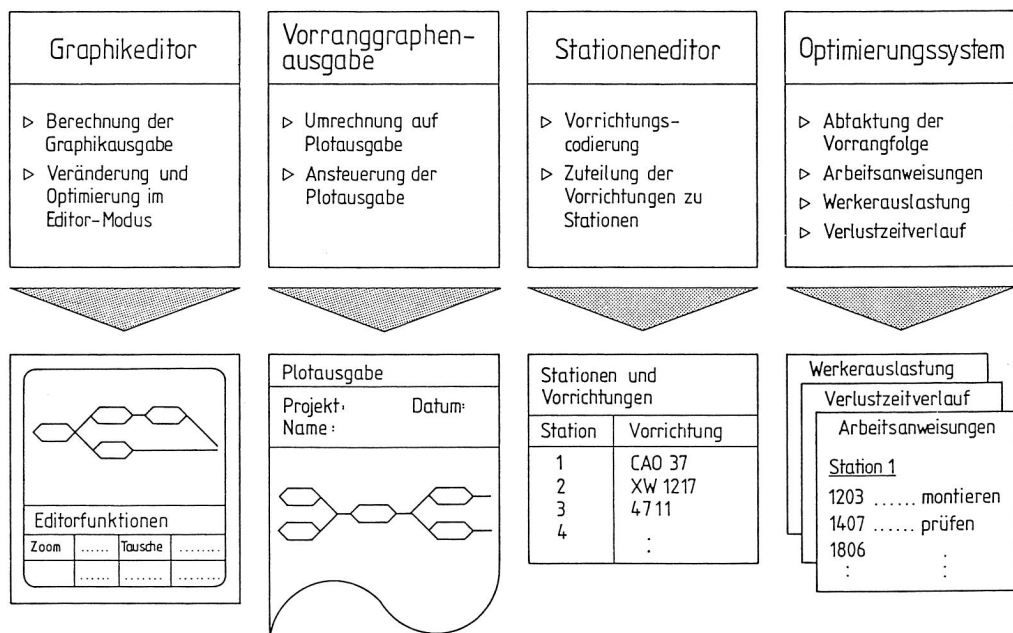


Bild 6-24: Aufbau und Funktionen von DOGMA

Eine wichtige Funktion übernimmt der Stationeneditor. Die Strukturen flexibler Montagestationen umfassen zum Teil Standardelemente wie Weitergabeeinrichtungen, Zuführeinrichtungen oder Füge- und Greifwerkzeuge, vielfach sind jedoch spezielle Vorrichtungen erforderlich, die wiederum an bestimmte Stationen gebunden sind.

Dabei sind zwei Ansätze grundlegend zu unterscheiden. Wird das Optimierungssystem auf bereits existente, verkettete Montagesysteme angewandt, so können Stationen, die mit Vorrichtungen für spezifische Teilverrichtungen ausgestattet sind, aus wirtschaftlichen Gründen nicht beliebig umgruppiert werden. Der Stationeneditor erlaubt es nun, diese teilverrichtungsspezifischen Vorrichtungen vorab bestimmten Stationen zuzuordnen. Kommt eine Umgruppierung in Betracht, so kann das Optimierungssystem diese Restriktion auch außer acht lassen.

Die Ergebnisse aus dem Bandabgleich mit Vorrichtungsberücksichtigung und ohne eine solche lassen dann exakte Aussagen über den möglichen wirtschaftlichen Vorteil zu, der zwar mit einer aufwendigen Umgruppierung der Stationen, dafür aber mit einem verbesserten Auslastungsgrad verbunden wäre.

Der zweite Ansatz besteht in der Möglichkeit, bei zu planenden Montagesystemen das Know-how des Betreibers oder eines Ausrüsters auszunutzen und bestimmte Teilverrichtungen z.B. Prüf- oder Justageautomaten vorab an festgelegte Stationen zu binden.

Im Stationeneditor werden die Vorrichtungen zunächst codiert, wobei diese Bezeichnung äquivalent zur Teilverrichtungsvorrichtung zu interpretieren ist. Anschließend erfolgt im Benutzerdialog die Zuteilung der Vorrichtungen zu Stationen. Hierbei ist eine Mehrfachbelegung zulässig und auch z.T. sinnvoll, da z.B. vorrichtungsgebundene Teilverrichtungen wie das Schrauben durchaus auf der gleichen Station ausgeführt werden können, sofern die Attribute des Schraubprozesses dies zulassen.

Der vierte Block im Softwarepaket umfaßt schließlich das Optimierungssystem. Mit der Methodik der vollständigen Enumeration oder wahlweise einem heuristischen Verfahren erfolgt die Abtaktung der Vorrangfolge. Ist ein Optimum, bzw. bei den heuristischen Verfahren ein Suboptimum gefunden, so können entsprechend der Stationenbelegung für manuelle Stationen Arbeitsanweisungen und für automatische Stationen Fertigungsinhalte ausgegeben werden. Zur Dokumentation dient die graphische Ausgabe der Werkerauslastung an den jeweiligen Stationen.

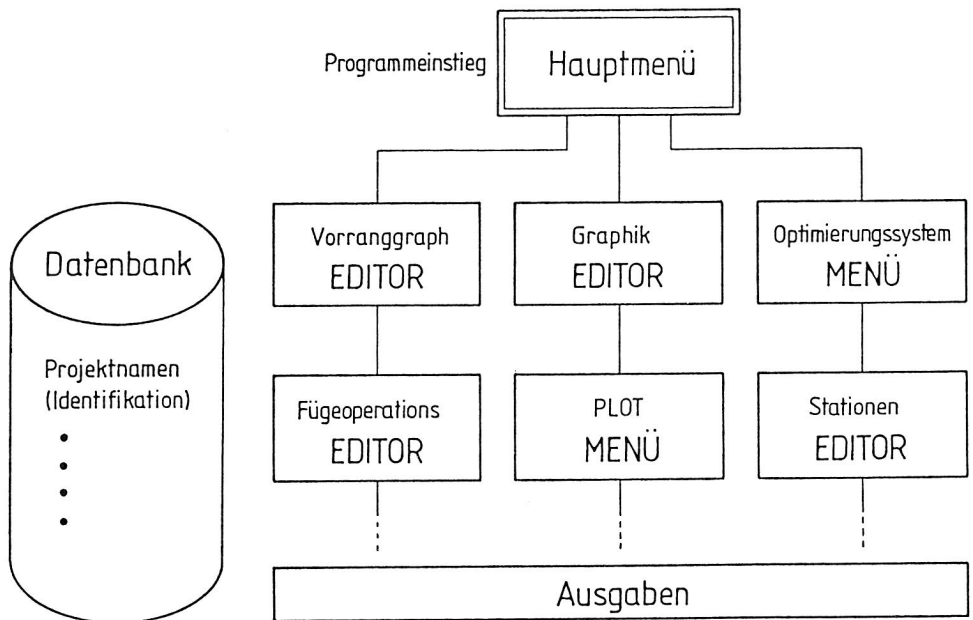


Bild 6-25: Menüstruktur und Dialogführung

Ein besonderes Hilfsmittel zur Beurteilung der projektierten Stückzahlen und damit der vorzugebenden Taktzeit stellt der Verlustzeitverlauf dar. Wird die Abtaktung nicht nur für eine bestimmte Taktzeit, sondern für einen technisch möglichen

Zeitbereich durchgeführt, so gibt das Diagramm (Kapitel 7) die Werte für zu erzielende Verlustzeiten zu jedem Taktintervall an. Damit läßt sich abschätzen, inwieweit eine Änderung der zunächst projektierten Taktzeit zu verbesserten oder aber auch zu verschlechterten Ergebnissen bei der Verlustzeit führt.

Eine außerordentlich wichtige Schnittstelle im System stellt die Mensch-Maschine-Kommunikation dar (Bild 6-25).

Mit wenigen übersichtlichen Bildschirmmenüs kann der Benutzer des Programmsystems alle Durchführungskomponenten ansprechen und sich leicht orientieren.

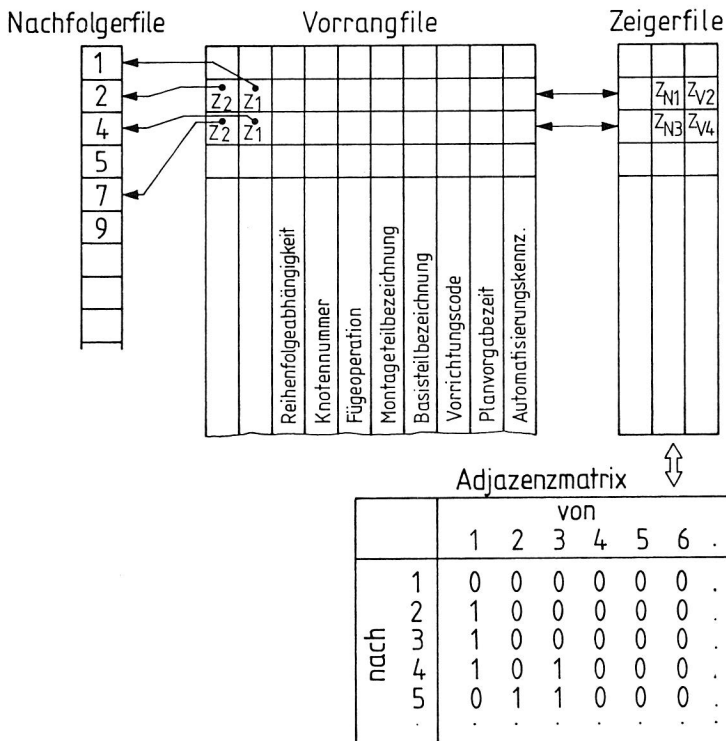


Bild 6-26: Interne Datenstruktur

6.3.4 Interne Datenstruktur und Fehlerbehandlung

Die Eingangsinformationen für das Softwaresystem DOGMA sind in der Datenbank abgelegt. Um eine effiziente Bearbeitung der Datenmengen zu erzielen, wird intern eine verzeigte Datenstruktur verwendet (Bild 6-26).

Bei Testläufen wurde festgestellt, daß die Rechnerperformance es dennoch erforderlich machte, auf arbeitsspeicherintensive Matrizen zurückzugreifen. Die Vorrangmatrix, auch als Adjazenzmatrix bezeichnet, wird allerdings nur sehr kurzfristig aufgebaut und temporär gehalten, um keinen unnötigen Speicherplatz zu belegen.

Bevor der Vorranggraph aus den Eingangsinformationen rechnergestützt aufgebaut werden kann, wird eine Fehlerbehandlung

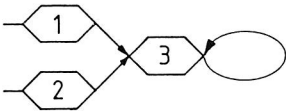
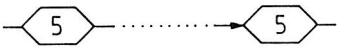
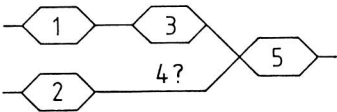
Schleifen	Ursachen:
	<p>Knoten wird mit eigener Tätigkeitsnummer als Vorgänger eingegeben.</p>
Doppelte Tätigkeitsnummer	
	<p>Bei manueller Korrektur im Vorrangfile mögliche Fehlerursache, ansonsten automatische Tätigkeitsnummerngenerierung.</p>
Nicht vorhandene Tätigkeitsnummer	
	<p>Nach manueller Löschoption im Editor mögliche Fehlerursache, wenn gelöschter Knoten noch als Vorgänger existiert.</p>

Bild 6-27: Fehlerquellen Im Vorranggraphen

durchgeführt. Da im vorangegangenen Schritt die Daten im Dialog zwischen Mensch und Maschine erstellt wurden, sind Fehleingaben die wesentlichen Ursachen bei den auftretenden Inkorrektheiten im Graphen (Bild 6-27).

Weil Identifizierung und logische Struktur der Knoten durch die Tätigkeitsnummer erfolgen, werden diese zur Fehlerbehandlung auch herangezogen. Mit Hilfe der Datenstruktur und einiger weniger Plausibilitätskontrollen können die dargestellten Fehlermerkmale erkannt und aufgezeigt werden.

Die anschließende Fehlerbeseitigung erfolgt durch den Bediener, der mit Korrekturhinweisen beim Dialog unterstützt wird.

6.3.5 Optimierungsablauf

Mit dem korrekten Vorranggraphen kann anschließend das Optimierungssystem gestartet werden. Es stehen zur Abtaktung die bereits angesprochenen Verfahren der vollständigen Enumeration und eine heuristische Methode zur Verfügung. Im ersten Schritt wird bei Aufruf des Optimierungssystems die größte

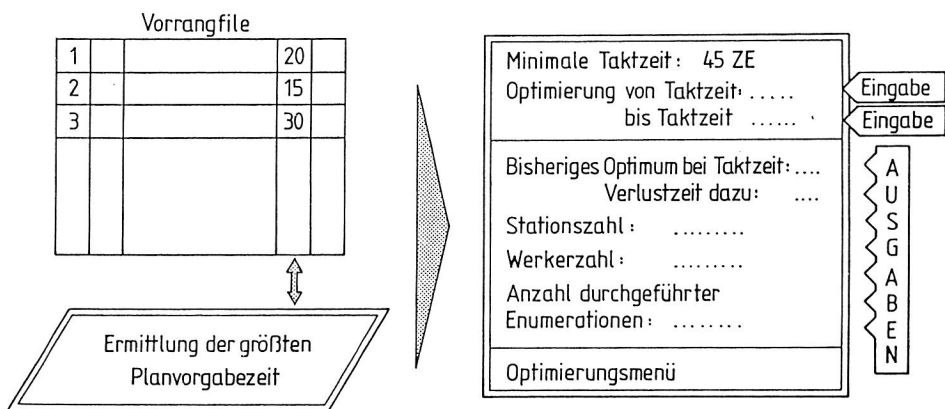


Bild 6-28: Optimierungsablauf

Teilverrichtungszeit aus dem Vorranggraphen ermittelt. Damit steht die für die Abtaktung erforderliche Mindesttaktzeit fest, da die Zeiteinheiten je Station mindestens der längsten Teilverrichtungszeit entsprechen müssen, wenn nicht mit redundanten Stationen operiert wird. Soll die Projektierung auch diese Möglichkeit unterstützen, so sind die in Frage kommenden Teilverrichtungen durch zwei parallele Knoten mit jeweils der halben Teilverrichtungszeit einzuplanen.

Der Programmablauf beginnt, wie in Bild 6-28 dargestellt, mit einem Eingangsmenü.

Hier wird die ermittelte Mindesttaktzeit angezeigt und dem Benutzer freigestellt, eine Unter- und Obergrenze für den Taktzeitbereich einzugeben, für den die Abtaktung ausgeführt werden soll. Dabei kann ausgehend von der geplanten Jahresstückzahl entsprechend Gleichung (9) die erforderliche Taktzeit berücksichtigt werden.

Zusätzlich wird bei der vollständigen Enumeration die Anzahl der Schritte abgefragt, um bei komplexen Aufgabenstellungen die sich potenzierenden Kombinationsmöglichkeiten nach oben hin einzuschränken. Dadurch wird erreicht, daß die Anzahl der Enumerationen bei der erreichten Grenze abgebrochen wird, ohne die bis dahin ermittelten Ergebnisse zu verlieren. Während des Berechnungsvorganges werden die jeweils erreichte Taktzeit, Stationsanzahl und zugehörige Verlustzeit visualisiert. Die Ergebnisse des Optimierungslaufes umfassen:

- Stationsbelegung mit Teilverrichtungen,
- Auslastungsstatistik je Station,
- Gesamtstatistik je Projekt und
- Verlustzeitverlauf über dem berechneten Taktzeitbereich.

Beispiele hierzu sind in den Bildern 7-7, 7-10 und 7-12 dargestellt. Die weitere Einbindung dieser Ergebnisse in den Projektierungsablauf sollen die folgenden Kapitel verdeutlichen.

6.4 Das Programmpaket PLASMA

Die bekannten Methoden und Verfahren zur Planung von Montagesystemen bauen nach der Montageaufgabenbeschreibung eine Montagefunktionsstruktur auf [59]. Dabei werden die Montagetätigkeiten in die Funktionselemente nach der VDI-Richtlinie 2860 [92] zergliedert. Auch bei den rechnergestützten Verfahren erfordert diese Vorgehensweise umfangreiche Kenntnisse und spiegelt in seinen Ergebnissen das Know-how des jeweiligen Planers wider. Neben der anzuwendenden Montagetechnik müssen dabei auch Formen, Abmessungen und Eigenschaften der zu montierenden Einzelteile bzw. Baugruppen berücksichtigt werden.

In einem weiteren Schritt werden dann meist in Katalogen Geräte ausgewählt, die in der Lage sind, Lösungsträger für die aufgestellten Funktionsketten zu repräsentieren.

Können keine geeigneten Geräte ermittelt werden, so wird bereits an dieser Stelle der Einstieg in Konstruktion und Feinplanung notwendig, um eine Lösung herbeizuführen. Sei es durch Umkonstruktion des Produktes (und damit Anpassung an die vorhandenen technischen Möglichkeiten) oder sei es durch Entwicklung neuer Montagegeräte, in beiden Fällen muß der Planer in eigenständige Problemfelder einsteigen mit den damit verbundenen Abweichungen vom eigentlichen Projektierungsziel.

Im Rahmen der Projektierung von Montagesystemen kann eine derartige Vorgehensweise nicht sinnvoll sein, da mit relativ geringem Aufwand erste Projektdaten gewonnen werden sollen.

Das Programmpaket PLASMA unterstützt ausgehend von den Ergebnissen der vorangegangenen Projektierungsschritte den Planer bei der Bildung von Montagesystemen, wobei besonderer Wert auf die symbolhafte Darstellung möglicher Systemlösungsvarianten gelegt wird.

6.4.1 Aufgaben und Zielsetzung der Funktionszuordnung

Für die Projektierung von Montagesystemen ist die Betrachtung von globalen Funktionsträgern ausreichend. Der Montageaufgabenstellung entsprechend wird in PLASMA eine Funktionszuordnung in den Gruppen:

- Transportieren,
- Weitergeben,
- Zuführen,
- Bewegen und
- Fügen

durchgeführt (Bild 6-29).

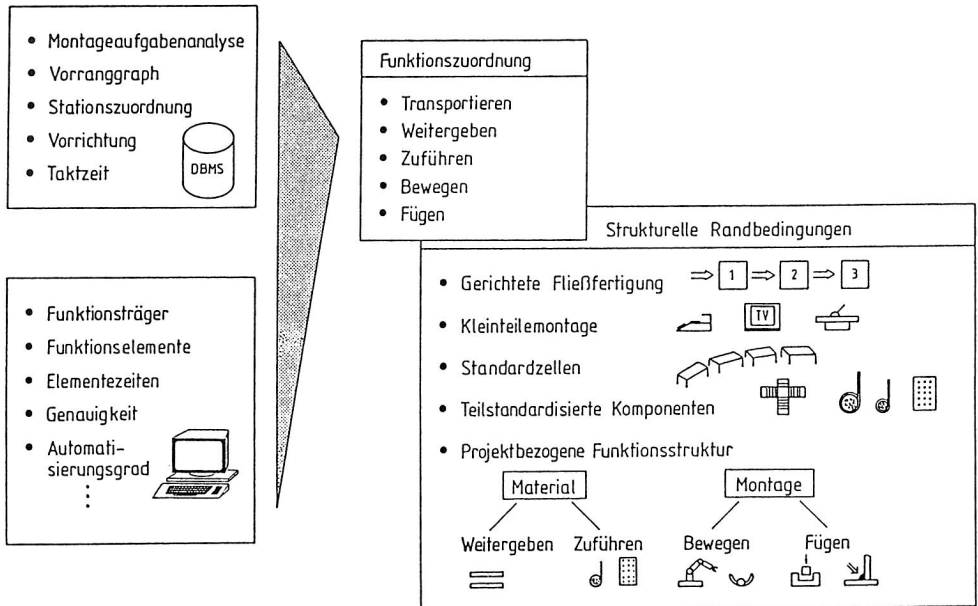


Bild 6-29: Projektierungsfeld Funktionszuordnung

Diesen Funktionsgruppen sind logisch Funktionsträger zugeordnet, die wiederum aus einer Menge von Funktionselementen be-

stehen. Die Funktionselemente sind mit Attributenlisten versehen, die dem jeweiligen Planungsfortschritt angepaßt und beliebig erweiterbar sind, um gegebenenfalls neuen Erkenntnissen oder Planungsrestriktionen gerecht werden zu können.

Bei der Funktionszuordnung sind einige strukturelle Randbedingungen zu berücksichtigen, die für Montagesysteme in der Elektro- und Feinwerktechnik typisch sind:

- gerichtete Fließfertigung,
- Kleinteilmontage,
- Standardzellen, Module und
- teilstandardisierte Komponenten (Funktionsträger).

Eine weitere Randbedingung ist die projektbezogene Funktionsstruktur. Sie differenziert global in die beiden Aufgabenfelder:

- Material und
- Montage.

Dem Aufgabenfeld Material sind die Funktionselemente für Weitergeben und Zuführen, dem Feld Montage für Bewegen und Fügen zugeordnet.

Die Zielsetzung für das Programmpaket PLASMA ist damit gegeben durch das Problemfeld der Funktionszuordnung zu Teilverrichtungen unter restriktiven Randbedingungen.

6.4.2 Programmaufbau und Menüstruktur

Das Programmsystem PLASMA ist in vier Module gegliedert (Bild 6-30), denen jeweils ein abgeschlossener Aufgabenumfang zugeordnet ist. Im Funktionseditor werden unter Zugriff auf das Datenbankmanagementsystem die Funktionselemente eingetragen und dabei mit den entsprechenden Attributen versehen.

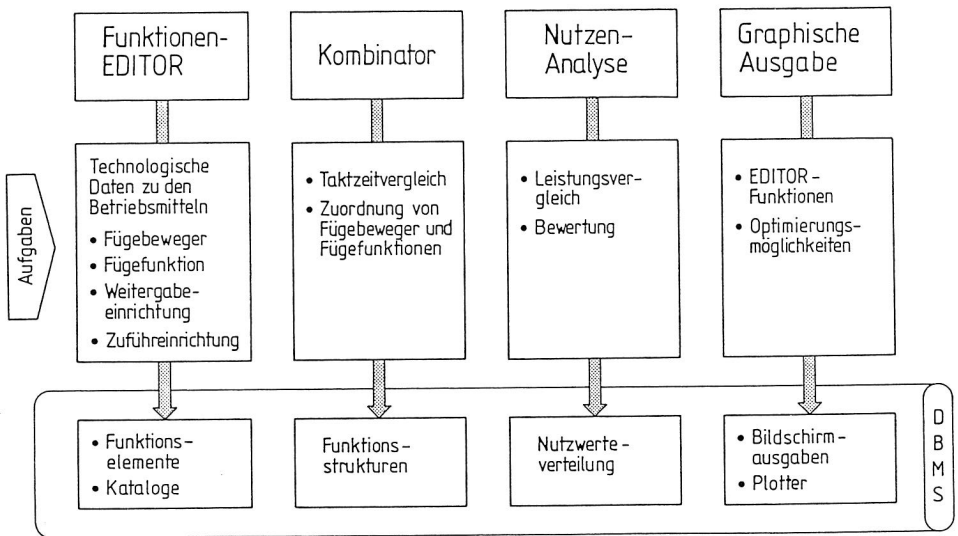


Bild 6-30: Menüstruktur des Funktionszuordnungsprogramms PLASMA

Das Kombinationsmodul bearbeitet die Funktionselementezuordnung und generiert zu den Lösungsalternativen Funktionsstrukturen. Dabei wird zunächst nur ein Taktzeitvergleich für die Montagebewegungs- (Fügebeweger) und die Fügefunktionen durchgeführt.

Die Reduktion der so erstellten Lösungsalternativen geschieht in der Nutzenanalyse. Mit diesem Hilfsmittel werden ähnlich der Nutzwertanalyse [140] auch schwer quantifizierbare Bewertungskriterien einer Beurteilung zugänglich gemacht. Aus den sich ergebenden Nutzwertevertteilungen für die Lösungsalternativen können vom Benutzer oder automatisch vom Programmsystem die günstigsten Systemalternativen bestimmt werden.

Ein wichtiges Hilfsmittel zur Beurteilung der Projektierungsergebnisse stellt die graphische Präsentation dar.

Eine Vielzahl der rechnergestützten Planungsmethoden für Montagesysteme heben besonders auf ihre Möglichkeiten ab,

die geplanten Anlagen im 2D- oder 3D-Layout darstellen zu können [35,36,86,109]. Die Aussage von solchen Layouts kann jedoch an Bedeutung verlieren, wenn nicht die Leistungs- und Wirtschaftlichkeitsmerkmale der visualisierten Anlagen im Vordergrund stehen.

Für die Projektierungsphase von Montagesystemen und damit auch für diesen Programmschritt stehen im Gegensatz dazu die Leistungspräsentation und die möglichen grundsätzlichen Ablaufalternativen für die zu planende Montageanlage im Vordergrund. Dabei wird auf Standardmodule und Funktionsträgerkomponenten zurückgegriffen, über deren Leistungsmerkmale und Kosten gesicherte Erkenntnisse vorliegen.

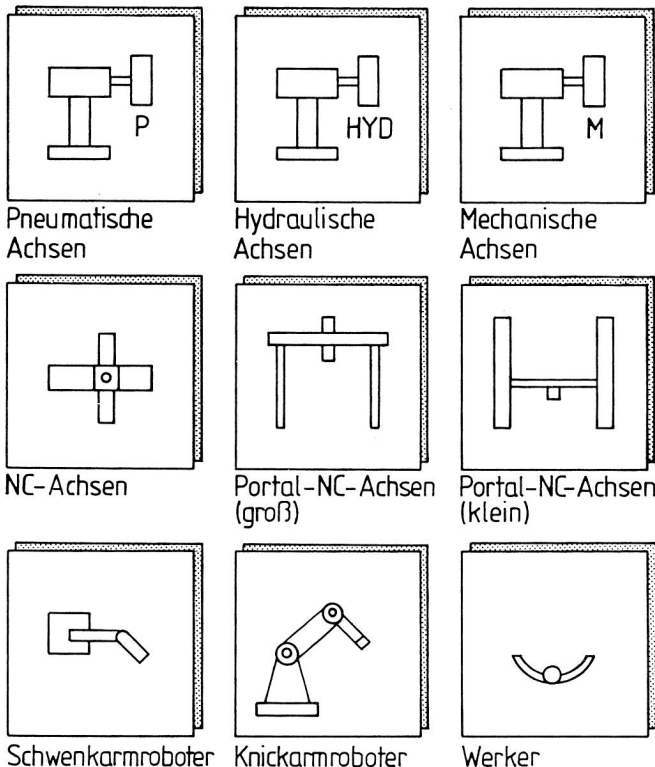


Bild 6-31: Beispiele für Funktionselementsymbole

Damit kann in diesem Stadium auf aufwendige 3D-Layouts verzichtet werden, die dann in späteren Detailplanungsphasen aber durchaus ihre Berechtigung behalten [35].

Die graphischen Ausgaben des Programmoduls PLASMA beschränken sich auf symbolische Repräsentation der Funktionselemente (Bild 6-31). Über einen Editor können diese Symbole jederzeit geändert, optimiert oder auch neu generiert werden.

Neben dieser graphischen Ergebnispräsentation werden Stücklisten und Leistungsmerkmalslisten zur abschließenden Entscheidungsfindung angeboten.

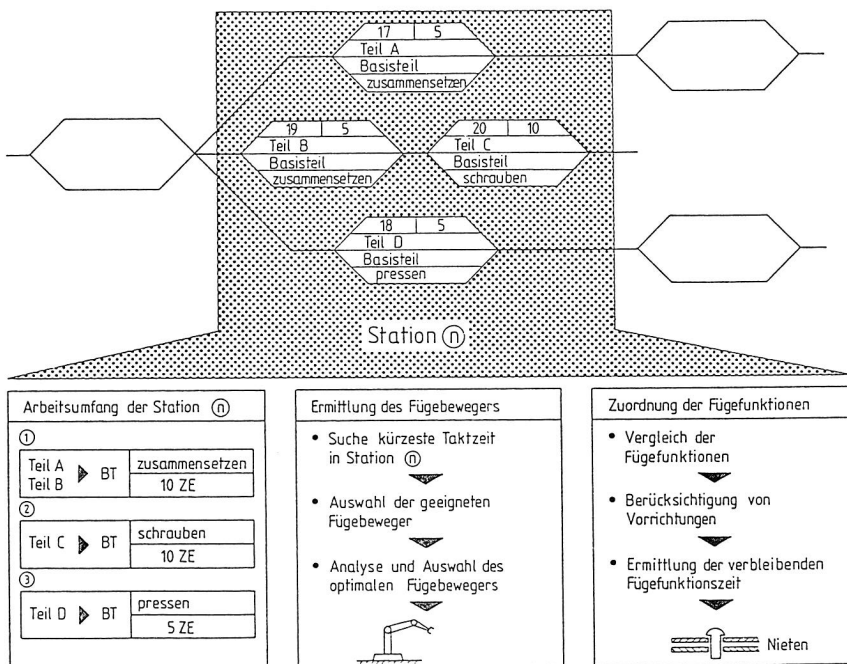


Bild 6-32: Funktionselementezuordnung

6.4.3 Funktionselementezuordnung

Die Abtaktung von Teilverrichtungsfolgen liefert als Ergebnis die Arbeitsumfänge der Stationen des projektierten Montagesystems. Die Modellbeschreibung macht es nun erforderlich, zu den Teilaufgaben geeignete Funktionsträger zu bestimmen.

Zunächst wird dazu ein geeignetes Gerät zur Ausführung der Montagebewegungen (Fügebeweger) für jede Station ermittelt (Bild 6-32).

Auswahlkriterium ist hierbei die Geschwindigkeit, um der geforderten Teilverrichtungszeit gerecht zu werden. In der Regel stehen nach diesem Schritt alternativ eine Reihe von Funktionsträgern zu Verfügung, die den Leistungsmerkmalen genügen. Eine weitere Einschränkung der Lösungsmöglichkeiten erfolgt durch vom Benutzer frei wählbare und gewichtbare Kriterien:

- | | |
|--------------------------|---------------|
| - Positioniergenauigkeit | - Lieferzeit |
| - Zulässige Last | - Lebensdauer |
| - Flexibilität | - Kosten |
| - Verfügbarkeit | |

Im darauffolgenden Schritt werden die für den Montageprozeß relevanten Funktionsträger ermittelt. Entsprechend den vorgegebenen Fügefunktionen und den codierten Vorrichtungen erfolgt eine Zuordnung von Funktionselementen zur Station. Auch hierbei wird verglichen, inwieweit die jeweiligen Vorgangszeiten der Funktionselemente eine Lösung in der vorgegebenen Stationszeit zulassen. Bei mehreren zulässigen Funktionselementelösungen erlauben die gleichen Kriterien wie oben eine vom Benutzer des Programms gesteuerte Einschränkung.

Die Auswahl geeigneter Funktionselemente erfolgt aus einem Funktionspool (Bild 6-33), der im DBMS integriert ist.

Funktionspool

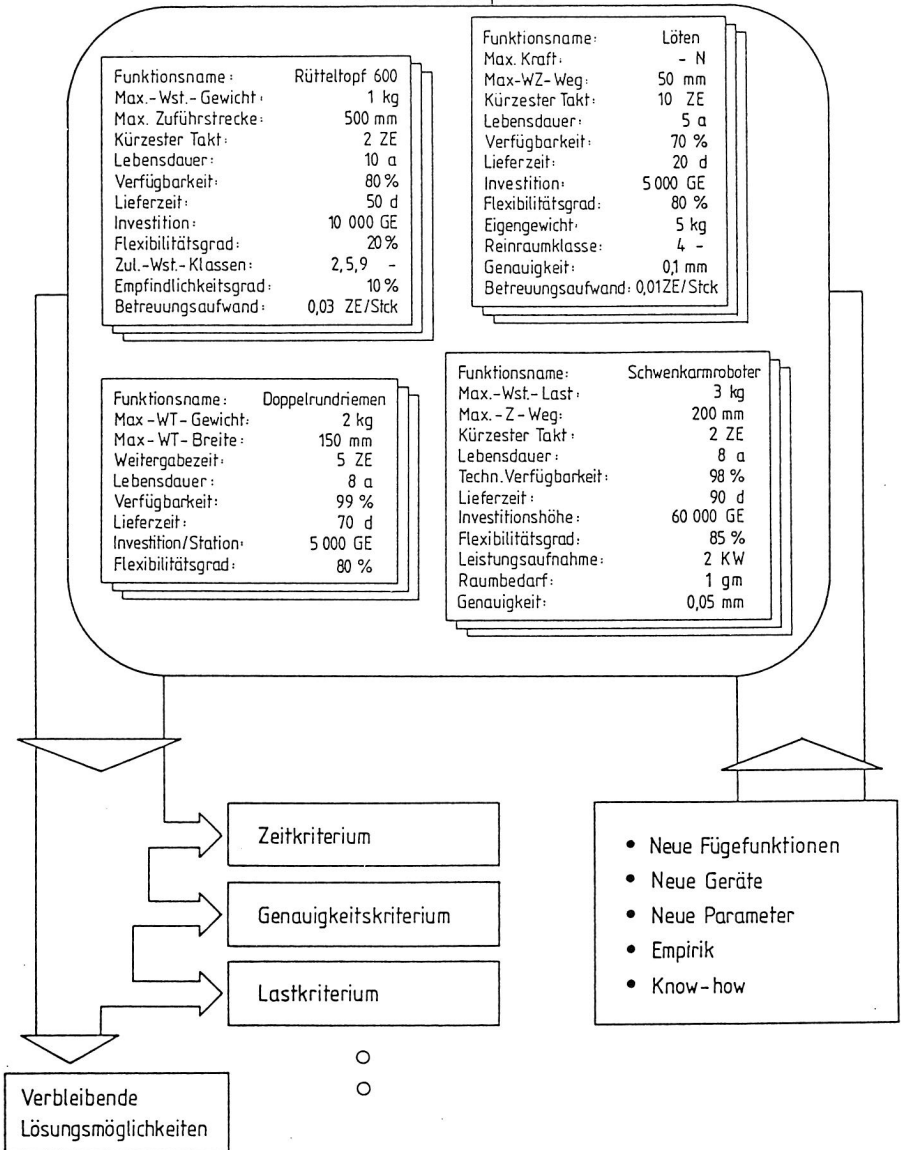


Bild 6-33: Ein- und Ausgänge zum Funktionspool

In den bestehenden Lösungselementepool können Erkenntnisse über neuartige Fügefunktionen und -geräte sowie veränderte Parameter, empirisches Wissen und Anwenderknowhow einfließen.

Bei der Funktionselementezuordnung werden die möglichen Lösungen schrittweise durch die bereits genannten Kriterien eingeschränkt, so daß nur noch zulässige Lösungsmöglichkeiten schließlich verbleiben.

Die Zuordnung selbst baut auf die Trennung in:

- montageprozeßspezifische und
- mutatorische Module.

Für die Projektierung müssen diese Module mit Funktionselementen versehen werden (Bild 6-34).

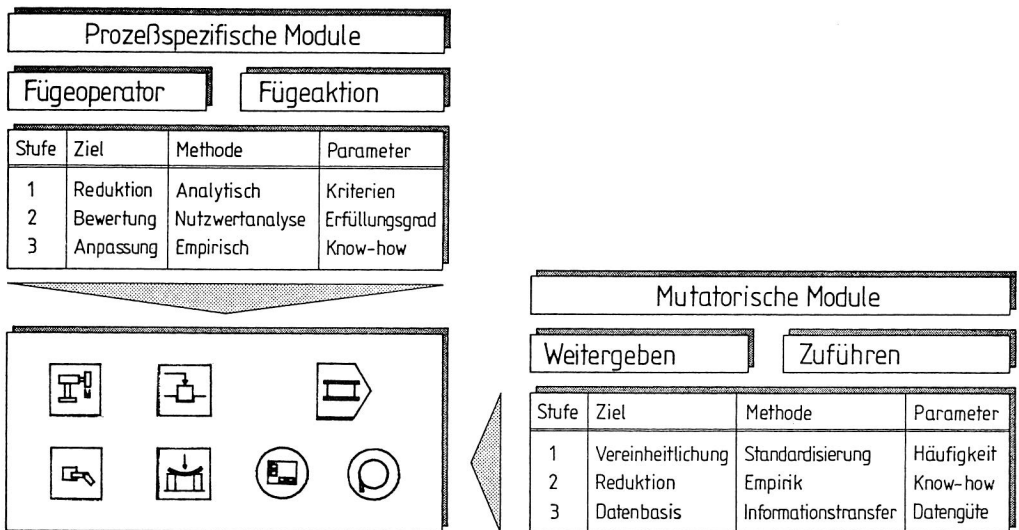


Bild 6-34: Modulare Funktionszuordnung

Aus den zur Verfügung stehenden Funktionselementen werden in drei Stufen die zulässigen Elemente ausgewählt.

Bei den prozeßspezifischen Modulen werden in der ersten Stufe mit analytischen Berechnungen unter Anwendung von Leistungskriterien die Elemente beurteilt und reduziert. Mit einer

Nutzwertanalyse lassen sich in der zweiten Stufe die analytisch schwer faßbaren Kriterien beurteilen. Schließlich berücksichtigt die dritte Stufe das Anwenderknowhow, indem hier durch gezielte Eingaben eine Anpassung der Lösungen an Erfahrungswerte ermöglicht wird.

Die zu montierenden Einzelteile und Baugruppen müssen zur Durchführung des eigentlichen Montageprozesses bewegt, das heißt transportiert, weitergegeben oder zugeführt werden.

Diese mutatorischen Module werden ebenfalls in drei Stufen bearbeitet. Zunächst kann mit den Ergebnissen aus Standardisierungsmaßnahmen eine Vereinheitlichung der Funktionselemente erreicht werden.

Da die konkrete Bestimmung von Geräten für Weitergabe- und Zuführaufgaben einen hohen analytischen Aufwand mit sich bringt, werden in der zweiten Stufe die Funktionselemente empirisch reduziert, wobei hier wieder das Anwenderknowhow zum Tragen kommt.

Abschließend werden die mutatorischen Funktionselemente in Datenstrukturen zusammengefaßt, um auch für spätere Projektierungsaufgaben den Wissens- und Informationstransfer zu gewährleisten.

6.4.4 Funktionselementezuordnung bei Produktvarianten

Wie schon bei den vorausgegangenen Programmodulen ist es auch bei der Funktionselementezuordnung erforderlich, für jede Montageproduktvariante die Projektierung getrennt durchzuführen.

Betrachtet man ein verkettetes Montagesystem, so besteht dies in der Regel aus einer Aneinanderreihung von Montagezellen (analog: Stationen). Entsprechend Bild 6-35 setzen sich die Elemente einer Station oder Montagezelle MZ_n aus den Lösungs-

komponenten E_n zusammen, die für eine Produktvariante ermittelt wurden.

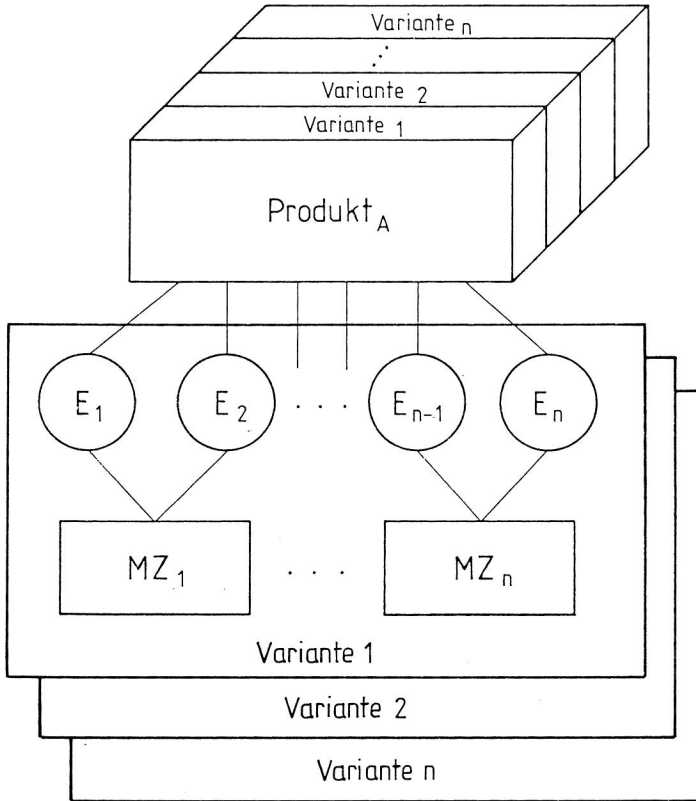


Bild 6-35: Zuordnung bei Produktvarianten

Andere Varianten bestehen dann in der Regel auch aus nicht-identischen Elementen. KALDE [59] schlägt in diesem Zusammenhang die Entwicklung eines gemeinsamen Lösungsraumes vor, dessen Bestandteile in der Lage sind, sämtliche Produktvarianten bearbeiten zu können.

Diese Vorgehensweise ist nur bedingt anwendbar und auch bei Betrieben mit variantenreicher Montage nicht immer sinnvoll.

Die ABC-Analysen von Stückzahlen und Loshäufigkeiten in diesen Betrieben verdeutlichen, daß eine Anpassung der Montagesysteme nur an die sogenannten A-Teile bzw. teilweise B - Teile notwendig erscheint [26].

Damit reduziert sich die Funktionselementezahl pro Station auf das erforderliche Mindestmaß.

Eine andere Vorgehensweise zur Lösung des Problems der variantenangepaßten Montagesysteme stellt die konstruktive Entwicklung von Produktvarianten dar, die auf variantenunabhängigen Montagesystemen gefertigt werden können.

Unter wirtschaftlichen Aspekten muß die letztgenannte Methode vorrangig in Betracht gezogen werden, da auch in den Betrieben niemand variantenflexible Montagesysteme betreiben möchte, deren Kapitaleinsatz bei einfachen konstruktiven Produktänderungen um ein vielfaches gesunken wäre.

Nach den so gefundenen und durch das rechnergestützte Projektierungsmodell ermittelten Lösungskomponenten muß im nächsten Schritt die Beurteilung der Wirtschaftlichkeit für das geplante System erfolgen.

6.5 Das Programmpaket KAPITAL

Die rechnergestützte Aufbereitung des angepassten Wirtschaftlichkeitsbeurteilungsmodells und damit die Bewertungsmöglichkeit der vorangegangenen Projektierungsschritte erfolgt im Programmodul KAPITAL.

Es vereint die verschiedenen Ablaufschritte und Betrachtungsmöglichkeiten, um ausgehend von den in der Projektierungsphase vorliegenden Daten eine Beurteilung der Projektwirtschaftlichkeit zuzulassen.

Besondere Berücksichtigung findet dabei die Aufnahme von Parametern, die infolge der notwendigen integralen Projektbetrachtung in das Modell einfließen.

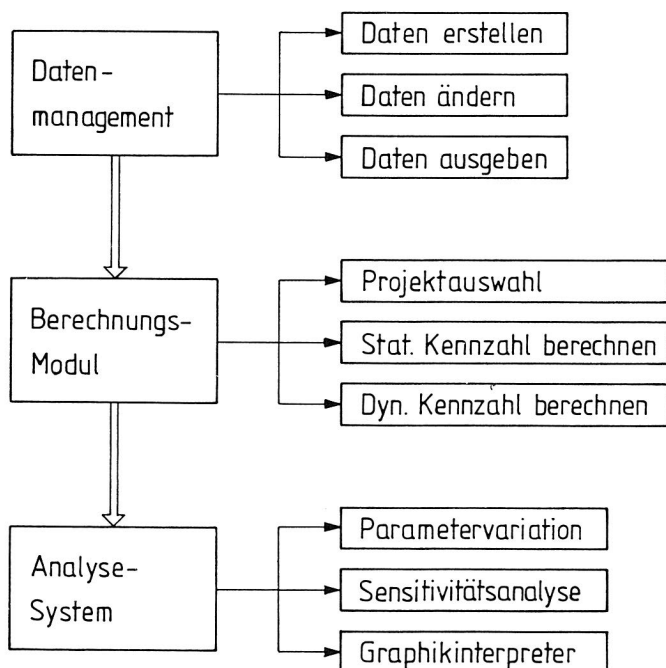


Bild 6-36: Ablaufstruktur des Programmoduls KAPITAL

Mit dem Programmsystem soll dem Benutzer ein Hilfsmittel angeboten werden, um neben der üblichen qualitativen Bewertung von Projekten eine Wirtschaftlichkeitsbetrachtung auf der Basis monetärer Werte durchzuführen.

Für den Anwender ist es nicht mehr erforderlich, die Detailrechnungen zu bearbeiten, dennoch sind ausreichende Kenntnisse der Wirtschaftlichkeitsrechnung unerlässlich, da ansonsten die erforderliche Interpretation der Parameterzusammenhänge und Ergebnisdaten zu Fehlern führen kann.

Allerdings waren diese Fehlinterpretationen auch bei manuell erstellten Kosten- und Investitionsrechnungen möglich.

Ein mit dem Grundwissen der Wirtschaftlichkeitsrechnung geschulter Programmnutzer wird in der Regel keinerlei Probleme mit der Ergebnisinterpretation haben, zumal eine übersichtliche Programmstruktur ihn dabei unterstützt.

6.5.1 Ablaufstruktur des Programmsystems

Der Aufbau und die Organisation innerhalb des Programmoduls KAPITAL ist in Bild 6-36 wiedergegeben.

Wie in den vorangegangenen Modulen wird auch hier zunächst eine Schnittstelle zum Datenbankmanagementsystem angeboten.

Hier wird dem Benutzer ermöglicht, Daten zu erstellen, zu ändern oder auszugeben, wobei die Daten, die in Vorläufermodulen schon abgelegt wurden, den weiteren Berechnungen zur Verfügung gestellt werden.

Im Berechnungsmodul wird das zu bearbeitende Projekt ausgewählt und statische bzw. dynamische Kennzahlen berechnet. Die dabei zur Anwendung kommenden Verfahren entsprechen den Methoden, die in Kapitel 5 vorgestellt wurden.

Grundsätzlich unterscheiden sich im Programmodul KAPITAL die statische und dynamische Berechnung durch ihre Zielsetzung bei der Ergebniserstellung.

Im Bild 6-37 sind jeweils für die statische und dynamische Berechnung die drei Ablaufstufen und die zugehörigen Datenstrukturen dargestellt. Für den Fall der statischen Berechnung einer der Wirtschaftlichkeitskennzahlen:

- Kosten pro Jahr,
- Maschinenstundensatz und
- Stückkosten

werden nur die Kapitaleinsatzdaten für ein Einzelprojekt betrachtet.

In den sich anschließenden Analyseschritten werden zeitdeterminierte Kostengrößen wie:

- Einsatzdauer,
- Nutzungsdauer und
- Ausfalldauer

vom Benutzer variiert. Dabei kommen betriebsinterne Werte oder empirische Daten zum Tragen. Schließlich werden in der dritten Stufe Betriebs-, Lohn- und Instandhaltungskosten untersucht. Dabei können die für das Einzelprojekt determinierten Werte in Grenzen variiert und die Auswirkung auf eine der Kennzahlen beobachtet werden.

Die dynamischen Wirtschaftlichkeitsberechnungsverfahren unterscheiden sich grundsätzlich von den statischen Verfahren durch die ihnen implizite Betrachtung von Differenzkosten.

Dazu ist es erforderlich, die Kapitaleinsatzdaten von mindestens zwei Alternativen zu berücksichtigen. Im Regelfall steht dem neuen Projekt eine vorhandene Anlage oder der Istzustand in Form manueller Arbeitsplätze gegenüber. Wird ein vollkom-

men neues System projiziert, so sind zwei alternative Lösungsstrukturen gegenüberzustellen.

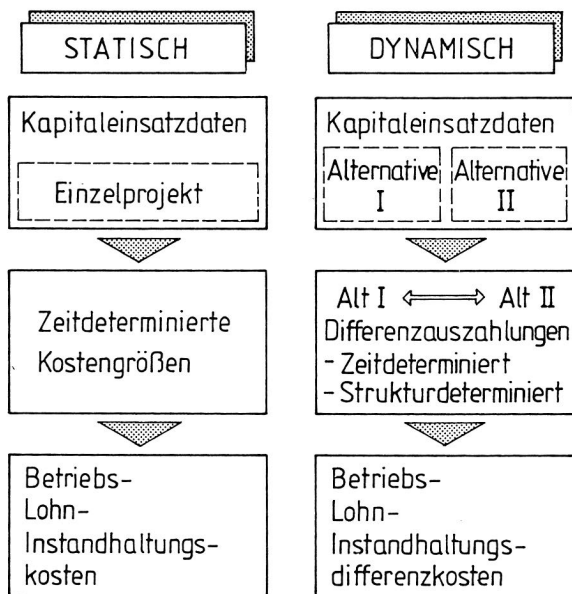


Bild 6-37: Verfahrens- und zugehörige Datenstruktur

In der ersten Stufe werden:

- Kapitalwert und
- Interner Zinsfuß

berechnet. Daneben können die auf Differenzauszahlungen basierenden Ergebnisse der:

- statischen Rentabilität und
- statischen Amortisationszeit

ermittelt werden. Sind mehr als zwei Alternativen zu berücksichtigen, müssen diese jeweils paarweise miteinander verglichen werden.

Im nächsten Schritt können für die Alternativen zeit- und strukturdeterminierte Differenzauszahlungen variiert werden. Insbesondere die strukturdeterminierten Werte ermöglichen in diesem Wirtschaftlichkeitsbeurteilungsmodell die Berücksichtigung der Aufwände und Erlöse, die sich durch eine integrale Projektbetrachtung einstellen. So können Produktqualitätsvorteile, Durchlaufzeitminimierung und Flexibilität mit in monetäre Größen einbezogen werden.

Ähnlich der Berechnung statischer Kennzahlen schließt die Ablaufstruktur mit der Möglichkeit, Betriebs-, Lohn- und Instandhaltungsdifferenzkosten zu variieren und ihre Auswirkung auf die Kennzahlen zu interpretieren.

6.5.2 Betrachtung der Rückflüsse

Für dynamische Wirtschaftlichkeitsberechnungsverfahren ist die Angabe der erwarteten Rückflüsse für den betrachteten Nutzungszeitraum von außerordentlicher Bedeutung.

Wird eine Kalkulation auf Produktebene durchgeführt, so ergibt sich der qualitative Rückflußverlauf entsprechend Bild 6-38.

Man rechnet im allgemeinen mit einer Anlaufphase, in der negative Rückflüsse, also Aufwände zu erwarten sind.

Im normalen Produktlebenszyklus werden die Rückflüsse nach der Anlaufphase bis zu einem Wendepunkt steigen und anschließend gegen Null sinken. Grundbedingung für eine wirtschaftliche Produktion ist, daß das Integral der Aufwände geringer ist als das der positiven Rückflüsse.

Zur Wirtschaftlichkeitsbeurteilung von Anlagen eignet sich diese Betrachtung kaum, da gerade die dynamischen Verfahren das zeitliche Eintreten von Rückflüssen stark berücksichtigen.

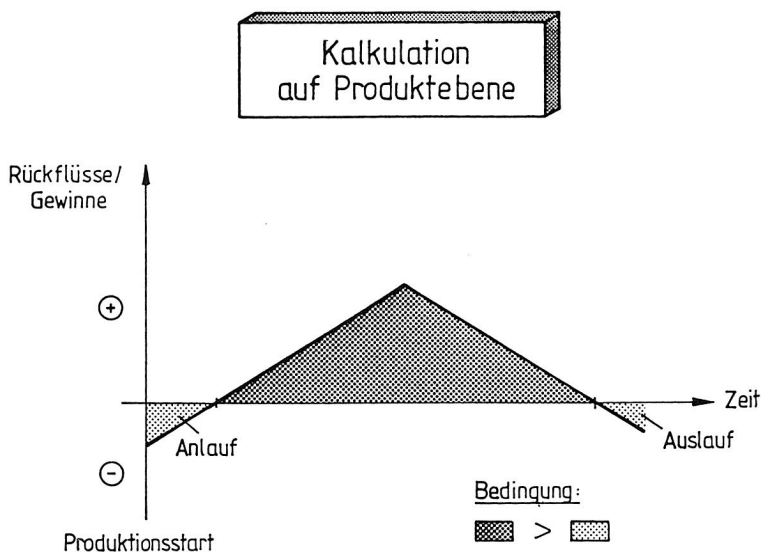


Bild 6-38: Qualitativer Rückflußverlauf auf Produktebene

Wie schon in Kapitel 5.2.3 angedeutet, verzichtet das hier vorgestellte Wirtschaftlichkeitsbeurteilungsmodell auf die herkömmliche Kalkulation mit fixen und variablen Kosten.

Um dennoch dem zeitlichen Verlauf der Rückflüsse gerecht zu werden, bietet das Modell die Möglichkeit an, über einen Quotienten unterschiedliche Rückflußverläufe nachzubilden (Bild 6-39).

Der Refluctaquotient r_t ist dabei definiert als:

$$r_t = \frac{\text{Einsparungen im letzten Nutzungsjahr}}{\text{Einsparungen im ersten Nutzungsjahr}} \cdot 100 [\%] \quad (25)$$

Entsprechend dieser Definition wird es nun möglich, Stückzahlentwicklungen, Lohn- und Preissteigerungsraten oder Struktureinflüsse mit zu berücksichtigen.

Durch die externe Angabe des Quotienten ergeben sich Rückflußverläufe über der Nutzungsdauer der Anlage, welche die unterschiedlichen Gegebenheiten in der Praxis widerspiegeln. Hohe Rückflüsse am Anfang deuten auf eine frühzeitige Gewinnphase hin, was bei kurzlebigen Produkten der Konsumgüterbranchen der Regelfall ist.

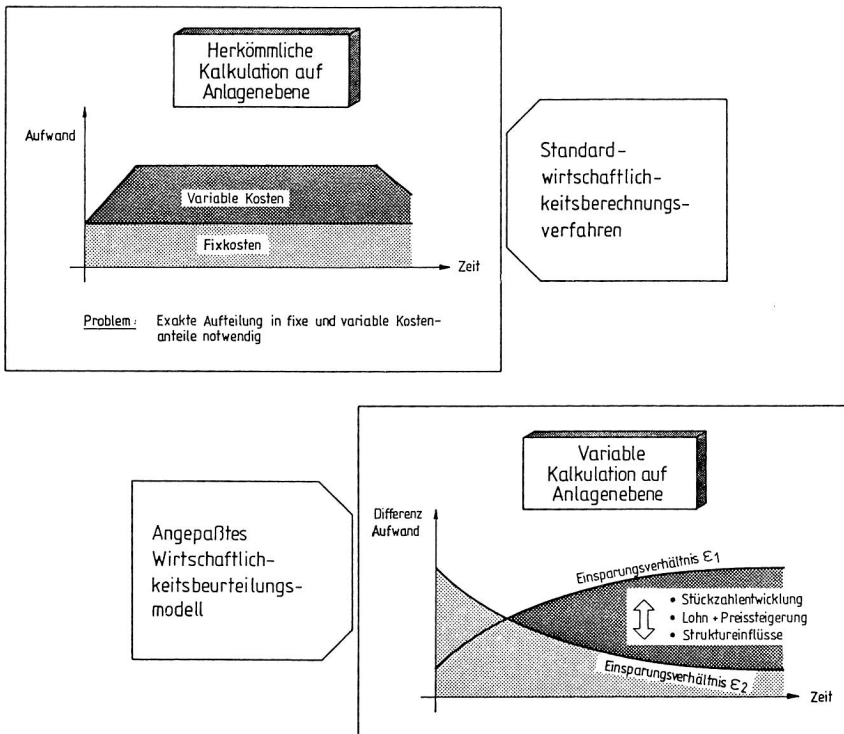


Bild 6-39: Anlagenkalkulation mit Refluctaquotient

Rückflüsse, die mit der Zeit zunehmen, repräsentieren Systeme aus Investitionsgüterbranchen, wobei hier die langfristigen Vorteile bei Lohn- und Strukturaufwänden zum Tragen kommen.

Damit wird es dem Benutzer entsprechend betriebsinterner Umstände durch die Eingabe eines Faktors bei der Wirtschaftlichkeitsberechnung ermöglicht, den ansonsten schwer abzu-

schätzenden und zu determinierenden Rückflußverlauf nachzubilden.

6.5.3 Kennzahlanalyse mittels Parametervariation

Die beiden Berechnungsverfahren zu Ermittlung von statischen oder dynamischen Wirtschaftlichkeitskennzahlen sind mit jeweils nur einem Ergebniskennwert nicht ausreichend, um bei der Projektierung von automatisierten Montagesystemen mit unsicheren Eingangsdaten eine befriedigende Entscheidungshilfe zu leisten.

Notwendigerweise muß ein angepaßtes Wirtschaftlichkeitsbeurteilungsmodell die Variation der Eingabedaten zulassen, um so deren Einfluß auf die Wirtschaftlichkeitskennzahl überprüfen zu können. Das Programmsystem KAPITAL bietet hierzu im Analysemodul die Möglichkeit.

Aus einer Grundmenge von Variationsdaten können vom Anwender jeweils zwei Parameter ausgewählt werden, die dann in der Variationsrechnung analysiert werden. Bild 6-40 gibt beispielhaft die Grunddatenmenge und die graphische Ergebnispräsentation der Variationsrechnung wieder. Grundsätzlich wird ein Grunddatenparameter zunächst über der betriebswirtschaftlichen Kennzahl variiert. Der Einfluß weiterer Grunddaten kann daneben durch Einführung eines Scharparameters berücksichtigt werden.

Im Beispiel wird zunächst untersucht, inwieweit eine Veränderung der vorgegebenen Nutzungsdauer von 5 Jahren Einfluß auf den Internen Zinsfuß ausübt. Naturgemäß muß bei einer längeren Anlagennutzungsdauer mit einem verbesserten Zinsfuß gerechnet werden, was die Programmergebnisse auch wiedergeben. Interessant ist es dann allerdings, gleichzeitig den Einfluß zu untersuchen, den die Rückflüsse auf die Kennzahl bedingen. Hier zeigt das Beispiel, daß bei einem Refluctaquotienten von 99.50%, also einem progressiven Rückflußverlauf, mit einem

höheren Zinsfuß gerechnet werden kann. Dieses Ergebnis spiegelt die höhere Bewertung von späten Rückflüssen bei der Internen Zinsfußberechnung wider.

Eine qualitativ andere Auswirkung auf den Internen Zinsfuß ergibt sich bei der Variation der Restwertdifferenz. Da dieser Parameter den Wiederverwendbarkeitsgrad bei automatisierten Montagesystemen repräsentiert, muß er bei der Wirtschaftlichkeitsberechnung entsprechend seines Stellenwertes Beachtung finden.

Die graphische Ergebnisdarstellung in Bild 6-40 macht deutlich, daß mit zunehmender Nutzungsdauer der Wiederverwendbarkeitsgrad an Bedeutung verliert. Eine mit umgekehrten Vorzeichen versehene Situation stellt sich bei der Variation der Lohndifferenzkosten ein. Hier steigt mit zunehmender Nutzungsdauer die positive Auswirkung einer personalarmen Produktion auf die Wirtschaftlichkeitskennzahl.

Die drei Beispiele zeigen, wie wichtig die Betrachtung der Umgebung einer zunächst ermittelten Wirtschaftlichkeitskennzahl ist. Um den in praxi auftretenden Abweichungen bei der Grunddatenmenge zu entsprechen, stellt die Analyse der singulären Kennzahlen durch Parametervariation ein geeignetes Modellbild dar.

6.5.4 Sensitivitätsanalyse

Die Parametervariation erlaubt die Analyse der Kennzahlenumgebung bei Grunddatenabweichungen. Ein weiterer Schritt zur Entscheidungsabsicherung kann getan werden, wenn die Wahrscheinlichkeit angegeben wird, mit der eine betriebswirtschaftliche Kennzahl bei unsicheren Grunddaten zu erwarten ist (Bild 6-41). Bei der Sensitivitätsanalyse versieht der Programmbenutzer die Elemente der Grunddatenmenge jeweils mit einer Sicherheitskennzahl, so daß eine Unsicherheitstabelle entsteht.

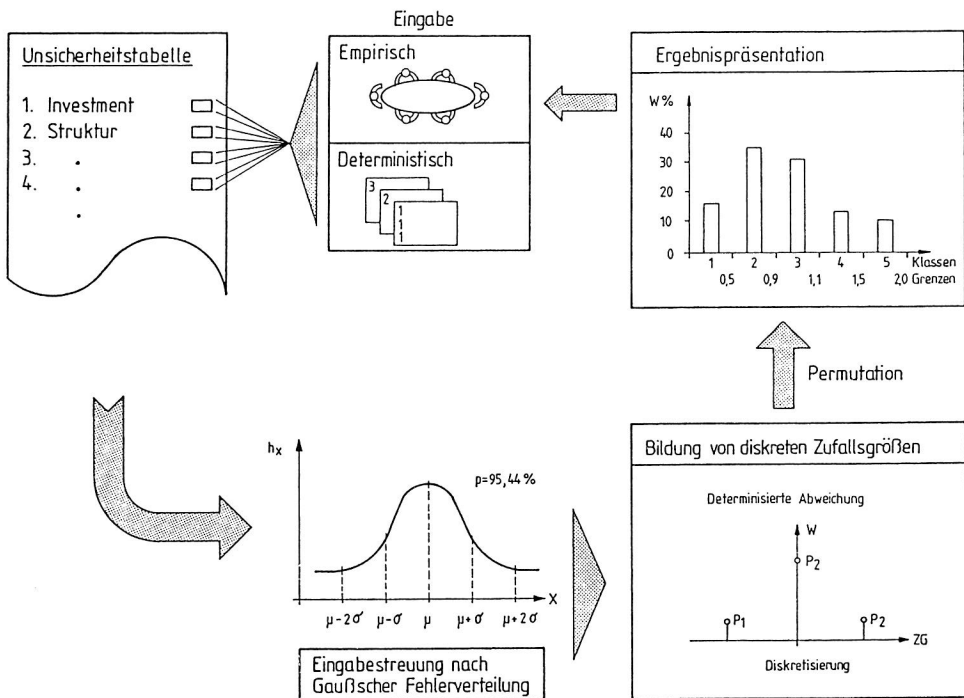


Bild 6-41: Modell der Sensitivitätsanalyse

Die Eingabe erfolgt in 5 Unsicherheitsstufungen, wodurch der Benutzer für jedes Grunddatum zum Ausdruck bringt, inwieweit der Ausgangswert als sicher bzw. als unsicher anzusehen ist.

Würden diese Unsicherheitsstufungen von im Grenzfall unendlich vielen Beobachtern angegeben, so erhielte man eine Eingabestreuung nach dem Gaußschen Fehlerverteilungsgesetz.

Stünde umgekehrt ein Eingabewert (Grunddatum) von vornherein fest, so würde die Verteilung zu einem Punkt mit der Wahrscheinlichkeit 1 entarten.

Die Gaußverteilungen werden im Programmmodul KAPITAL durch diskrete Zufallsgrößen repräsentiert. Interpretiert werden die Unsicherheitsstufungen als Mittelwerte der Verteilungen,

da diese vom Programmanwender als die für ihn am wahrscheinlichsten erscheinenden Werte anzusehen sind.

Neben dem Mittelwert ist für die Eindeutigkeit einer Normalverteilung noch die Standardabweichung σ notwendig. Der Wert von σ legt fest, ob eine schmale hohe oder breite flache Glockenkurve vorliegt.

Die Fläche unter der Glockenkurve zwischen zwei Werten auf der Abszisse entspricht der Wahrscheinlichkeit, daß die Zufallsgröße innerhalb dieser Grenzen liegt. Zwischen $(\mu - \lambda \cdot \sigma)$ und $(\mu + \lambda \cdot \sigma)$ besitzt jede Gaußverteilung eine definierte Fläche. So beträgt die Wahrscheinlichkeit, daß eine Zufallsgröße für $\lambda = 2$ in dem symmetrischen Intervall liegt, 95,44%.

Umgekehrt wird im Programmodul diese angenehme Eigenschaft der Normalverteilung zur Definition der Sicherheits- oder je nach Betrachtungsweise Unsicherheitsstufungen angewendet.

Für die unsicherste Stufe bedeutet dies, daß sich der Anwender zu 95,44% sicher ist, daß der geschätzte Wert um maximal 100% vom Mittelwert μ abweicht (μ entspricht dabei dem ursprünglich eingegebenen Grunddatum).

Damit lassen sich für die fünf möglichen Stufen folgende Abweichungen A angeben:

Stufe 1	A = 100%	(bezogen auf μ)
Stufe 2	A = 50%	
Stufe 3	A = 20%	
Stufe 4	A = 5%	
Stufe 5	A = 1%.	

Mit:

$$\sigma = \frac{A \cdot \mu}{100} \cdot 0.5 \quad (26)$$

ist für jeden Eingabewert eine Gaußverteilung definiert.

Unabhängig von dieser Verteilungsfunktion wird nun an den Stellen $(\mu - \sigma)$ und $(\mu + \sigma)$ diskretisiert. Damit ergeben sich drei Flächen, wobei die außenliegenden Anteile die Wahrscheinlichkeit von 0.1587 und die mittlere eine Wahrscheinlichkeit von 0.6826 repräsentieren.

Zur Berechnung der diskreten Zufallsgrößen werden die Flächenschwerpunkte herangezogen, wobei die Wahrscheinlichkeit, daß ein Wert rechts oder links vom Schwerpunkt liegt, gleich groß ist.

Für die drei Flächen ergeben sich entsprechend drei Zufallsgrößen, die bei der anschließenden Permutation Verwendung finden.

Hierbei wird die Gesamtheit der Zufallsgrößen vollständig permutiert, das heißt, jede Größe wird mit jeder Variation kalkuliert und so die Wirtschaftlichkeitskennzahl berechnet.

Die Ergebnispräsentation erfolgt in einem Wahrscheinlichkeitsdiagramm. Dabei wird in Klassen aufgeteilt die Wahrscheinlichkeit wiedergegeben, mit der die Wirtschaftlichkeitskennzahl in dem betreffenden Klassenintervall zu erwarten ist.

Die Wahrscheinlichkeitsverteilung stellt neben der Parametervariation eine weitere wichtige Entscheidungshilfe dar. Projektteams werden so in die Lage versetzt, schon in den ersten Planungsschritten Voraussagen über die zu erwartende Wirtschaftlichkeit neuer Montagesystemtechnologien bei unsicheren Ausgangsdaten zu machen.

Planungsbegleitend bietet das Programmsystem KAPITAL die Möglichkeit, die zunächst angenommenen Grunddaten weiter abzusichern und bei eventuell ungünstiger Entwicklung der Wirtschaftlichkeit rechtzeitig entgegenzusteuern.

Bild 6-42 gibt beispielhaft die Wahrscheinlichkeitsverteilungen für unterschiedliche Sicherheitsstufungen wieder. Die Ergebnisse zeigen, daß bezogen auf die Kenngröße Interner Zinsfuß auch bei unsicheren Eingabedaten eher mit einer günstigeren Wirtschaftlichkeit gerechnet werden darf.

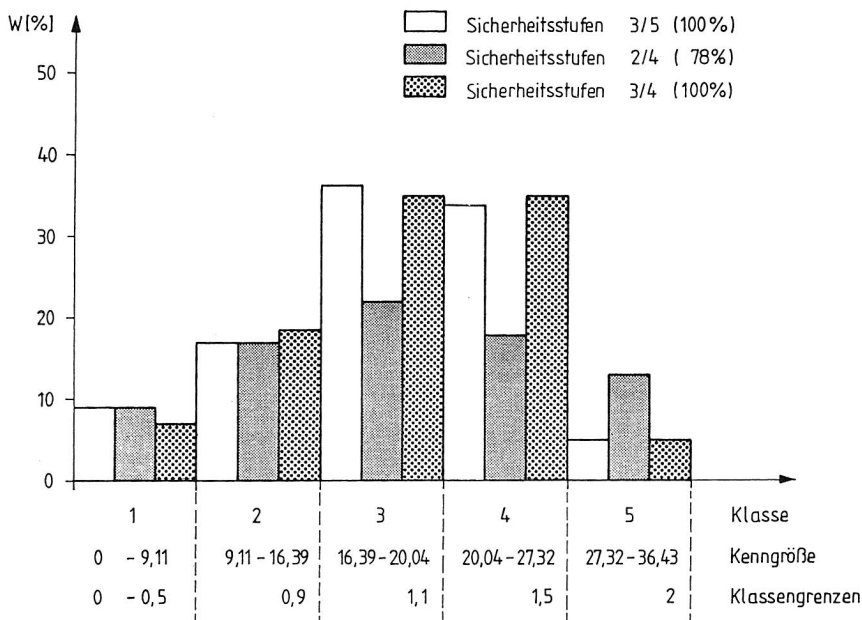


Bild 6-42: Beispielhafte Wahrscheinlichkeitsverteilung

6.5.5 Grenzen der Parameter- und Sensitivitätsanalyse

Die beiden Verfahren der Parameter- und Sensitivitätsanalyse besitzen grundsätzlich nicht die Möglichkeit, Abhängigkeiten der Parameter und Grunddaten untereinander rechnerintern zu berücksichtigen.

Wird beispielhaft die wirtschaftliche Nutzungsdauer eines Montagesystems verringert, da die Produktlebenszyklen sich verkürzen, so ist naturgemäß mit einem höheren Restwert der

Anlage zu rechnen. Andererseits kann der Wiederverwendbarkeitsgrad und damit der Restwert eines Montagesystems bei stark produktspezifischer Anlagenkonstellation so gering sein, daß er von der Anlagennutzungsdauer als unabhängig zu betrachten ist.

Hier verbleibt ein wichtiges Feld für den betriebswirtschaftlich geschulten Programmanwender, solche Einflüsse zu berücksichtigen oder bewußt zu manipulieren, um den neuen Anforderungen seitens der integralen Projekt- und damit Wirtschaftlichkeitsbetrachtung in den Betrieben nachzukommen.

Des weiteren werden bei der Ergebnispräsentation die Wahrscheinlichkeiten in Klassen eingeteilt. Fehler, die z.B. bei der Einordnung der Ergebnisse in Klassen und durch die Wahl der Klassengrenzen gemacht werden, verlieren durch das Gesetz der großen Zahlen (3^{15} Permutationen) ihre Bedeutung.

Weit problematischer dürfte es sein, daß die Sicherheitsstufungen der Einschätzung des Benutzers unterliegen. Hierbei versagt beim Ungeübten schnell das Vorstellungsvermögen über die damit erwirkten Zufallsgrößen.

Im Fazit ergibt sich durch die Sensitivitätsanalyse für den Systemprojektierer und Programmanwender die Möglichkeit, weniger exakte, quantitative Ergebnisse zu erzielen, als vielmehr qualitative Aussagen zu machen, über zu erkennende und zu beurteilende Tendenzen bei der Wirtschaftlichkeit.

7. Anwendungsbeispiel für das Projektierungsmodell

Für den praxisgerechten Aufbau des rechnerintegrierten Projektierungsmodells ist es von großer Bedeutung, durch Anwendungsbeispiele nachzuweisen, daß mit dem Modell die gewünschten Vorteile im Projektierungsablauf erzielt werden.

Der Einsatz des Projektierungsmodells im Industriebetrieb hängt wie bei vielen neuen Softwareprodukten in der Regel davon ab, ob es zu:

- Kosteneinsparungen,
- Zeitverkürzungen und
- Ergebnisoptimierungen beiträgt.

In Bild 7-1 ist die Zielsetzung bei der Eingabe eines Praxisbeispiels dargestellt.

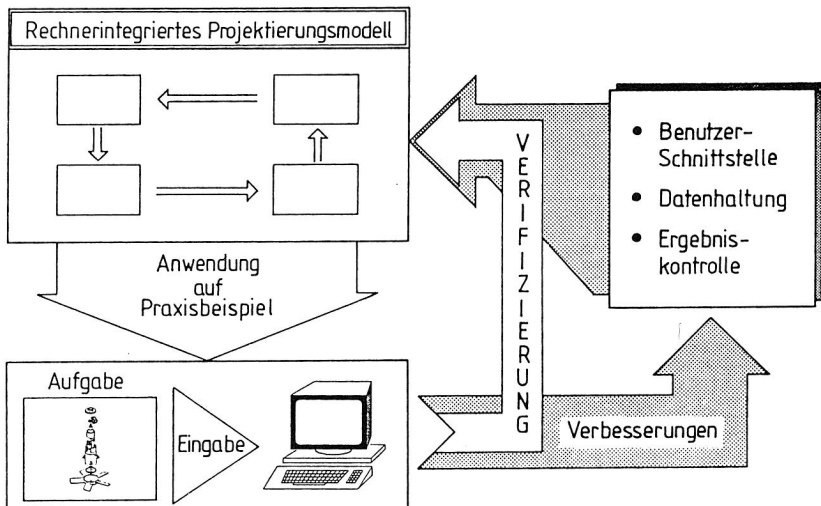


Bild 7-1: Zielsetzung des Anwendungsbeispiels

Einerseits ist die Anwendung der implementierten Software unabdingbar, um das Modell des Projektierungsablaufs zu veri-

fizieren, andererseits sind auch Erkenntnisse über Verbesserungsmöglichkeiten zu erwarten.

So wurden im Laufe der Modellentwicklung Änderungen an Benutzerschnittstelle, Datenhaltung und Ergebniskontrolle durchgeführt.

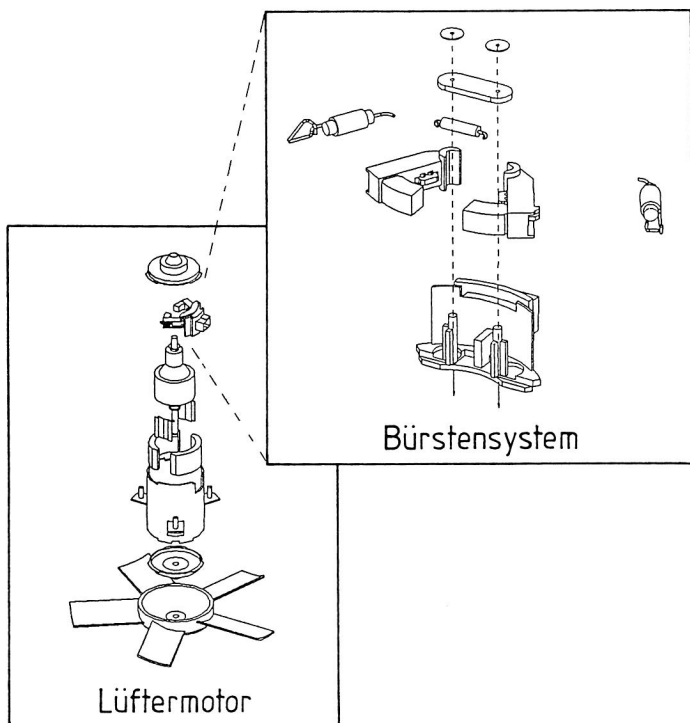


Bild 7-2: Montageaufgabe

Im folgenden Kapitel soll anhand einer Aufgabenstellung die Anwendbarkeit und Vorteilhaftigkeit des Modells zur rechnerintegrierten Projektierung von automatisierten Montagesystemen demonstriert werden.

7.1 Aufgabenstellung

Für das Projektierungsmodell wurde als Aufgabenstellung die Montage einer Elektrokleinmotorbaugruppe mit einer Vorgabe von zwei Millionen Stück pro Jahr gewählt.

Der Motor besteht aus den Baugruppen Gehäuse, Dauermagnete, Steckfedern, Läufer, Bürstensystem und Lagerschilde. Zusätzlich werden variantenspezifische Ventilatoren angebracht, um den Motor für den Einbau zu vervollständigen.

Die Bürstensystembaugruppe wurde bei Projektierungsbeginn auf Handarbeitsplätzen vormontiert. Diese Montageaufgabe soll sinnvoll, d.h. wirtschaftlich, flexibel und integrationsfähig automatisiert werden.

Eine wichtige Voraussetzung zur Bewältigung dieser Aufgabenstellung ist die montagegerechte Konstruktion der Baugruppe. Wie das Bild 7-2 verdeutlicht, waren bei dem bestehenden Produkt einige wesentliche Gesichtspunkte der montagefreundlichen Gestaltung vernachlässigt worden.

Um dennoch den Istzustand zu dokumentieren und später auch kostenmäßig betrachten zu können, ist in Bild 7-3 der Vorranggraph für die Bürstenbaugruppe vor der Umkonstruktion wiedergegeben. Anhand der aus der vorliegenden Konstruktion sich ergebenden Montagekomplexität läßt sich z.B. auch nachweisen, wie groß die Kostenverantwortung in den Entwicklungsabteilungen ist.

Nach der rechnerunterstützten Montageaufgabenanalyse sollen mit dem Projektierungsmodell alternative Lösungskonzepte zur Automatisierung der Baugruppenmontage erarbeitet werden.

Dazu gehören:

- Planvorgabezeitberechnungen und Abtaktungen bei verschiedenen Taktzeiten,

- Gegenüberstellung heuristischer und enumerativer Abtaktungsergebnisse,
- Funktionslayout der Alternativen und
- Bewertung mit dem Wirtschaftlichkeitsbeurteilungsmodell.

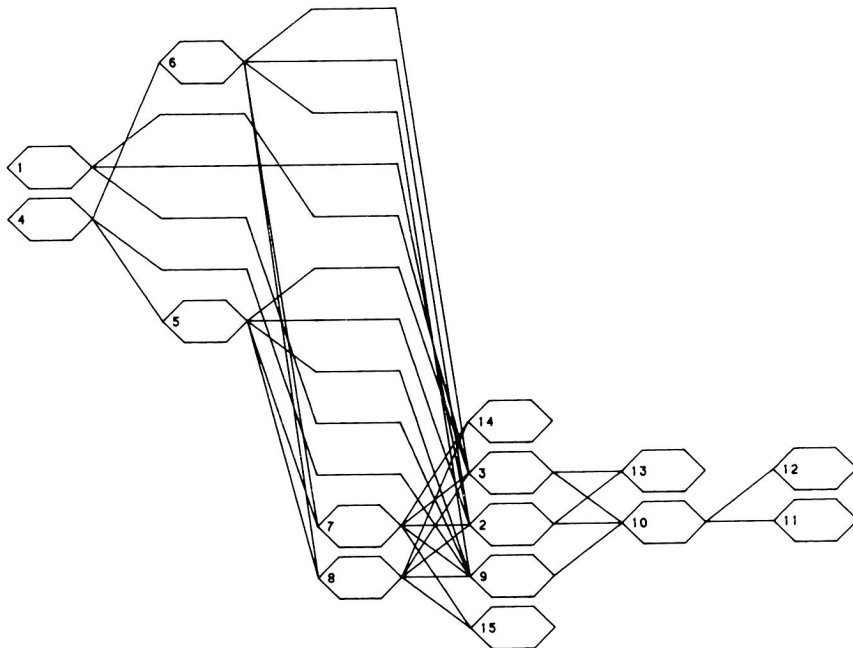


Bild 7-3: Vorranggraph im Istzustand

7.2. Planvorgabezeitberechnungen und Abtaktungen

Nach Umkonstruktion und Weiterentwicklung des Produkts ergibt sich die in Bild 7-4 dargestellte Montageaufgabe.

Dabei ist die Füge­richtung vereinheitlicht und die Teilezahl reduziert worden. Auch die besonders automatisierungsfreundlichen Snap-In-Verbindungen wurden realisiert.

Der Einstieg in das Projektierungsmodell erfolgt durch die Eingabe der Tätigkeitsliste. Dabei kann der Projektierer

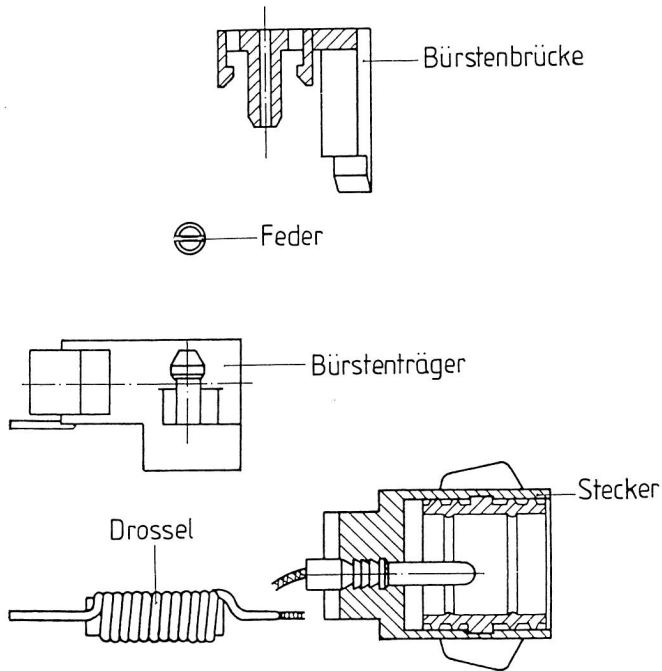


Bild 7-4: Montageskizze des automatisierungsgerecht gestalteten Bürstensystems

Tätigkeits-Nr.	Montageobjekt	Basisteil	Tätigkeit / Fügefunktion	Planvorgabezeit	
				BE	sec.
1	Drossel	Stecker	crimpen	85	5.1
2	Drossel	Stecker	crimpen	70	4.2
3	Stecker/Drossel	Werkstückträger	zusammensetzen	65	3.9
4	Bürstenträger	Drosseln	zusammensetzen	65	3.9
5	Feder	Bürstenträger	einsetzen	85	5.1
6	Bürstenbrücke	Stecker/Bürstentr.	zusammensetzen	60	3.6
7	Bürstenträger	Drossel	crimpen	85	5.1
8	Bürstenträger	Drossel	crimpen	85	5.1
9	Bürstensystem	Palette	zusammensetzen	65	3.9
				665 BE	39.9 sec.

1 BE = 1 Workfaktor-BLOCKELEMENT = 0.06 sec

Bild 7-5: Tätigkeitsliste

zunächst in beliebiger Folge die Montageaufgaben durch die Parameter Montageobjekt, Basisteil und Tätigkeit beschreiben.

Für das neue Bürstensystem ist die so erstellte Tätigkeitsliste in Bild 7-5 wiedergegeben. Zu den Tätigkeiten wurden anschließend die Planvorgabezeiten berechnet. Die Werte sind ebenfalls in der Liste aufgenommen. Unabhängig von der geforderten Stückzahl können nun auf der Basis des neuen Vorranggraphen (Bild 7-6) erste Abtaktungen über einen größeren Taktzeitbereich durchgeführt werden.

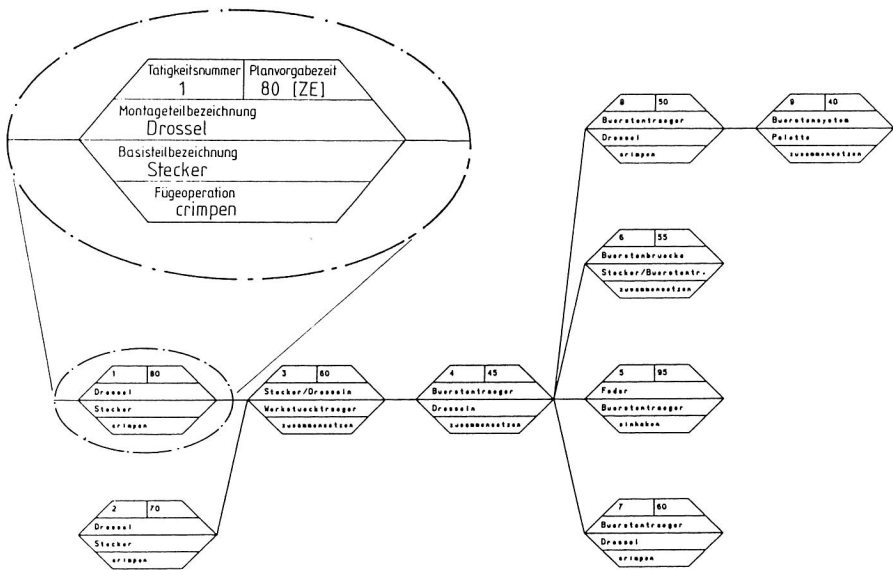


Bild 7-6: Vorranggraph "Neues Bürstensystem"

Dazu werden in einem Diagramm die bei einer Taktzeit berechneten Verlustzeitwerte (vgl. t_{TA} in Gl.2) über der Taktzeit aufgetragen. Beginnend bei der kleinstmöglichen Taktzeit, die durch die größte Teilverrichtungszeit gegeben ist, werden die Verlustzeitwerte bis zur größtmöglichen Taktzeit, die durch die Summe aller Teilverrichtungszeiten gegeben ist, aufgetragen. Mit größer werdender Taktzeit verringert sich naturgemäß die produzierte Stückzahl aber auch die Anzahl der Arbeits-

stationen, da der Gesamtarbeitsumfang bei längerer Taktzeit auf weniger Arbeitsplätzen bewältigt werden kann.

Ausgehend von der kleinstmöglichen Taktzeit von 85 BE (85 Workfaktorblockelemente entsprechen 5,1 sec) bis zum Takt, der dem gesamten Montageumfang von 665 BE's entspricht, gibt Bild 7-7 den Verlustzeitverlauf für den ersten Abtaktungslauf wieder. Nachträglich wurde zur Verdeutlichung der aufgrund der vorgegebenen Jahresstückzahl interessante Taktzeitbereich graphisch unterlegt. Hier erscheinen die Verlustzeiten zu hoch, da sie etwa in der Größenordnung von 50% der Gesamt-taktzeit errechnet wurden.

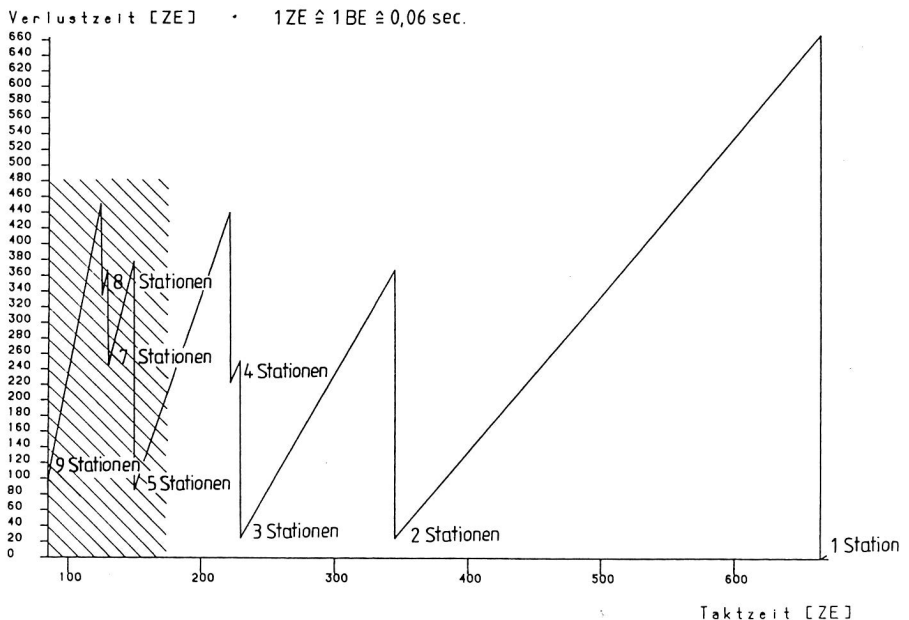


Bild 7-7: Verlustzeitverlauf (1.Version)

Für den Projektierer gilt es nun, Montageaufgabeninhalte und Planvorgabezeiten in sinnvollen Einklang zu bringen. Durch Restriktionen und die Berücksichtigung von Nebentätigkeiten, wie etwa dem Ablegen von Bauteilen im Werkstückträger, kann iterativ eine optimale Auslastung der Stationen erreicht werden. Eventuell auftretende Verluste sind dabei in der

Berechnung der geforderten Taktzeit nach Gleichung (9) bereits berücksichtigt.

7.2.1 Heuristische und enumerative Abtaktungsergebnisse

Bevor der Optimierungsvorgang begonnen wird, sollten die Ergebnisse der verschiedenen Abtaktungsverfahren auf ihre Qualität überprüft werden.

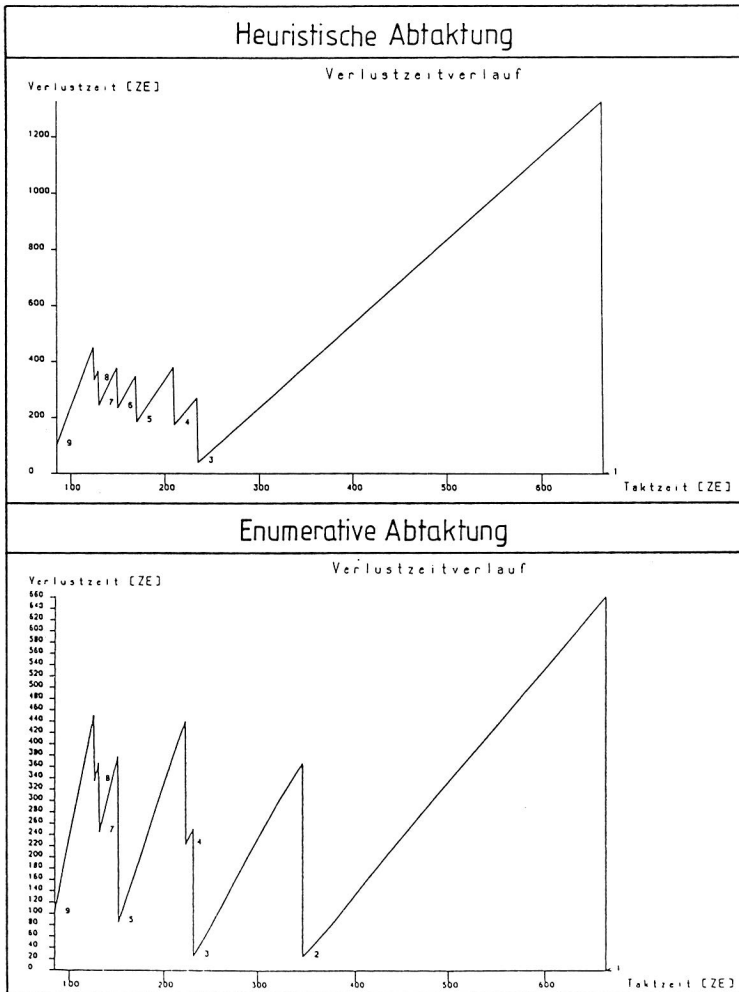


Bild 7-8: Gegenüberstellung der Abtaktungsergebnisse

Neben der reinen Rechenzeit gilt es, weitere Faktoren zu finden, um dem Projektierer die Entscheidung für heuristische oder enumerative Abtaktung zu ermöglichen.

Das Bild 7-8 zeigt eine Gegenüberstellung von Abtaktungsergebnissen mit einem heuristischen Verfahren und der vollständigen Enumeration (Bild 7-7). Die Verlustzeitverläufe repräsentieren den gleichen Montageumfang wie im Eingabebeispiel. Ein Vergleich zeigt, daß, mit Ausnahme der Taktzeit 230 ZE, durch das heuristische Verfahren die optimalen Abtaktungen nicht berechnet werden, da nicht die Gesamtheit der möglichen Kombinationen durch dieses Verfahren berücksichtigt wird und offensichtlich gerade die unberücksichtigten Kombinationen zu guten Abtaktungsergebnissen (gleichbedeutend mit geringen Verlustzeiten) führen.

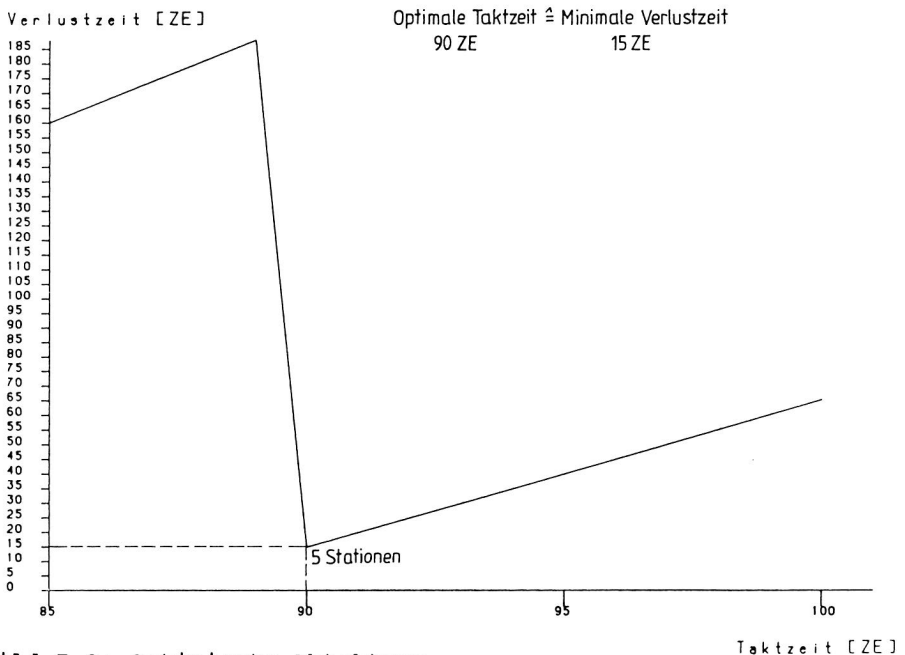


Bild 7-9: Optimierte Abtaktung

Bei kleinen Montageaufgaben, einfachen Vorranggraphen und entsprechend kurzen Rechnerzeiten muß die Entscheidung eindeutig zur enumerativen Abtaktung gehen, da nur durch dieses

Verfahren optimale Ergebnisse erzielt werden können. Eine Grenze, ab der heuristische Verfahren aufgrund ihrer erheblich kürzeren Berechnungszeiten anzuwenden sind, sollte vom Projektierungsteam in Abhängigkeit von Zumutbarkeit, Akzeptanz und vorhandener Rechnerleistung selbst bestimmt werden.

Werden in der Projektierungsphase hohe Ansprüche an möglichst kurzfristig vorliegende, erste Ergebnisse gestellt, so können mit der heuristischen Abtaktung über einen größeren Taktzeitbereich erste Näherungen erzielt werden. Auf eine exakte Berechnung im betrachteten Zeitrahmen sollte dagegen nicht verzichtet werden. Auch kann bei komplexen Montageaufgaben, die aus mehr als 50 Einzeltätigkeiten bestehen, eine Aufteilung in Abschnitte sinnvoll sein, für die dann bei geringerer Rechenzeit optimale Ergebnisse erzielt werden.

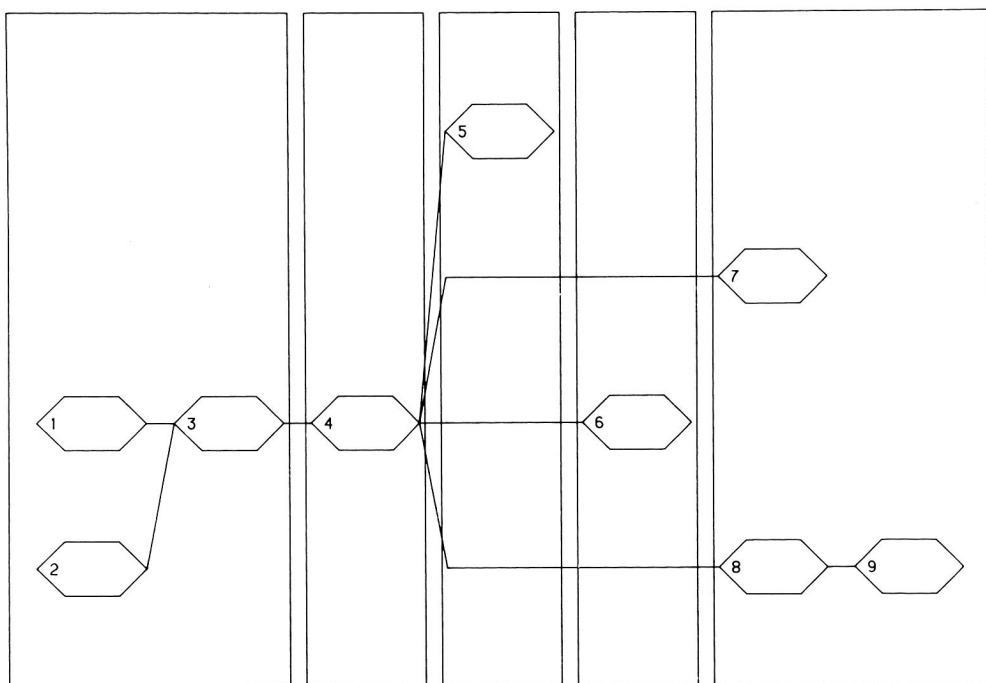


Bild 7-10: Vorranggraph zu Stationen geblockt

7.3 Optimierter Montageumfang und Funktionslayout

Nach den bereits erwähnten Optimierungen unter Berücksichtigung von Planvorgabezeitreduzierungen und Restriktionen wird für das Anwendungsbeispiel ein erneuter Abtaktungslauf von 85-100 BE (5.1 - 6.0 sec) durchgeführt.

Der Verlustzeitverlauf in Bild 7-9 weist auf ein Minimum hin, das bei einer Takzeit von 90 BE (5.4 sec) mit 5 Stationen zu erwarten ist. Aus dem geblockten Vorranggraphen entsprechend Bild 7-10 können die Arbeitsinhalte der Stationen abgeleitet werden, da hier die Teilverrichtungen des Vorranggraphen zu Arbeitsstationen zusammengefaßt werden. Mit dem Projektierungssystem läßt sich anschließend die Stationsauslastung (Bild 7-11) zu der optimierten Taktzeit berechnen und in einem Balkendiagramm visualisieren. Dabei entspricht die berechnete Gesamtauslastung dem Bandwirkungsgrades aus Gl.8.

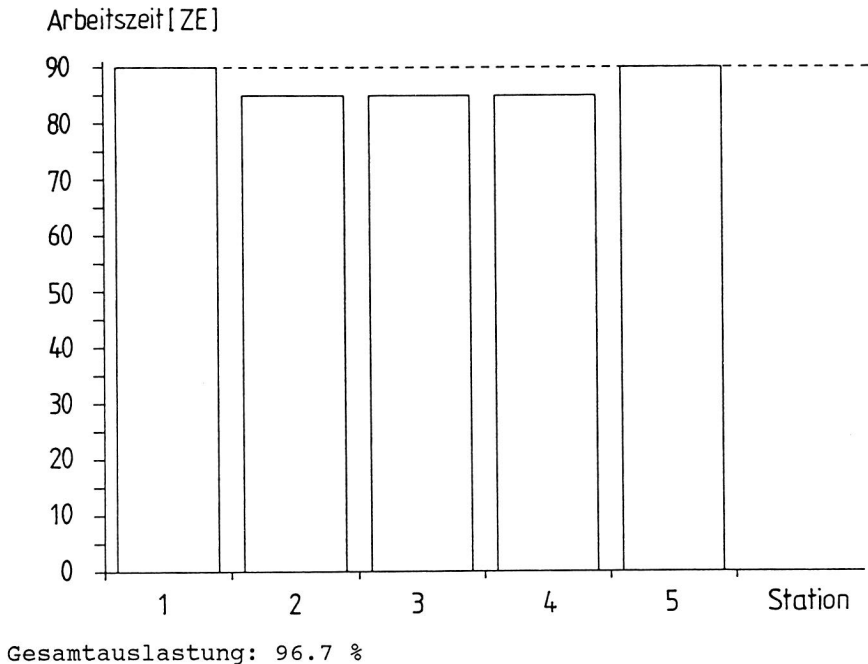


Bild 7-11: Stationsauslastung für das Anwendungsbeispiel

Taet. Nr.	Fügefunktion	Teilbezeichnung	Basisteilbezeichnung	Taet. zeit	ben. Vorr.
1	umformen	Drossel	Stecker	35	1
2	umformen	Drossel	Stecker	35	1
3	zusammensetzen	Stecker /Drossel	Werkstückträger	20	0
Auslastungsstatistik für Werker 1 auf Station 1 : Taktzeit : 90 Arbeitszeit : 90 Verlustzeit : 0 Auslastung : 100,00%					
Taet. Nr.	Fügefunktion	Teilbezeichnung	Basisteilbezeichnung	Taet. zeit	ben. Vorr.
4	zusammensetzen	Bürstenträger	Drosseln	85	0
Auslastungsstatistik für Werker 2 auf Station 2 : Taktzeit : 90 Arbeitszeit : 85 Verlustzeit : 5 Auslastung : 94,44%					
Taet. Nr.	Fügefunktion	Teilbezeichnung	Basisteilbezeichnung	Taet. zeit	ben. Vorr.
5	zusammensetzen	Feder	Bürstenträger	85	0
Auslastungsstatistik für Werker 3 auf Station 3 : Taktzeit : 90 Arbeitszeit : 85 Verlustzeit : 5 Auslastung : 94,44%					
Taet. Nr.	Fügefunktion	Teilbezeichnung	Basisteilbezeichnung	Taet. zeit	ben. Vorr.
6	zusammensetzen	Bürstenbrücke	Stecker /Bürstenträger	85	0
Auslastungsstatistik für Werker 4 auf Station 4 : Taktzeit : 90 Arbeitszeit : 85 Verlustzeit : 5 Auslastung : 94,44%					
Taet. Nr.	Fügefunktion	Teilbezeichnung	Basisteilbezeichnung	Taet. zeit	ben. Vorr.
7	umformen	Bürstenträger	Drossel	35	2
8	umformen	Bürstenträger	Drossel	35	2
9	zusammensetzen	Bürstensystem	Palette	20	0
Auslastungsstatistik für Werker 5 auf Station 5 : Taktzeit : 90 Arbeitszeit : 90 Verlustzeit : 0 Auslastung : 100,0%					
Station	Werker	Arbeitszeit	Verlustzeit	Auslastung in %	
1	1	90	0	100,00	
2	2	85	5	94,44	
3	3	85	5	94,44	
4	4	85	5	94,44	
5	5	90	0	100,00	
			GESAMTSTATISTIK		
			Taktzeit	90	
			Anzahl Werker	5	
			Gesamtzeit der Tätigkeiten	435	
			Fertigungszeit mit Verlustzeiten	450	
			Summe Verlustzeiten	15	
			Gesamtauslastung in %	96,67	

Bild 7-12: Arbeitsanweisungsliste für die Montagestationen im Anwendungsbeispiel

Das Projektierungsmodell ermöglicht des weiteren auch die Erstellung von Arbeitsanweisungen (Bild 7-12) für Handarbeitsplätze, die bekanntlich für absehbare Zukunft in automatisierten Montagesystemen ihren Stellenwert behalten werden.

Nach der so ermittelten optimalen Stationsbelegung wird im Projektierungsmodell das nächste Modul gestartet. Bevor in diesem ein Funktionslayout erstellt wird, kann der Programm-nutzer anhand einer Nutzwertanalyse aus der Vielzahl der möglichen Funktionselemente, die für die Lösung des Montageumfanges zur Verfügung stehen, wenige geeignete auswählen.

Gewichtung der Zielkriterien:		Benotung der Wertebereiche:		Zielgewichte für:	
Verfügbarkeit	: 27.21	gut	: 10	Verfügbarkeit	: 8.16
Lieferzeit	: 1.36	mittel	: 5	Lieferzeit	: 0.41
Kosten/Station	: 23.81	schlecht	: 1	Kosten/Station	: 7.14
Lebensdauer	: 23.81			Lebensdauer	: 7.14
Flexibilität	: 20.41			Flexibilität	: 6.12
Raumbedarf	: 3.40			Raumbedarf	: 1.02
Überziel	: 30				

Kombination	Station						Nutzwert
	1	2	3	4	5	...n	
1	NCA	NCA	MEC	MEC	NCA		845.92
2	NCA	NCA	MEC	MEC	SCH		872.86
3	NCA	NCA	MEC	NCA	NCA		905.10
4	NCA	NCA	MEC	NCA	SCH		932.04
5	NCA	NCA	MEC	SCH	NCA		932.04
6	NCA	NCA	MEC	SCH	SCH		958.98
7	NCA	NCA	NCA	MEC	NCA		905.10
8	NCA	NCA	NCA	MEC	SCH		932.04

68	SCH	SCH	SCH	MEC	SCH		1012.86
69	SCH	SCH	SCH	NCA	NCA		1045.10
70	SCH	SCH	SCH	NCA	SCH		1072.04
71	SCH	SCH	SCH	SCH	NCA		1072.04
72	SCH	SCH	SCH	SCH	SCH		1098.98

<u>Erläuterungen:</u>	SCH : Schwenkarmroboter (SCARA) NCA : NC-Achsen (Baukasten) MEC : Anschlaggesteuerte Bewegungsachsen (Kurvengerät)						
<u>Ergebnis:</u>	Nach der NWA erbringt die Kombination 72 : SCH SCH SCH SCH SCH den höchsten Nutzwert						

Bild 7-13: Ergebnisprotokoll der Nutzwertanalyse

In Bild 7-13 ist eine Nutzwertergebnisliste wiedergegeben, wobei hier für die Handhabungs- bzw. Fügegeräte die Analyse durchgeführt wurde.

Aufbauend auf diesen Ergebnissen wird das Funktionslayout graphisch generiert. Dabei steht es dem Programmanwender frei, z.B. aufgrund seiner Erfahrung bestimmte Geräte für das Layout (Bild 7-14) vorzugeben.

Es lassen sich so für den gleichen Montageumfang verschiedene Layouts erstellen, aus denen dann anschließend mit dem Wirtschaftlichkeitsbeurteilungsmodell die optimale Version ausgewählt werden kann.

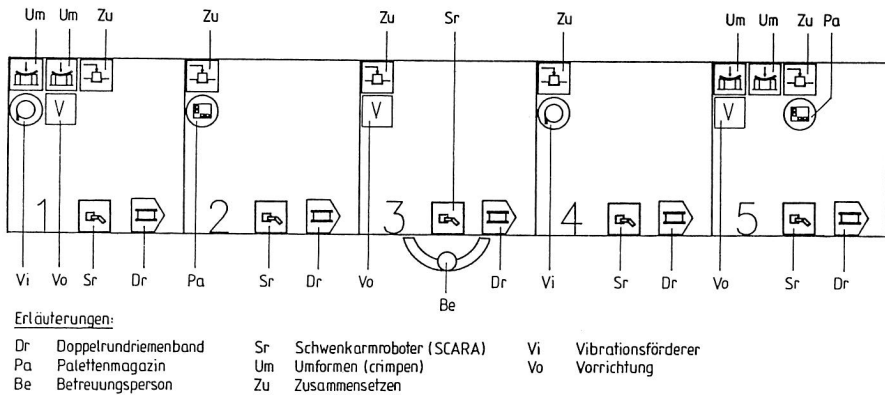


Bild 7-14: Funktionslayout

7.4 Bewertung mit dem Wirtschaftlichkeitsbeurteilungsmodell

Nachdem mit der Nutzwertanalyse eine Variante für das projizierte Montagesystem ausgewählt wurde, muß nun die Wirtschaftlichkeit des Systems überprüft werden.

Hierzu sind im Wirtschaftlichkeitsbeurteilungsmodell zunächst die **Kapitaleinsätze** für 14 Positionen anzugeben. Dabei wird der Programmanwender durch die in Kapitel 3 erfaßten Standard- bzw. Durchschnittswerte unterstützt. So können etwa die Kapitaleinsätze für Grundsystem, Unfallschutz, Pneumatik, Sensorik und Steuerung für jede zu projektierende Montagezeile aus den Standardisierungsmaßnahmen abgeleitet werden. Andere Daten werden aus dem zuvor erstellten Funktionslayout übertragen.

Eine wichtige Position sind die Strukturkosten für die automatisierte Montage. Beim Kapitaleinsatz werden hier Aufwendungen für Diagnose- und Qualitätssicherungssysteme, CIM-Hardware und -Software sowie Materialflußintegration aufsummiert.

Des weiteren sind als Voraussetzung für ein dynamisches Berechnungsverfahren **zeitabhängige Kostengrößen** einzugeben. Wirtschaftliche Nutzungsdauer, Restwertdifferenz, Kalkulatorischer Zinssatz, Sozial- und Raumkostensatz werden auf der Basis betrieblicher Vorgabedaten ermittelt.

Die Größe des Rückflußquotienten kann entsprechend der betrieblichen Gegebenheiten angesetzt werden, sollte aber einer späteren Variation unterzogen werden, um schwankende Auslastungs- und Produktionsraten nachzubilden.

Schließlich müssen noch **Mehr- und Minderkosten** berücksichtigt werden, die durch den Vergleich zwischen automatisierter Montage mit der vorhandenen manuellen Montage auftreten. Die Lohndifferenz wird nach Berechnung der erforderlichen Taktzeit mit Gleichung (9) aus der Planvorgabezeit für die manuelle Montage ermittelt. Hierin sind auch die Taktausgleichskosten entsprechend Gleichung (5) und (6) enthalten.

Die **zeitabhängigen Minderkosten** der automatisierten Montage können bei den Ausschußdifferenzkosten und beim Automationsvorteil berücksichtigt werden. Dabei lassen sich die Aus-

I. Kapitaleinsatz

1. GRUNDSYSTEM, UNFALLSCHUTZ	:	75000.00
2. TRANSPORTSYSTEM	:	75000.00
3. ZUFUEHRSYSTEM, WERKSTUECKTRAEGER	:	57500.00
4. NC-ACHSEN, ROBOTER	:	400000.00
5. GREIFER	:	30000.00
6. SENSORIK	:	12500.00
7. STEUERUNG, ELEKTRIK	:	87500.00
8. PNEUMATIK	:	40000.00
9. VORRICHTUNGEN	:	20000.00
10. EINFUEHRUNG, SCHULUNG, ANLAUF	:	150000.00
11. FORSCHUNG & ENTWICKLUNG	:	100000.00
12. STRUKTURKOSTEN	:	35000.00
13. DEMONTAGE EINER ALTEN ANLAGE	:	5000.00
14. ERLOES AUS EINER ALTEN ANLAGE	:	0.00

II. Zeitabhängige Kostengrößen

1. WIRTSCHAFTLICHE NUTZUNGSDAUER [a]:	5.00
2. RESTWERTDIFFERENZ [DM]:	170000.00
3. KALKULATORISCHER ZINSSATZ [%]:	6.00
4. LOHNSTEIGERUNGSRATE [%]:	5.00
5. PREISSTEIGERUNGSRATE [%]:	5.00
6. SOZIALKOSTENSATZ AUF LOHN, GEH. [%]:	86.00
7. ENERGIE: STROMPREIS [DM/KWh]:	0.10
8. ENERGIE: PREIS F. LUFT [DM/cbm]:	0.08
9. RAUMKOSTENSATZ PRO QM [DM/qm/m]:	40.00
10. ALTERNATIVE I : BEREIT.ZEIT [h/a]:	3900.00
11. ALTERNATIVE I : VERFUEGBARKEIT [%]:	80.00
12. ALTERNATIVE II: BEREIT.ZEIT [h/a]:	3900.00
13. ALTERNATIVE II: VERFUEGBARKEIT [%]:	80.00
14. REFLUCTAQUOTIENT [%]:	100.00

III. Mehr- und Minderkosten

1. LOHNDIFFERENZ (PROD. PERS.) [DM/a] :	233280.00
2. GEHALTSDIFFERENZ (UNPRO.P.) [DM/a] :	6250.00
3. INSTANDHALTUNGSKOSTENDIFF. [DM/a] :	-50000.00
4. INSTANDHALTUNGSLOHNDIFFERENZ [DM/a] :	-50000.00
5. FLAECHENBEDARFSDIFFERENZ [qm] :	2.00
6. LEASINGKOSTENDIFFERENZ [DM/a] :	0.00
7. DIFF.KOSTEN AUSSCHUSS [DM/a] :	40000.00
8. AUTOMATIONSVORTEIL [DM/a] :	5000.00
9. ALTERNAT I : STROMVERBRAUCH [KW] :	7.50
10. ALTERNAT II: STROMVERBRAUCH [KW] :	7.00
11. ALTERNAT I : LUFTVERBRAUCH [cbm/h] :	5.00
12. ALTERNAT II: LUFTVERBRAUCH [cbm/h] :	1.80

Bild 7-15: Kostenwerte beim Anwendungsbeispiel

RENTABILITAETSVERGLEICH ZWEIER ALTERNATIVEN MIT UNTERSCHIEDLICHEN KAPITALEINSATZ

NAME : BUERSTENSYSTEMMONTAGE

WIRTSCHAFTLICHE NUTZUNGSDAUER	[A]	5.00
KALKULATORISCHER ZINSSATZ	[%]	6.00
LOHNSTEIGERUNGSRATE	[%]	5.00
PREISSTEIGERUNGSRATE	[%]	5.00
SOZIALKOSTENS. AUF LOHN, GEHALT	[%]	86.00
MEHRINVESTITION VON ALTERNAT. I	[DM]	1087500.00
RESTWERTDIFF. ALT. I - ALT.II	[DM]	170000.00
INV.DIFF. INCL. RESTW./INV.NIVEAU	[%]	88.32

MEHRKOSTEN DER ALTERNATIVEN

	ALTERNATIVE I	ALTERNATIVE II
INVESTITIONSHOEHE [DM]	1087500.00	0.00
BEREITSCH.ZEIT [H/A]	3900.00	3900.00
VERFUEGBARKEIT [%]	80.00	80.00
ABSCHREIBUNGEN [DM/A]	183500.00	
ZINSEN [DM/A]	37725.00	
LOHN,GEH. M. S. [DM/A]		493532.59
INSTANDHALTUNG [DM/A]	110775.30	
RAUMKOSTEN [DM/A]		1063.44
ENERGIEKOSTEN [DM/A]	1057.59	
AUSSCHUSS/MIETE [DM/A]		44310.12
AUTOMAT.VORTEIL [DM/A]		5538.77

BETRIEBSKOSTENEINSPARUNG PRO JAHR [DM/A]

IM 1. NUTZUNGSJAHR	390531.09
IM 2. NUTZUNGSJAHR	410057.63
IM 3. NUTZUNGSJAHR	430560.47
IM 4. NUTZUNGSJAHR	452088.47
IM 5. NUTZUNGSJAHR	474692.91

RENTABILITAETSKENNZ. FUER MEHRINV. DER KAPITALINTENS. ALT.

KAPITALWERT	[DM] :	847231.06
INTERNER ZINSFUSS	[%] :	29.26

schußdifferenzkosten aus dem Produkt der Jahresstückzahl, dem Produktwert und dem Ausschußreduktionsfaktor berechnen. Beim Automationsvorteil sollte der Wegfall von Lohn- und Arbeitsanweisungspapieren sowie einem reduzierten Warenbestand kostenmäßig bewertet werden. Die vollständige Liste der Eingabewerte ist in Bild 7-15 wiedergegeben.

Nach Eingabe der Daten werden die Wirtschaftlichkeitskennzahlen Rentabilität, Amortisationszeit, Kapitalwert und Interner Zinsfuß berechnet. Bild 7-16 zeigt den gesamten Ergebnisausdruck, wobei eine Gliederung in Grunddaten, Vergleichsdaten, Betriebskosteneinsparungen und Wirtschaftlichkeitskennzahlen vorgenommen wurde.

Ausgehend von diesen ersten Ergebnissen werden entsprechend dem Wirtschaftlichkeitsbeurteilungsmodell im nächsten Schritt die Grunddaten variiert, um Entwicklungen der Kennzahlen bei veränderten Ausgangsdaten beobachten zu können.

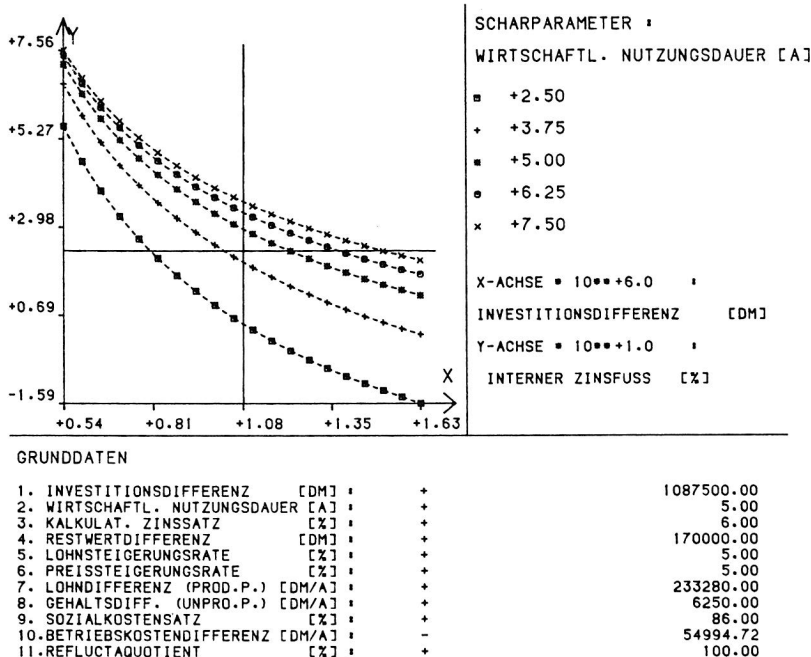


Bild 7-17: Parametervariation I

Die Bilder 7-17 bis 7-21 geben einen graphischen Eindruck von den zu erwartenden Kennzahlen wieder. Die Diagramme sind jeweils in vier Quadranten aufgeteilt, wobei die vertikale Achse mit dem Ausgangswert der Variation identisch ist. Die horizontale Linie repräsentiert einen Schwellwert für den Internen Zinsfuß, der betriebsintern festgelegt wird. Oberhalb des Schwellwertes ist mit einer erfolgreichen Investition zu rechnen, darunter ist ein Kapitaleinsatz nicht gerechtfertigt. Aus den Diagrammen lassen sich verschiedene Erkenntnisse gewinnen.

Wird vom Ursprungspunkt des Achsenkreuzes ausgegangen, können für die variierten Kurvenverläufe Gradienten berechnet werden. Je größer diese Gradienten werden, umso höher wird im Schwellbereich das Risiko der Investition. Ähnlich der Wirtschaftlichkeitskennzahl (Interner Zinsfuß) kann auch für diese Gradienten eine betriebsinterne Schwelle festgelegt werden, die bei Investitionsentscheidungen nicht über- bzw. unterschritten werden sollte.

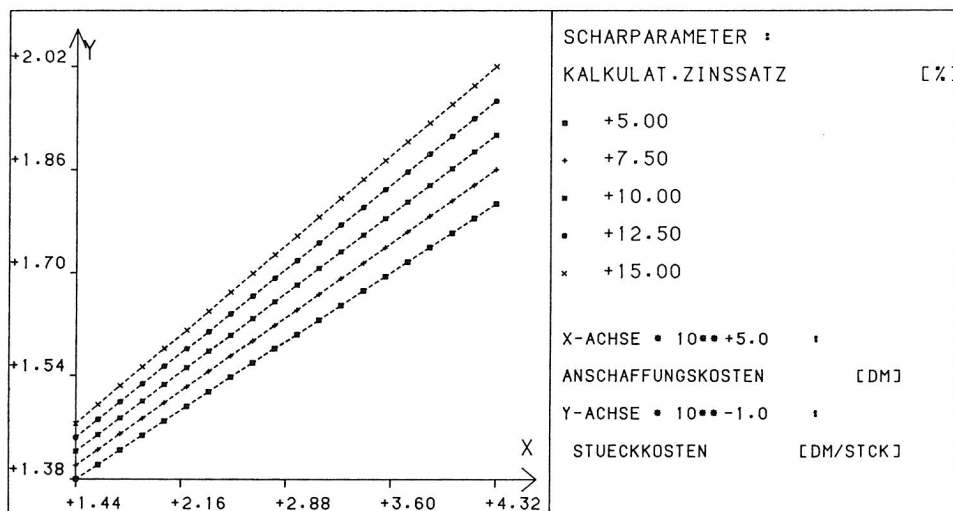


Bild 7-18: Parametervariation II

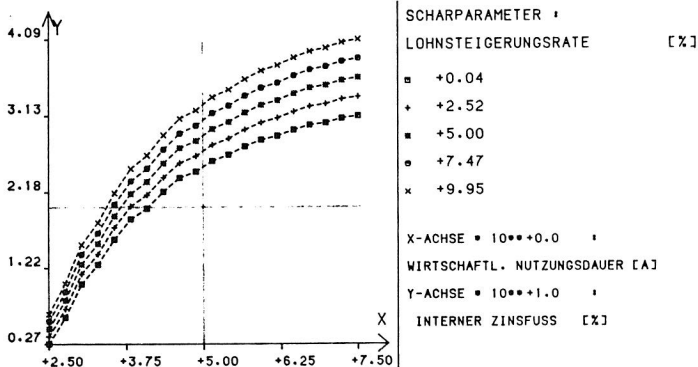


Bild 7-19: Parametervariation III

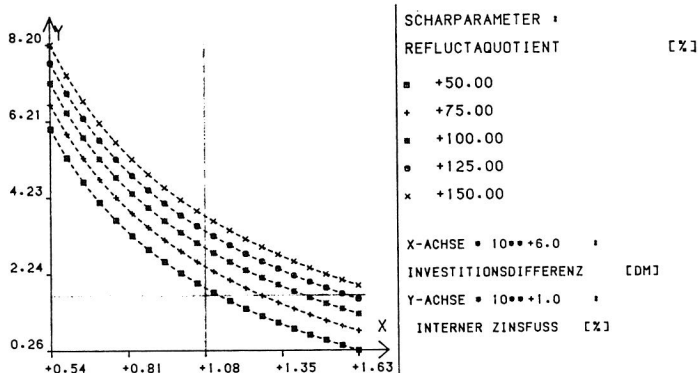


Bild 7-20: Parametervariation IV

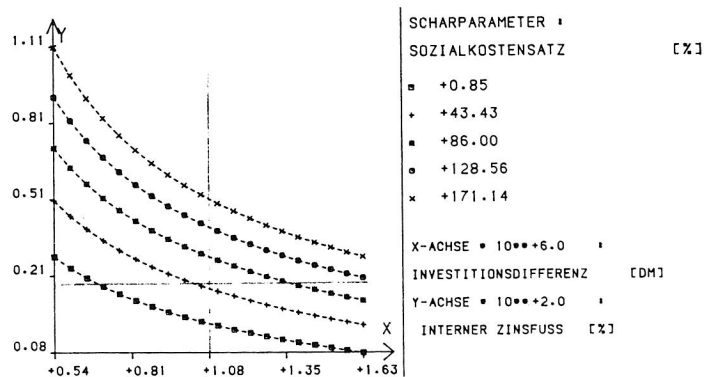


Bild 7-21: Parametervariation V

Für eine weitergehende Analyse der Einflußparameter untereinander dient im folgenden Modellschritt die Sensitivitätsanalyse.

Sind die Eingabewerte mit Unsicherheitsgrenzen (s.Kap. 6.5.4) versehen, ergibt die Analyse eine Verteilungsfunktion der Wahrscheinlichkeiten über Intervalle des Internen Zinsfußes.

Das Bild 7-22 gibt diese Verteilungen für das Anwendungsbeispiel wieder. Dabei steigt von Variante V1 bis zu Variante V4 die Sicherheit der Eingabewerte.

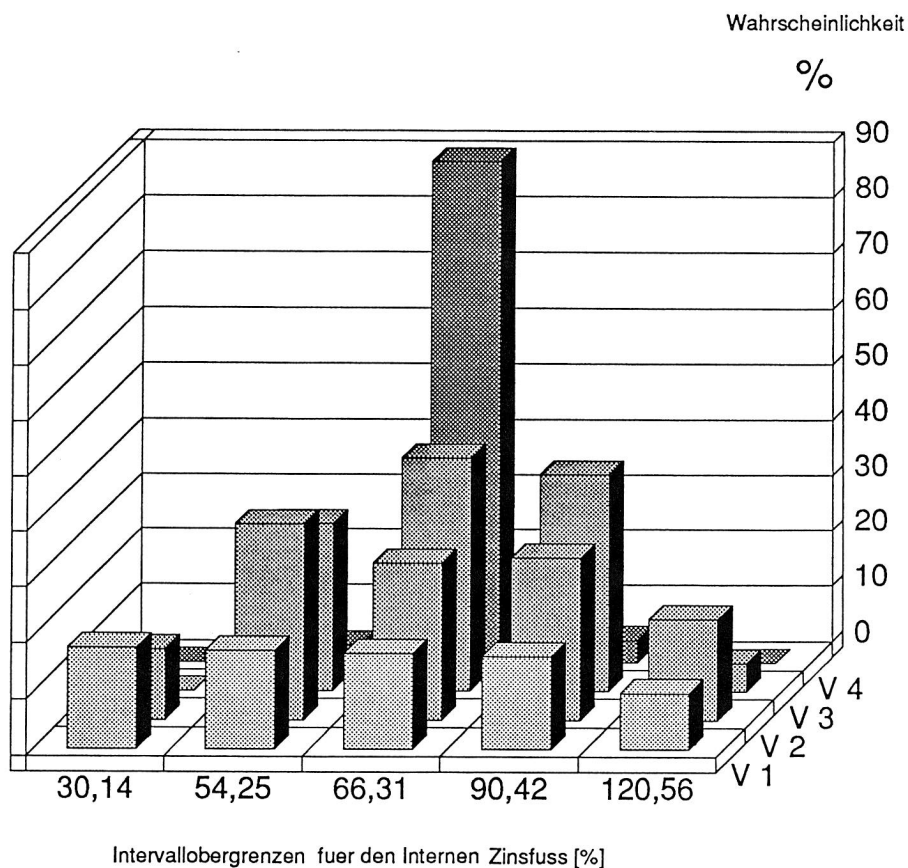


Bild 7-22: Verteilungsfunktionen der Wahrscheinlichkeiten

7.5 Modellvalidierung

Die Validierung des Modells zur rechnergestützten Projektierung von automatisierten Montagesystemen erfolgt anhand eines Vergleiches mit Ergebnissen, die aus realisierten Projektierungen vorliegen. Eine mögliche Validierung kann durch den Vergleich zwischen den in der Montageaufgabenanalyse gefundenen Teilverrichtungszeiten und den tatsächlichen Taktzeiten erreicht werden.

Bild 7-23 zeigt eine Gegenüberstellung der im Versuchsfeld ermittelten Taktzeiten für die Montage der Bürstensystembaugruppe mit den zuvor berechneten Teilverrichtungszeiten. Die durchschnittliche prozentuale Abweichung zwischen berechneten und gemessenen Werten ist außerordentlich gering und erhöht damit das Vertrauen in das rechnergestützte Modell zur Projektierung von Montagesystemen.

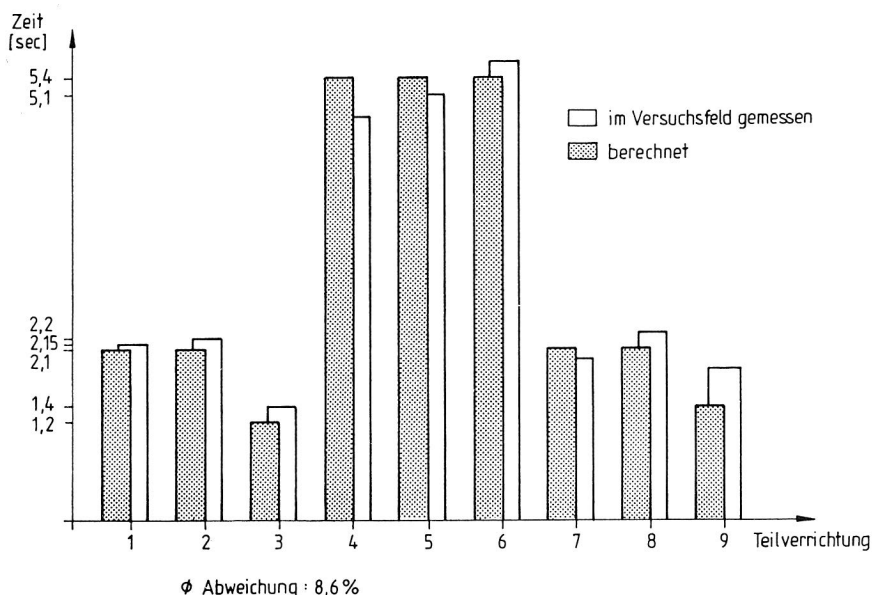


Bild 7-23: Gegenüberstellung der gemessenen und berechneten Teilverrichtungszeiten beim Anwendungsbeispiel

Für den Kapitaleinsatz liegen entsprechend Bild 7-24 Werte vor, die die Aufwendungen für Montagezellen bei herkömmlicher Planung und Ausführung widerspiegeln. Die Daten sind bei den Erhebungen, wie sie in Kap.3 beschrieben wurden, aufgenommen worden. Der Vergleich mit den im Anwendungsbeispiel ermittelten Daten (Kap.6.5.3) weist auf eine starke Kongruenz hin.

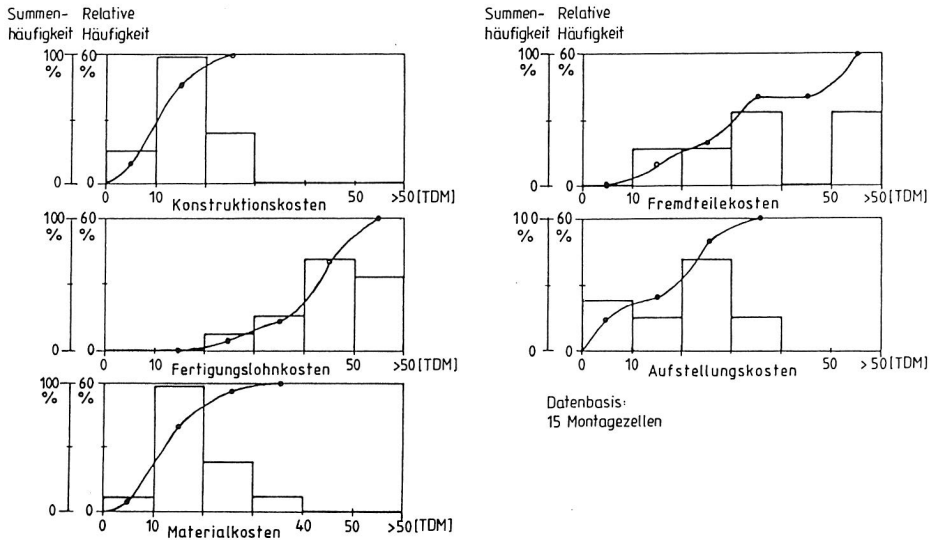


Bild 7-24: Aufwandsverteilungen pro Montagezelle

Zusammenfassend kommt das Modell somit dem Anspruch nahe, ein geeignetes Abbild darzustellen, um den Anforderungen neuer Techniken bereits im Vorfeld der Planung von Montagesystemen durch die rechnergestützte Projektierung gerecht zu werden.

8. Zusammenfassung

Das Umfeld der mittelständisch geprägten Industrie in der Bundesrepublik Deutschland ist durch einen wachsenden Wettbewerbsdruck gekennzeichnet. Zum Ausdruck kommt diese Situation in der ständig kürzeren Produktlebensdauer, den damit sinkenden Losgrößen und den steigenden Variantenzahlen. Dadurch ergeben sich starke Rationalisierungszwänge in den genannten Betrieben.

Technische Abteilungen und Produktion haben in der Vergangenheit insbesondere durch Rationalisierungen in der Vorfertigung ihren Beitrag zu Kosteneinsparungen leisten können. Da hier keine weiteren gleichartigen Erfolge zu erwarten sind, verlagern sich die Rationalisierungsanstrengungen auf den Montagebereich.

Nachdem auch hier insbesondere durch neue Techniken wie z.B. den Roboter die Basis für flexibel automatisierbare Montagesysteme geschaffen wurde, gilt es nun, den Einsatz dieser Systeme durch die im Vorfeld angesiedelten Planungsabteilungen zu optimieren.

Entsprechend den steigenden Produktionsanforderungen und verkürzten Planungsfrequenzen existiert in den für die Projektierung und Planung von Montagesystemen zuständigen Abteilungen ein beträchtliches Rationalisierungspotential. Ähnlich der Kostenverantwortung in Entwicklungs- und Konstruktionsabteilungen kommt dabei der Projektierung von Montagesystemen als Vorstufe zur eigentlichen Planung verstärkte Bedeutung zu.

In diesen Zusammenhang ist die Zielsetzung der vorliegenden Arbeit zu stellen, die für die Projektierung von automatisierten Montagesystemen ein rechnergestütztes Hilfsmittel aufstellt.

Die Struktur der Arbeit spiegelt eine Modellbildung des Pro-

jektierungsumfanges wider. Es wird unterschieden in Montageaufgabenanalyse, optimale Stationsbelegung, Funktionsträgerzuordnung und Wirtschaftlichkeitsbeurteilung. Der Aufbau in Modellform wurde gewählt, um den Anforderungen nach einer exakten Abbildung des real existierenden Projektierungsablaufs gerecht zu werden und um die Vorteile der Modellbildung nutzen zu können.

Als eine mögliche Art der Montageaufgabenanalyse wird im vorgestellten Modell der Vorranggraph verwendet. Da er besonders geeignet ist, Vorlage für spätere Abtaktungen zu bilden und eine gewisse Verbreitung gefunden hat, wird der Vorranggraph den exakteren Methoden (Petri-Netze) vorgezogen, zumal diese einen für die Projektierung nicht vertretbaren Analyseaufwand mit sich bringen.

Für die Abtaktung wurden verschiedene Methoden der rechnergestützten Montagereihenfolgebestimmung im Modell gegenübergestellt. Zur Auswahl stehen die exakte Enumeration und ein heuristisches Verfahren.

Um nach der optimalen Stationsbelegung mit Montageinhalten die zugehörigen Funktionsträger auszuwählen, wurde zum einen mit der Methode der Kombinatorik eine Elementezuordnung vorgenommen und zum anderen mit Hilfe einer Nutzwertanalyse der technisch mögliche Lösungsumfang eingeschränkt.

Abschließend wurden unter Berücksichtigung wichtiger Kostengrößen die Lösungsvarianten einer Wirtschaftlichkeitsbeurteilung unterzogen. Dazu sind im vorliegenden Projektierungsmodell neue Faktoren und Parameter implementiert worden, die der integralen Konzeption moderner Montagesysteme nachkommen.

Vor der Implementierung des Projektierungsmodells wurden auch die Randbedingungen rechnerssystemunabhängiger Software aufbereitet. Hierzu ist insbesondere die Aufstellung eines konzeptionellen Datenbankschemas für die rechnergestützte Projektierung zu rechnen.

Die Anwendung und Validierung des Projektierungsmodells erfolgte anhand eines praxisnahen Beispiels. Die später ausgeführte Lösung und die tatsächlich aufgetretenen Kosten tragen zum Vertrauen auf die vorab gewonnenen Projektierungsergebnisse bei.

Mit dem in der vorliegenden Arbeit vorgestellten Modell zur rechnergestützten Projektierung von Montagesystemen ist somit ein Hilfsmittel vorhanden, welches den Mitarbeitern von Planungsabteilungen in der Industrie erlaubt, gestellte Aufgaben und zukünftige Anforderungen mit einer rechnergestützten Methode in verkürzter Zeit und mit qualitativ verbesserten Ergebnissen zu bewältigen.

9. Literaturverzeichnis

1. Abele, E.
Bäßler, R.
Wolf, E. Entwicklungstendenzen bei flexibel
 automatisierten Montagesystemen
 wt - Z. ind. Fertig. 74 (1984),
 S.333-336
2. Ammer, E.-D. Rechnerunterstützte Planung von Mon-
 tageablaufstrukturen für Erzeugnisse
 der Serienfertigung
 Springer Verlag, Berlin, Heidelberg,
 New York, Tokyo 1985
3. Ammer, D. Rechnerunterstützte Vorranggraphener-
 stellung - ein Schritt zur rationellen
 Montageplanung
 HGF Nr.14 v. 17.2.1982, S.27-28
4. Abele, E.
Schöninger, J. Montagesystemgestaltung in der Fabrik
 2000
 VDI-Z Bd.128 (1986) Nr.1/2, S.39-40
5. Auwärter, A.
Gröchtmeier, M.
Schad, G. Einführung eines Programmsystems zur
 dialogorientierten Leistungsabstimmung
 von Montagesystemen in der Praxis
 wt - Z. ind. Fertig. 77 (1987), S.215-218
6. Arcus, A.L. COMSOAL - A computer method of sequen-
 cing operations for assembly lines
 The international Journal of Production
 Research 4 (1966) Nr.4, S.259-278
7. Babel, W.
Thaus, H.-J. Rechnerintegrierte Produktion -
 Erfahrungen aus der Praxis
 VDI-Z Bd.128 (1986) Nr.9, S.277-284
8. Bauer, C.O. Die unbekannten Kosten von Schraub-
 verbindungen, KE, Januar 1986, S.32-36
9. Becker, H. Rechnergestütztes Lösen von Ingenieurs-
 aufgaben
 VDI-Z Bd.127 (1985) Nr.5, S.143-144
10. Blatrix, J.-P.
Parent, M. The flexible Assembly Shop
 5th International Conference on Assembly
 Automation, May 1984 Paris, S.317-326
11. Boothroyd, G. Automatisches Handhaben von Kleinteilen
 Fertigung 4/1976, S.95-102
12. Boothroyd, G.
Redford, A.H. Mechanized Assembly
 Verlag Mc Graw-Hill, London 1968
13. Bracht, U. Datenbankorientierte Fabrikplanung
 wt - Z. ind. Fertig. 75 (1985), S.381-385

14. Bronner, A. Einsatzgebiete der Wertanalyse- wo
kann und soll Wertanalyse eingesetzt
werden?
VDI-Berichte Nr. 430, 1981, S.61-69
15. Bronstein, I.N. Taschenbuch der Mathematik, 16. Aufl.,
Semendjajew, K.A. Verlag Harri Deutsch, Zürich 1976
16. Bühner, R. Entgelt und Mitarbeitermotivation bei
neuen Techniken in der Produktion
VDI-Z Bd.128 (1986) 19, S.723-728
17. Bullinger, H.J. Interaktive Simulation von Montage-
Schweitzer, W. systemen
wt - Z. ind. Fertig. 75 (1985),
S.421-424
18. Bullinger, H.J. Systematische Montageplanung
Carl Hanser Verlag, München 1986
19. Bullinger, H.J. Auslegung einer Automobilendmontage
u.a. mit Hilfe der Simulation
ZwF 79 (1984) 12, S.607-612
20. Dassler, R. Datenbankanwendung in CIM - Prozessen
Gausemeier, J. am Beispiel der Planung flexibler Mon-
Schäfer, G. tagesysteme
Tagungsband zur CAT 1987, Berlin 1987,
S.135-141
21. Dathe, H.M. Moderne Projektplanung in Technik
und Wissenschaft
Carl Hanser Verlag, München 1971
22. Deutschländer, A. Rechnerunterstützte Layout-Planung
Severin, F. für Industrieroboteranwendungen
ZwF 81 (1986) 10, S.515-522
23. Dittmayer, S. Das Kapazitätsfeld, ein Hilfsmittel
zur Arbeitsgestaltung
wt - Z. ind. Fertig. 68 (1978),
S.487-491
24. Dittmayer, S. Planung von Arbeitsinhalten unter humani-
tären und technisch betriebswirtschaft-
lichen Gesichtspunkten mit Hilfe eines
Vorranggraphen, ZwF 73 (1978) 12,
S.603-610
25. Elbracht, D. Der Weg zur automatisierten Montage
Schacher, H. Carl Hanser Verlag München, 1985
26. Eversheim, W. Montageorientierte Erzeugnisstrukturierung
u.a. in der Einzel- und Kleinserienproduktion -
ein Gegensatz zur funktionsorientierten
Erzeugnisgliederung?
VDI-Z Bd.125 (1983) Nr.12, S.475-479

27. Eversheim, W. Einsatz von Handhabungsgeräten in komplexen Mehrmaschinensystemen
VDI-Z, Bd.127 (1985) Nr.14, S.513-517
28. Eversheim, W. Flexibilität als Kriterium
VDI-Z Bd.127 (1985) Nr.9, S.313-318
29. Eversheim, W. Montage variantenreicher Serienprodukte
Steinfatt, E. VDI-Z Bd.128 (1986), S.193-197
Schuh, G.
30. Eversheim, W. Beurteilung flexibler Montagesysteme
Haksoo, M. VDI-Z Bd.128 (1986) 14, S.551-556
Müller, W.
31. Felbecker, O. Ein Beitrag zur Reihenfolgeplanung bei Mehrproduktlinienfertigung
Dissertation RWTH Aachen, 1980
32. Feldmann, K. Flexible Montagelinien- Aufbau und Einsatzverfahren
Tagungsband zum MHI-Kongress, Hannover-Messe '83, S.77-95
33. Feldmann, K. Rechnergestützte Planung und Gestaltung von Montagesystemen
Tagungsband zum MIC-Kongress, München 1983
34. Feldmann, K. Flexible Assembly Systems for Different Cores in Electric Machines and Transformers, Annals of CIRP Vol.28/1/1979
35. Feldmann, K. Verfahrenskette zur Planung und Programmierung von Montagesystemen
Eisele, R. ZwF 82 (1987) Nr.9, S.521-527
Kleineidam, G.
36. Feldmann, K. Rechnereinsatz in der Montageplanung
Hemberger, A. VDI-Z Bd.129 (1987) Nr.7, S.96-99
37. Feldmann, K. Automatisierte Montagesysteme am Beispiel elektromechanischer und elektronischer Produkte
Kudorfer, A. VDI-Bericht 479, Düsseldorf 1983, S.37-44
38. Feldmann, K., Handhabungs- und Fügegeräte, Seminarunterlagen "Flexible automatisierte Montagesysteme"
Nolting, F.-W. VDI-Bildungswerk, Düsseldorf 1983
39. Feldmann, K. Automatisierung der Montage in der Feinwerktechnik
Nolting, F.-W. VDI - Bericht 556, Darmstadt 1986
40. Feldmann, K., Planung und Gestaltung von Montagelinien, Seminarunterlagen "Flexible automatisierte Montagesysteme", VDI-Bildungswerk, Düsseldorf 1983
Schlüter, K.

41. Feldmann, K.
Wiegel, G. Einsatz von Handhabungsgeräten in der Montage
VDI-Bericht Nr.323, 1978, S.115-121
42. Frank, H.E. Handhabungseinrichtungen
Otto Krausskopf Verlag, Mainz 1973
43. Gairola, A. Montage automatisieren durch montagegerechtes Konstruieren
VDI-Z Bd.127 (1985) Nr.11, S.403-408
44. Ganguin, E.-D. Wie verändert CIM ein Unternehmen?
CIM-Management 4/85, S.5-10
45. Görke, M. Rechnerunterstütztes Verfahren zur Leistungsabstimmung von Mehrmodell-Montagesystemen
Otto Krausskopf Verlag, Mainz 1978
46. Görke, M.
Lentes, H.P. Leistungsabstimmung von Montagelinien
AV 13 (1976) Heft 3, S.71-77
47. Günzler, W.
Kurz, J. Work-Factor-Handbuch - Blockverfahren
Work-Factor - Gemeinschaft, Deutschland 1985
48. Gustavson, R.E. Computer-aided synthesis of least cost assembly systems, Proceedings 14th ISIR/Robots 7 Goeteborg, 1984, S.95-106
49. Hartley, J. Cost versus faults - the optimum balance in debugging
Assembly Automation Febr. 1986, S.40-42
50. Hellwig, H.-E.
Paulus, M. Informationsverteilungen in integrierten Produktionssystemen
VDI-Z Bd. 128 (1986) Nr.1/2, S.1-12
51. Hemberger, A. Innovationspotentiale in der rechnerintegrierten Produktion durch wissensbasierte Systeme
Carl Hanser Verlag, München 1988
52. Hichert, R. Probleme der Vielfalt
wt - Z. ind. Fertig., (1986), S.141-145
53. Hilgenböcker, H. Systemvergleiche sind oft nicht mehr als Weltanschauungen, PRODUKTION 22. September 1983/Nr.38, S.3-4
54. Hirschbach, O. Rechnerunterstützte Montageplanerstellung
Otto Krausskopf Verlag, Mainz 1978
55. Hitz, K. Integrierte Steuerung eines flexiblen Fertigungssystems
ZwF 81 (1986) 3, S.117-122

56. Hoeschen, R.D. Planung von Montagesystemen im Rahmen der technischen Investitionsplanung
Dissertation RWTH Aachen, 1978
57. Hoffmann, T.R. Assembly line balancing with a precedence matrix
Management Science 32 (1986) Nr.4, S.430-454
58. Kähler, St. Design of Assembly Systems for Maximum Flexibility
Andreasen, M. M. 4th International Conference on Assembly Automation Tokyo, 1983
Ahm, Th.
59. Kalde, M. Methodik zur Festlegung der Flexibilität in der Montage
Dissertation RWTH Aachen, 1987
60. Kölle, J.H. Entwicklung von Verfahren zur Terminplanung und -steuerung bei flexiblen Montagesystemen
Springer Verlag, Berlin, Heidelberg, New York, 1981
61. Koether, R. Rechnergestützte Modellfolgebestimmung in einer Automobilendmontage
ZwF 80 (1985)10, S.472-476
62. Koller, R. Rationalisierung und Automatisierung der Vorrichtungskonstruktion mit Hilfe elektronischer Rechenanlagen
Pieperhoff, H.J. Konstruktion 30 (1978) H.8, S.319-325
63. Kollmuß, F. Rechnerunterstützte Abtaktung eines Fließbandes in der Montage
REFA-Nachrichten 6/1982, S.327-330
64. Kovach, J. CALB - Systematic Assembly Management
Assembly Engineering, September 1969, S.20-25
65. Kramer, F., Kosten- und Leistungsrechnung mit Datenverarbeitungsanlagen
Krantz, F. Verlag Rudolf Müller, Köln 1970
66. Krause, M. Die Leistungsabstimmung - ein gelöstes Problem?
ZwF 79 (1984) 7, S.344-348
67. Kühn, F.M. Belastungsanalyse mit Mikrocomputer, REFA-Nachrichten 4/1984, S.41-46
68. Lentjes, H.-P. Auslegung von Montagelinien mit Hilfe der Simulation
VDI-Berichte Nr.323, 1978, S.19-28

69. Liebe, B. Strategische Investitionen
VDI-Z Bd. 128 (1986) 15/16, S.577-580
70. Löhr, H.G. Eine Planungsmethode für automatische
Montagesysteme
Otto Krausskopf Verlag, Mainz 1976
71. Lotter, B. Primär-Sekundär-Montageanalyse als Pla-
nungsmethode für Montagelinien
wt - Z. ind. Fertig. 75 (1985), S.9-14
72. Lotter, B. Planung und Aufbau von flexiblen Mon-
tageanlagen am Beispiel der Feinwerktechnik
wt - Z. ind. Fertig. 77 (1987), S.206-210
73. Lotter, B. Flexible assembly lines for precision
engineering
Assembly Automation, May 1985, S.103-109
74. Lotter, B. Arbeitsbuch für Montagetechnik
Verlag Krausskopf, Stuttgart 1982
75. Lukas, B. Investitionsentscheidungen - vom Rechner
unterstützt
VDI-Z Bd. 126 (1984) 11, S.391-397
76. Luszek, G.
u.a. CAP für die Montage - ein Baustein
für CIM
VDI-Z Bd.129 (1987) Nr.1, S.49-53
77. Lutz, L. Abtakte von Montagelinien
Otto Krausskopf Verlag, Mainz 1974
78. Maczka, W.J. Planning for Automated Assembly:
The Common Denominators
Assembly Engineering - 2/85, S.16-20
79. Mätzener, P. FTS applications in automobile
factories, The changing face of Manu-
facturing, British robot association
May 1986, UK, S.43-51
80. Matthies, H. Vorgabezeitermittlung mit Standard-
programmen
wt Zeitschrift für industrielle Ferti-
gung 75 (1985)7, S.417-420
81. Mehlhorn, H. Mechanisierung und Automatisierung von
Fügeprozessen für Kleinteile
Feingerätetechnik 25.(1976) 11,
S.494-496
82. Metzger, H. Planung und Bewertung von Arbeits-
systemen in der Montage
Otto Krausskopf Verlag, Mainz 1977

83. Miese, M. Systematische Montageplanung in Unternehmen mit Einzel- und Kleinserienproduktion, Dissertation RWTH Aachen, 1973
84. Miese, M.
Schimke, E. Wirtschaftlichkeitsvergleich und Bewertung alternativer Montagesysteme Industrie-Anzeiger 95 (87), S.1995-1999
85. Milberg, J.
Barthelmeß, Verbindungstechniken in der automatischen Montage Praxis der Montageautomatisierung, VDI - Tagung Nürnberg, 1984
86. Milberg, J.
Diess, H. Rechnerunterstützte Planung von automatischen Montageanlagen VDI-Z Bd.128 (1986) 11, S.443-449
87. Moser, Jorge Systematische Investitionsplanung Springer Verlag, Berlin, Heidelberg, New York, Tokyo 1981
88. Müller, I. Technische Investitionsplanung in Klein- und Mittelbetrieben VDI-Z Bd.127 (1985) Nr.6, S.179ff
89. Müller-Merbach, H. Operations Research, 3.Auflage, Verlag Franz Vahlen, München 1973
90. N.N. MTM - Grundlehrgang, 3. Auflage, Deutsche MTM Vereinigung, Hamburg 1981
91. N.N. Methodenlehre des Arbeitsstudiums Teil 3: Kostenrechnung, Arbeitsgestaltung Carl Hanser Verlag, München 1969
92. N.N. VDI - Richtlinie 2860, Beuth - Verlag, Berlin - Köln 1982
93. N.N. VDI - Richtlinie 2222 Konzipieren technischer Produkte Beuth Verlag, Düsseldorf 1977
94. N.N. DIN 8593 Fertigungsverfahren Fügen Beuth - Verlag, Berlin, 1985
95. Nolting, F.-W.
Schlüter, K. Bauelemente bestimmen die Bestückungstechnik VDI-Nachrichten 49 (1985) Dez., S.14

96. Nolting, F.-W. Flexible Automatisierung von Fügeprozessen in der Feinwerktechnik - Einhaken von Zugfedern
Feinwerktechnik & Meßtechnik 94 (1986) 7, S.455-458
97. Nolting, F.-W. Schlüter, K. Komplettlösung als Chance für Spezialfirmen
VDI-Nachrichten 40 (1986) 10, S.18
98. Nolting, F.-W. Schlüter, K. Software strukturiert chaotisch anfallende Daten
VDI-Nachrichten 40 (1986), S.39
99. Nolting, F.-W. Rechnergestützte Systeme zur Montageplanung, atp Sonderheft Fertigungsautomatisierung
Oldenbourg Verlag, München 1987
100. Olfert, K. Investition
F. Kiehl Verlag, Ludwigshafen 1982, 2. Auflage
101. Peffekoven, K.H. Planung und Steuerung des Montageablaufs in Unternehmen der Einzel- und Serienfertigung
Dissertation RWTH Aachen, 1982
102. Prack, K.-W. Systemkonzept zur standardisierten rechnergestützten Arbeitsplanung
Fortschritt-Berichte VDI Reihe 2, Bd. 100, Düsseldorf 1985
103. Raktabutr, X. Computer Aided Line Balancing Review And Applications
University of Louisville, M.S. 1981
104. Reis, W. Komfortable Robotereinsatzplanung
VDI-Z Bd. 128 (1986) 9, S.277-284
105. Rinza, P. Projektmanagement: Planung, Überwachung und Steuerung von techn. und nichttechnischen Vorhaben
VDI-Verlag, Düsseldorf 1985
106. Salwiczek, P. Köhler, F. Rechnergestützte Arbeitsmethodenverbesserung
ZwF 78 (1983) 7, S.305-309
107. Sauer, H. Simulationsmodell zur Planung der Kapazität von Montagesystemen
wt - Z. ind. Fertig. 74 (1984) Heft 7, S.419-422
108. Schaefer, F.-W. System zur Planung und Nutzung der Flexibilität in der Fertigung
Dissertation RWTH Aachen, 1980

109. Schlaich, G. CADLAS - eine rechnergestützte Methode für die Layouterstellung von automatischen Montagesystemen
VDI-Z Bd.127 (1985) Nr.20, S.808-810
110. Schmidt, B. Systemanalyse und Modellaufbau,
Fachberichte Simulation
Springer Verlag, Berlin, Heidelberg
1985
111. Schmitz, A. Entwicklung von Algorithmen zur Aufarbeitung komplizierter Netzplanstrukturen
Kultusministerium Düsseldorf, 1976
112. Schraft, R.D. Roboter im Vergleich
Schöninger, J. VDI - Z Bd. 129 (1987) Nr.7, S.96-99
113. Schünemann, T.H. Berücksichtigung unterschiedlicher Flexibilitätsggrade bei der Investitionsplanung von Industrierobotern
Lehnen, H. ZWF 78 (1983) 11, S. 501-506
114. Schuster, J. Rechnerunterstützte Projektierung und
Viehweger, B. Angebotserstellung für flexible Fertigungssysteme
ZWF 79 (1984) 8, S.381-387
115. Shah, R. Erfahrungen europäischer CIM-Anwender
VDI-Z Bd.129 (1987) Nr.1, S.34-43
116. Siemens, K.J. Greifer- und Werkzeugwechsel bei Handhabungsgeräten
VDI-Z Bd.126 (1984) Nr.4, S.78-82
117. Sneider, R.M. A Methodology For Optimal Assembly Line Balancing
Verlag UMI, Ann Arbor (USA) 1980
118. Sommer, O. Ermittlung der Montagekosten in Abhängigkeit von der Genauigkeit der zu montierenden Einzelteile
Schardt, Ch. Der Maschinenbau 19 (11) 1970, S.507-509
119. Spur, G. Automatisierte Montage einer elektromechanischen Baugruppe mit Industrierobotern
Carl Hanser Verlag, München 1984
120. Strauch, R. Mathematische Methoden helfen planen
data report 15 (1980) Heft 4, S.25-30
121. Talbot, F.B. A comparative evaluation of heuristic line balancing techniques
u.a. Management Science 9 (1963) Nr.4, S.551-555

122. Tonge, F.M. Assembly line balancing using probabilistic combinations of heuristics
Management Science 11 (1965) Nr.7, S.727-735
123. Ungeheuer, U. Methodische Montagestrukturierung
Konz, H.-J. VDI-Z Bd.128 (1986) Nr.23/24, S.929-933
124. Vetter, R. Materialflußgerechtes Gestalten von Montagesystemen für die Serienfertigung von Elektroerzeugnissen
Werkstatt und Betrieb 119 (1986) 1, S.25-31
125. Viehweger, B. Rechnerunterstützte Planungshilfen für Fertigungssysteme
Wieneke, B. ZwF 81(1986)1, S.23-28
126. Volmer, J. Industrieroboter
VEB-Verlag Technik, Berlin 1981, 2.Aufl.
127. Walther, J. Systematische Planung flexibel automatisierter Montageanlagen
VDI-Z Bd.127 (1985) Nr.9, S.313-318
128. Walther, J. Programmierbare Montagestation für PKW-Motoren
u.a. VDI-Z Bd.126 (1984) Nr.10, S.352-360
129. Warnecke, H.J. Wirtschaftlichkeitsrechnung für Ingenieure
u.a. Carl Hanser Verlag, München Wien 1980
130. Warnecke, H.J. Einlegegeräte zur automatischen Werkstückhandhabung
Schraft, R.D. Otto Krausskopf Verlag, Mainz 1973
131. Warnecke, H.J. Taktzeitprognose für flexible Montagestationen
Schweizer, M. VDI - Z Bd.129 (1987) Nr.3, S.53-56
Schöninger, J.
132. Warnecke, H.J. Entwicklungstendenzen und Auswirkungen beim montagegerechten Konstruieren
Bäßler, R. VDI - Bericht 556, Darmstadt 1986
Richter, M.
133. Weichand, M. Integration des Planungs- und Konstruktionsprozesses durch rechnerinterne Modellbildung
VDI-Z Bd.127 (1985) Nr.23/24, S.995-1000
134. Weißmantel, H. Lösungsansätze zur Überprüfung der Montagegerechtheit von Produkten der Feinwerktechnik
VDI - Bericht 556, Darmstadt 1986

- 135. Weule, H. Rechnerunterstützte Produktanalyse in
Friedmann, T. der Montageplanung
VDI - Z Bd.129 (1987) Nr.12, S.59-63

- 136. Wiendahl, H.-P Verfügbarkeitssteigerung automatischer,
Ziersch, W.-D verketteter Montagesysteme
Schweizer Maschinenmarkt (35) 1982,S.34-38

- 137. Wiendahl, H.P. Simulation von Fertigungsabläufen
Lorenz, W. VDI - Z Bd.129 (1987) Nr.12, S.38-45

- 138. Wildemann, H. Strategische Investitionsplanung für neue
Technologien in der Produktion, 25 Aufl.,
GmfZ - Verlag, München 1987

- 139. Zachau, H. Hilfsmittel zur Rationalisierung der
technologischen Vorbereitung von
Montageprozessen und seine Einsatz-
möglichkeiten, Fertigungstechnik und
Betrieb 23 (1973) Heft 7, S.435-438

- 140. Zangemeister, Ch. Planung und Entscheidungsvorbereitung
-NAPSY-
Nutzwert-Analyse-Programm-System zur
computergestützten Bewertung von Pro-
gramm- und Projektalternativen
Forschungsbericht W 76-19, BMFT 1976

- 141. Zehnder, C.A. Informationssysteme und Datenbanken
Teubner Verlag, Stuttgart 1987

- 142. Zülch, G. Simulationsverfahren in der Anwendung
wt - Z. ind. Fertig. 75 (1985), S.377-
380

Lebenslauf

Persönliches Friedrich-Wilhelm Nolting
geb. am 19. Februar 1957 in Todenmann
verh. mit Sigrid Nolting, geb. Hiddessen
Eltern: Wilhelm Nolting
Sophie Nolting, geb. Richard

Schulbildung 1963 - 1967 Volksschule Todenmann
1967 Hauptschule Rinteln
1967 - 1976 Gymnasium-Ernestinum Rinteln
15.05.1976 Abitur

Studium 1976 - 1982 Studium der Fachrichtung
Maschinenbau an der
Universität Hannover
28.09.1982 Diplomhauptprüfungszeugnis

Berufstätigkeit Praktikantentätigkeit bei verschiedenen
Industrieunternehmen

1979-1982 Studentische Hilfskraft am Institut für Fabrikanlagen der Universität Hannover
Leiter: Prof. Dr.-Ing. H.P. Wiendahl

Seit dem 2. Januar 1983 Wissenschaftlicher Mitarbeiter und seit dem 1. November 1986 Oberingenieur am Lehrstuhl für Fertigungsautomatisierung und Produktionssystematik der Universität Erlangen-Nürnberg
Leiter: Prof. Dr.-Ing. K. Feldmann

Reihe Fertigungstechnik Erlangen

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

Andreas Hemberger. 208 Seiten, 107 Bilder. 1988. Kartoniert.

**Beitrag zur Steigerung der Flexibilität automatisierter Montagesy-
steme durch Sensorintegration und erweiterte Steuerungskonzepte**

Detlef Classe. 194 Seiten, 70 Bilder. 1988. Kartoniert.

Projektierung von Montagesystemen

Friedrich-Wilhelm Nolting. 201 Seiten, 107 Bilder, 1 Tabelle. 1989.
Kartoniert.

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

Karsten Schlüter. 177 Seiten, 97 Bilder. 1989. Kartoniert.

Aufbau von Modellen zur Lageregelung von Industrierobotern

Shir-Kuan Lin. 168 Seiten, 46 Bilder. 1989. Kartoniert.