

Martin Koch

*Wissensbasierte Unterstützung der Angebotsbearbeitung
in der Investitionsgüterindustrie*

Martin Koch

*Wissensbasierte Unterstützung
der Angebotsbearbeitung
in der Investitionsgüterindustrie*

Herausgegeben von

Professor Dr.-Ing. Klaus Feldmann,

Lehrstuhl für

Fertigungsautomatisierung und Produktionssystematik

FAPS



Carl Hanser Verlag München Wien

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

Tag der Einreichung:	7. Juli 1994
Tag der Promotion:	17. Oktober 1994
Dekan:	Prof. Dr. Dr. h. c. F. Durst
Berichterstatte:	Prof. Dr.-Ing. K. Feldmann
	Prof. Dr.-Ing. H. Meerkamm

Die Deutsche Bibliothek - CIP - Einheitsaufnahme

Koch, Martin

Wissensbasierte Unterstützung der Angebotsbearbeitung in der
Investitionsgüterindustrie / Martin Koch. - München ; Wien :
Hanser, 1995

(Fertigungstechnik - Erlangen ; 41)

Zugl.: Erlangen, Nürnberg, Univ., Diss., 1994

ISBN 3-446-18174-1

NE: GT

Dieses Werk ist urheberrechtlich geschützt.

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

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

© Carl Hanser Verlag München, Wien 1995

Herstellung: Gruner Druck GmbH, Erlangen-Eltersdorf

Printed in Germany

Vorwort

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

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

Herrn Prof. Dr.–Ing. H. Meerkamm, dem Leiter des Lehrstuhls für Konstruktionstechnik am Institut für Fertigungstechnik, danke ich für die Übernahme des Korreferats und die Durchsicht der Arbeit.

Herrn Prof. Dr. F. Hofmann, danke ich für seine Bemühungen bei der Durchführung des Promotionsverfahrens.

Ferner gilt mein Dank allen Kollegen, Studenten und wissenschaftlichen Hilfskräften, die durch ihre Unterstützung zum Gelingen dieser Arbeit beigetragen haben. Insbesondere möchte ich mich bei Frau Dipl.–Inf. Elisabeth Mader, Herrn Dipl.–Inf. Uwe Dennerlein, Herrn cand.–ing. Robert Egle, Herrn cand.–inf. Thomas Mangold, Herrn cand.–inf. Thomas Koller, Herrn cand.–inf. Jörg Pensel, Frau Dipl.–inf. Doris Seifert, und Herrn Dipl.–inf. Anton Ernst für die gute Zusammenarbeit und die gewissenhafte Implementierung der Konzepte bedanken.

Nicht zuletzt bedanke ich mich bei Frau Dipl.–Ing. Corinna Titz und Herrn Dipl.–Wirtsch.–Ing. Reiner Schweizer für die sorgfältige Durchsicht der Arbeit und bei Frau Estella Otterstetter für die Unterstützung bei der Gestaltung der Arbeit.

Martin Koch

Wissensbasierte Unterstützung der Angebotsbearbeitung in der Investitionsgüterindustrie

– Inhaltsverzeichnis –

1	Einleitung	1
2	Anforderungen an die integrierte Angebotsbearbeitung	3
2.1	Aufgaben der Angebotsbearbeitung	7
2.1.1	Technische Problemlösung	9
2.1.2	Erstellung der Angebotsunterlagen	11
2.2	Informationstechnische Einbindung der Angebotsbearbeitung	12
2.3	Ziele der Angebotsbearbeitung	13
2.4	Defizite der Angebotsbearbeitung	15
3	Entscheidungsunterstützendes System zur Angebotsbearbeitung	18
3.1	Grundprinzipien Entscheidungsunterstützender Systeme	18
3.2	Ansatzpunkte der Entscheidungsunterstützung bei der Angebotsplanung	22
3.3	Die Architektur von <i>ESA</i>	27
4	Wissensbasierte Konfigurierung von Angeboten	32
4.1	Motivation der wissensbasierten Angebotserstellung	32
4.2	Einheitliche Begriffsbasis	35
4.3	Grundlegende Merkmale von Konfiguratoren	38
4.3.1	Eigenschaften	38
4.3.2	Architekturkonzepte für wissensbasierte Konfiguratoren	39
4.3.3	Anwendungsbereiche und Beispielsysteme	41
4.3.4	Entwicklungstrends bei Konfiguratoren	44

4.4	Realisierungsalternativen	45
4.4.1	Kommerzielle Systeme zur Unterstützung	45
4.4.2	Werkzeuge im wissenschaftlichen Bereich	48
4.5	Modellierung technischer Systeme	49
4.5.1	Anforderungen an Konfigurierungsmodelle	49
4.5.2	Methoden der Modellierung	50
4.6	Kontrolle in wissensbasierten Systemen	50
4.7	Problemlösungsmethoden	52
5	Das Programm ANKON zur Angebotskonfigurierung	58
5.1	Zielsetzung von ANKON	58
5.2	Die Systemarchitektur von ANKON	60
5.3	Wissensmodellierung	63
5.3.1	Fallspezifisches Wissen	63
5.3.2	Bereichsbezogenes Wissen	66
5.3.3	Zwischenergebnisse und Problemlösungen	79
5.4	Problemlösungsmethoden	81
5.4.1	Interaktive Konfigurierung	81
5.4.2	Halbautomatischer Konfigurierungsmodus	83
5.5	Die Benutzerschnittstelle des Systems	114
5.5.1	Wissensakquisition	115
5.5.2	Problemlösungskomponente	117
5.5.3	Visualisierung des Angebots	121
5.6	Die Entwicklungsumgebung von ANKON	123

6	Präferenzmodelle zur Evaluierung von Angebotsvarianten	126
6.1	Entscheidungsfindung bei mehreren Zielkriterien	126
6.2	Modell zur Bewertung von Bestückssystemen	129
6.3	Realisierung des Bewertungswerkzeugs	130
7	Empirische Leistungsanalyse von Bestückssystemen	138
7.1	Intention der Leistungsanalyse	138
7.2	Verfahren zur Leistungsermittlung	138
7.3	Methode der versuchsorientierten Leistungsermittlung	141
7.4	Validierung der Methode	148
8	Zusammenfassung	152
9	Literatur	154

1 **Einleitung**

Im Zuge der Globalisierung der Märkte und der immer kürzer werdenden Innovationszyklen /37/ wird der Konkurrenzdruck auch für die Hersteller von Investitionsgütern immer größer. Neben den Faktoren Preis-/ Leistungsverhältnis und Produktqualität gewinnt die Angebotsbearbeitung im Hinblick auf eine positive Kundenentscheidung immer größere Bedeutung. Ein schnell erstelltes, die Kundenanforderungen exakt erfüllendes und technisch korrektes Angebot kann den entscheidenden Wettbewerbsvorteil darstellen.

Dadurch ergibt sich für die Unternehmen ein hoher Kostenaufwand bei der Angebotsbearbeitung, der durch die relativ geringe Umwandlungsrate von Angeboten in Aufträge zudem großen Einfluß auf die Produktkosten hat. Im Bereich der Investitionsgüterindustrie wird allgemein von einer Umwandlungsrate von 5–20% ausgegangen /3//101/. Dieser Wert steht in Abhängigkeit zur aktuellen konjunkturellen Situation und zur Wettbewerbssituation unter den Anbietern des betrachteten Investitionsguts.

Diese Situation stellt hohe Anforderungen an die Angebotsbearbeitung in den Unternehmen der Investitionsgüterindustrie. Die Forderung nach kurzen Durchlaufzeiten von der Anfrage bis zum Angebot einerseits und die Notwendigkeit der Minimierung des Ressourcenverbrauchs zur Angebotserstellung andererseits, sind weitere zu beachtende Rahmenbedingungen bei der Implementierung der Angebotsbearbeitung in einem Unternehmen.

Daher wird der Rationalisierung der Angebotsbearbeitung immer größere Aufmerksamkeit geschenkt /75/. Zur Optimierung der Angebotsbearbeitung können sowohl aufbau- als auch ablauforganisatorische Maßnahmen beitragen /32/. Ergänzend hierzu werden durch die Einführung entsprechender DV-technischer Lösungen zusätzliche Rationalisierungspotentiale ausgeschöpft und eine Effizienzsteigerung der Angebotsbearbeitung herbeigeführt /31/.

Der zweite Aspekt wird in dieser Arbeit aufgegriffen. Es werden Methoden und Werkzeuge entwickelt, die die einzelnen Aufgaben der Angebotsbearbeitung im Bereich der Investitionsgüterindustrie unterstützen. Da die Charakteristiken der verschiedenen Investitionsgüter sehr unterschiedlich sind, ist die Entwicklung allgemein einsetzbarer Werkzeuge für sämtliche Teilaufgaben der Angebotsbearbeitung nicht möglich. Im Rahmen der Arbeit erfolgt daher, wenn erforderlich eine Fokussierung auf das Equipment für die Flachbaugruppenfertigung und hier im speziellen auf Betriebsmittel für den SMD- Bestückprozeß /81/.

Die verschiedenen Werkzeuge werden in einem *Entscheidungsunterstützenden System* zusammengefaßt. Primärer Nutzen dieses integrierten Systems ist die Möglichkeit auf verteilte Informationen lokal zuzugreifen, bei komplexen Problemen der Angebotsbearbeitung eine Entscheidungsunterstützung zu erhalten und Teile des

Angebotserstellungsprozesses zu automatisieren. Gerade die Integration der verschiedenen Funktionen der Angebotserstellung und die aktive Unterstützung des Vertriebsingenieurs bei der Lösungsfindung ist nicht Stand der Technik /32/ und birgt ein hohes Rationalisierungspotential in sich.

Ziel der Arbeit ist daher die Unterstützung der technischen Problemlösung im Rahmen der Angebotserstellung mittels eines integrierten Angebotsplanungssystems. Den eingangs bereits erwähnten wachsenden Anforderungen an die Angebotsbearbeitung kann somit wirkungsvoll begegnet werden. Im einzelnen verfügt das System über die folgenden Funktionen.

Neben der Möglichkeit, interaktiv Angebote zu erstellen und eine Überprüfung der technischen Konsistenz durchzuführen, wird ein wissensbasierter Ansatz zur Generierung kundenspezifischer Problemlösungen entwickelt und realisiert. Hierbei werden explizite und implizite Kundenanforderungen verarbeitet (s. Kapitel 5).

Desweiteren bietet ein Modul des Systems die Möglichkeit alternative Problemlösungen gemäß der individuellen Präferenzenstruktur des Kunden zu bewerten und somit die Entscheidung des Vertriebsingenieurs, als auch die des Kunden, für eine Lösung unter der Berücksichtigung konkurrierender Ziele zu unterstützen (s. Kapitel 6).

In seinem Pflichtenheft verlangt der Kunde für ein Referenzprodukt in der Regel ein bestimmtes Leistungsverhalten des geplanten Produktionssystems. In Kapitel 7 wird ein auf einer versuchsorientierten Methode beruhendes Werkzeug zur Leistungsermittlung vorgestellt. Somit kann der Vertriebsingenieur schon in der Planungsphase Leistungsdaten ermitteln und dem Kunden entsprechende Garantien geben.

2 *Anforderungen an die integrierte Angebotsbearbeitung*

Wie in Kapitel 1 bereits aufgezeigt, stellt die rechnergestützte, ganzheitliche Angebotsbearbeitung einen wichtigen Beitrag zur Rationalisierung der Angebotsplanung dar. Auf die aufbau- bzw. ablauforganisatorischen Maßnahmen, die zusätzliche Verbesserungen bewirken können, wird im Rahmen dieser Arbeit nicht eingegangen (vgl. /32/).

Nachfolgend wird die Abgrenzung der Aufgaben der Angebotsplanung zu den anderen Funktionen der Vertriebsunterstützung sowie die Definition des Anwendungsbereichs der im Rahmen dieser Arbeit vorgestellten Methoden und Werkzeuge vorgenommen. Darauf aufbauend werden in Abschnitt 2.1 die einzelnen Teilaufgaben der Angebotsplanung im Detail beschrieben. In den Abschnitten 2.2 und 2.3 wird auf die Ziele der Angebotsbearbeitung bzw. auf die informationstechnische Einbindung der Angebotsbearbeitung innerhalb der Unternehmensorganisation eingegangen. Abschließend werden in Abschnitt 2.4 die in der Praxis aktuell vorhandenen Defizite aufgezeigt. Auf dieser Basis ist die Ableitung der Anforderungen an ein System zur rechnergestützten, integrierten Angebotsbearbeitung möglich.

Die in den nachfolgenden Kapiteln vorgestellten Methoden und Werkzeuge sind auf die Angebotserstellung für komplexe, erklärungsbedürftige Investitionsgüter ausgerichtet. Die Realisierung erfolgt exemplarisch für die Flachbaugruppenfertigung. Es wird das Equipment für die nachfolgend aufgelisteten Prozeßschritte berücksichtigt.

- Kleben
- Lotpaste auftragen
- SMD-Bestücken
- Löten

Charakteristisch für die Flachbaugruppenfertigung ist die Organisation nach dem Prinzip der Fließfertigung, das heißt der Einsatz von Fertigungslinien, sowie der modulare Aufbau der Produktionssysteme. Grundsätzlich gilt es bei den Produktionssystemen vier Hierarchiestufen zu unterscheiden (vgl. auch Bild 1):

- Zellenebene
- Linienebene
- Maschinenebene
- Ebene der Einzelkomponenten

Eine Produktionszelle besteht aus mehreren Stationen bzw. Maschinen, die zum Teil in Serie geschaltet sind und eine sogenannte Bestücklinie (s. Bild 1) bilden.

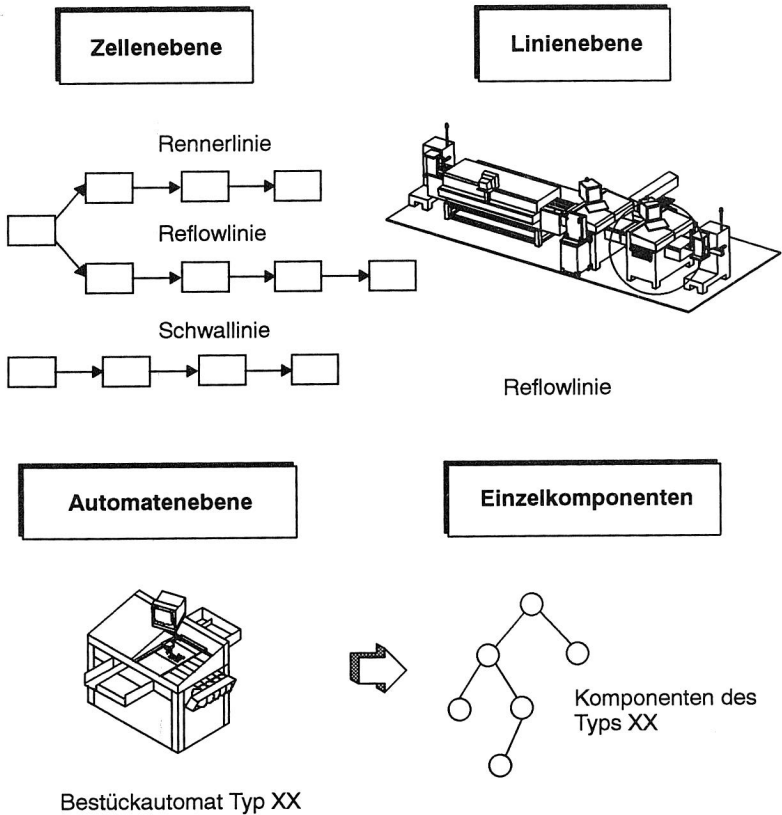


Bild 1: Hierarchische Strukturierung der Produktionssysteme in der Elektronikfertigung

Sie unterscheiden sich zum einen bezüglich der Prozesseignung und zum anderen durch ihre Leistungsmerkmale sowie der verarbeitbaren Flachbaugruppen- bzw. Bauelementetypen. Desweiteren sind die einzelnen Stationen einer Linie über sogenannte Integrationskomponenten verknüpft. Hierbei handelt es sich z. B. um Transportbänder oder Eingabe- und Ausgabeeinheiten einer Linie.

Die zweite zu betrachtende Ebene sind die einzelnen Stationen einer Produktionszelle. Sie sind nach dem Baukastenprinzip aufgebaut und bestehen aus einer Menge von Einzelkomponenten. So kann eine Station, neben einer Basiskomponente, dem sogenannten Grundmodul, über anforderungsspezifische Zusatzeinrichtungen verfügen.

Weitere Einzelheiten über die Prozesse und Betriebsmittel der Flachbaugruppenfertigung finden sich in der einschlägigen Literatur /61//84//115/.

Das in dieser Arbeit beschriebene integrierte Angebotsplanungssystem stellt einen Teil der Funktionalität eines Vertriebsunterstützungssystems zur Verfügung. Unter CAS wird der Einsatz der EDV zur Unterstützung sämtlicher im Rahmen des Vertriebs von Gütern anfallender Aufgaben verstanden. Alternativ dazu ist auch eine Definition im engeren Sinne gebräuchlich. Hierbei beschränkt sich der Blickwinkel auf die DV-technische Unterstützung des Außendienstmitarbeiters /114/.

Bild 2 zeigt die einzelnen Teilaufgaben der Vertriebsunterstützung. Der Nutzen eines

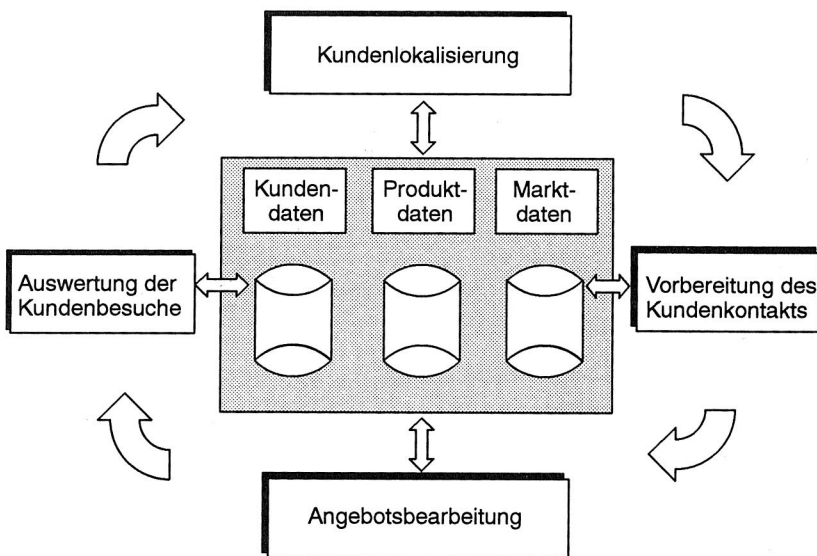


Bild 2: Funktionen der ganzheitlichen Vertriebsunterstützung

ganzheitlichen Ansatzes und eines daraus resultierenden integrierten Systems zur Vertriebsunterstützung, ist im wesentlichen durch die folgenden Merkmale beschrieben:

- Systematisierung der Marktbeobachtung
- Effizienzsteigerung durch verkürzte Bearbeitungszeiten
- Höhere Angebotsqualität
- Effizienzkontrolle der Angebotsbearbeitung

Diese Aufzählung ist nicht vollständig und umreißt nur die wichtigsten Effekte /126/. Die Systematisierung der Marktbeobachtung ermöglicht zum einen den Bedarf potentieller Kunden frühzeitig zu ermitteln zum anderen sich änderndes Kundenverhalten in die eigenen Produktplanungen mit einzubeziehen. Der Rechneinsatz kann Aufgaben automatisieren oder zumindest unterstützen, so daß die Ausführung in kürzerer Zeit vorgenommen werden kann. Desweiteren ist eine Qualitätssteigerung der erstellten Angebote zu erwarten, da aufgrund der global verfügbaren Informationen die Anwendung veralteter, d.h. inkorrektter Informationen nahezu ausgeschlossen ist.

Eine weitere wichtige Maßnahme zur Verbesserung der Vertriebsprozesse ist die systematische Verfolgung der erstellten Angebote. Vor allem bei einer erfolglosen Angebotsabgabe ist eine Ursachenanalyse durchzuführen. Die Erkenntnisse können in die eigenen Produktentwicklungen einfließen bzw. bei einer erneuten Anfrage des Kunden angewendet werden. Eine schematisierte, rechnergestützte Angebotsverfolgung bietet die Möglichkeit, Schwachstellen in den Produkten zu detektieren und auf kundenspezifische Anforderungen bei erneuter Anfrage entsprechend einzugehen.

Der aktuelle Stand des Softwareeinsatzes im Vertrieb läßt sich folgendermaßen charakterisieren. Für einzelne Teilaufgaben des Vertriebs existieren bereits Standardlösungen /114/. Hierbei handelt es sich zumeist um Komponenten von *PPS*-Systemen. Aber gerade die speziellen Anforderungen der Angebotsbearbeitung werden nur unzureichend berücksichtigt. Dieser Mangel an Standardsoftware für diesen Bereich ergibt sich aus den in hohem Maße produktspezifischen Anforderungen. Selbst die Unterschiede innerhalb einer Branche sind beträchtlich, so daß auch die Entwicklung branchenspezifischer Lösungen erschwert wird. So existiert beispielsweise für Hersteller flexibler Drehzellen eine universitäre Lösung /3/, für die Werkzeugmaschinenbranche in ihrer Gesamtheit wird dagegen kein System angeboten.

Aus dieser Situation läßt sich der Entwicklungsbedarf für die rechnergestützte Angebotsbearbeitung im Rahmen der integrierten Vertriebsunterstützung ableiten. Eine Standardlösung für nach dem Baukastenprinzip aufgebaute Investitionsgüter ist realisierbar, wenn investitionsgutabhängige Bausteine problemlos integrierbar sind.

Im folgenden Abschnitt werden nun die Teilaufgaben der Angebotsbearbeitung aufgezeigt und in Abschnitt 2.4 die aktuell existierenden Defizite beschrieben.

2.1 Aufgaben der Angebotsbearbeitung

In der Literatur wird die Aufgabe der Angebotsbearbeitung in die folgenden Teilaufgaben untergliedert [32]:

- Technische Problemlösung
- Preiskalkulation
- Bestimmung des Liefertermins
- Juristisch-finanzielle Problemlösung

Eine wichtige Teilaufgabe wird bei der oben vorgestellten Aufgabenuntergliederung nicht explizit berücksichtigt. Die Generierung der Angebotsunterlagen soll als eigenständiges, wichtiges Teilproblem verstanden werden. Diese Forderung ergibt sich aus der zentralen Funktion dieser Aufgabe. Informationen aus sämtlichen Teilaufgaben der Angebotsbearbeitung werden in diesem Schritt aggregiert und kundengerecht aufbereitet. In Abschnitt 2.1.2 wird näher darauf eingegangen.

Für die im Rahmen dieser Arbeit betrachteten Investitionsgüter ist die Kalkulation des Preises keine Schwierigkeit, da es sich bei dem dem Kunden anzubietenden Gut nicht um eine Neukonstruktion, sondern um ein aus einzelnen Modulen zusammengesetztes Gesamtsystem handelt. Der Angebotspreis ergibt sich somit mittels einer einfachen Addition der Einzelpreise der Komponenten.

Desweiteren empfiehlt es sich, bevor mit der Erstellung des Angebots begonnen wird, eine Anfragebewertung durchzuführen. Anhand geeigneter Kriterien wird die Anfrage evaluiert, der grundsätzliche Bedarf einer Angebotserstellung ermittelt sowie ergänzend der Umfang des zu erstellenden Angebotes festgelegt. Bild 3 zeigt in der Übersicht nochmals die einzelnen für den Anwendungsfall relevanten Aufgaben der Angebotsbearbeitung.

Das in dieser Arbeit vorgestellte System zur ganzheitlichen, rechnergestützten Angebotsbearbeitung beschränkt sich in seiner Funktionalität auf die beiden Aspekte "Technische Problemlösung" und "Erstellung der Angebotsunterlagen". Aufgrund der Offenheit des vorgestellten Systems (vgl. Kapitel 3) sind die anderen Teilaspekte der Angebotsbearbeitung bzw. Vertriebsunterstützung integrierbar, finden aber in den nachfolgenden Ausführungen keine vertiefende Berücksichtigung. Die Lösung ist somit als integraler Bestandteil eines übergreifenden Vertriebsunterstützungssystems anzusehen.

In den folgenden Abschnitten 2.1.1 und 2.1.2 wird auf die Aufgaben der beiden zu betrachtenden Teilaspekte der Angebotsbearbeitung unter Berücksichtigung der Anforderungen des Anwendungsbereichs im Detail eingegangen.

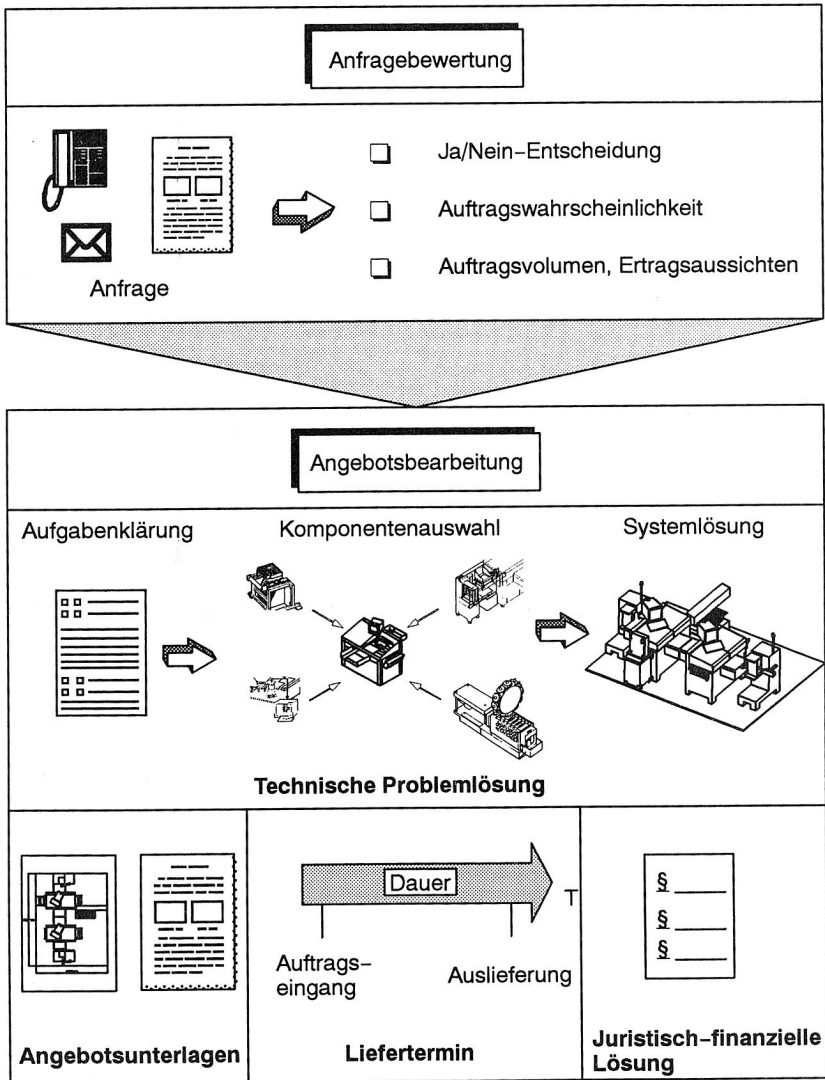


Bild 3: Aufgaben der Angebotsbearbeitung für Equipment der Flachbaugruppenfertigung

2.1.1 Technische Problemlösung

Die Technische Problemlösung bzw. Technische Angebotsplanung wird in der Literatur folgendermaßen definiert:

Die technische Angebotsplanung umfaßt alle zur Entwicklung und Nutzung eines Systems erforderlichen Maßnahmen methodischer, organisatorischer und technischer Art, mit deren Hilfe zu einer Kundenanfrage eine unter den gegebenen Randbedingungen optimale technische Lösung ermittelt werden kann /47/.

Die Aufgaben der technischen Angebotsplanung werden durch die Art der Anfrage entscheidend bestimmt. Es gilt zwischen zwei Varianten zu unterscheiden:

- Der Kunde gibt die Lösung bereits vor
- Der Kunde spezifiziert nur seine Anforderungen

Der erste Fall tritt z. B. bei Nachbestellungen oder bei einer außerordentlichen Vertrautheit des Kunden mit dem Produktspektrum des Herstellers auf. Dieser Fall wird aufgrund der Einfachheit der Problemlösung nicht weiter betrachtet. Trotzdem kann auch hier der Prozeß der Angebotsbearbeitung durch eine entsprechende Automatisierung und Verknüpfung der einzelnen Teilaufgaben optimiert werden.

Hingegen ist die Lösungssuche im Falle der bloßen Spezifikation der Anforderungen des Kunden eine mitunter aufwendige, zeitintensive und fehleranfällige Aufgabe. Der Vereinfachung des Prozesses der Lösungsermittlung wird in dieser Arbeit besondere Aufmerksamkeit geschenkt (s. Kapitel 5). Bild 4 zeigt für diesen Fall die Vorgehensweise und die Teilaufgaben der technischen Angebotsplanung.

Grundlage der durchzuführenden Aktivitäten ist die umfassende Klärung der Anforderungen des Kunden. Ausgehend von den Informationen, die der Anfrage direkt entnommen werden können, sind zum Beispiel fehlende Angaben mittels einer Checkliste systematisch zu erfassen.

Der in Bild 4 streng sequentiell dargestellte Ablauf der technischen Angebotsplanung, mit der einleitenden Aufgabenklärung und der darauf folgenden Systemplanung, stellt den Idealfall dar. In der Regel wird es sich um einen zyklischen Prozeß handeln. Die Kundenanforderungen sind a priori nicht komplett erfaßbar, da im Zuge der Angebotserstellung neue Anforderungen erwachsen können. Hierbei spielen vor allem stark kundenspezifische Anforderungen, die nicht Gegenstand einer allgemeingültigen Checkliste sein können, eine Rolle. Zudem entstehen zusätzliche Wünsche des Kunden oftmals erst bei genauerer Kenntnis der angebotenen Güter und bei Vorlage eines konkreten Angebots.

Der zweite Schritt ist die Ermittlung der technischen Lösung, das heißt die Planung des Produktionssystems. Zwei interdependente Aufgaben sind hierbei zu lösen:

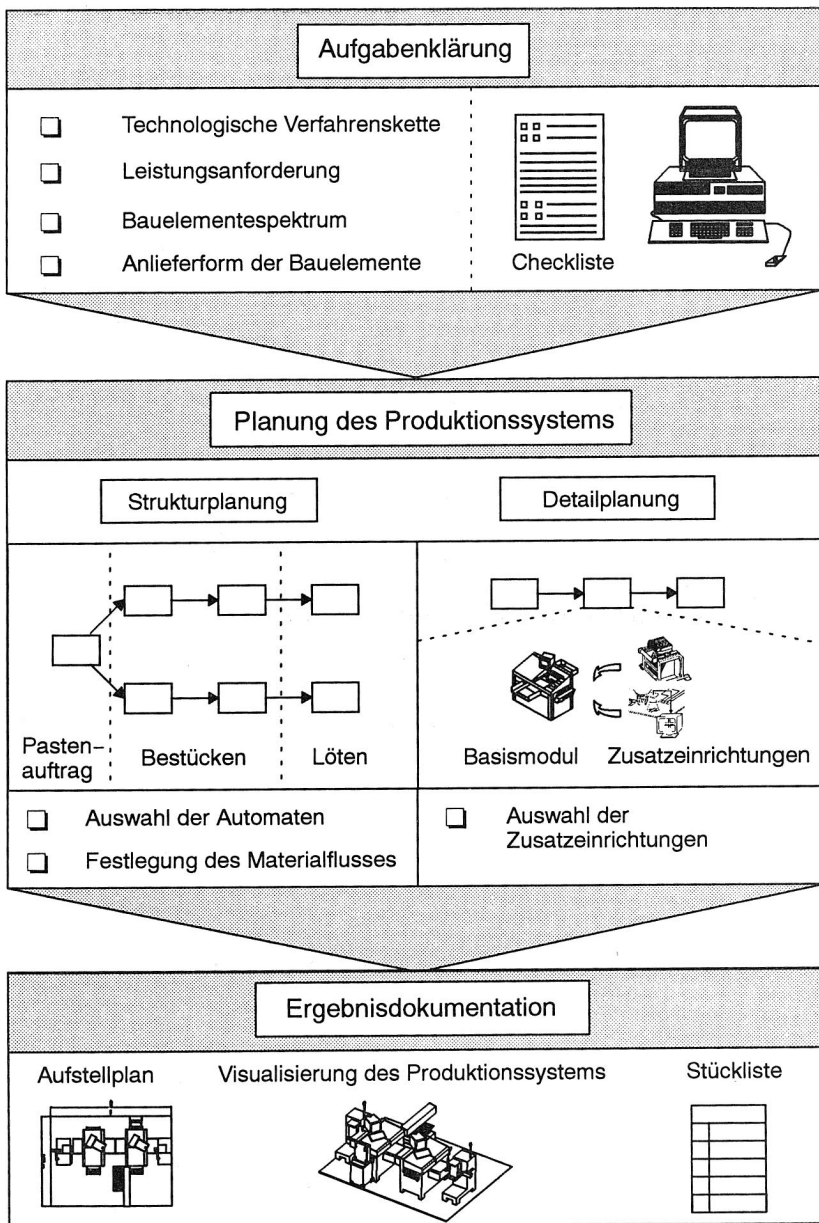


Bild 4: Ablauf und Aufgaben der technischen Angebotsbearbeitung

- Strukturplanung
- Detailplanung

Im Rahmen der Strukturplanung wird das Layout des anzubietenden Produktionssystems bestimmt. Gemäß der erforderlichen technologischen Verfahrenskette (vgl. /39/) sowie der Eigenschaften der zu fertigenden Flachbaugruppen, wird die Auswahl der benötigten Betriebsmittel vorgenommen. Desweiteren erfolgt die materialflußtechnische Verknüpfung der Automaten. Die wichtigsten, hierbei zu berücksichtigenden Eigenschaften der Flachbaugruppen sind:

- Bauelementespektrum
- Stückzahl
- Größe der Leiterplatte

Die Ergebnisse der Strukturplanung beeinflussen die Detailplanung. Im Rahmen dieses Planungsschrittes werden die erforderlichen Komponenten der Automaten bestimmt. Die Entscheidung wird maßgeblich durch die folgenden Faktoren geprägt:

- Anzahl der unterschiedlichen Bauelementetypen
- Anforderungen der Bauelementetypen an den Bestückprozeß

Abschließende Aufgabe der technischen Angebotsplanung ist die Dokumentation der ermittelten Lösung. Bestandteile der Dokumentation sind der Aufstellplan, eine graphische Darstellung und die Stückliste des geplanten Produktionssystems. Diese Informationen sind nur ein Teil der für die Generierung der Angebotsunterlagen notwendigen Informationen. Sämtliche Ergebnisse der gesamten Angebotsbearbeitung werden in den Angebotsunterlagen aggregiert und dargestellt. Auf die Aufgabe der Erstellung der Angebotsunterlagen wird im nächsten Abschnitt gesondert eingegangen.

2.1.2 Erstellung der Angebotsunterlagen

Die Ergebnisse der einzelnen Aufgaben der Angebotsbearbeitung müssen für den Kunden dokumentiert werden. Dies geschieht in den für den Kunden generierten Angebotsunterlagen. Bild 5 zeigt die darin enthaltenen Informationen.

Es wird deutlich, daß zur Erstellung der Unterlagen Informationen aus den verschiedensten Unternehmensbereichen benötigt werden. So ist die Bestimmung des Liefertermins sicherlich nur in enger Abstimmung mit der Auftragsbearbeitung möglich. Auf die Einbettung der Angebotsbearbeitung in die Unternehmensorganisation wird daher in Abschnitt 2.2 näher eingegangen.

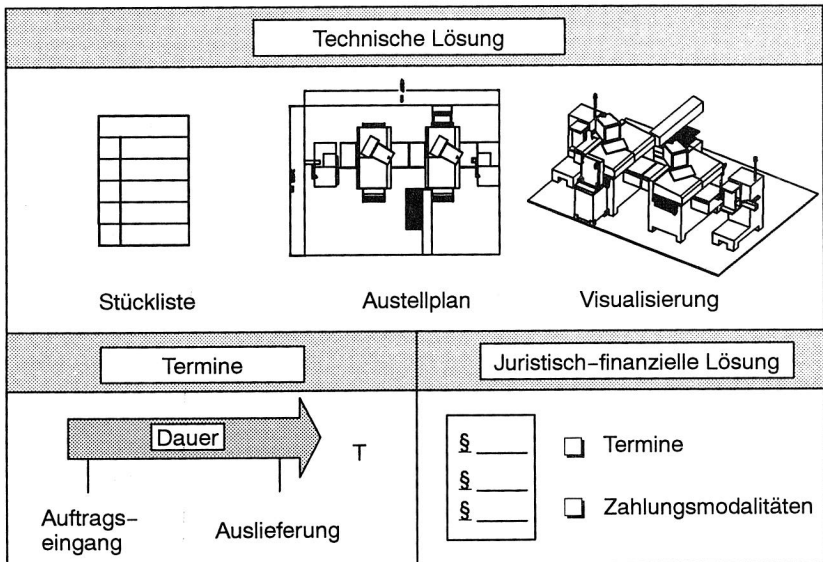


Bild 5: *Aufbau der Angebotsunterlagen*

An die Angebotsunterlagen werden hohe qualitative Anforderungen gestellt, da sie maßgeblichen Einfluß auf die Kundenakzeptanz des Angebots haben. Das Angebot wird daher oftmals auch die Visitenkarte des Unternehmens genannt /122/. Hieraus ergibt sich, abgesehen vom Aufwand zur Beschaffung bzw. Ermittlung der erforderlichen Informationen, trotz der heute verfügbaren technischen Hilfsmittel ein beträchtlicher Aufwand für die Erstellung der Unterlagen. Besonderes Augenmerk muß auf die einfache Modifikation der Unterlagen bei sich ändernden Kundenanforderungen gerichtet werden. Eine automatisierte bzw. teilautomatisierte Generierung der Unterlagen bietet hier die entsprechende Unterstützung.

2.2 *Informationstechnische Einbindung der Angebotsbearbeitung*

Betrachtet man die aufbauorganisatorische Struktur der Unternehmen, so ist die Angebotsbearbeitung in der Regel eine Teilfunktion des Vertriebs. Die Zuordnung des Vertriebs zum technischen oder zum kaufmännischen Bereich ist unternehmensspezifisch und variiert daher.

Die diversen Aufgaben der Angebotsbearbeitung (s. Abschnitt 2.1) erfordern einen intensiven Informationsaustausch mit anderen Unternehmensfunktionen. Diese sind nur zum Teil dem Vertrieb zuzuordnen (s. Bild 6).

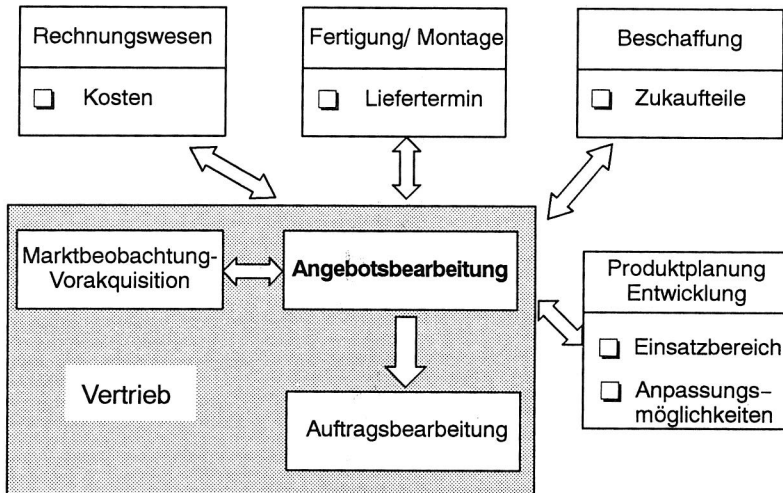


Bild 6: Schnittstellen der Angebotsbearbeitung zu anderen Unternehmensfunktionen

Aus dieser Konstellation ergeben sich Anforderungen an die aufbau- und an die ablauforganisatorische Struktur der Angebotsbearbeitung, da durch entsprechende Organisationsformen die Ermittlung der zur Angebotsbearbeitung erforderlichen Informationen unterstützt werden kann.

Diese aus kommunikationstechnischer Sicht zentrale Stellung der Angebotsbearbeitung beeinflusst natürlich auch das Realisierungskonzept für ein rechnergestütztes integriertes Angebotsplanungssystem, wie es in Kapitel 3 beschrieben wird.

2.3 Ziele der Angebotsbearbeitung

Primäres Ziel der Angebotsbearbeitung ist die effiziente und erfolgreiche Bearbeitung von Kundenanfragen. Unter Effizienz wird hierbei die Minimierung der Kosten, die aufgrund der Erstellung der Angebote auf die akquirierten Aufträge verrechnet werden müssen, verstanden. Andererseits muß die Ausgestaltung des Angebots den Anforderungen des Kunden genügen. Denn, wie eingangs bereits erwähnt, ist die Umwandlung des Angebots in einen Auftrag, also eine erfolgreiche Angebotsbearbeitung das zentrale Zielkriterium.

Nachfolgend wird auf die einzelnen Ziele der Angebotsbearbeitung im Detail eingegangen.

- **Minimierung der benötigten Zeitspanne von der Anfrage bis zum Angebot**
Die Reduzierung der Dauer kann durch verschiedenste Maßnahmen erzielt werden. Neben der Unterstützung der technischen Problemlösung (vgl. Kapitel 6), kann der gesamte Prozeß der Erstellung der Angebotsunterlagen zumindest teilautomatisiert werden. Der Rückgriff auf bereits erstellte Unterlagen stellt eine weitere Möglichkeit zur Beschleunigung der Angebotserstellung dar.
- **Hohe Qualität des Angebots**
Die Informationen müssen in den Unterlagen übersichtlich dargestellt werden und die für den Kunden erforderlichen Inhalte besitzen. Desweiteren ist auf die technische Korrektheit der angebotenen Konfiguration des Produktionssystems zu achten. Bei modular aufgebauten Produkten, wie wir sie im Rahmen dieser Arbeit betrachten, stehen die einzelnen Komponenten in bestimmten Relationen zueinander. Das heißt, grundsätzlich sind nur bestimmte Konfigurationen technisch sinnvoll. Ergänzend muß die angebotene Lösung auch die Anforderungen des Kunden, wie z. B. die Vorgabe eine bestimmte Anzahl von Flachbaugruppen innerhalb eines vorgegebenen Zeitraums zu fertigen, erfüllen.
- **Geringer Aufwand bei Modifikation der Angebote**
Oftmals treten im Laufe des Kundenkontakts neue Anforderungen, die eine Angebotsänderung erforderlich machen, zutage. Die Ursache liegt zum einen in der zunehmenden Kenntnis des Kunden bezüglich der technischen Möglichkeiten der Produkte des Herstellers, zum anderen in den oftmals nicht explizit gemachten Rahmenbedingungen des Kunden.
- **Entscheidungshilfe für den Kunden**
Der Vergleich unterschiedlicher Angebote eines Anbieters ist aufgrund der oftmals nicht verfügbaren Informationen zur Bewertung einzelner Kriterien nur unter Vorbehalt möglich. Die Unterstützung des Kunden mittels einer entsprechenden Methode und den dafür erforderlichen Informationen zur Bewertung der Angebotsvarianten bezüglich seiner ganz spezifischen Anforderungen ist ein zusätzlicher Service.
- **Unterstützung des Kunden bei der Investitionsdurchführung**
Bei der Durchführung einer Investition spielen auch finanztechnische Aspekte eine Rolle. Der Hersteller kann den potentiellen Kunden, wie es im Konsumgüterbereich schon lange üblich ist, mit einem Finanzierungskonzept unterstützten (vgl. /114/).
- **Ganzheitliche Lösung**
Es wird nicht nur das Produkt selber angeboten, sondern auch ein Konzept zur DV-technischen, als auch logistischen Integration in die bestehende Umgebung erarbeitet.

Zwei miteinander verknüpfte Maßnahmen zur Realisierung dieser Ziele sind in der Literatur zu finden /31/. Nur die Berücksichtigung beider unten aufgelisteter Ansatzpunkte führt zur Ausschöpfung sämtlicher Rationalisierungspotentiale der Angebotsbearbeitung.

- Ablauf- und aufbauorganisatorische Maßnahmen
- Einsatz von Hilfsmitteln bzw. Werkzeugen zur Unterstützung

Die Aufbauorganisation hat großen Einfluß auf die Komplexität des im Rahmen der Angebotserstellung (vgl. Bild 6) erforderlichen Informationsflusses. Damit einher geht die Festlegung der Abläufe des gesamten Prozesses der Angebotserstellung. Mitunter können neue Prozeßschritte, wie die Anfragenbewertung oder die Ermittlung der Kundenanforderungen mittels einer Checkliste, eine erhebliche Rationalisierung der Angebotsbearbeitung bedeuten.

Der Einsatz von Hilfsmitteln bezieht sich primär auf die Anwendung von Rechner-technik. Hilfsmittel, wie z. B. eine Checkliste (vgl. /2/), die eine systematische Anfragenklärung erzwingen, können ihre volle Wirksamkeit erst im Zusammenspiel mit entsprechenden *DV*-technischen Lösungen entfalten.

Im folgenden Abschnitt wird die Diskrepanz zwischen den oben formulierten Zielen der Angebotsbearbeitung und der tatsächlichen Situation bei Herstellern von Investitionsgütern für die Flachbaugruppenfertigung aufgezeigt. Die Erkenntnisse basieren auf einer bei den Herstellern durchgeführten Umfrage.

2.4 Defizite der Angebotsbearbeitung

Die aktuelle Situation in der Angebotsbearbeitung für komplexe Investitionsgüter ist nicht befriedigend im Hinblick auf die Realisierung der in Abschnitt 2.3 formulierten Ziele. Dies trifft z. B. für Hersteller spanender Werkzeugmaschinen (vgl. /3/) als auch für die Hersteller von Automaten für die Flachbaugruppenfertigung zu.

Die hierbei auftretenden Defizite sind in Bild 7 zusammenfassend dargestellt und werden im folgenden näher erläutert.

Wie in Abschnitt 2.2 bereits aufgezeigt werden im Rahmen der Angebotsbearbeitung eine Vielzahl von Informationen aus den verschiedenen Unternehmensbereichen benötigt. Ein reibungsloser Informationsfluß auch innerhalb des Vertriebs, so z. B. zwischen der Zentrale und den Verkaufsbüros, ist daher unbedingt erforderlich. Durch den Einsatz entsprechender, auf den Möglichkeiten moderner Kommunikationstechnologie basierender Hard- und Software (vgl. /135/), kann sowohl die Verfügbarkeit als auch die Qualität der Informationen gesteigert werden. Dieser Informationsfluß, mit der dafür erforderlichen konsistenten Datenhaltung ist in der Praxis oftmals nicht zufriedenstellend realisiert /63/.

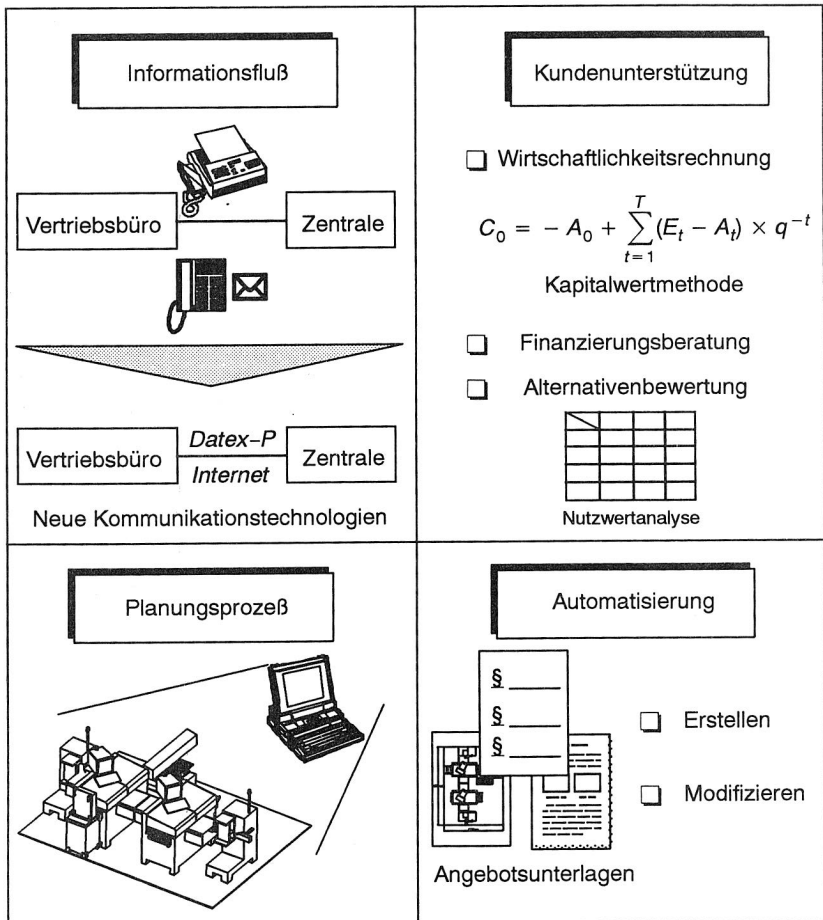


Bild 7: *Schwachstellen im Bereich der Angebotsbearbeitung für komplexe Investitionsgüter*

Eine qualifizierte Entscheidungsunterstützung bei der Systemauswahl sowie eine Unterstützung bei der Durchführung der Investition wird dem Kunden in der Regel nicht angeboten.

Bei der Projektierung des Produktionssystems gemäß den Anforderungen des Kunden kann der Vertriebsingenieur nur bei einem kleinen Teil seiner Aufgaben von rechnergestützten Werkzeugen Gebrauch machen. Eine aktive Unterstützung bei der Auswahl der erforderlichen Komponenten erhält er nicht.

Ein weiterer Aspekt ist die mangelnde Automatisierung der Angebotsbearbeitung. Vor allem bei der Erstellung der Angebotsunterlagen wird zwar für einzelne Teilaufgaben Standardsoftware eingesetzt, eine integrierte Lösung die die Generierung aller erforderlichen Dokumente unterstützt existiert aber in der Regel nicht. Änderungen des Angebots verursachen daher noch einen erheblichen Zeitaufwand.

In der Summe führen die oben beschriebenen Defizite zu einer relativ zeit- und personalintensiven Bearbeitung der Anfragen. Die hierbei anfallenden Kosten beeinflussen aufgrund der geringen Umwandlungsrate der Angebote in Aufträge die zu verrechnenden Preise nicht unerheblich. Die Rationalisierung der Angebotsbearbeitung äußert sich also direkt in der durch geringere Angebotspreise erreichten gesteigerten Wettbewerbsfähigkeit des Anbieters.

Aus den identifizierten Schwachstellen der aktuellen Situation in der Angebotsbearbeitung bei den Herstellern von Investitionsgütern für die Flachbaugruppenfertigung leitet sich der dieser Arbeit zugrundeliegende Entwicklungsbedarf direkt ab. Mit dem Einsatz eines rechnergestützten, integrierten Systems wird die Rationalisierung der Angebotsbearbeitung erreicht. Es werden die zentralen Schwachpunkte der Angebotsbearbeitung herausgegriffen und dafür adäquate Methoden und Werkzeuge entwickelt. Im nachfolgenden Kapitel wird das Gesamtkonzept dieses rechnergestützten Angebotsplanungssystems vorgestellt.

3 *Entscheidungsunterstützendes System zur Angebotsbearbeitung*

Nachfolgend wird das Konzept eines Softwarewerkzeugs zur Unterstützung der Angebotsbearbeitung vorgestellt. Primäres Ziel der Anwendung dieses Programmes ist die Optimierung der Prozesse der Angebotsbearbeitung unter Berücksichtigung der in den Abschnitten 2.3 und 2.4 formulierten Ziele bzw. Defizite.

Neben dem Aspekt den Prozeß der Angebotsbearbeitung vor allem in Bereichen, die nur in geringem Maße der kognitiven Fähigkeiten des Menschen bedürfen, weitestgehend zu automatisieren, wird der Schwerpunkt auf die Entscheidungsunterstützung bei komplexen, kognitiv anspruchsvollen Aufgaben gelegt. Entscheidungsunterstützung kann hierbei auf verschiedenerelei Art geboten werden /10/:

- Aggregation von Informationen
- Bereitstellung von Methoden und Verfahren zur Entscheidungsfindung
- Bereitstellung von Werkzeugen, die die Aufgabenmodellierung ermöglichen

Diesen Aspekten wird in dem nachfolgend vorgestellten System (s. Abschnitt 3.3) insofern Rechnung getragen, als die hierfür erforderlichen Funktionen in das Systemkonzept integriert sind.

Im Rahmen des Kapitels wird nun einleitend auf die Problematik der Entscheidungsfindung sowie auf die verfügbaren Werkzeuge zur Entscheidungsunterstützung, die *Entscheidungsunterstützenden Systeme (EUS)*, eingegangen. In der Literatur werden diese Systeme meist mit dem englischen Begriff *Decision Support System (DSS)* bezeichnet. *DSS* sind aufgrund der stark differierenden Anforderungen der Anwendungsgebiete keine Standardsysteme, vielmehr handelt es sich um Speziallösungen. Im zweiten Teil des Kapitels werden die Ansatzpunkte zur Entscheidungsunterstützung bei der Angebotsbearbeitung für komplexe, erklärungsbedürftige Investitionsgüter aufgezeigt. Abschließend wird in Abschnitt 3.3 die Architektur des Werkzeugs vorgestellt. Desweiteren werden die Teilfunktionen des Systems, die in den Kapiteln 5 bis 7 detailliert beschrieben werden, kurz vorgestellt.

3.1 *Grundprinzipien Entscheidungsunterstützender Systeme*

Ende der Sechzigerjahre begann man in den USA sich mit *DSS* wissenschaftlich auseinanderzusetzen /72/. Grundlage der Arbeiten waren die entscheidungstheoretischen Modelle. Zwei Teilgebiete, der Entscheidungstheorie, die nachfolgend näher beleuchtet werden, bilden hierzu die theoretische Basis:

- Deskriptive Entscheidungstheorie
- Präskriptive bzw. Normative Entscheidungstheorie

Die deskriptive Entscheidungstheorie befaßt sich mit der Frage, wie Entscheidungen getroffen werden und versucht desweiteren eine Erklärung für die Ausprägung der Entscheidung zu liefern. Es handelt sich also um die Analyse kognitiver Prozesse.

Im Gegensatz dazu steht die normative Entscheidungstheorie. Sie befaßt sich mit den Methoden und Verfahren zur Unterstützung der Entscheidungsfindung. Diese Verfahren werden für die Anwendung in einem DSS operationalisiert und implementiert. Weitere Ausführungen zu den entscheidungstheoretischen Grundlagen der DSS sprengen den Rahmen dieser Arbeit. Hierzu sei auf die einschlägige Literatur verwiesen /68//83/.

Bevor die Anwendungsbereiche von DSS aufgezeigt werden, muß die Bedeutung des Begriffs geklärt werden. In der Literatur findet sich keine einheitliche Definition zum Begriff DSS. Die Frage, welche Eigenschaften ein System zum DSS machen und welche Abgrenzung zu Expertensystemen besteht, wird kontrovers diskutiert /16//28//46/. Für diese Arbeit wird die Definition von Klein und Metlie zugrundegelegt /72/. Sie definieren ein DSS folgendermaßen:

A computer information system that provides information in a given domain of application by means of analytical decision models and access to databases, in order to support a decision maker in making decisions effectively in complex and ill-structured (non-programmable) tasks.

Aus der Definition ist ersichtlich, daß DSS vor allem im betriebswirtschaftlichen, insbesondere im Managementbereich ihre Anwendung finden. Denn gerade hier ist die schnelle Verfügbarkeit und die adäquate Selektion der Informationen Grundlage einer effizienten Entscheidungsfindung. Daher findet in der Definition auch die Methode des Datenbankzugriffs zur Informationsgewinnung der DSS eine explizite Erwähnung.

Wichtig bei dieser Definition ist auch die Betonung des Unterstützungscharakters des Systems bei komplexen, schwach strukturierten bzw. nicht programmierbaren Aufgaben. Unter "schwach strukturiert" wird hierbei ein nicht algorithmisierbares Problem verstanden /72/. Die Gleichsetzung eines solchen Problems mit der Eigenschaft, daß die Aufgabe nicht programmierbar ist, kann, denkt man an den Einsatz von Programmiermethoden der KI /138/, nicht aufrechterhalten werden. Ansonsten dient diese Definition als Grundlage für die weiteren Ausführungen.

Diese schwach-strukturierten, komplexen Aufgaben finden sich nicht nur im betriebswirtschaftlichen Bereich, sondern auch bei technisch-wirtschaftlichen Problemen. Gerade im Bereich der Angebotsbearbeitung für komplexe, erklärungsbedürftige Investitionsgüter, wie es das Equipment zur Flachbaugruppenfertigung darstellt, finden sich solche Aufgabenstellungen. Eine Entscheidungsunterstützung und somit ein DSS kann den Prozeß der Angebotsbearbeitung also nachhaltig unterstützen.

Eine funktionale Erweiterung erfahren die klassischen *DSS* durch die Integration der Expertensystemtechnologie. Seit 1985 wird diese Thematik in der Literatur aufgegriffen /64/. Der Integrationsgedanke basiert auf der impliziten Annahme, daß sich Expertensysteme und *DSS* unterscheiden. Diese Frage wird in der Literatur wie oben bereits angedeutet, kontrovers diskutiert. Die grundlegende Problematik des Vergleichs ist die Varianz der zahlreichen Definitionen zu Expertensystemen /149/. Werden z. B. die angewendeten Entwicklungswerkzeuge in den Vergleich mit einbezogen, so unterscheiden sich die Systeme. Vergleicht man aber die Systemintentionen, so ergeben sich keine Unterschiede.

Im Rahmen dieser Arbeit wird analog zu den Ausführungen von Klein und Metlie /72/ von einem Unterschied der beiden Systemkonzepte ausgegangen. Das im folgenden vorgestellte System ist somit kein klassisches *DSS*, sondern gemäß des von Klein und Metlie geprägten Terminus ein *Knowledge-based Decision Support System (KBDSS)*, da es über wissensverarbeitende Funktionalität verfügt (s. Bild 8).

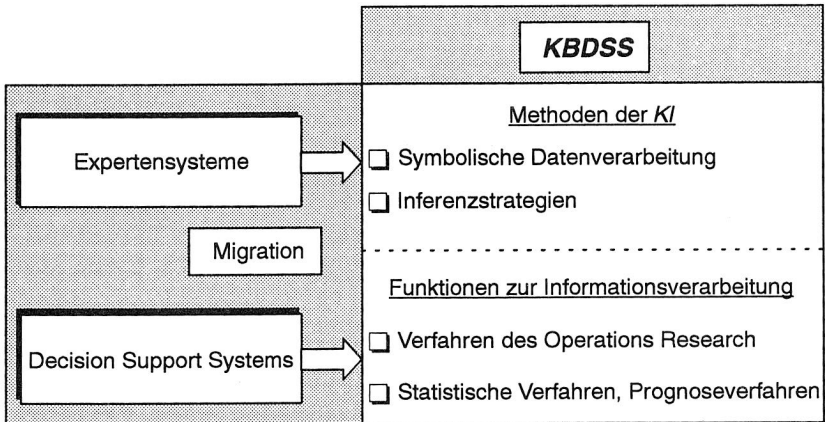


Bild 8: Erweiterung der Funktionalität klassischer *DSS*

Der Aufbau bzw. die Einzelkomponenten eines *KBDSS* werden in Bild 9 dargestellt. Grundlage eines solchen Systems ist ein Datenbankmanagementsystem in dem die benötigten Informationen verwaltet werden. Information ist in diesem Zusammenhang zum einen mit den grundlegenden Daten, wie sie auch bei konventionellen Systemen auftreten zum anderen mit Wissen über den Anwendungsbereich gleichzusetzen. Die Darstellung in Bild 9 soll die Existenz dieser beiden Informationsklassen in der Datenbank symbolisieren. Bei der Realisierung wird es diese strikte Trennung nicht geben, vielmehr sind die beiden Datenbereiche eng miteinander verwoben.

Ein weiterer Bestandteil sind die im System implementierten Problemlösungsmethoden. Hierbei gilt es zwei Klassen von Verfahren zu unterscheiden. Zum einen werden

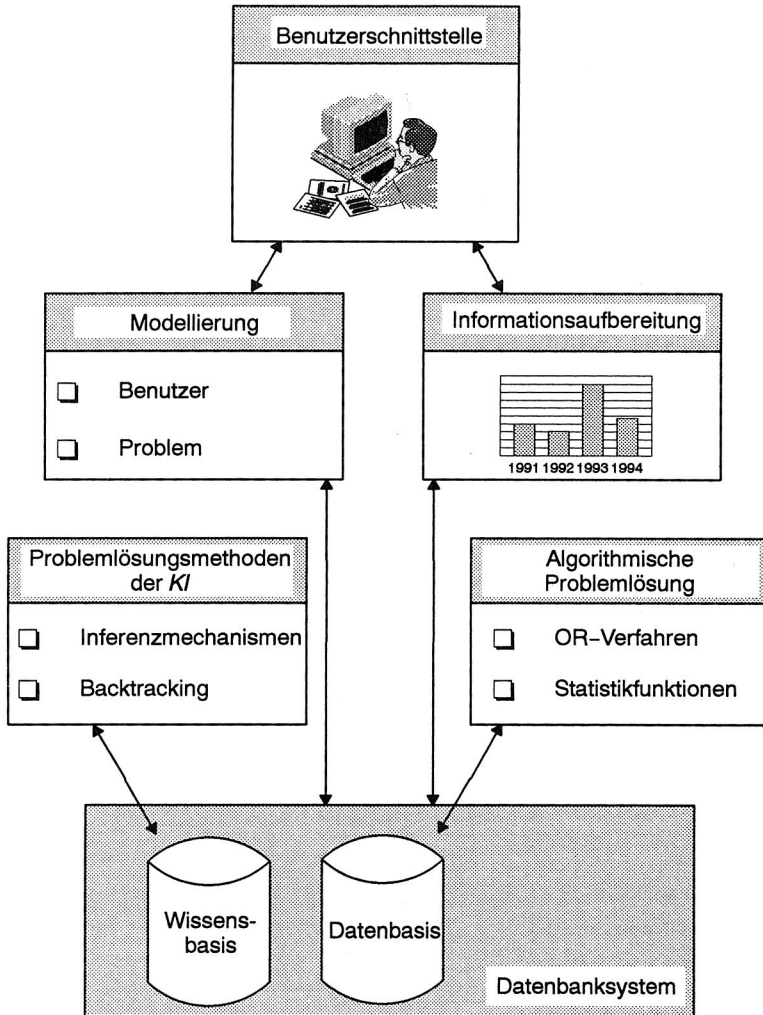


Bild 9: Komponenten eines Knowledge-based Decision Support Systems

quantitative Verfahren, wie sie z. B. im Bereich des Operations Research /97/ anzutreffen sind und zum anderen Methoden aus der Künstlichen Intelligenz, wie z. B. Inferenzstrategien zur Regelverarbeitung /117/, angewendet. Anzumerken ist in diesem Zusammenhang, daß ein KBDSS zumeist aus mehreren einzelnen Anwendungen besteht (vgl. Abschnitt 3.3). Bei diesen Applikationen können aber Methoden aus beiden Bereichen zur Anwendung kommen. Die Darstellung in Bild 9

macht die Existenz dieser beiden Methodenklassen deutlich, soll aber keine Aussage über die Zuordnung zu den einzelnen Applikationen machen.

Die Systeme haben einen ausgeprägt interaktiven Charakter. Das spiegelt sich in der Bedeutung der Benutzerschnittstelle wider /67/. Eng verbunden mit dem Entwurf des Interface, sind zwei weitere Systemfunktionen. Dem Benutzer muß die Möglichkeit gegeben werden, komfortabel die Problemformulierung und die Modellierung seiner Präferenzen vorzunehmen. Die Aufgabenmodellierung ist von zentraler Bedeutung für die Akzeptanz der Systeme. Desweiteren ist die Informationsaufbereitung in Abhängigkeit des zugrundeliegenden Benutzermodells Bestandteil eines *KBDSS*.

Wie oben bereits ausgeführt werden *DSS* bzw. *KBDSS* vornehmlich im Umfeld betriebswirtschaftlicher Aufgabenstellungen eingesetzt. Typische Anwendungsfelder sind:

- Rechnungswesen /16/
- Finanzplanung /72/

Der Nutzen dieser Systeme (vgl. /25/), also die Unterstützung der Entscheidungsfindung bei unstrukturierten bzw. schwach strukturierten Problemen /70/, birgt auch bei Problemen im technischen bzw. technisch-wirtschaftlichen Umfeld ein hohes Rationalisierungspotential in sich. Die Entwicklung von Systemen zur Unterstützung der Überwachung von Flexiblen Fertigungssystemen /129/ und der Erstellung von Arbeitsplänen /14/ belegen dies.

Im folgenden Abschnitt werden nun die Ansatzpunkte der Entscheidungsunterstützung für die technische Angebotsbearbeitung für das Equipment der Flachbaugruppenfertigung aufgezeigt.

3.2 Ansatzpunkte der Entscheidungsunterstützung bei der Angebotsplanung

Rechnergeführte Entscheidungsunterstützung birgt für verschiedene Problemklassen ein hohes Rationalisierungspotential in sich. Von Bedeutung sind hierbei Aufgaben, bei denen z. B. große Datenmengen mit vergleichsweise einfachen Verfahren bearbeitet werden müssen. Oder aber Aufgaben, zu deren Lösung komplexe Algorithmen, wie z. B. Verfahren aus dem Operations Research, angewendet werden. Desweiteren können durch den Einsatz wissensverarbeitender Methoden kognitiv anspruchsvolle Tätigkeiten, wie es die Projektierung von Produktionssystemen für die Flachbaugruppenfertigung darstellt, unterstützt werden.

Im Umfeld der technischen Angebotsbearbeitung für das Equipment der Flachbaugruppenfertigung, stellt die Projektierung, des die Kundenanforderungen optimal er-

füllenden Produktionssystem, die zentrale Aufgabe dar. Zur Bewältigung dieser Aufgabe benötigt der Vertriebsingenieur vielfältige Informationen. Verschiedene, im Bedarfsfall anwendbare Funktionen können den Prozeß der Projektierung wirkungsvoll unterstützen. Die für diese Aufgabe relevanten Funktionen sind in Bild 10 dargestellt. Auf diese Ansatzpunkte der Entscheidungsunterstützung, wird nachfolgend im Detail eingegangen.

Technische Konsistenzprüfung

Das gesamte Produktionssystem ist modular aufgebaut. Zwei Systemebenen lassen sich identifizieren. Zum einen sind die Bestücklinien des Produktionssystems aus einzelnen Automaten und zum anderen die Automaten wiederum aus Einzelkomponenten aufgebaut (vgl. Kapitel 2). Hierbei existieren vielfältige Abhängigkeiten der Automaten bzw. der Einzelkomponenten zueinander.

Betrachtet man eine Linie, so gilt es Restriktionen, bezüglich der Reihenfolge und der Kombination bestimmter Automatentypen innerhalb einer Linie, zu berücksichtigen. Auch die Auswahl der Einzelkomponenten der Automaten wird durch bestimmte Randbedingungen beeinflusst. So kann z. B. die Auswahl einer Komponente die Auswahl einer weiteren Komponente bedingen oder ausschließen.

Aufgrund der schnellen technologischen Entwicklung gerade im Umfeld der Elektronikfertigung unterliegen auch die Betriebsmittel häufig technischen Änderungen. Das heißt, daß z. B. die Abhängigkeiten der Komponenten eines Automaten untereinander über die Zeit nicht konstant sind. Der Vertriebsingenieur muß zur Durchführung der Projektierung diese Informationen ständig parat haben. Ein rechnergestütztes Verfahren, das zum einen die technisch korrekte Konfigurierung des Produktionssystems steuert und zum anderen mögliche Fehler in einer Projektierung ermittelt, ermöglicht eine verbesserte Qualität der erstellten Angebote. Die Prüfung auf technische Konsistenz eines Angebots ist von den Anforderungen des Kunden völlig unabhängig. Die Restriktionen beruhen allein auf den konstruktiven Randbedingungen der Betriebsmittel.

Prüfung der Anforderungsadäquanz

Diese Funktion stellt eine Erweiterung der Prüfung auf technische Konsistenz dar. Die Überprüfung interaktiv erstellter Systemkonfigurationen im Kontext der Kundenanforderungen ist eine weitere nützliche Hilfe zur Durchführung der Projektierung. Die Unterstützung richtet sich nun ausschließlich auf die Projektierung der Bestücksysteme, da im Vergleich zum Equipment für die nach- bzw. vorgeschalteten Prozeßschritte diese Aufgabe die größte Komplexität beinhaltet.

Die Anforderungen des Kunden werden für diese Aufgabe im wesentlichen durch die Flachbaugruppen, die er fertigen will, beschrieben. Das heißt es wird einerseits fest-

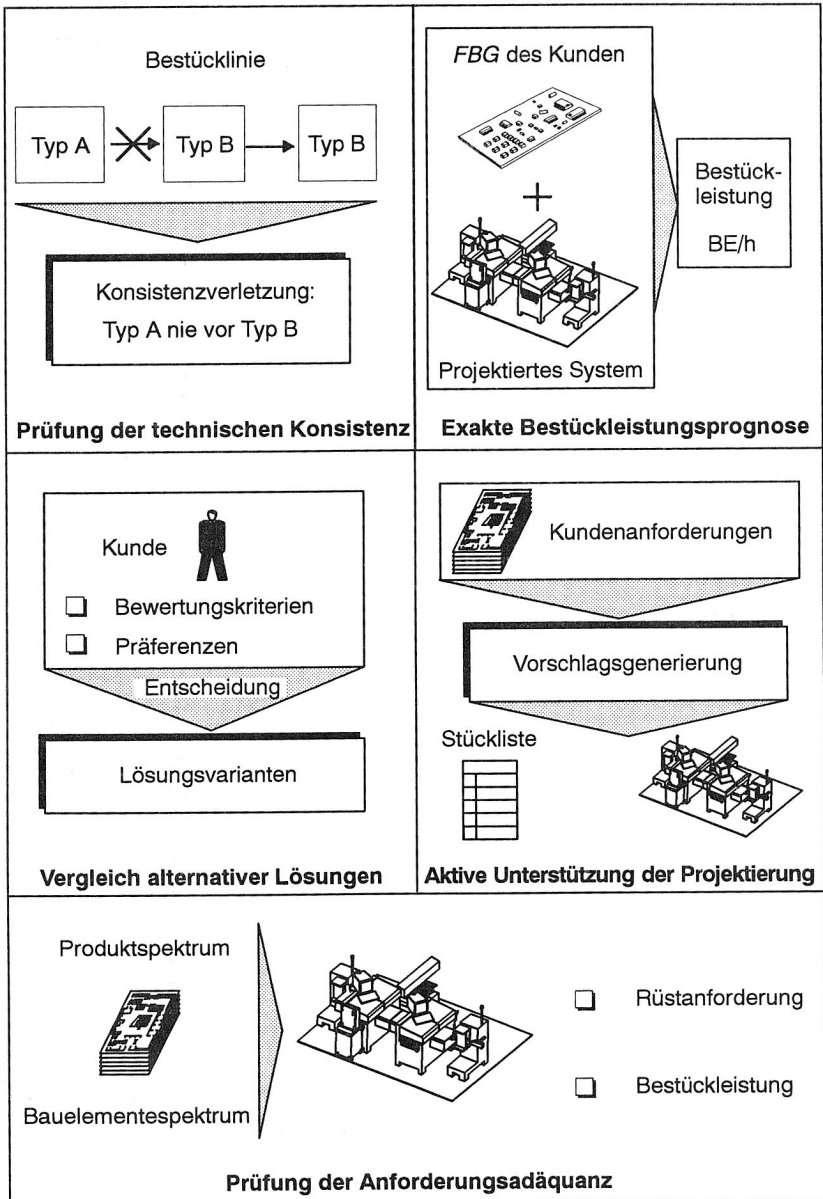


Bild 10: Ansatzpunkte der Entscheidungsunterstützung

gelegt welches Bauelementespektrum zu bestücken und andererseits, welche Stückzahlen der Flachbaugruppen zu fertigen sind. Genauere Informationen über die Flachbaugruppen, wie z. B. die Position der Bauelemente auf der Leiterplatte werden, da sie entweder nicht verfügbar oder noch mit großen Unsicherheiten behaftet sind, nicht berücksichtigt. Basierend auf diesen Eingangsinformationen sind zur Durchführung der Projektierung die folgenden Überprüfungsfunktionen hilfreich:

- Bestückleistungsanalyse
- Rüstbarkeit der Bauelemente

Die Bestückleistung des Systems wird für die durch die Flachbaugruppen festgelegte Bestückaufgabe ermittelt. Die Abhängigkeit der Systemleistung u. a. vom zu verarbeitenden Bauelementespektrum ist hierbei zu berücksichtigen. Die Approximation der Bestückleistung ist an dieser Stelle ausreichend.

Die zweite wichtige Information, die die Projektierung unterstützt, ist die Aussage, ob das geplante Bestücksystem genügend Fördererstellplatzkapazität auch für die Flachbaugruppe, die das größte Bauelementespektrum hat, besitzt. Die Rüstbarkeit der Förderer für die verschiedenen Bauelementetypen ist durch die verfügbaren Fördererstellplätze der Automaten begrenzt.

Jeder Bauelementtyp benötigt, sieht man von Mehrfachrüstungen ab, eine Bereitstellungspur eines Förderers. Die Förderer verfügen über eine oder mehrere Spuren und verbrauchen in Abhängigkeit ihrer Eignung für bestimmte Bauelementetypen und deren Bauform eine bestimmte Anzahl von Fördererstellplätzen (s. Bild 11). Sonderfälle, bei denen die Anordnung der Förderer auf den Automaten den Verbrauch der Stellplätze beeinflusst, können vernachlässigt werden und finden in diesem Zusammenhang keine Berücksichtigung.

Exakte Bestückleistungsprognose

Im Rahmen des Pflichtenhefts fordert der Kunde in der Regel eine garantierte Bestückleistung für eine von ihm vorgegebene Musterflachbaugruppe. Diese Leistung muß bei der Abnahme des Systems durch den Kunden vom Bestücksystem erbracht werden.

Die aus dieser Aufgabenstellung resultierenden Anforderungen an ein Berechnungsmodell zur Leistungsermittlung, unterscheiden sich von den Anforderungen im Rahmen der Funktionen zur Unterstützung der Projektierung (s. o.) schon allein aufgrund der erforderlichen Genauigkeit der Berechnung. Desweiteren sind die verfügbaren Eingangsinformationen wesentlich detaillierter. Die zu fertigende Flachbaugruppe ist durch ihre Bauelemente, sowie der damit korrespondierenden Bestückpositionen, exakt beschrieben.

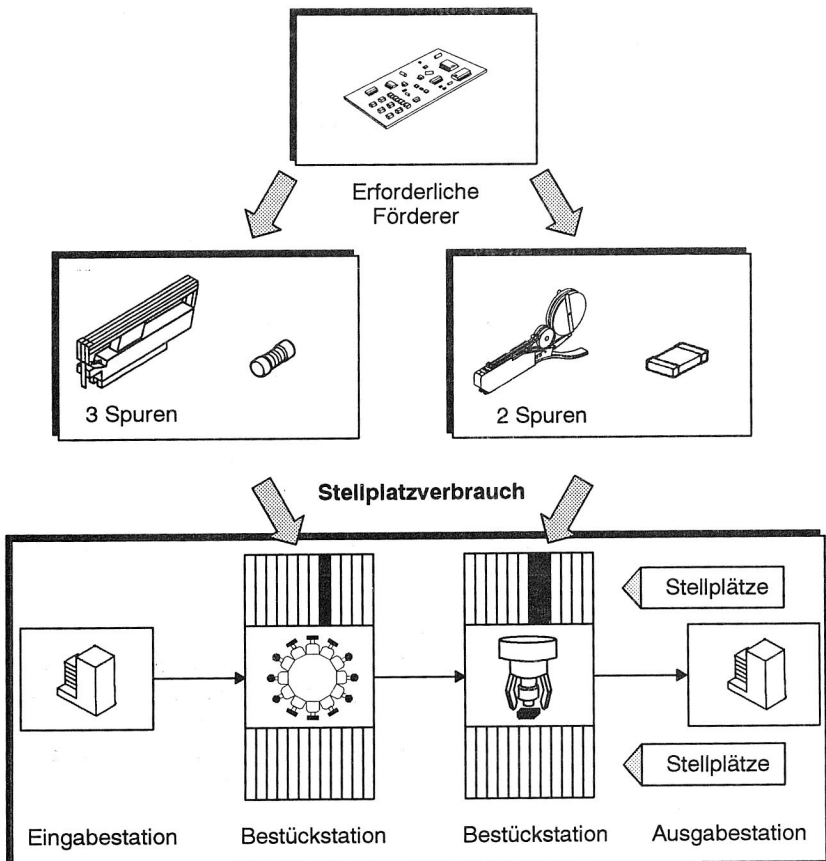


Bild 11: Überprüfung der Rüstbarkeit im Rahmen der Projektierung

Mittels dieser exakten Bestückleistungsprognose kann der Vertriebsingenieur schon in einer frühen Planungsphase qualifizierte Aussagen bezüglich der zu erwartenden Bestückleistung des projektierten Bestücksystems unter den vom Kunden vorgegebenen Randbedingungen machen. Das Erreichen dieser Werte bei der späteren Abnahme des Bestücksystems durch den Kunden ist dann gewährleistet.

Vergleich alternativer Lösungen

Die Kundenanforderungen werden bei den oben beschriebenen Unterstützungsmechanismen ausschließlich durch die zu fertigenden Flachbaugruppen repräsentiert. Die Anforderungen des Kunden sind aber in der Realität wesentlich vielfältiger. So

können z. B. Flexibilitätsaspekte bezüglich des Leistungsvermögens des Systems oder der Rüstbarkeit der Bauelemente, wichtige Kriterien bei der Entscheidung zugunsten einer bestimmten Alternative sein.

Eine Bewertung alternativer Systemlösungen unter Berücksichtigung der kundenspezifischen Präferenzen dient somit zum einen zur Unterstützung der Projektierung und zum anderen der Entscheidungsfindung des Kunden bei Existenz unterschiedlicher Lösungen.

Aktive Unterstützung der Projektierung

Bei den oben beschriebenen Funktionen zur Unterstützung der Angebotsbearbeitung wird die Auswahl der Systemkomponenten nicht unterstützt. Vielmehr werden dem Vertriebsingenieur Bewertungs- bzw. Überprüfungsfunktionen zur nachträglichen Prüfung eines Angebots zur Verfügung gestellt. Die Auswertung der Ergebnisse kann die Änderung eines Angebotes erforderlich machen.

Die Unterstützung der Auswahlentscheidungen, also des Prozesses der Projektierung hinsichtlich der Erfüllung der technischen und der kundenspezifischen Restriktionen bzw. Anforderungen ist eine weitere, die Angebotsbearbeitung vereinfachende Funktionalität. Hierzu ist Wissen über die Vorgehensweise bei der Projektierung und dem Ablauf der integrierten Entscheidungsprozesse erforderlich. Entsprechende Möglichkeiten zur Wissensspeicherung müssen im DSS vorhanden sein.

Die oben identifizierten Ansatzpunkte der Entscheidungsunterstützung werden der Entwicklung des **Entscheidungsunterstützenden System zur Angebotsbearbeitung (ESA)** zugrundegelegt und bestimmen somit den Funktionsumfang des Systems. Im folgenden Abschnitt wird auf das Softwarekonzept von ESA eingegangen und der Leistungsumfang der einzelnen Module skizziert.

3.3 Die Architektur von ESA

Für die einzelnen Aspekte der Entscheidungsunterstützung werden zum Teil eigenständige Systemmodule entwickelt (s. Bild 12). Desweiteren existieren Systemkomponenten, die die Pflege der Wissensbasis und der Stammdaten ermöglichen. Ergänzend hierzu gibt es Hilfsmittel zur Visualisierung des geplanten Produktionssystems und zur Erstellung der Angebotsunterlagen.

Integriert werden die einzelnen Werkzeuge aus datentechnischer Sicht durch eine gemeinsame Daten- und Wissensbasis. Die Verwaltung erfolgt mittels eines relationalen Datenbankmanagementsystems. Dem Benutzer präsentiert sich das System dank einer entsprechenden zentralen grafischen Schnittstelle als integriertes Werkzeug (s. Bild 13).

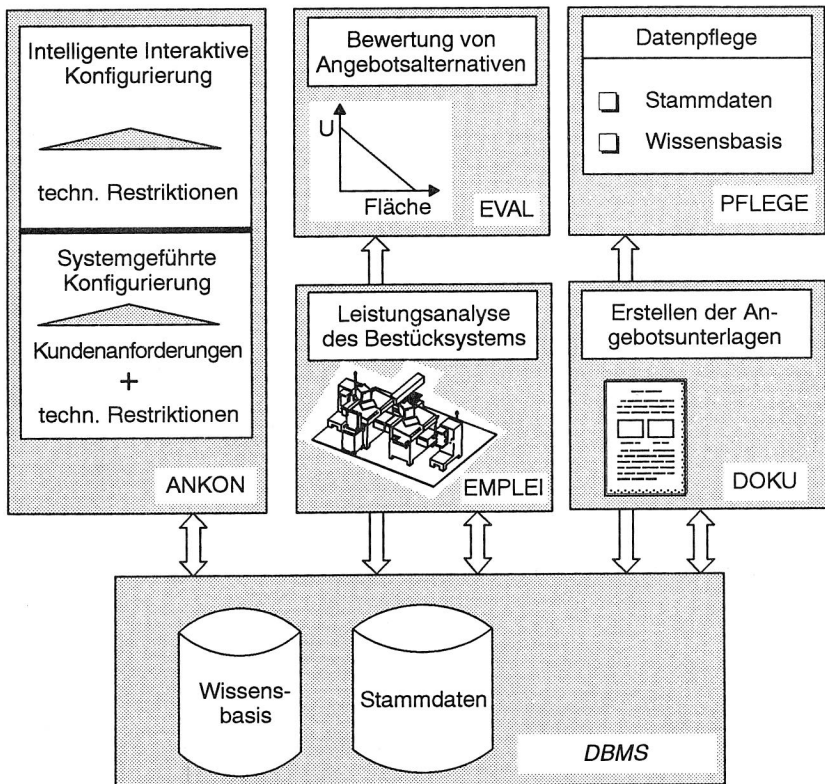


Bild 12: Systemarchitektur von ESA

Entwickelt wird das System auf Workstations mit einem *UNIX*-Betriebssystem unter *X11/MOTIF* /87/. Desweiteren werden zur Unterstützung der Entwicklungsarbeiten die Werkzeuge *INGRES/ WINDOWS 4GL* /105/ und *PROKAPPA* /102/ eingesetzt. Die Entwicklung des Moduls zur Visualisierung des projektierten Bestücksystems wird durch die Verwendung von Funktionalität des *CAD*-Systems *UNIGRAPHICS* /104/ unterstützt. Als relationales Datenbankmanagementsystem kommt *INGRES* /113/ zum Einsatz.

Nachfolgend wird kurz auf die Funktionalität und Intention der einzelnen Programmodule eingegangen. Die detaillierte Erläuterung erfolgt in den Kapiteln 5 bis 7.

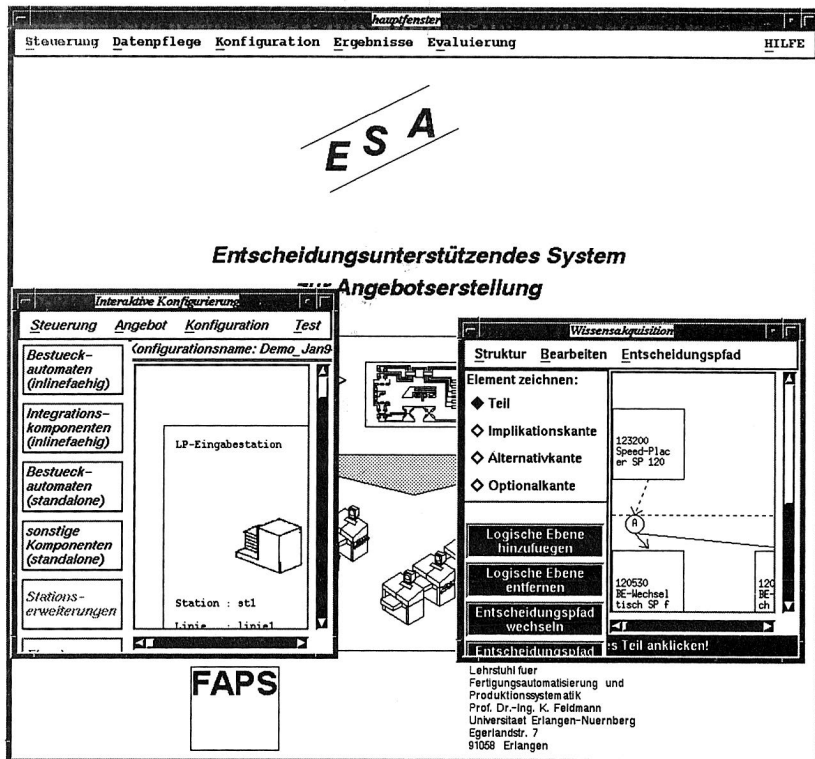


Bild 13: Benutzerschnittstelle des integrierten Systems zur Angebotsbearbeitung

ANKON

Der **Angebotskonfigurator (ANKON)** verfügt über eine interaktive und eine systemgeführte Variante. Bei der interaktiven Variante wird die Auswahl der Komponenten in Bezug auf die Einhaltung der technischen Restriktionen unterstützt. Weitere Funktionen ermöglichen die Überprüfung bereits erstellter Angebote hinsichtlich der Erfüllung der kundenspezifischen Anforderungen.

Bei der systemgeführten Variante hingegen werden die Kundenanforderungen schon von den Methoden zur Steuerung der Konfigurierung berücksichtigt. Die dem Anwender präsentierten Alternativen während der Konfigurierung sind auf die Kundenanforderungen abgestimmt.

DOKU

Der Modul dient einerseits zur Visualisierung des projektierten Bestücksystems und andererseits ermöglicht er darüberhinaus die automatisierte Erstellung der erforderlichen Angebotsunterlagen (s. Abschnitt 5.5.3). Hierzu müssen zwei Dinge erfüllt sein. Es muß eine graphisch ansprechende Visualisierung am Bildschirm geben (s. Bild 14) Desweiteren muß die Möglichkeit zur Erstellung eines dem Kunden zusendbaren Angebots gegeben sein. Hierzu gehört auch die Generierung eines Aufstellungsplans, der die geometrischen Informationen für den Kunden beinhaltet.

In den beiden folgenden Kapiteln werden die dem Angebotskonfigurator *ANKON* zugrundeliegenden Methoden und das Realisierungskonzept des Moduls vorgestellt.

4 Wissensbasierte Konfigurierung von Angeboten

Konfigurieren wird in Kombination mit dem Thema *Planen* als eigenständiges Forschungsgebiet der Künstlichen Intelligenz (KI) betrachtet. Gegenstand dieses Kapitels ist eine systematische Betrachtung der verfügbaren Methoden und die semantische Fixierung der gebräuchlichen Begriffe. Ein weiteres Ziel ist es, die existierenden Methoden, Werkzeuge und Konzepte bezüglich ihrer Tauglichkeit für den Anwendungsfall (s. Abschnitt 2.1) zu bewerten.

Die Evaluierung der verschiedenen Lösungsansätze bezüglich ihrer Eignung, mündet im Realisierungskonzept für den in Abschnitt 5 detailliert beschriebenen Angebotskonfigurator *ANKON*. Die entwickelten und verwendeten Methoden zur effizienten Wissensrepräsentation und Wissensverarbeitung basieren auf der im folgenden dargestellten systematischen Analyse des Stands der Technik in diesem Bereich.

Einleitend wird im folgenden Abschnitt der Nutzen eines wissensbasierten Konfigurators für die Aufgabe der Angebotserstellung im Bereich des Investitionsgütervertriebs aufgezeigt.

4.1 Motivation der wissensbasierten Angebotserstellung

In Bild 15 werden die nachfolgend ausführlich beschriebenen einzelnen Nutzenaspekte einer rechnergestützten, wissensbasierten Angebotserstellung im Überblick dargestellt.

Qualität des Angebots

Die Qualität eines Angebots spiegelt sich hauptsächlich in zwei Punkten wider:

- Erfüllen der Kundenanforderung
- Technische Konsistenz des Angebots

Der Kunde stellt gewisse Anforderungen an das geplante Produktionssystem. Primär ist dies für den betrachteten Bereich der Bestückssysteme die Forderung nach einer adäquaten Bestückleistung für ein bestimmtes Produktspektrum unter der Zielsetzung minimaler Investitionskosten. Weitere aus dem betrieblichen Umfeld des Kunden resultierende Anforderungen sind möglich. Mittels eines wissensbasierten Konfigurators, der über eine die Kundenpräferenzen berücksichtigende Konfigurationsstrategie verfügt, kann ein in hohem Maße kundenspezifisches Angebot rationell erstellt werden.

Desweiteren ist die technische Konsistenz des Angebots gewährleistet. Basierend auf den in der Wissensbasis abgelegten Konfigurationsrestriktionen und -regeln, ist

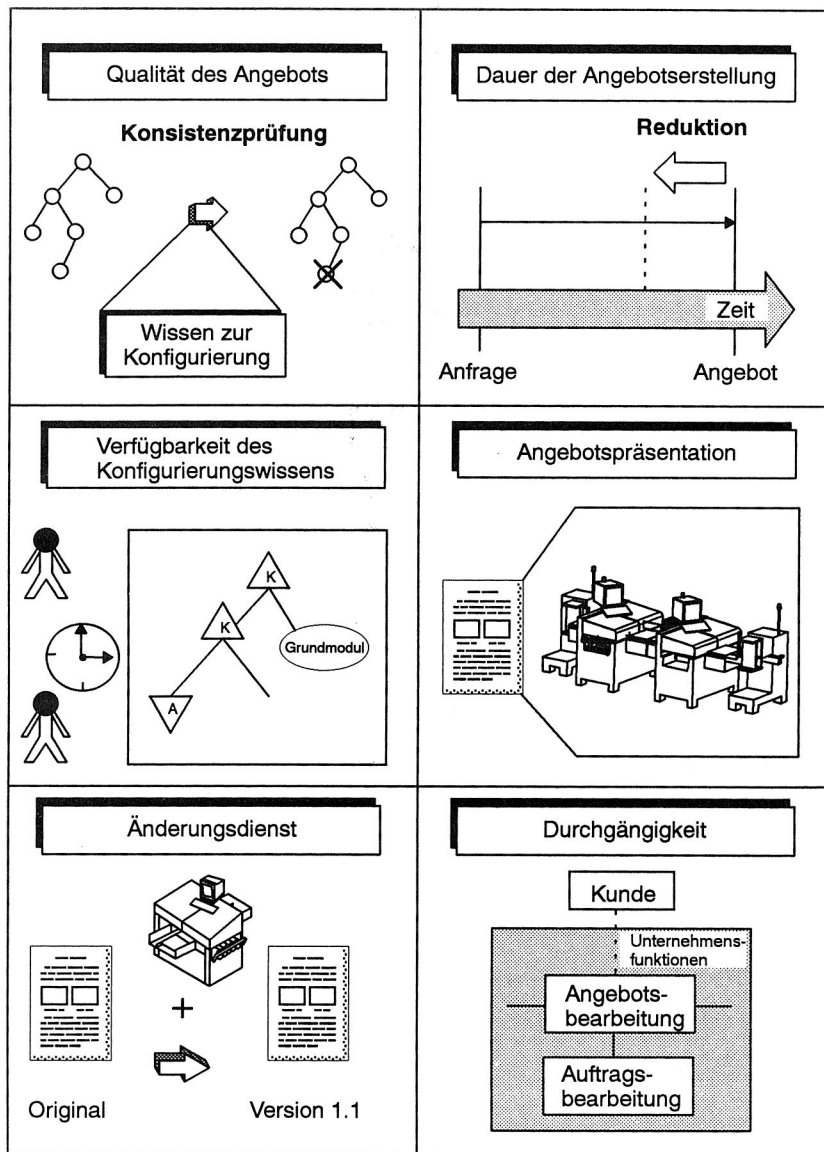


Bild 15: Nutzenaspekte der rechnergestützten, wissensbasierten Angebotserstellung

eine Überprüfung des konfigurierten Produktionssystems auf Vollständigkeit und Korrektheit möglich. Somit wird die Erstellung fehlerhafter Angebotsunterlagen vermieden.

Dauer der Angebotserstellung.

Die benötigte Zeit von der Anfrage des Kunden bis zum Versand des Angebots ist ein entscheidendes Kriterium bei der Auftragsvergabe /63/. Bei der Konfigurierung sind aufwendige zeitintensive Berechnungen erforderlich. So ist neben der Bestückleistungsermittlung auch eine Fördererkapazitätsbetrachtung durchzuführen. Eine Rechnerunterstützung kann gerade hier den Konstruktionsprozeß verkürzen. Mittels weiterer, an den Konfigurator angebundener Funktionen, wie zum Beispiel der automatischen Erstellung der Angebotspapiere, kann die Dauer von der Anfrage bis zum fertigen Angebot weiter verkürzt werden. Diese zusätzlichen Werkzeuge übernehmen die vom Konfigurator erzeugten Daten.

Wissensaggregation und Wissensverfügbarkeit

Zur Konfigurierung eines Bestücksystems ist oftmals Wissen aus verschiedenen Abteilungen des Unternehmens erforderlich. Dieses verteilte Wissen ist personengebunden und daher nicht jederzeit verfügbar. In der Wissensbasis des Konfigurators kann zumindest ein Teil des verteilten Wissens abgelegt werden. Somit ist das Konfigurationwissen jederzeit für die Systemanwender verfügbar.

Änderungen der Konfigurationsrestriktionen

Gerade im Bereich der Produktionssysteme für die Flachbaugruppenfertigung ist auf Grund der kurzen Produkt- und Technologieinnovationszyklen mit häufigen Änderungen des Equipments zu rechnen /37/. Mittels einer einfach zu handhabenden Wissensakquisitionskomponente (s. Abschnitt 5.5.1) kann die Wissensbasis problemlos aktualisiert werden und somit die Änderungen bei der Angebotserstellung sofort berücksichtigt werden.

Durchgängige Bearbeitung der Anfrage

Eine rechnergestützte Konfigurierung des Angebots ermöglicht im Fall des Auftragserhalts die direkte Weiterverwendung der bereits ermittelten Daten. So kann zum Beispiel eine aus dem Angebot abgeleitete Stückliste von der Auftragsbearbeitung weiterverarbeitet werden. Dadurch wird eine Aufwandsreduzierung und eine Verringerung der Wahrscheinlichkeit von Übermittlungsfehlern bewirkt.

Vertriebsorientierte Präsentation

Auch beim Vertrieb von Investitionsgütern spielen Aspekte, die über die zu erfüllenden technischen Anforderungen hinausgehen, eine nicht zu vernachlässigende Be-

deutung bei der Entscheidung des potentiellen Käufers für einen bestimmten Hersteller. Dem schriftlichen Angebot und der Präsentation des Equipments beim Hersteller kommt daher besondere Bedeutung zu /122/. Eine ansprechende Visualisierung des angebotenen Produktionssystems im Angebot ist daher notwendig. An den Konfigurator kann ein Visualisierungsmodul angekoppelt werden, der bei entsprechender Realisierung die volumenorientierte Darstellung des Produktionssystems am Bildschirm ermöglicht. Modifikationen der Systemkonfiguration können dann sofort sichtbar gemacht werden. Desweiteren kann die räumliche Einordnung in die Fertigungsumgebung des Kunden veranschaulicht werden. Diese visuellen Informationen können automatisch in das schriftliche Angebot integriert werden.

Modifikation des Angebots

Bei der rechnergestützten Konfigurierung kann bei sich ändernden Kundenanforderungen eine Änderung des Angebots schnell und effizient vorgenommen werden. Die intelligenten Mechanismen zur Sicherung der Angebotskonsistenz sind selbstredend auch für diese Aufgabe verfügbar. Die Modifikation der Angebotsunterlagen ist aufgrund der Verknüpfung des Konfigurators mit Funktionen der automatisierten Generierung der Angebotsunterlagen problemlos möglich.

Im nächsten Abschnitt werden die grundlegenden Begriffe des Themenkomplexes *Planen* und *Konfigurieren* definiert. Unter Berücksichtigung der damit geschaffenen einheitlichen Begriffsbasis werden die weiteren Ausführungen zur wissensbasierten Angebotskonfigurierung vorgenommen.

4.2 Einheitliche Begriffsbasis

Bevor in den nachfolgenden Abschnitten und Kapiteln die Problematik des wissensbasierten Konfigurierens von Produktionssystemen der Elektronikfertigung näher betrachtet wird, ist eine grundlegende einheitliche Begriffsbasis festzulegen. Einleitend wird eine Einordnung des Problemkreises des Konfigurierens in das Forschungsgebiet der Künstlichen Intelligenz vorgenommen. Daran anschließend werden die verschiedenen im Umfeld des Konfigurierens grundlegenden Begriffe definiert.

Bild 16 zeigt die verschiedenen Forschungsbereiche der Künstlichen Intelligenz im Überblick. Der Aspekt des Konfigurierens läßt sich dem Teilbereich der Expertensystemforschung zuordnen. Ein Bestreben in diesem Forschungsgebiet ist es, unterschiedliche, charakteristische Anwendungsklassen zu definieren. Diese Klassen werden auch als Problemlösungstypen bezeichnet /12//91/. Ziel ist, es klassenspezifische Methoden zu entwickeln, die für sämtliche Anwendungen dieser Klasse bzw. dieses Problemlösungstyps geeignet sind.

Nach Puppe gehört das Konfigurieren zum Problemlösungstyp Konstruktion /117/. Das Konfigurieren ist aber nur ein Teilaspekt der gesamten Konstruktionsproblema-

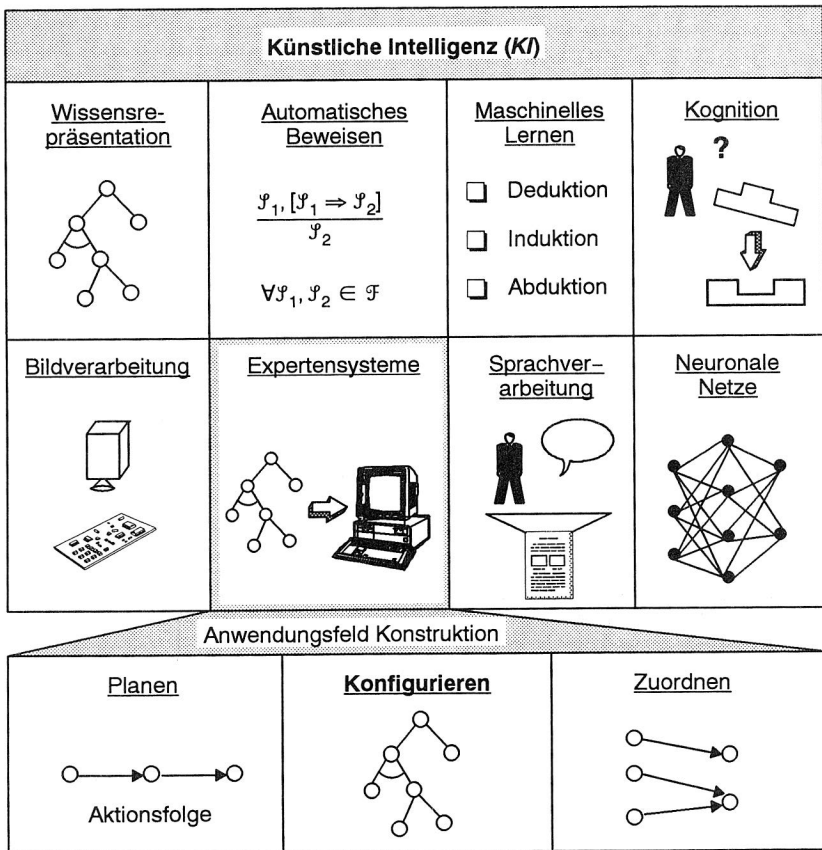


Bild 16: Einordnung des Themenkomplexes Konfigurieren in die Forschungsgebiete der Künstlichen Intelligenz (KI)

tik/13//59/. Weiterhin gehören Planungs- und Zuordnungsprobleme zum Problemlösungstyp Konstruktion. Die Abgrenzung der einzelnen Teilaspekte des Problemlösungstyps Konstruktion wird durch die folgenden Definitionen vorgenommen /26//117//150/:

- **Planen**
Unter Planen wird das Erstellen einer Struktur von Aktionen, deren Ausführung ein gegebenes Problem löst, verstanden.
- **Konfigurieren**
Beim Konfigurieren wird eine Struktur von Komponenten, die gegebenen Randbedingungen genügt, erstellt.

- Zuordnung

Bei einem Zuordnungsproblem wird eine Menge von Objekten unter Berücksichtigung von Restriktionen auf eine andere Menge von Objekten abgebildet.

Die Definitionen zeigen, daß das Planen und das Konfigurieren große Ähnlichkeiten aufweisen. Entscheidender Unterschied des Planens zum Konfigurieren ist die Berücksichtigung zeitlicher Aspekte. So handelt es sich beim Planen um einen nicht-monotonen Prozeß, da Situationen generiert werden, die aufgrund von Änderungen mit Merkmalen der vorangegangenen Situationen unverträglich sind /62/.

Da gerade der Aspekt der Gültigkeit eines Merkmals nach Ausführung einer Aktion eine wichtige Rolle bei vielen Arbeiten zum Planen spielt, sind die Ansätze aus diesem Bereich nur von geringer Relevanz, weil beim Konfigurieren diese Problematik nicht auftritt. Die Verfahren im Bereich der Konfiguration haben hingegen auch ihre Bedeutung für den Bereich des Planens /150/.

Bevor einzelne, primär in Kapitel 5 verwendete Begriffe definiert werden, ist prinzipiell die Abgrenzung der Begriffe Konstruktion und Konfigurierung vorzunehmen. Konstruktion hat eine weitaus umfassendere Bedeutung als Konfigurierung. So wird nach Pahl und Beitz /109/ zwischen den Konstruktionsarten Neu-, Anpassungs- und Variantenkonstruktion unterschieden. In den informatikgeprägten Veröffentlichungen haben sich die Begriffe innovatives Design¹, Routinedesign und kreatives Design durchgesetzt /43//142/. Unter Konfigurierung wird aber ausschließlich die Konstruktionsart Variantenkonstruktion bzw. Routinedesign verstanden. Zur Unterstützung des innovativen bzw. kreativen Designs haben sich zudem aufgrund des Unterschiedes zum Routinedesign bzw. Konfigurierens andere Methoden und Werkzeuge (vgl. /92/) etabliert. Es bleibt festzuhalten, daß die Verwendung des Begriffs Konstruktion im Rahmen der Arbeit immer dem impliziten Wissen unterliegt, daß es sich um die Konstruktionsart Variantenkonstruktion handelt. Nachfolgend sind die einzelnen Begriffe definiert /48/.

- Konstruktionsprozeß

Unter dem Konstruktionsprozeß wird die Gesamtheit aller Konstruktionsschritte verstanden.

- Konstruktion

Mit Konstruktion werden einzelne Zustände eines Konstruktionsprozesses bezeichnet. Dies ist im speziellen auch das Ergebnis eines Konstruktionsprozesses. Im Kontext der Arbeit wird alternativ hierzu der Begriff Konfiguration verwendet.

- Einzelkomponente

Unter einer Einzelkomponente wird ein nicht mehr weiter unterteilbares Objekt einer Konstruktion verstanden.

1 *Design* hat im anglo-amerikanischen Sprachraum die Bedeutung des deutschen Begriffs Konstruktion und wird in diesem Kontext so verstanden und verwendet

- **Konstruktionsobjekt**
Dies ist ein einzelner Bestandteil einer Konstruktion. Es kann sich hierbei um ein elementares, nicht weiter zerlegbares Konstruktionsobjekt oder um ein Objekt, das wiederum aus mehreren Einzelkomponenten besteht, handeln. Synonym werden die Begriffe Konfigurationsobjekt und Konstruktionskomponente verwendet.
- **Konstruktionsschritt**
Ein Konstruktionsschritt ist ein elementarer Bestandteil des Konstruktionsprozesses. Die Summe aller Konstruktionsschritte beschreibt den Konstruktionsprozeß. Ein Konstruktionsschritt bewirkt die Veränderung der aktuellen Konfiguration. Je nach angewendeter Problemlösungsmethode gibt es unterschiedliche Arten von Konstruktionsschritten (s. Abschnitt 5.4.2).
- **Lösungsraum**
Der Lösungsraum umfaßt alle, unter den gegebenen Randbedingungen möglichen, Konfigurationen.

Im nächsten Abschnitt wird auf den Aufbau und die Eigenschaften von wissensbasierten Konfiguratoren eingegangen.

4.3 Grundlegende Merkmale von Konfiguratoren

4.3.1 Eigenschaften

Mit dem Einsatz von Konfiguratoren soll der Konstruktionsprozeß von komplexen Objekten unterstützt werden. Ziel hierbei ist die optimale Erfüllung der Anforderungen unter Berücksichtigung der existierenden Randbedingungen (vgl. 4.1). Bei der Konfigurierung gilt es grundsätzlich zwei Fälle zu unterscheiden:

- **Neukonfigurierung**
- **Änderungskonfigurierung**

Bei der Änderungskonfigurierung wird im Gegensatz zur Neukonfigurierung auf eine bestehende Lösung aufgesetzt und diese entsprechend der geänderten Anforderungen modifiziert [65]. Im Kontext der rechnergestützten Konfigurierung von Produktionssystemen werden zwei Varianten der Änderungskonfigurierung unterschieden. Bei der additiven Methode wird zwar die bestehende Lösung berücksichtigt, aber sie wird ausschließlich erweitert. Bei der substitutiven Methode besteht die Möglichkeit, die bestehende Lösung zu verändern.

Ein weiteres, für Konfiguratoren charakteristisches Merkmal, ist der sehr große zu betrachtende Lösungsraum. Die Größe des Lösungsraums ergibt sich aufgrund der

kombinatorischen Explosion. Verzichtet man bei der Konfigurierung auf den Einsatz von Wissen, so reduziert sich das Problem auf ein rein kombinatorisches Problem. Dieses Problem hat aber zumeist einen sehr großen Lösungsraum. Die Komplexität einer solchen Aufgabenstellung vermittelt die nachfolgend dargestellte Berechnungsvorschrift für die Anzahl (*Anz*) möglicher Konfigurationen /26/.

$$Anz = \sum_{i=1}^n n^i m^{i-1} = n \frac{(nm)^n - 1}{nm - 1}$$

wobei

n: Anzahl der Konstruktionskomponenten

m: Anzahl der Verknüpfungen der Konfiguration

Diese Komplexität ergibt sich beim kompletten Verzicht auf Wissen beim Konfigurieren. Dörner zeigt den positiven Einfluß des in den Konstruktionsprozeß eingebrachten Wissens auf die Problemkomplexität und motiviert daher den Einsatz wissensbasierter Methoden für Konfigurierungsaufgaben /26/.

Ein weiteres wichtiges, auf der Komplexität bzw. Größe des Lösungsraums beruhendes Merkmal eines Konfigurators ist der Einsatz von interaktiven Problemlösungsmechanismen. Dies hat vor allem für die Konfigurierung technischer Systeme seine Gültigkeit /147/. Interaktive Lösungsverfahren ermöglichen die Nutzung schwer bzw. nicht abbildbaren Wissens des Anwenders für den Konstruktionsprozeß und garantieren daher eine optimale Nutzung vorhandener Wissensressourcen. Der Konfigurator übernimmt somit die Funktion eines intelligenten Assistenten /40/.

4.3.2 Architekturkonzepte für wissensbasierte Konfiguratoren

Der Aufbau eines Konfigurators wird durch zwei wesentliche Punkte bestimmt. Dies ist zum einen die Realisierung der Wissensmodellierung und der damit verbundenen Wissenserwerbskomponente und zum anderen die Entscheidung für den Einsatz einer bestimmten Problemlösungsstrategie.

Wissensbasis

Grundsätzlich gilt es zwischen verteilten und zentralen Wissensbasen zu unterscheiden. Bei verteilten Wissensbasen treten eine Reihe von Problemen auf:

- Verfügbarkeit des Wissens
- Konsistenzerhaltung
- Koordinierung der Anwendung der Wissensbasen

Ein weiterer Einflußfaktor auf die Systemarchitektur ist die Realisierung der Wissensspeicherung. Die Gewährleistung der Wissenspersistenz kann mittels Datenbanken oder über fileorientierte Mechanismen erfolgen. Der Einsatz von Datenbanken empfiehlt sich, wenn der Konfigurator mehrbenutzerfähig sein soll und Daten verarbeitet, die von anderen Systemen auch verwendet werden. Dies ist meist der Fall, da der Konfigurator in der Regel keine Insellösung, sondern ein integraler Bestandteil der vorhandenen EDV-Umgebung ist /9/.

Sind bei der Problemlösung verteilte, separate Wissensbasen implizierende, Wissensquellen zu berücksichtigen, so haben sich sogenannte *Blackboardsysteme* und deren Derivate als Architekturkonzept etabliert /98/. Bild 17 zeigt exemplarisch eine erweiterte Blackboardarchitektur. Charakteristische Merkmale dieser Systeme sind

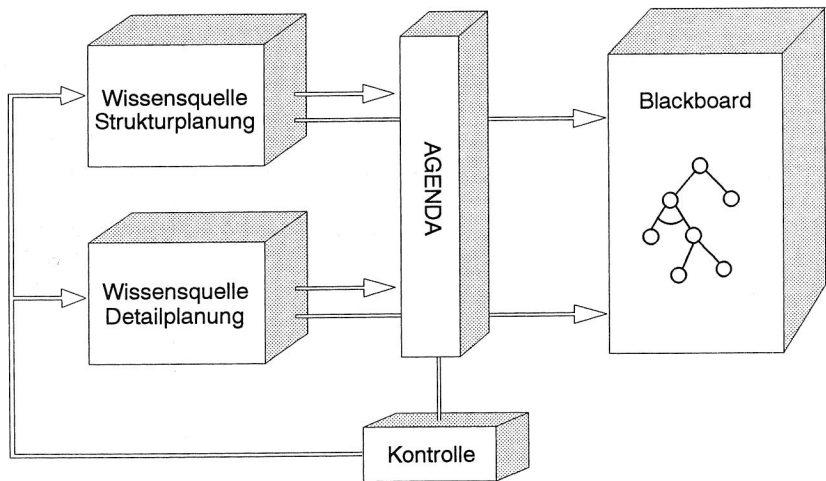


Bild 17: Architektur eines erweiterten Blackboardsystems

verteilte Wissensquellen, die unabhängig voneinander an der Problemlösung mitwirken, sowie eine zentrale Datenbasis. Die zentrale Datenbasis wird als *Blackboard* bezeichnet, und repräsentiert die dynamische Wissensbasis. Abweichend vom elementaren Blackboard-Modell wird bei der hier vorgestellten Variante die Aktivierung der Wissensquellen über eine entsprechende Kontrollfunktion sowie einer zugeordneten Agenda gesteuert. Der Einsatz eines solchen Konzepts ist angezeigt, wenn die betrachtete Domäne über Wissensbereiche verfügt, deren Formalisierung unterschiedlicher Methoden bedarf.

Der zweite zu berücksichtigende Einflußfaktor auf den Aufbau des Konfigurators, ist die zur Anwendung kommende Problemlösungsmethode. Hierbei besteht eine enge Verknüpfung zu den Methoden der Wissensrepräsentation.

Problemlösung

Je nach angewendeter Problemlösungsmethode bzw. Problemlösungsmethoden, werden unterschiedliche, sich in der Systemarchitektur widerspiegelnde Funktionen benötigt (vgl. Abschnitt 5.7). So ist zum Beispiel bei einer rein interaktiven Problemlösung eine eigenständige Erklärungskomponente nicht erforderlich. Die Architektur des im Rahmen dieser Arbeit betrachteten Konfigurators ist in Abschnitt 5.2 beschrieben.

4.3.3 Anwendungsbereiche und Beispielsysteme

In diesem Abschnitt wird auf die primären Anwendungsbereiche von Konfiguratoren eingegangen und einzelne für die Methodenentwicklung im Rahmen dieser Arbeit richtungsweisende Systeme werden exemplarisch vorgestellt. Die Anwendungsbereiche kann man grob in drei Klassen unterteilen:

- Konfigurierung technischer Produkte
- Planung bzw. Konfigurierung von Produktionssystemen
- Konfigurierung von Objekten nicht technischer Natur

Konfigurierung technischer Produkte

Ein wissensbasierter Konfigurator kann für verschiedenste technische Artefakte sinnvoll sein. Vorbedingung eines effizienten Einsatzes ist eine hinreichend komplexe Aufbaustruktur des Produkts, sowie deren modularer Aufbau. Desweiteren muß der Lösungsraum über eine bestimmte Größe verfügen.

Die ersten Konfiguratoren beschäftigten sich mit der Konfigurierung von Computern /90/. So wird der regelbasierte Konfigurator *R1* bzw. *XCON* als der Urvater der Konfiguratoren angesehen. Die Bedeutung dieses Systems liegt in den aus der praktischen Anwendung in großem Stil gewonnenen Erkenntnisse über die angewendeten Methoden und Expertensystemprojekte für Konstruktionsaufgaben im Allgemeinen. Die dabei verfolgte strikte Fixierung auf das regelbasierte Paradigma bei der Wissensrepräsentation hat sich für Konfiguratoren als nicht vorteilhaft herausgestellt. So ist aufgrund des Fehlens expliziter Kontrollstrukturen eine Kontrolle z. B. über sogenannte Metaregeln notwendig. Eine Pflege der Wissensbasis wird somit zu einem extrem schwierigen Unterfangen, da die Unabhängigkeit der Regeln nicht mehr gewährleistet ist /1//131/. Weitere Systeme befassen sich mit der Konfigurierung von:

- Aufzügen /88/
- Digitalen Vermittlungssystemen /125/
- CNC–Steuerungen /54/
- Passagierräumen von Flugzeugen /79/
- Systeme der Fördertechnik /74/
- Industrielle Rührwerke /8/

Die reine Produktkonfigurierung unterscheidet sich von der Konfigurierung von Produktionssystemen nicht unerheblich. Im nächsten Abschnitt wird auf die Besonderheiten dieser Klasse von Konstruktionsproblemen eingegangen.

Konfigurierung von Produktionssystemen

Bei der Konfigurierung von Produktionssystemen ist die zu erfüllende Fertigungsaufgabe der entscheidende Einflußfaktor bei der Konfigurierung. Insbesondere ist das erwartete Systemverhalten im Produktionsprozeß ein wichtiger Input für die zu treffenden Entscheidungen bei der Konfigurierung. Die Festlegung der Konfiguration ist abhängig von der Produktplanung, als auch von der operativen Planung im Fertigungsbereich. Die Berücksichtigung der operativen Planung bei der Konfigurierung erweitert das originäre Konfigurierungsproblem zu einem kombinierten Planungs- und Konfigurierungsproblem (s. Bild 18). Bei einer auftragsgebundenen Fertigung spielt die Produktionsplanung für die Konfigurierung keine Rolle, da die notwendigen Informationen nicht vorhanden sind, oder mit großen Unsicherheiten behaftet sind.

Planen und Konfigurieren ist in diesem Zusammenhang gemäß den in Abschnitt 4.2 gegebenen Definitionen zu verstehen. Die der operativen Planung anhaftende Unsicherheit erfordert spezielle, von den bei der Produktkonfigurierung üblichen Methoden abweichende Verfahren (vgl. Kapitel 5).

Nachfolgend wird auf einige wissensbasierte Planungs- bzw. Konfigurierungssysteme für Produktionssysteme näher eingegangen. Die Unterschiede zur Konfigurierung von Produktionssystemen der Flachbaugruppenfertigung werden herausgearbeitet. Alternative Ansätze zur Auslegung von Produktionssystemen werden in diesem Zusammenhang nicht betrachtet (vgl. /21//121/). Zwei Anwendungsbereiche herrschen bei den wissensbasierten Planungs- bzw. Konfigurierungssystemen vor. Ein Einsatzbereich ist die Konfigurierung von Flexiblen Fertigungssystemen /82//94//154/. Hier besteht eine enge Verknüpfung zu den Arbeiten, die sich mit der Wirtschaftlichkeitsbetrachtung von Flexiblen Fertigungssystemen befassen, da hinter einer Konfigurierung immer die Intention steht, die wirtschaftlich optimale Lösung zu finden /139//140/. Gerade die Problematik der Quantifizierung der Flexibilität (vgl. Abschnitt 6.2) ist ein Schwerpunkt dieser Arbeiten.

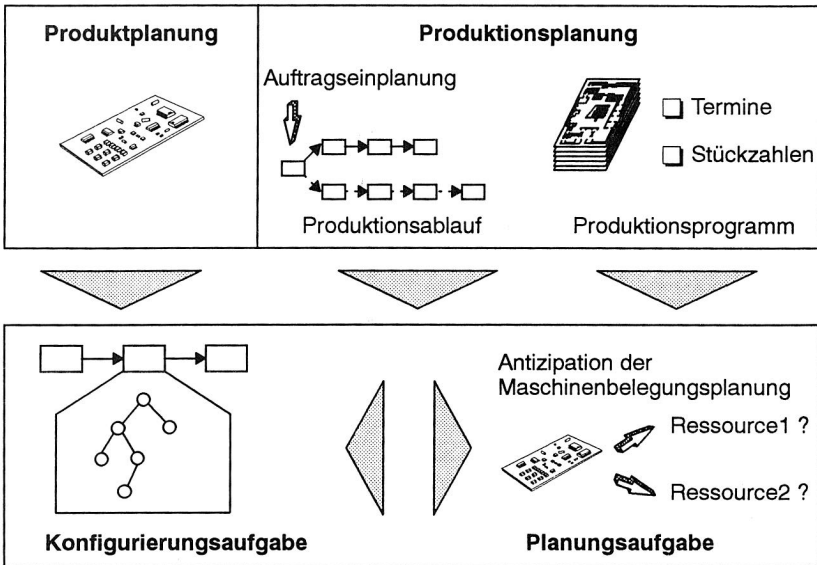


Bild 18: Einflußfaktoren auf die Konfigurierung von Produktionssystemen

FLEXPERT ist ein Planungssystem, das die Strukturplanung und Grobauslegung von Flexiblen Fertigungssystemen unterstützt /147/. Neben der Konfigurierung neuer Systeme wird auch die Analyse bereits existierender Anlagen ermöglicht. Hierzu werden die Simulationstechnik, sowie Verfahren zur Wirtschaftlichkeitsbetrachtung angewendet.

Die speziellen Anforderungen bei der Konfigurierung von Bestückssystemen, wie zum Beispiel die Rüstbarkeitsüberprüfung sind mit diesem auf die Teilefertigung abgestimmten System nicht bearbeitbar. Zudem wird die exakte Konfigurierung der einzelnen Maschinen selbst im Rahmen der Grobauslegung nicht ermittelt. Für die Unterstützung der Angebotserstellung ist aber gerade eine detaillierte Ermittlung sämtlicher benötigter Komponenten unumgänglich.

Den zweiten Schwerpunkt der Arbeiten bildet der Bereich der wissensbasierten Montageplanung /24/33//148/. Die dabei auftretenden Probleme sind in den Arbeiten von Ganghof und Köhne dargestellt /42/77/. Speziell das zu lösende kombinierte Planungs- und Konfigurierungsproblem wird betrachtet. Gerade in diesem Punkt unterscheidet sich die Bestücksystemkonfigurierung von den Ansätzen der Montagesystemplanung. Bei der Konfigurierung der Bestückssysteme ist eine Zuordnung der Leiterplatten auf die Ressourcen erforderlich. Bei der Montagesystemplanung hinge-

gen ist eine Festlegung der Abfolge der Montageoperationen, die einen entscheidenden Einfluß auf die Konfiguration des Montagesystems hat, notwendig. Das zu betrachtende Problem bei der Bestückssystemplanung ist also ein kombiniertes Zuordnungs- Konfigurierungsproblem (vgl. Abschnitt 4.2).

Konfigurierung von Objekten nicht technischer Natur

Zu diesem Themenkreis gehören z. B. Arbeiten, die die Konfigurierung chemischer Verbindungen behandeln. Die Arbeiten zum Konfigurieren in den sogenannten schwach strukturierten Domänen befinden sich momentan erst im Anfangsstadium /123/.

Die Betrachtung der existierenden Systeme macht deutlich, daß keines dieser Systeme den Anforderungen eines Bestückssystemkonfigurators als Bestandteil eines integrierten Systems zur Angebotsbearbeitung genügt. Die Entwicklung spezieller, den Eigenschaften der Domäne entsprechenden Wissensrepräsentationsformalismen und Problemlösungsmethoden ist unter Berücksichtigung der bereits vorhandenen Methoden und Verfahren erforderlich. In Kapitel 5 werden diese Arbeiten vorgestellt.

4.3.4 Entwicklungstrends bei Konfiguratoren

Gerade bei Konfiguratoren hat sich die generelle Entwicklung im Bereich der Expertensystemtechnologie hin zur stärkeren Integration des Benutzers in den Problemlösungsprozeß durchgesetzt. In einem sehr komplexen Anwendungsfeld, wie es die Konfigurierung von Produktionssystemen darstellt, hat sich dieser Ansatz als einzig tragfähig erwiesen. Den entwickelten Systemen wird keine substitutive, sondern eine beratende Eigenschaft zugeordnet /147/.

Die Entwicklungen bei den Problemlösungsstrategien und Wissensrepräsentationsformalismen konzentrieren sich auf sogenannte starke Methoden für einzelne Anwendungsbereiche. Die Anwendungserfahrungen haben gezeigt, daß nur auf einer domänenangepaßten Wissensrepräsentation basierende starke Problemlösungsverfahren den Konstruktionsprozeß sinnvoll unterstützen können. Eine Formulierung des Domänenwissens mittels schwacher Methoden, wie z. B. Regeln, ist in den meisten Anwendungsfällen nur für Teilbereiche der Domäne sinnvoll /55//69//134/.

Desweiteren fokussieren sich die aktuellen Forschungsarbeiten auf die folgenden Problembereiche:

- Konfigurieren in schwach strukturierten Domänen, das heißt von Objekten deren Struktur a priori nicht festgelegt ist /123/
- Compilation von Wissensbasen /5/

- Unschärfe Modellierung, das heißt insbesondere die Verarbeitung unscharfer Aufgaben- bzw. Zielformulierungen /41/
- Optimierungsbasiertes Konfigurieren /128/
- Logikbasiertes Konfigurieren /73/
- Konfigurieren unter Berücksichtigung geometrischer Informationen /79/

Gerade das optimierungsbasierte Konfigurieren ist ein wichtiger Bereich im Hinblick auf die im Rahmen dieser Arbeit verfolgten Aufgabenstellung. Die Konfigurierung der Bestückssysteme erfolgt unter der Prämisse, die Kundenanforderungen optimal zu erfüllen. Die Lösung dieser Optimierungsaufgabe ist integraler Bestandteil der Konfigurationserstellung und wird durch die unterschiedlichen Zielkriterien der verschiedenen Kunden erschwert. Verfahren zur Lösung dieser Aufgabe finden sich in Kapitel 5.

4.4 Realisierungsalternativen

Zur Unterstützung der Entwicklung von wissensbasierten Systemen haben sich verschiedene Werkzeuge am Markt etabliert. Neben den kommerziellen Systemen werden aber auch im akademischen Bereich solche Werkzeuge entwickelt. In diese Arbeiten fließt primär die Erkenntnis ein, daß die Bereitstellung von Standardmethoden und Formalismen für viele Anwendungsfälle nur einen Teil der möglichen Unterstützung darstellt. Der Trend hin zu leistungsfähigen, problemspezifischen Werkzeugen ist unverkennbar (s. Abschnitt 4.4.2). Nachfolgend werden nun sowohl die kommerziellen, als auch die Systeme aus dem wissenschaftlichen Bereich betrachtet und gemäß ihrer Tauglichkeit, für den oben vorgestellten Anwendungsfall, evaluiert. Diese Untersuchung mündet in die Entscheidung für das im Rahmen dieser Arbeit verfolgte Realisierungskonzept.

4.4.1 Kommerzielle Systeme zur Unterstützung

Bevor die einzelnen Klassen der Entwicklungswerkzeuge näher beleuchtet werden, sind die Teilfunktionen, deren Entwicklung durch die Werkzeuge unterstützt wird, zu identifizieren. Bild 19 zeigt im Überblick sowohl die schwerpunktmäßig unterstützten Entwicklungsaufgaben, als auch eine Klassifizierung der Entwicklungswerkzeuge /124/. Die Eignung der Werkzeuge der verschiedenen Klassen, die Entwicklungen für die zentralen Komponenten eines wissensbasierten Systems zu unterstützen, variiert stark und ist Gegenstand der nachfolgenden Ausführungen.

Shells

Eine Expertensystemshell verfügt über eine vorab festgelegte Funktionalität und Methode für die Teilaspekte Wissensrepräsentation, Benutzerinteraktion und Problem-

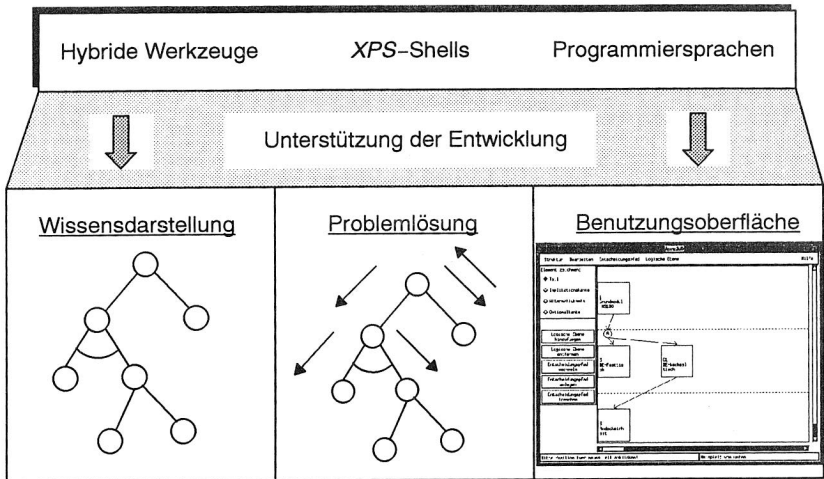


Bild 19: Teilaufgaben bei der Entwicklung von wissensbasierten Systemen und mögliche Realisierungswerkzeuge

lösung. Bei der Anwendung eines solchen Werkzeugs muß die Wissensmodellierung mittels der vorhandenen Wissensrepräsentationsformalismen durchgeführt werden. Die weiteren Bestandteile des Anwendungssystems erfordern dann keinen zusätzlichen Aufwand. Die Dialog- und die Problemlösungskomponente sind fertig implementiert und benötigen nur eine entsprechend gefüllte Wissensbasis. Dieser geringe Entwicklungsaufwand ist der entscheidende Vorteil dieser Werkzeuge.

Der gravierende Nachteil hingegen ist die mangelnde Flexibilität der Werkzeuge. Das Domänenwissen muß in die vorhandenen Standarddarstellungsmechanismen gepreßt werden und eine Anpassung der Benutzungsschnittstelle bzw. der angewendeten Problemlösungsmethode ist in der Regel nicht möglich.

Die oben aufgeführten Defizite machen den Einsatz von Shells für den im Rahmen dieser Arbeit betrachteten Anwendungsfall unmöglich. Gerade im Bereich der wissensbasierten Konfigurierung sind, aufgrund der spezifischen Anforderungen dieses Problemtyps, spezielle Methoden zur Wissensdarstellung und Problemlösung erforderlich. Je nach Anwendungsbereich variieren diese Methoden, so daß eine Shell zur Unterstützung dieser Systementwicklungen zu unflexibel ist. Für gewisse Anwendungsbereiche, so z. B. für Diagnoseaufgaben, haben sich hingegen XPS-Shells am Markt etabliert /63/.

Hybride Werkzeuge

Hybride Entwicklungswerkzeuge unterstützen den Einsatz verschiedener Methoden zur Wissensdarstellung und Problemlösung in den Anwendungssystemen. Zudem sind Hilfsmittel zur Realisierung der Benutzungsoberflächen vorhanden. Unter Einsatz der verfügbaren Basisbausteine kann die Oberfläche frei entwickelt werden. Desweiteren existieren Schnittstellen zu einer bzw. mehreren Programmiersprachen. Die hohe Flexibilität bei der Gestaltung der Anwendung wird mit einer ebenso hohen Komplexität des Werkzeugs bezahlt. Die Einbettung des, mittels des Werkzeugs entwickelten, Anwendungssystems in die bestehende Umgebung muß über entsprechende Schnittstellen realisiert werden. Eine Mehrbenutzerfähigkeit ist in der Regel nicht gegeben. Abhilfe schaffen Werkzeuge, die über eine Datenbankschnittstelle verfügen. So verfügt *KEE* mittlerweile in der aktuellen Version über eine leistungsfähige Datenbankschnittstelle, die diese Integration stark vereinfacht /44//103/.

Die Anwendung dieser hochkomplexen Werkzeuge ist nur sinnvoll, wenn ein Großteil der Funktionalität bei der Anwendungsentwicklung auch benötigt wird. Im betrachteten Anwendungsfall werden Techniken, wie *TMS* bzw. *ATMS* /27/ und symbolische Datenverarbeitung nicht genutzt, so daß die Stärken der Entwicklungswerkzeuge nicht zur Geltung kommen. Von der Anwendung eines solchen Werkzeugs wird daher abgesehen. Die verbleibende Realisierungsalternative, die für die Aufgabenstellung auch ausgewählt wird, ist der Einsatz von höheren Programmiersprachen zur Systementwicklung.

Programmierersprachen

Der Einsatz von Programmiersprachen, also der Verzicht auf spezielle Werkzeuge, die die Entwicklung wissensbasierter Systeme unterstützen, bedeutet jedoch nicht den gänzlichen Verzicht auf unterstützende Hilfsmittel. So wird zur Realisierung der Benutzungsoberfläche ein Interfacebuilder, der integraler Bestandteil einer Entwicklungsumgebung für Datenbankapplikationen ist, eingesetzt /105/. Desweiteren wird die konventionelle C Programmierung durch eine C Workbench unterstützt und vereinfacht /102/. Die Beispiele belegen, daß auch bei dieser Realisierungsvariante leistungsfähige Werkzeuge zur Verfügung stehen. Eine explizite Unterstützung der Entwicklung spezieller Funktionen wissensbasierter Systeme, mittels hierfür eigens konzipierter Werkzeuge, ist aber nicht möglich. Im Anwendungsfall ist ein domänen-spezifischer Wissensrepräsentationsformalismus entwickelt worden (s. Abschnitt 5.3.2), der den Einsatz kommerzieller Werkzeuge von vornherein ausschließt.

Bei der Entscheidung für eine Programmiersprache stehen sich die symbolverarbeitenden Sprachen wie *LISP*, *Prolog* etc. und die konventionellen Sprachen, wie *C*, *C++*, *Pascal* etc. gegenüber. Anzumerken ist auch der erhebliche Unterschied innerhalb der Klasse symbolverarbeitender Sprachen. Die Entscheidung für eine Sprache ist primär von den beiden folgenden Faktoren abhängig:

- Konzept der Problemlösung
- Formalismus der Wissensdarstellung

Das Umfeld des Entwicklungsteams, sowie das verfügbare Know-how spielen bei der Entscheidung sicherlich auch eine Rolle.

Der entscheidende Vorteil beim Einsatz konventioneller Programmiersprachen, sowie der entsprechenden Entwicklungswerkzeuge, ist die Flexibilität der Anwendungsentwicklung. Demgegenüber steht der erhöhte Realisierungsaufwand. Aber gerade die Entwicklung von wissensbasierten Systemen für industrielle Problemstellungen macht die Integration in die bestehende *DV*-Welt des Unternehmens erforderlich und erfordert in der Konsequenz eine gute Anpaßbarkeit des Systems. Vor allem mit Shells, aber mitunter auch mit hybriden Werkzeugen entwickelte Anwendungen sind in eine bestehende *DV*-Landschaft nur sehr schwer integrierbar. Daher werden die Entwicklungen des Konfigurators mit konventionellen Programmiersprachen durchgeführt. Zur Unterstützung einzelner Aufgaben, wie z. B. die Oberfläche-entwicklung werden entsprechende Entwicklungswerkzeuge angewendet.

4.4.2 Werkzeuge im wissenschaftlichen Bereich

Gerade im Bereich des wissensbasierten Konfigurierens sind zahlreiche Forschungsaktivitäten im Gange /143/. Neben der Entwicklung von Konfiguratoren für spezielle Problemstellungen steht vor allem die Entwicklung von Werkzeugen zur Unterstützung der Realisierung von Konfiguratoren im Vordergrund. Nachfolgend wird auf die bedeutendsten, für diese Arbeit richtungsweisenden Projekte näher eingegangen.

Generell muß festgestellt werden, daß eine Anwendung dieser Werkzeuge aus den unten aufgeführten Gründen nicht in Frage kommt.

- Werkzeug ist nur prototypisch realisiert worden /18/
- Entwicklung ist noch nicht abgeschlossen /49/
- Funktionalität ist nicht mit den Anforderungen deckungsgleich /132/

Trotzdem haben gerade die Systeme der ersten beiden Klassen aufgrund der ihnen zugrundeliegenden Konzepte eine große Bedeutung für die Lösung der, im Rahmen dieser Arbeit betrachteten, Konstruktionsaufgabe. Die verwendeten Methoden bedürfen aber aufgrund der spezifischen Problematik bei der Konfigurierung von Produktionssystemen einer Erweiterung und können daher nur einen Grundstein für die zu bewältigende Systementwicklung darstellen (s. Kapitel 5).

Im Mittelpunkt der Entwicklungsarbeiten im wissenschaftlichen Bereich steht der Expertensystemkern *PLAKON* /18/. Im Rahmen des *PROKON* Projektes wird diese

Entwicklung fortgesetzt /49/. Charakteristisch an *PLAKON* ist die Ablösung des regelbasierten Paradigmas im Bereich der wissensbasierten Konfigurierung. Das Werkzeug basiert auf einer objektorientierten Darstellung der Konstruktionsobjekte, einer Verarbeitung der Randbedingungen mittels eines Constraint Systems und einer an der Domänenstruktur orientierten Problemlösungsmethode. *PROKON* überführt nun dieses System in den modularen Werkzeugkasten *KONWERK*. So werden im Rahmen dieses Projekts Ansätze zu bisher nicht untersuchten Bereichen, wie die Konfigurierung in schwach strukturierten Domänen, dem räumlichen Konfigurieren und dem optimierungsbasierten Konfigurieren gesucht. Gerade das optimierungsbasierte Konfigurieren hat für die Konfigurierung von Bestückssystemen große Bedeutung und findet sich in den angewandten Problemlösungsmethoden wieder (s. Abschnitt 5.4).

4.5 Modellierung technischer Systeme

Die Modellierung der zu konfigurierenden Systeme ist Grundlage des wissensbasierten Konfigurierens. Die angewandten Methoden haben entscheidenden Einfluß auf die Korrektheit der Abbildung der Realität, dem Pflegeaufwand bei Änderungen des betrachteten technischen Systems und auf die Effizienz der Problemlösung.

In Abschnitt 4.5.1 werden die Anforderungen, die aus der geplanten Anwendung der Modelle resultieren, formuliert, und in Abschnitt 4.5.2 werden die für die Bestückssystemkonfigurierung relevanten Methoden zur adäquaten Modellierung technischer Systeme vorgestellt. Es wird ausschließlich die Modellierung technischer Systeme betrachtet. Dies ist möglich, da ab einem gewissen Abstraktionsgrad die Eigenschaften der Systeme sehr ähnlich sind und somit auch die Methoden der Modellierung für unterschiedliche Anwendungsfelder ihre Gültigkeit besitzen.

4.5.1 Anforderungen an Konfigurierungsmodelle

Bevor auf die wichtigsten Anforderungen an Konfigurierungsmodelle eingegangen wird, ist die Zielsetzung der Entwicklung von Konfigurierungsmodellen zu analysieren. Das Konfigurierungsmodell muß zum einen die Abbildung des zu konfigurierenden Objekts und zum anderen die Modellierung der Vorgehensweise der Problemlösung ermöglichen. Man erkennt an diesen beiden Anforderungen, daß die Eigenschaften des Problemlösungsprozesses die Methode der Modellierung mitbestimmen. Zur Modellierung von technischen Systemen stehen mittlerweile einige bereits in Anwendungen erprobte Verfahren zur Verfügung. Die Methoden zur Modellierung der Vorgehensweise werden aber zur Zeit noch recht kontrovers diskutiert /119/.

Die nachfolgend aufgelisteten Anforderungen an die Konfigurierungsmodelle sind in die Arbeiten zur Modellierung der Produktionssysteme der Flachbaugruppenfertigung eingeflossen und haben zu den in Abschnitt 5.3 vorgestellten Verfahren geführt /96/.

- Explizieren wesentlicher Eigenschaften der Wissensdomäne
Eventuell vorhandene Grundprinzipien zur Konfigurierung des betrachteten technischen Systems, wie zum Beispiel eine zunehmende Verfeinerung der Konfiguration, müssen im Modell abbildbar sein.
- Analysierbarkeit des Modells
An Hand des Modells müssen Aussagen über die Eigenschaften, wie zum Beispiel Lösbarkeit der Aufgabenstellung, getroffen werden können.
- Kommunizierbarkeit des Modells
Das Modell muß für die Zielgruppe gut verständlich sein.
- Eine Zerlegung des Problems in Teilprobleme muß unterstützt werden.
- Die Modellierung soll zu einer Problemreduktion führen.

4.5.2 Methoden der Modellierung

Wie oben bereits angedeutet hängt die Methode der Modellierung von der angewandten Problemlösungsmethode ab. Für die Modellierung technischer Systeme (vgl. auch /93/) mit ihren speziellen Eigenschaften hat sich für Systeme, die über einen stark strukturierten Aufbau verfügen, folgende Methode etabliert (s. Bild 20):

- Objektorientierte Modellierung der Aufbaustruktur mittels *is a* und *has parts* Beziehungen /19//110/
- Modellierung der Restriktionen in einem Netz von Constraints /141/

Diese Methoden beschränken sich ausschließlich auf die Abbildung der Aufbaustruktur des Systems. Ein explizites Prozeßmodell oder Vorgehensmodell wie es bei Richter /119/ genannt wird, kann damit nicht beschrieben werden.

Für den im Rahmen dieser Arbeit betrachteten Anwendungsfall der Konfigurierung von Bestückssystemen sind diese Methoden, aufgrund der starken Strukturierung der Domäne, anwendbar. Andere Ansätze, wie zum Beispiel die logikbasierte Modellierung, haben für diese Arbeit keine Bedeutung /73/.

4.6 Kontrolle in wissensbasierten Systemen

Dem Kontrollaspekt wird in der Expertensystemforschung große Bedeutung zugeordnet. Dies wird allein schon durch die Vielzahl von Veröffentlichungen dokumentiert /15//17//48/. Bevor in diesem Abschnitt verschiedenen Methoden zur Darstellung des Kontrollwissens vorgestellt werden und deren Eignung für den Anwendungsfall bewertet wird, muß der Begriff der Kontrolle näher betrachtet werden. In Anlehnung an Günter /48/ wollen wir Kontrolle folgendermaßen definieren:

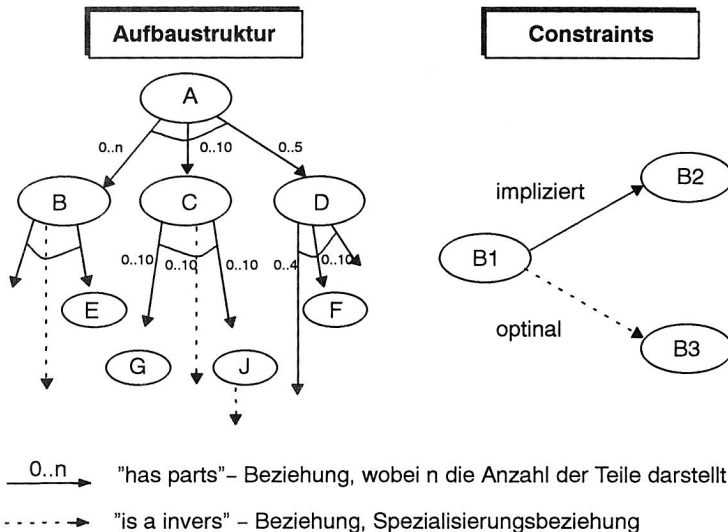


Bild 20: Modellierungsmethode für Konfigurationaufgaben

Unter Kontrolle wird die Ablaufsteuerung des Problemlösungsprozesses verstanden, das heißt, alles was mit dem dynamischen Ablauf der Problemlösung in Verbindung steht, gehört zur Kontrolle. Ganz allgemein ist die Kontrolle die Steuerung der Suche im Lösungsraum.

Es lassen sich nun die folgenden Aufgaben im Rahmen der Kontrolle identifizieren:

- Festlegung der Sequenz der Bearbeitungsschritte
- Auswahl des Verfahrens zur Entscheidungsfindung
- Methode der Konfliktlösung bei Widersprüchen in Teillösungen
- Modularisierung des Problems in Teilprobleme

Die Bedeutung der Kontrolle für wissensbasierte Konstruktionssysteme hat mehrere Gründe. So hat sie ganz entscheidenden Einfluß auf die Effizienz und die Transparenz des Problemlösungsprozesses. Diese beiden Faktoren beeinflussen sehr stark die Benutzerakzeptanz des Systems. Der zentralen Bedeutung dieses Aspekts wird in dieser Arbeit Rechnung getragen und daher für die Detailplanung ein frei konfigurierbares Vorgehensmodell entwickelt. Der Anwender kann das Reihenfolgewissen,

sowie Wissen über die Problemmodularisierung komfortabel formulieren und in die Wissensbasis einbringen (s. Abschnitt 5.3.2).

Die Methoden der Kontrolle sind vom grundlegenden Realisierungsansatz des Konstruktionssystems abhängig. Lange Zeit wurde auch bei der Entwicklung von Konstruktionsexpertensystemen das regelbasierte Paradigma verfolgt /88//90/. Der grundlegende Gedanke hierbei ist, das gesamte Wissen in eine Vielzahl voneinander unabhängiger Regeln zu transformieren. D. h., es wird nicht festgelegt wie und wann die Regeln angewandt werden. Die Entwicklungserfahrungen haben gezeigt, daß dieser Ansatz für Konstruktionssysteme nur bedingt tauglich ist. Gerade in diesem Umfeld ist die Abbildung der Vorgehensweise bei der Problemlösung aufgrund der anzutreffenden Problemkomplexität unumgänglich. Daher sind zahlreiche Erweiterungen zu den rein regelbasierten Systemen entwickelt worden. So zum Beispiel wird die Anwendung von:

- Metaregeln /22/
- Kontexten und Modulen /90/

zur Ablaufsteuerung in regelbasierten Systemen vorgeschlagen. Diese Ansätze führen zu einer Verquickung des Kontrollwissens mit den anderen Arten des bereichsbezogenen Wissens (s. Abschnitt 5.3.2). Die Pflege der Wissensbasis wird dadurch immens erschwert, da die Unabhängigkeit der einzelnen Regeln nicht mehr gewährleistet ist. Eine ausführliche Diskussion der Nachteile regelbasierter Systeme für Konstruktionsaufgaben findet sich in der Literatur /48//134//153/.

Für den Bereich der Konfigurierung von Bestückssystemen wird daher von einer regelbasierten Wissensrepräsentation abgesehen und eine an die begriffsorientierte Kontrolle angelehnte Methodik angewendet (s. Abschnitt 5.3.2). Desweiteren werden Methoden des hierarchischen Planens in die Vorgehensweise zur Problemlösung integriert. Die starke Strukturierung der betrachteten Domäne und die Flexibilität des Ansatzes für verschiedene Problemlösungsmethoden haben zum Einsatz dieses Verfahrens geführt. Ein Überblick über anwendbare Problemlösungsmethoden und deren Eignung für die Aufgabe der Bestückssystemkonfigurierung wird im nächsten Abschnitt gegeben.

4.7 Problemlösungsmethoden

Unter einer Problemlösungsmethode versteht man einen Algorithmus der festlegt, wie bereichsbezogenes Wissen zur Lösung eines Problems verwendet wird /4/. Es wird zwischen zwei Klassen von Methoden unterschieden:

- schwache Problemlösungsmethoden
- starke Problemlösungsmethoden

Die schwachen Methoden werden auch als sogenannte Basisproblemlösungsmethoden bezeichnet. Sie zeichnen sich durch ihre Domänenunabhängigkeit und ihre flexible Anwendbarkeit aus. Ein Beispiel ist die Anwendung der Vorwärts- bzw. Rückwärtsverkettung bei der Wissensmodellierung mit Regeln. Charakteristisch für diese Verfahren ist auch deren Unabhängigkeit von einem bestimmten Wissensrepräsentationsformalismus. Daraus ergibt sich der entscheidende Nachteil dieser schwachen Methoden. Sie sind nicht in der Lage spezielle Eigenschaften der Domäne auszunutzen, da die zugrundeliegenden schwachen Repräsentationsformalismen die Abbildung dieser Eigenschaften erschweren. Die Wissensakquisition wird somit nur unzureichend unterstützt, da die Repräsentation und die Funktion des Wissens nicht festgelegt werden.

Diese Defizite haben gerade bei der Entwicklung von wissensbasierten Konfiguratoren zur Anwendung von starken Problemlösungsmethoden geführt /117/. Die schwachen Verfahren werden daher aufgrund ihrer fehlenden Relevanz für den Anwendungsfall nicht mehr weiter betrachtet.

Starke Methoden legen die Repräsentation und Funktion des bereichsbezogenen Wissens weitestgehend fest und sind daher weniger flexibel einsetzbar. Dafür sind die speziellen Eigenschaften der Domäne besser abbildbar und die Problemlösung wird dadurch vereinfacht bzw. ermöglicht. In Bild 21 werden die wichtigsten Problemlösungsmethoden der Problemklasse Konstruktion dargestellt.

Nachfolgend werden die Prinzipien der einzelnen Methoden kurz vorgestellt (vgl. /117//144/). Hintergrund der Ausführungen ist die Bewertung der verschiedenen Verfahren bezüglich der Tauglichkeit für den betrachteten Anwendungsfall.

Strukturorientiertes Konfigurieren

Das Domänenwissen wird in einem *Und/Oder*-Graphen /99/ abgebildet. Dieses Strukturmodell beinhaltet somit sowohl kompositionelle, als auch spezialisierende Beziehungen. Die Problemlösung wird durch eine schrittweise Expandierung des Graphen erreicht.

Dieser Ansatz findet bei der Entwicklung von Konfigurierungswerkzeugen und -anwendungen breite Beachtung /144/. Ein sinnvoller Einsatz dieser Methode ergibt sich vor allem in stark strukturierten Domänen, wie sie bei der Konfigurierung von technischen Artefakten häufig anzutreffen sind.

Ressourcenorientiertes Konfigurieren /60//153/

Beim ressourcenorientierten Konfigurieren gibt es grundsätzlich zwei Arten von Wissensobjekten:

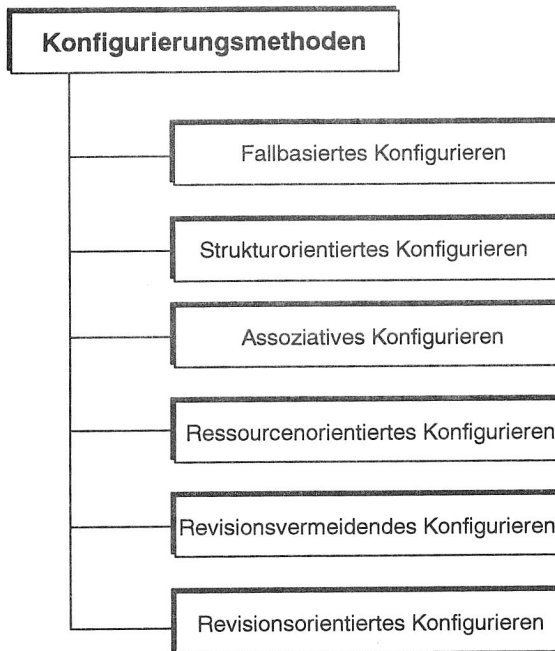


Bild 21: Problemlösungsmethoden für die Problemklasse Konstruktion

- Komponenten
- Ressourcen

Diese beiden Objektarten stehen in Beziehung zueinander. So können Komponenten Ressourcen bereitstellen, als auch Ressourcen anfordern. Die Problemlösung ist ein iterativer Prozeß, der den Ausgleich der Ressourcenbilanzen anstrebt. Diese Methode findet primär bei der Konfiguration von Objekten, die keine starke hierarchische Strukturierung aufweisen, ihre Anwendung.

Revisionsvermeidendes Konfigurieren

In der Literatur wird diese Strategie auch mit *least-commitment* Strategie bezeichnet /117/. Grundprinzip ist die Vermeidung schneller, später evtl. zu revidierender heuristischer Entscheidungen. Voraussetzung ist die Modellierung ungerichteter Abhängigkeiten und deren effiziente Auswertung, also der Einsatz von Constraint-Netzen und Constraint-Propagierung /53/. Die Methode wird meist in Verbindung mit anderen Verfahren zur Problemlösung eingesetzt.

Revisionssorientiertes Konfigurieren

Beim revisionsorientierten Konfigurieren gilt es drei Phasen zu unterscheiden:

- propose
- critique
- modify

Der Ablauf der Konfigurierung wird im folgenden kurz skizziert. Aufgrund heuristischer Annahmen wird frühzeitig bei der Konfigurierung eine Entscheidung getroffen. Anschließend wird die Einhaltung der vorhandenen Restriktionen geprüft. Tritt eine Restriktionsverletzung auf, so wird die Entscheidung revidiert. Entscheidende Bedeutung für die Effizienz dieses Verfahrens haben hierbei die angewandten Konfliktlösungsmechanismen. Gerade im Bereich des intelligenten, wissensbasierten Backtrackings werden momentan verstärkt Forschungsanstrengungen unternommen /48/.

Zu dieser Methode sind zahlreiche Derivate entwickelt worden /117/. Sie dienen primär zur Ermittlung der Werte von Parametermengen und zur Lösung von Zuordnungsproblemen.

Fallbasiertes Konfigurieren

Zur Lösung eines Konfigurierungsproblems wird aus einer Fallbibliothek ein möglichst ähnlicher Fall extrahiert. Diese Lösung wird dann entsprechend der Anforderungsunterschiede modifiziert. Die Definition eines Ähnlichkeitsmaßes, das den quantitativen Vergleich verschiedener Lösungen ermöglicht, ist das Hauptproblem der fallbasierten Ansätze /6/. In der Literatur finden sich nur wenige Arbeiten /51/ zu diesem Thema.

Assoziative Konfigurierung /58//142/

Bei der assoziativen Konfigurierung müssen alle möglichen Konstruktionen explizit angegeben werden. Daher beschränkt sich die Anwendung dieser Methode auf Probleme mit relativ kleinem Lösungsraum. Die Lösungen werden in einer Hierarchie abgebildet. Ein, an diese hierarchische Lösungsstruktur, angepaßtes Selektionsverfahren ermittelt die adäquate Lösung. Der Selektionsmechanismus ist dem Verfahren der heuristischen Klassifikation, das im Bereich der Diagnostik seine Anwendung findet, ähnlich.

Schwachpunkte des Verfahrens sind schlechte Abbildungsmöglichkeiten für Abhängigkeiten zwischen Konstruktionsobjekten und der große Aufwand bei Aufgaben, die eine Parameterwertermittlung beinhalten /48/.

Bewertung der Problemlösungsmethoden

Abschließend folgt nun die Bewertung der einzelnen Problemlösungsmethoden im Hinblick auf die Eignung für den betrachteten Anwendungsfall. Die Eignung der einzelnen Methoden wird anhand der nachfolgend aufgelisteten Charakteristika des Konfigurierungsproblems vorgenommen.

- Abstinenz der Parameter Festlegungsproblematik
- Großer Lösungsraum
- Existenz von gerichteten Abhängigkeiten zwischen den einzelnen Komponenten
- Starke Strukturierung der Domäne

Die Merkmale der Aufgabe, verglichen mit den Leistungsmerkmalen der Verfahren, führen zu dem in der nachfolgenden Tabelle zusammengefassten Ergebnis.

Problemlösungsmethode	Eignung	Grund
Revisionsorientiertes Konfigurieren	–	Diese Methode wird vor allem zur Bestimmung von Parameterwerten angewandt.
Revisionsvermeidendes Konfigurieren	–	Voraussetzung zur Anwendung ist die Existenz ungerichteter Abhängigkeiten.
Assoziatives Konfigurieren	–	Modellierungsaufwand ist für den zu betrachtenden Lösungsraum zu groß.
Ressourcenorientiertes Konfigurieren	–	Problemformulierung gemäß der Anforderungen des <i>Ressourcenorientierten Konfigurierens</i> nicht möglich.
Strukturorientiertes Konfigurieren	+	Starke Strukturierung der Problemdomäne und strukturorientierte Vorgehensweise der Experten
Fallbasiertes Konfigurieren	+	Gerade bei der Angebotsbearbeitung haben Kunden oftmals ähnliche Anforderungen, so daß der Rückgriff auf bereits erstellte Konfigurationen sinnvoll ist

– nicht geeignet; + gut geeignet

Neben dem strukturorientierten Methode ist auch ein fallbasierter Ansatz denkbar. Dieser wird aber aufgrund der bisher unzureichend vorliegenden Forschungsergebnisse nicht weiter verfolgt, da das Ziel der Arbeit nicht primär die Entwicklung neuer Problemlösungsmethoden, sondern die Entwicklung einer speziellen Anwendung ist. Trotzdem haben die domänenspezifischen Anforderungen der Aufgabenstellung

zu Neuentwicklungen in zwei, in Abschnitt 5.3.2 näher vorgestellten Bereichen geführt:

- Repräsentation von gerichteten Abhängigkeiten der Konstruktionsobjekte
- Deklarative Formulierung von Kontrollwissen

Nach eingehender Betrachtung der verfügbaren Methoden im Bereich des wissensbasierten Konfigurierens kann das Realisierungskonzept des Angebotskonfigurator *ANKON* festgelegt werden. Im folgenden Kapitel werden nun Architektur, Funktionalität und Realisierung der Bestandteile des Angebotskonfigurator im Detail vorgestellt.

5 *Das Programm ANKON zur Angebotskonfigurierung*

In diesem Kapitel wird die zentrale, den Benutzer bei der Angebotsplanung unterstützende Komponente des *Entscheidungsunterstützenden Systems zur Angebotsplanung (ESA)* beschrieben. Es handelt sich um die intelligente Konfigurierungskomponente, die es dem Anwender ermöglicht, in zwei verschiedenen Modi Angebote zu erstellen. Neben den zugrundeliegenden Konzepten werden in den nachfolgenden Abschnitten die einzelnen Features dieses Bausteins näher beleuchtet. Desweiteren wird auf die Systemarchitektur und die Realisierung im Detail eingegangen.

5.1 *Zielsetzung von ANKON*

Der Angebotskonfigurator soll die kundengerechte Konfigurierung von Bestückssystemen, sowie zusätzlicher Komponenten eines Produktionssystems der Elektronikfertigung, vereinfachen (vgl. Abschnitt 3.2). Das Werkzeug unterstützt primär die Teilaufgabe der Bestücksystemkonfigurierung, die aufgrund ihrer hohen Komplexität eine Rechnerunterstützung in besonderem Maße wünschenswert macht. So wird die Konfigurierung von Systemkomponenten, die keine Bestückfunktionalität haben nur im interaktiven Modus unterstützt. Dies ist zum einen in der bestücksystemimmanenten Komplexität und zum anderen durch die vergleichsweise einfache Konfigurierung der weiteren Bestandteile des Produktionssystems begründet.

Ziel ist es also, ein kundengerechtes Angebot zu generieren. Da die individuellen Zielsetzungen und Wünsche der Kunden bei der Beschaffung von Investitionsgütern, und hier im speziellen von Bestückssystemen, variieren, ist für die Problemlösung ein Mechanismus zur Berücksichtigung dieser Kundenpräferenzen unbedingt erforderlich.

Neben einigen grundsätzlichen Anforderungen, wie zum Beispiel der technischen Erfüllbarkeit der Bestückanforderungen, wird es Kriterien geben, die von Kunde zu Kunde in der Präferenzgewichtung differieren. Dies hat direkten Einfluß auf die Problemlösungsmechanismen, die zur Erfüllung dieser Anforderung kundenspezifisch parametrierbar sein müssen. Die klassischen Problemlösungsmethoden (vgl. Abschnitt 4.7) bedürfen daher einer in Abschnitt 5.4 behandelten Modifikation, um dieses sogenannte optimierungsbasierte Konfigurieren zu ermöglichen /127//128/. Auch in diesem Kontext stellt sich das klassische Problem der konkurrierenden Ziele, das eine Fülle von Verfahren im Bereich des Operations Research /108/ und der Entscheidungstheorie nach sich gezogen hat.

Hohe Anforderungen werden auch an die Wartung und Pflege des Systems gestellt. Hierunter ist primär die Pflege der zugrundeliegenden Wissensbasis zu verstehen, die einerseits aufgrund der häufigen Änderungen bereits existierender Konstruktionsobjekte, andererseits aufgrund kompletter Neuentwicklungen, einer ständigen

Aktualisierung bedarf. Hierzu sind benutzerfreundliche Mechanismen und Benutzeroberflächen zu schaffen, die eine Anpassung des Systems ohne explizites Wissen über die, dem Programm zugrundeliegenden, Kontrollmechanismen ermöglichen. Gerade bei den sogenannten regelbasierten Systemen ist diese Art der Pflege der Wissensbasis nicht möglich, da die Regeln nicht unabhängig voneinander sind. So wird in der neueren Forschung die Einschränkung auf das regelbasierte Paradigma bei der Entwicklung von Expertensystemen, speziell für Konstruktionsaufgaben, stark kritisiert /49/.

Der systemgesteuerte Entscheidungsprozeß soll für den Anwender ein hohes Maß an Transparenz mitbringen. Eine aktive Beteiligung des Benutzers an den Entscheidungen ist daher auch im halbautomatischen Modus notwendig. Auf die Realisierung einer expliziten Erklärungskomponente kann dann verzichtet werden. Nur so kann die notwendige Benutzerakzeptanz für das System erzeugt werden.

ANKON liefert auch die zur kundengerechten Präsentation des Angebots erforderlichen Eingangsinformationen. Wie in Abschnitt 3.3 bereits ausgeführt, übernimmt der Modul *DOKU* die eigentliche Präsentation des Angebots.

Nachfolgend werden nochmals zusammenfassend die Ziele die der Entwicklung des Angebotskonfigurators sowie der zusätzlich erforderlichen Module *PFLEGE* und *DOKU* zugrundeliegen, aufgelistet:

- Unterstützung des Vertriebsingenieurs bei der Konfigurierung eines Angebots in zwei Modi:
 - interaktiver Modus
 - halbautomatischer Modus
- Pflege und Wartung des Programmsystems ohne spezielle programmspezifische Kenntnisse
- Präsentationsfähige Visualisierung des konfigurierten Angebots
- Kundenspezifische Parametrierung der Problemlösungsmechanismen
- Integration des Anwenders in die systemgesteuerten Konstruktionsentscheidungen zur Erhöhung der Benutzerakzeptanz

Diese noch relativ global gefaßten Ziele spiegeln sich in den Realisierungskonzepten und der darauf aufsetzenden Implementierung wider. Die Systemarchitektur und die Funktionalität der einzelnen Bestandteile von *ANKON* sowie die dahinter stehenden Konzepte werden in den nachfolgenden Abschnitten dieses Kapitels beschrieben.

5.2 Die Systemarchitektur von ANKON

In diesem Abschnitt wird das Lösungskonzept für die oben ausgeführten Anforderungen und Zielsetzungen vorgestellt. Bild 22 zeigt schematisch die einzelnen Komponenten des wissensbasierten Angebotskonfigurators, wobei die aus anwendungsspezifischen Anforderungen resultierenden Abweichungen von der klassischen Architektur wissensbasierter Systeme zu beachten sind /56/.

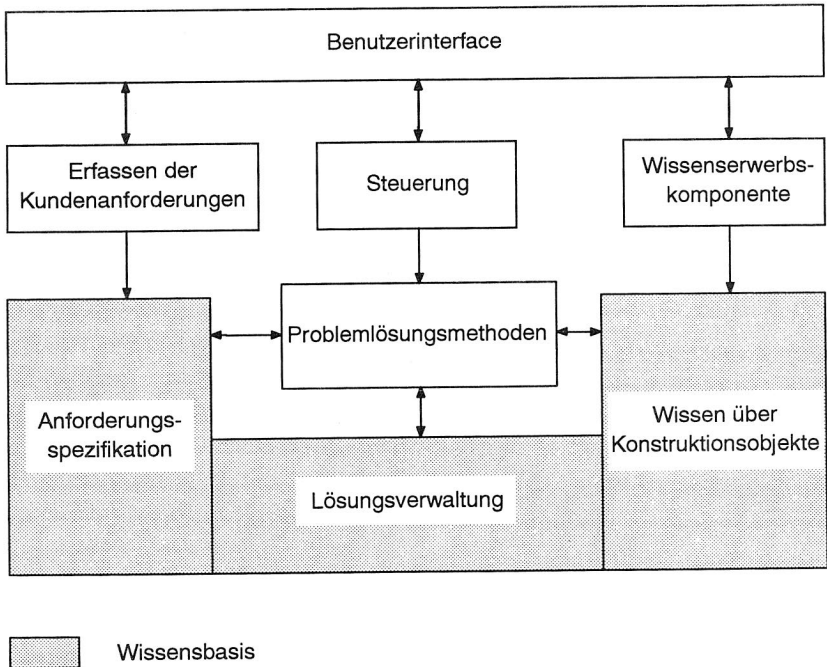


Bild 22: Architektur von ANKON

Nachfolgend wird kurz die Funktionalität der verschiedenen Systemkomponenten beschrieben. Eine detaillierte Erläuterung der zugrundeliegenden Konzepte sowie der darauf aufbauenden Realisierung wird in den Abschnitten 5.3 und 5.4 vorgenommen.

Benutzerinterface

Die Benutzerschnittstelle eines dialogorientierten wissensbasierten Systems hat folgende Bestandteile /57/:

- Erklärungskomponente
- Fragekomponente
- Wissenserwerbskomponente

Aufgrund der Integration des Konfigurators in *ESA* und der spezifischen Anforderungen der Domäne wird bei der Realisierung von *ANKON* von dieser klassischen Strukturierung der Bedienoberfläche abgewichen. Auf den Entwurf und die Implementierung einer expliziten Erklärungskomponente, die das Entscheidungsverhalten des Systems dem Anwender plausibel machen soll, wird bewußt verzichtet. Die Begründung ist einfach. *ANKON* verfügt über zwei Problemlösungsmodi (s. Abschnitte 5.4.1 und 5.4.2), dem interaktiven und dem halbautomatischen Modus. Bei beiden Varianten ist der Anwender a priori aufgrund der verwendeten Problemlösungsmechanismen in den Konstruktionsprozeß integriert, so daß eine zusätzliche Erklärungskomponente nicht notwendig ist. Die Benutzerakzeptanz der Systemvorschläge ist durch die starke Einbindung des Anwenders auf jeden Fall gewährleistet.

Eine klassische Fragekomponente, die zum einen zur Aufnahme des fallspezifischen Wissens dient und zum anderen während der Problemlösung fehlendes Wissen vom Anwender erfragt, fehlt ebenso. Das sogenannte Fallwissen, in diesem Zusammenhang also die Beschreibung der zu fertigenden Flachbaugruppen, deren zu fertigende Stückzahlen und die bereits vorhandenen Betriebsmittel des Kunden, können durch die Anwendung von Funktionen des Moduls *PFLEGE* von *ESA* eingegeben werden.

Beim Wissenserwerb muß Wissen über die einzelnen Konstruktionsobjekte und die Beziehungen zwischen diesen Objekten akquiriert werden. Die Beschreibung der Konstruktionsobjekte, das heißt der konfigurierbaren Einzelkomponenten, wird durch Funktionen des Moduls *PFLEGE* unterstützt. Sie können vom Konfigurator verarbeitet werden. Die Werkzeuge der Datenpflege, die im Rahmen von *ESA* zur Verfügung stehen, werden auch von weiteren Funktionen des Entscheidungsunterstützenden Systems genutzt.

Der zweite Aspekt des Wissenserwerbs ist die Modellierung von Abhängigkeiten zwischen den einzelnen Konstruktionsobjekten. Hierbei wird der Anwender von einem Werkzeug unterstützt, das eine graphische Repräsentation dieser Beziehungen zwischen den verschiedenen Objekten ermöglicht. So ist eine einfache Modifikation bzw. Generierung von Beziehungswissen möglich. Ebenso wird die Eingabe von Abhängigkeiten zwischen den die Anforderungen spezifizierenden Eigenschaften der Flachbaugruppen und den zu konfigurierenden Objekten ermöglicht. Diese Informationen sind für den Problemlösungsprozeß unbedingt erforderlich.

Wissensbasis

Nach Puppe gliedert sich eine Wissensbasis in die folgenden Teilbereiche /116/:

- fallspezifisches Wissen
- bereichsbezogenes Wissen
- Zwischenergebnisse und Problemlösungen

In Anlehnung an diese Untergliederung existieren im Rahmen von *ANKON* diese drei Bestandteile, wobei anzumerken ist, daß diese Daten nicht ausschließlich von *ANKON*, sondern auch von anderen Werkzeugen in *ESA* genutzt werden. Auf die sich daraus ergebenden Probleme bei der Wahrung der Datenkonsistenz wird im Abschnitt Wissensmodellierung (s. Abschnitt 5.3) näher eingegangen.

Problemlösungsmechanismen

Die Erstellung eines Angebots kann vom Anwender auf zwei verschiedene Arten bewerkstelligt werden. Zum einen steht der interaktive Modus zur Verfügung. Hier kann der Anwender rechnergeführt ein Angebot zusammenstellen und anschließend Plausibilitätschecks durchführen lassen. Bei dieser Überprüfung wird das Angebot ausschließlich auf technische Konsistenz geprüft. Unter technischer Konsistenz verstehen wir in diesem Kontext die Einhaltung der aufgrund der technischen Eigenschaften der Konstruktionsobjekte, vorliegenden Restriktionen. Wir wollen für solch eine Restriktion ein einfaches, umgangssprachlich formuliertes Beispiel geben:

"Jeder Bestückautomat benötigt einen Stationsrechner"

Solche Randbedingungen für die Konfigurierung eines Angebots bzw. eines Bestückautomaten werden im Rahmen des Plausibilitätschecks überprüft und dem Anwender bei Verletzung angezeigt. Die Adäquanz bezüglich spezieller kundenspezifischer Anforderungen wird in diesem Problemlösungsmodus nicht untersucht. Im halbautomatischen Modus werden nun die speziellen Kundenanforderungen in die Konstruktionsentscheidungen des Systems integriert. Für den Anwender besteht aber weiterhin die Möglichkeit intensiv mit seinen Entscheidungen in den Konstruktionsprozeß einzugreifen.

Eine detaillierte Beschreibung der hier nur kurz angerissenen Problemlösungsmechanismen wird in Abschnitt 5.4 vorgenommen.

5.3 Wissensmodellierung

Nachfolgend werden die Bestandteile der Wissensbasis für den Konfigurator näher betrachtet (vgl. Bild 22). Hierzu werden jeweils die Mechanismen, die die Abbildung der Objekte der realen Welt in die für das System notwendigen Datenobjekte realisieren, beschrieben. Auf implementierungsspezifische Details wird nicht eingegangen.

5.3.1 Fallspezifisches Wissen

Fallspezifisches Wissen umfaßt bei dem hier betrachteten Anwendungsfall eine Beschreibung der Anforderungen des Kunden. Es muß ein Formalismus gefunden werden, mit dem auf einfache Weise die Modellierung der kundenspezifischen Anforderungen durchgeführt werden kann. Wichtig hierbei ist im Hinblick auf die notwendige Benutzerakzeptanz die Minimierung des Eingabeaufwandes für den Anwender. Bestandteile des fallspezifischen Wissens sind:

- Beschreibung der zu fertigenden Flachbaugruppen (FBG)
- Gewünschtes Produktionsvolumen für die verschiedenen Flachbaugruppentypen
- Beschreibung der aktuellen Produktionsumgebung des Kunden

Die Komponenten des fallspezifischen Wissens werden nun im einzelnen betrachtet. Wird in der sogenannten Nutzentechnik gefertigt, und davon können wir in unserem Anwendungsfall ausgehen, so besteht ein Flachbaugruppentyp aus mehreren Einzelschaltungen, die vom Aufbau her identisch oder auch unterschiedlich sein können. Eine Einzelschaltung besteht aus einer Menge von Bauelementen. Diese individuellen Bauelemente sind durch ihre Position in der Einzelschaltung eindeutig identifizierbar und können genau einem Bauelementtyp zugeordnet werden. Ein Bauelementtyp entspricht einer Gehäuseform. Wenn man das objektorientierte Modellierungsparadigma zugrundelegt, sind die Bauelementtypen als Subklassen der Klasse Bauelement und die einzelnen Bauelemente als Objekte dieser Klassen zu verstehen [7//89]. In Bild 23 sieht man den hierarchischen Aufbau der Flachbaugruppenbeschreibung sowie einige für die Konfigurierung notwendigen Eigenschaften der drei Konzepte Flachbaugruppe, Einzelschaltung und Bauelement.

Durch diese Flachbaugruppenbeschreibung ist der zentrale Bestandteil der Modellierung der Produktionsaufgabe realisiert. Zudem muß zur Durchführung der Konfigurierung noch eine quantitative Aussage bezüglich der Jahresbedarfe für die einzelnen Flachbaugruppentypen gemacht werden. Hier wird von Schätzungen, die naturgemäß gewissen Unsicherheiten unterliegen, ausgegangen.

Die aktuelle Produktionsumgebung des Kunden muß zur Durchführung bestimmter Konfigurierungsvarianten modellierbar sein. Dies ist zum einen die Rekonfigurierung

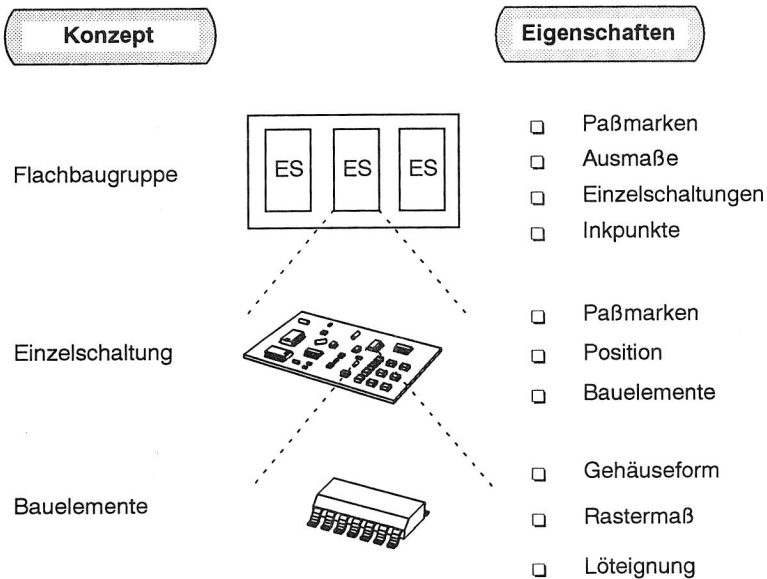


Bild 23: Fallspezifisches Wissen

bestehender Bestücksysteme und zum anderen die additive Methode der Konfigurierung, die ein bestehendes System zwar in die Überlegungen mit einbezieht, aber es gänzlich unverändert läßt. Die substitutive Methode, bei der Veränderungen der aktuell vorhandenen Ressourcen vorgenommen werden können, wird im Rahmen dieser Arbeit nicht weiter betrachtet.

Wie oben bereits erwähnt, wird bei der Konfigurierung im halbautomatischen Modus, für die wir das fallspezifische Wissen benötigen, nur die Konfigurierung der Bestücksysteme betrachtet. Die Erstellung des gesamten Angebots wird nur im interaktiven Modus unterstützt. Daher ist bei der Erfassung der aktuellen Produktionsumgebung nur die Beschreibung der Bestücksysteme notwendig. Die Modellierung eines Bestücksystems wird mittels der drei unten aufgelisteten Konzepte vorgenommen.

- Bestücksystem
- Bestücklinie
- Bestückautomat

Ein Bestücksystem besteht aus Bestücklinien, Standalone Automaten und weiteren einzelnen Konstruktionsobjekten, den sogenannten Einzelkomponenten. Diese Einzelkomponenten haben die Eigenschaft, daß sie keiner individuellen Bestücklinie und keiner individuellen Bestückstation logisch zuzuordnen sind. Unter einer Einzel-

komponente verstehen wir ein nicht mehr weiter unterteilbares Objekt, das in eine Konfiguration aufgenommen werden kann (s. Bild 24).

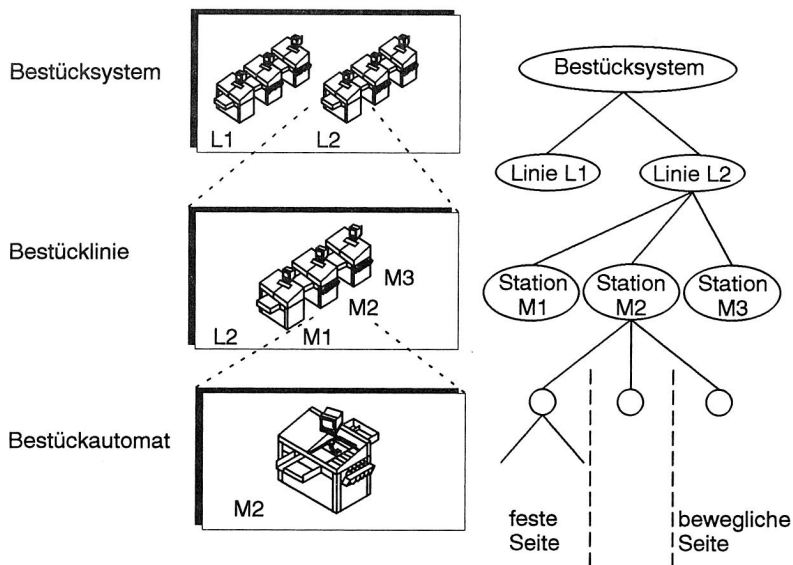


Bild 24: Exemplarische Modellierung eines Bestücksystems

Eine Bestücklinie besteht wiederum aus einzelnen Bestückautomaten und Einzelkomponenten, die einer Linie logisch zuzuordnen sind. Ein Bestückautomat ist nun durch die Gesamtheit aller seiner zugehörigen Einzelkomponenten definiert. Diese Konstruktionsobjekte bzw. Einzelkomponenten des Automaten stehen in Relation zueinander und haben fest definierte geometrische Positionen an einem Automat. Zudem können für jeden Automatentyp logische Bereiche definiert werden, denen dann die Einzelkomponenten zugeordnet werden (s. Bild 24). Solch ein logischer Bereich kann zum Beispiel einem physikalischen Bereich einer Bestückstation entsprechen (z. B. bewegliche Seite). Die Zuordnung der Einzelkomponenten zu diesen Bereichen spiegelt sich in der Abbildung des Automaten in einer Baumstruktur wider. Jeder Ast, von der Wurzel aus gesehen, repräsentiert dann einen eigenen Bereich des Automaten. Diese Bereiche können für jeden Automatentyp individuell definiert werden.

5.3.2 Bereichsbezogenes Wissen

Beim bereichsbezogenen Wissen handelt es sich um die Beschreibung der einzelnen Konstruktionsobjekte sowie die Modellierung der Abhängigkeiten zwischen den verschiedenen Objekten. Im Anwendungsfall sind die Konstruktionsobjekte sämtliche in einem Angebot möglichen Objekte, also alle Einzelkomponenten des Herstellers und desweiteren übergeordnete Objekte, die aus einer Menge von Einzelkomponenten bestehen.

Ein weiterer wichtiger Bestandteil ist das Kontrollwissen, das die Vorgehensweise der Konfigurierung beschreibt. Das Kontrollwissen kann nochmals in Reihenfolgewissen, Bearbeitungswissen, Konfliktlösungswissen und Fokussierungswissen unterteilt werden /50/. In den Abschnitten 5.5 und 5.6 wird detailliert auf die Bestandteile der Wissensbasis und speziell auf das Kontrollproblem eingegangen. Die Vor- und Nachteile der unterschiedlichen Modellierungsansätze für bereichsbezogenes Wissen wurden bereits in Abschnitt 4.5 aufgezeigt, so daß in diesem Abschnitt nur die Realisierung der Abbildung der realen Welt in die Wissensbasis betrachtet wird. Bild 25 zeigt nochmals den Aufbau der Wissensbasis und hier insbesondere die Struktur des bereichsbezogenen Wissens.

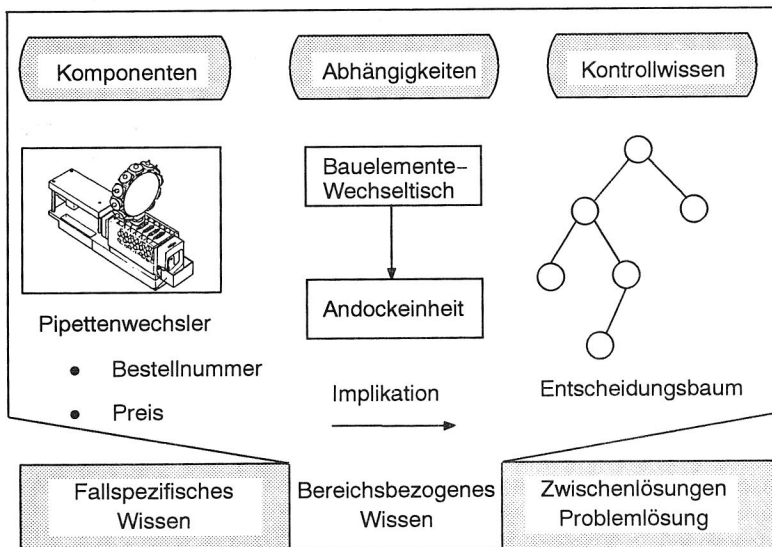


Bild 25: Bereichsbezogenes Wissen

Beschreibung der Konstruktionsobjekte

Unter einer Einzelkomponente verstehen wir, wie oben bereits definiert, einen atomaren Bestandteil einer Konfiguration. Das heißt, diese Komponente kann nicht weiter unterteilt werden. Die Komponente wird durch ihre Eigenschaften charakterisiert, wobei die Sicht ausschließlich auf die zu beschreibende Komponente beschränkt ist. Auswirkungen auf die Umgebung bleiben unberücksichtigt. So ist eine Einzelkomponente beschrieben durch die Bestellnummer, den Preis und weitere für die Angebotsplanung notwendigen Attribute (s. Bild 25).

Bevor die Abhängigkeiten näher betrachtet werden, muß die Begriffsbildung erläutert werden. Es wird zwischen Objekttypen erster und zweiter Ordnung unterschieden. Instanzen von Objekttypen erster Ordnung haben die Eigenschaft, nur aus Einzelkomponenten, also aus nicht weiter unterteilbaren Objekten, zu bestehen. Objekttypen zweiter Ordnung hingegen stehen nur in Beziehung zu Objekttypen erster Ordnung. Die Verknüpfung mit den atomaren Einzelkomponenten erfolgt daher nur indirekt über die Objekttypen erster Ordnung. Bild 26 veranschaulicht nochmals die Objekthierarchie.

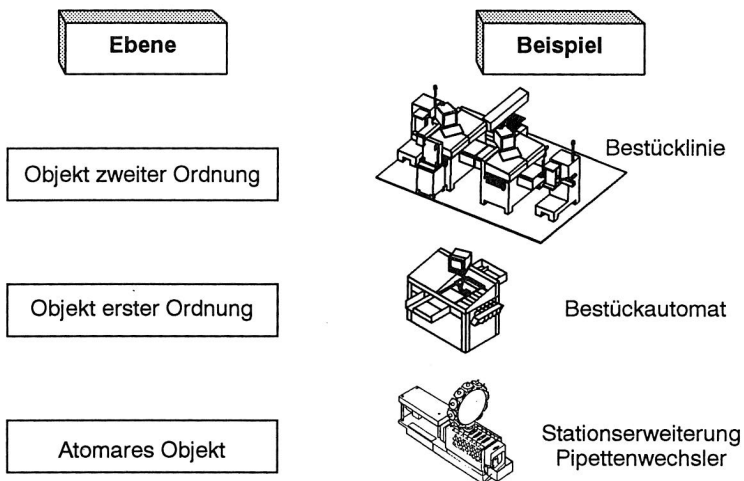


Bild 26: Hierarchische Modellierung der Domäne

Die zu modellierenden Abhängigkeiten in der Domäne unterteilen sich in:

- Abhängigkeiten zwischen den Einzelkomponenten eines Objekttyps erster Ordnung
- Abhängigkeiten zwischen den Objekttypen erster Ordnung

- Abhängigkeiten zwischen dem fallspezifischen Wissen und den Konstruktionsobjekten

Aufgrund der domänenspezifischen Gegebenheiten ist die Möglichkeit der Abbildung von Abhängigkeiten über die Ebene der Objekttypen erster Ordnung hinaus nicht erforderlich.

Abhängigkeiten zwischen den Einzelkomponenten eines Objekttyps erster Ordnung

Die Interdependenzen zwischen den Einzelkomponenten sind bei der Konfigurierung, das heißt bei der Instanziierung der Objekttypen erster Ordnung zu berücksichtigen. Ein Objekt erster Ordnung besteht ausschließlich aus atomaren Einzelkomponenten. Ein Beispiel für ein Objekt erster Ordnung ist ein Bestückautomat. Für den Modellierungsmechanismus leiten sich folgende Anforderungen ab:

- Definition beliebiger Objekttypen erster Ordnung
- Beschreibung der Vorgehensweise bei der Konfigurierung
- Berücksichtigung der Abhängigkeiten zwischen den Einzelkomponenten

Ein Objekttyp ist hierbei ein beliebiges Konzept /89/. Er muß aber nach obiger Definition erster Ordnung sein, also aus atomaren Einzelkomponenten bestehen. Eine Beschreibung der Abhängigkeiten und der Vorgehensweise in einem Modell ist anzustreben. Bei den Abhängigkeiten zwischen den Einzelkomponenten sind folgende Ausprägungen zu beobachten:

- Einzelkomponente A bedingt die Auswahl der Einzelkomponente B (Implikation).
- Einzelkomponente A oder Einzelkomponente B können ausgewählt werden. Es handelt sich um die logische Operation der Adjunktion, das heißt es können auch beide oder auch keine der beiden Komponenten ausgewählt werden.
- Einzelkomponente A oder Einzelkomponente B können ausgewählt werden, wobei nur eine Alternative gewählt werden darf (Disjunktion).

Bild 27 zeigt die zu modellierenden logischen Abhängigkeiten nochmals in der Übersicht. Um diese in der realen Welt vorhandenen Interdependenzen abzubilden, wird ein sogenannter Regelbaum eingesetzt. Dieser Regelbaum ist ein Baum im Sinne der Informatik /45/. Er besteht aus Knoten und Zweigen. Der oberste Knoten wird als Wurzel, die untersten als Blätter bezeichnet. Man kann einen Baum auch im graphentheoretischen Sinne beschreiben /108/. So handelt es sich bei diesem Regel-

Implikation	Bauelemente– wechseltisch	→	Andockeinheit
Konjunktion	Grundmodul Station Typ xx	→	(Stationsrechner \wedge Dokumentation)
Adjunktion	Videolageerkennungssystem	\vee	CRDL–Meßgerät
Disjunktion	Bauelementewechseltisch	∇	Festtisch

Bild 27: Abhängigkeiten zwischen den Einzelkomponenten

baum um einen gerichteten, zyklenfreien Graphen, der aus Knoten und gerichteten Kanten besteht (s. Bild 28). Zur Abbildung der oben beschriebenen Abhängigkeiten zwischen den Einzelkomponenten werden nun verschiedene Knotentypen eingeführt. Die Kanten haben innerhalb des Regelbaums immer die gleiche Semantik. Sie beschreiben den Ablauf des Konstruktionsprozesses. Deswegen werden gerichtete Kanten, die stets von der Wurzel des Baums wegweisen, eingesetzt. Konkret bedeutet dies, daß auch ein Teil des Kontrollwissens, das Reihenfolgewissen, das zur Steuerung des Konstruktionsprozesses der Objekte erster Ordnung dient, in diesem Regelbaum abgebildet ist. Auf die Abbildung des Kontrollwissens wird weiter unten noch im Detail eingegangen.

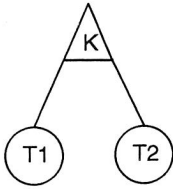
Um zusätzlich noch eine Strukturierung des Konstruktionsprozesses zu ermöglichen, wird das Konzept der Entscheidungspfade eingeführt.

Definition des Begriffs Entscheidungspfad

Ein Entscheidungspfad beschreibt die Konfigurierung eines Teilausschnitts des Objekts. Das heißt, die Konfigurierung eines Objekts kann in mehrere voneinander getrennte Aktionsketten zerlegt werden. Diese Teilausschnitte können mit realen physikalischen Gegebenheiten übereinstimmen. So könnte man bei einem Bestückungsautomaten zum Beispiel die Konfigurierung von linker und rechter Seite in Materialflußrichtung voneinander trennen (vgl. Bild 28).

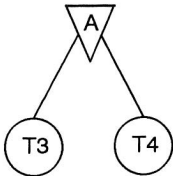
Der Konstruktionsprozeß kann somit in verschiedene Teilprozesse zerlegt werden. Eine vollständige Konfiguration ergibt sich, wenn sämtliche Entscheidungspfade betrachtet wurden. Im Regelbaum spiegelt sich die Anzahl der Entscheidungspfade in der Anzahl der von der Wurzel ausgehenden Kanten wider.

Konjunktivknoten

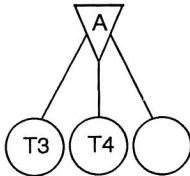


Der Konjunktivknoten dient zur Abbildung der Implikationen. Im nebenstehenden Beispiel kann Teil *T1* nur zusammen mit Teil *T2* in der Konfiguration vorhanden sein.

Alternativknoten

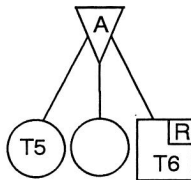


Nebenstehendes Beispiel modelliert eine Disjunktion. Es handelt sich hierbei um ein *exklusives oder*. Es wird entweder Teil *T3* oder *T4* konfiguriert. Beide Komponenten zusammen können in einer Konfiguration nicht vorkommen.



Zur Abbildung einer Adjunktion benötigt man den leeren Teileknoten, der einen Sonderfall des Teileknotens darstellt. Teile *T3* und *T4* sind somit optional.

Regelknoten



Für einige Einzelkomponenten ergibt sich erst während des Konstruktionsprozesses die Abhängigkeit zu den anderen Einzelkomponenten. Dies sind zum Beispiel Komponenten, die einmal pro Bestücklinie vorhanden sein müssen. Hier ist die Konfiguration eines Automaten abhängig von der Konfiguration der anderen Automaten der Linie.

Die Regelknoten werden nur im Zusammenhang mit der Abbildung einer Adjunktion verwendet, so daß die Auswahl dieser Einzelkomponente grundsätzlich optional ist. Die Abhängigkeit zu vorangegangenen Konstruktionsentscheidungen ergibt sich ausschließlich aus den textuellen Regeln, die jedem Regelknoten zugeordnet sind. Der Benutzer wird durch diese Regeln bei seinen Konstruktionsentscheidungen unterstützt. Für den halbautomatischen Konfigurationsmodus bedeutet dies eine zwingende Benutzerinteraktion.

Eine Realisierungsalternative ist der Einsatz eines sogenannten *Truth Maintenance Systems (TMS)* [23//27], das eine Verwaltung von Annahmen in einer Wissensbasis ermöglicht. Das heißt der Wahrheitsgehalt der Annahmen wird während des Konstruktionsprozesses ständig überprüft. Der Aufwand zur Realisierung eines solchen Systems ist aber in diesem Anwendungsfall nicht gerechtfertigt, da die Integration des Benutzers in den Entscheidungsprozeß keine qualitativen Nachteile des Ergebnisses der Konfigurierung erwarten läßt.

Die Modellierung der Konstruktionsvarianten der Objekttypen erster Ordnung ist mit den obigen Beschreibungsmethoden vollständig möglich. Abhängigkeiten zwischen den Objekttypen erster Ordnung, sowie die Beziehungen der Objekttypen und der Einzelkomponenten zum fallspezifischen Wissen, fehlen noch zur vollständigen Modellierung des bereichsbezogenen Wissens. Die Beziehungen zwischen den Objekttypen der verschiedenen Modellierungsebenen untereinander werden am Ende dieses Abschnitts behandelt (vgl. auch Bild 33).

Abhängigkeiten zwischen den Objekttypen erster Ordnung

Abhängigkeiten treten nicht bei allen Objekten erster Ordnung auf. In der betrachteten Domäne sind diese Beziehungen nur vorhanden, wenn es sich bei den Objekten um Automaten einer Bestücklinie handelt. Der Aufbau der Bestücklinien, das heißt die Reihenfolge der Bestückautomaten sowie die Auswahl der Automatentypen ist einerseits abhängig vom fallspezifischen Wissen, andererseits gilt es einige heuristische Grundregeln zu beachten. Eine Regel lautet zum Beispiel:

Automatentyp A in Materialflußrichtung nie vor Automatentyp B

Da die Menge der Varianten des Linienaufbaus noch überschaubar ist, wird die explizite Abbildung sämtlicher Möglichkeiten angestrebt. Wie schon bei der Beschreibung der Aufbauvarianten der Objekttypen erster Ordnung soll Kontrollwissen und hier insbesondere das Reihenfolgewissen in die Beschreibung integriert werden. Hierfür wird ein Entscheidungsbaum eingesetzt [11//66]. Jede Hierarchiestufe des Baumes entspricht einem weiteren Automat in der Linie (s. Bild 30). Das heißt, in Ebene 3 besteht die Linie aus drei Automaten. Der Knoten in Ebene 0 ist rein technischer Natur. Er dient als Wurzel des Entscheidungsbaums. Die Anzahl der Kanten, die einzelne Knoten mit der darunterliegenden Hierarchiestufe verbindet, ist gleich der Anzahl der möglichen Konstruktionsentscheidungen.

Abhängigkeiten zwischen dem fallspezifischen Wissen und den Konstruktionsobjekten

In der Wissensbasis muß, um die halbautomatische Variante der Konfigurierung zu ermöglichen, Wissen vorhanden sein, das die Verknüpfung des fallspezifischen Wissens mit den Einzelkomponenten bzw. den Konstruktionsobjekten abbildet.

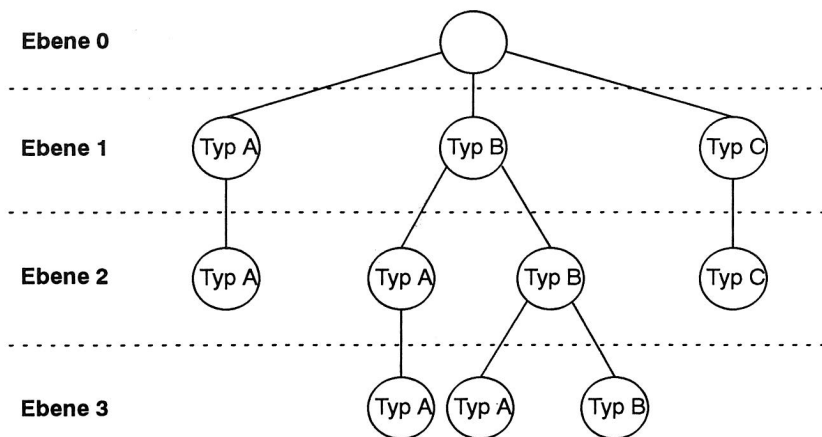


Bild 30: Entscheidungsbaum für die Linienkonfigurierung

Im betrachteten Anwendungsfall gilt es, zwei Einflußfaktoren auf den Konstruktionsprozeß zu beachten. Zum einen sind dies die Eigenschaften der Flachbaugruppen des Kunden und zum anderen die Eigenschaften der Bauelemente der Flachbaugruppen, die den Lösungsraum der möglichen Konfigurationen einschränken. In Bild 31 werden die Eigenschaften der Flachbaugruppen und der Bauelementtypen zusammenfassend dargestellt. Aus den Eigenschaften der zu fertigenden Flachbaugruppen bzw. den zu bestückenden Bauelementtypen lassen sich die Anforderungen an das zu konfigurierende Bestückssystem ableiten.

Zur Definition des die Anforderungen erfüllenden Lösungsraums bedarf es nun der Festlegung der Anforderungen denen die Automaten genügen, das heißt es muß beschrieben werden, über welche Leistungen die verschiedenen Automatentypen im einzelnen verfügen. Die Leistungen eines Automaten, also eines Objektes erster Ordnung, sind abhängig von seinem Aufbau. Das heißt, die Einzelkomponenten, die zu der Konfiguration des Objektes dieses Typs gehören, sind verantwortlich für die Leistungen des Objekts. Die Beschreibung der Leistungen der Objekte erster Ordnung und der dazugehörigen Einzelkomponenten muß einen Abgleich mit den durch die zu bestückenden Bauelemente der Flachbaugruppen des Kunden erwachsenden Anforderungen ermöglichen.

Mit Hilfe eines entsprechenden Algorithmus kann nun die Überprüfung der grundsätzlichen Eignung eines Automatentyps zur Bestückung eines bestimmten Bauelemententyps durchgeführt und somit der Lösungsraum für alle möglichen Konfigurationen aufgespannt werden. Der Nutzen dieser Vorgehensweise ist die problemlose

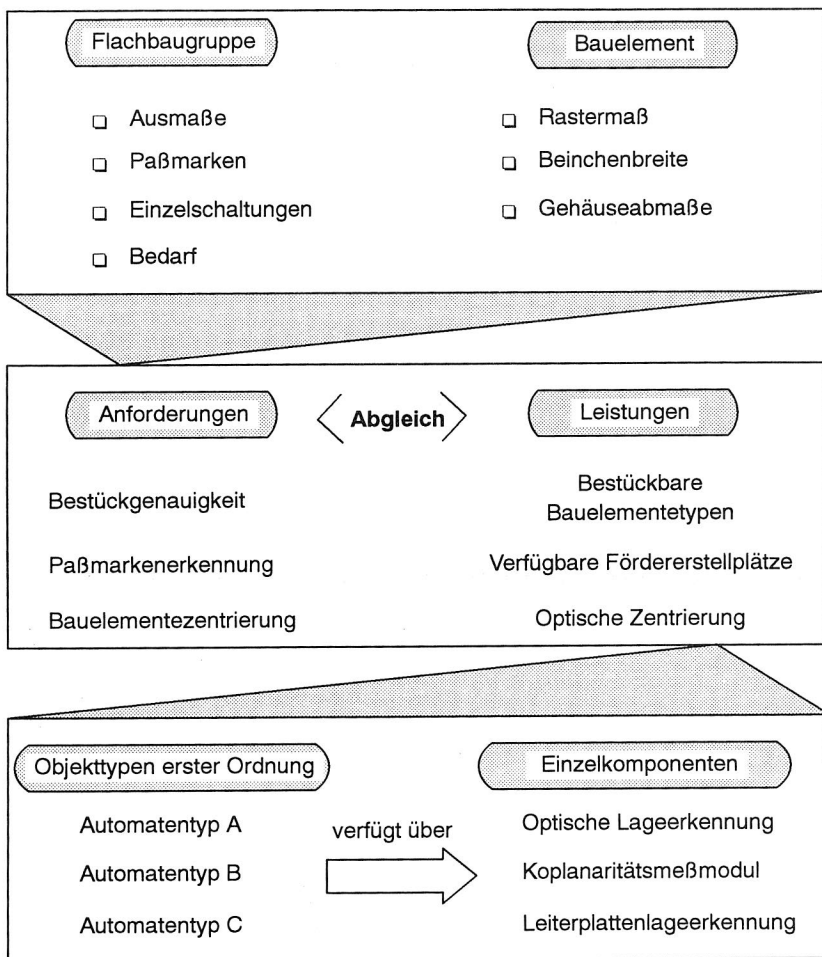


Bild 31: Definition des Lösungsraums

Erweiterbarkeit der Bauelementebibliothek, die keine Veränderung der Funktionalität des Konfigurators nach sich zieht. Ergeben sich aber aufgrund technischer Neuentwicklungen neue Eigenschaften der Bauelemente, die zusätzliche Anforderungen an die Bestückssysteme stellen, so muß auch bei dieser Lösungsvariante in die Implementierung eingegriffen werden. Desweiteren können Bauelemente aus verschiedenen Gründen, trotz Erfüllung der auf den Eigenschaften basierenden Anfor-

derungen, von einem Automatentyp nicht bestückbar sein. Solche Ausnahmen müssen auch bei dieser Variante explizit formuliert werden.

Bei *ANKON* wird ein hybrider Ansatz zur Verknüpfung des fallspezifischen Wissens mit den Konstruktionsobjekten gewählt. Die auf den Bauelementeeigenschaften basierenden Abhängigkeiten werden explizit beschrieben. Die flachbaugruppenabhängige Einschränkung des Lösungsraums wird mittels eines Anforderungs-/ Leistungsabgleichs ermittelt. Nachfolgend werden die beiden Varianten zur Einschränkung des Lösungsraums näher beschrieben.

Bauelementeabhängige Einschränkung des Lösungsraums

Für jeden Bauelemententyp werden explizit die Objekte erster Ordnung, also z.B. die Automatentypen, sowie die eventuell erforderlichen zusätzlichen Einzelkomponenten, die zur Bestückung dieses Bauelemententyps notwendig sind, angegeben. Der daraus resultierende Eingabeaufwand ist noch vertretbar, da zum einen die Anzahl der unterschiedlichen Bauelemententypen überschaubar ist und zum anderen der Aufwand nur einmalig entsteht. Anschließend stehen diese Bauelemententypen für alle weiteren Konstruktionsaufgaben zur Verfügung. Neue Bauelemententypen können problemlos zusätzlich aufgenommen werden.

Wie oben bereits erwähnt, stellen die Bauelemententypen bestimmte Anforderungen an die Bestückautomaten. Diese Anforderungen resultieren in speziellen Einzelkomponenten, die in der Konfiguration des Automaten vorhanden sein müssen, um diesen Bauelemententyp bestücken zu können. Bild 32 stellt die zu modellierenden Abhängigkeiten dar. In Anlehnung an die Modellierung des möglichen Aufbaus der Objekte erster Ordnung werden für die verschiedenen Bauelemententypen die möglichen Objekttypen erster Ordnung, sowie die erforderlichen Einzelkomponenten, festgelegt. Benötigt man mehrere Einzelkomponenten so wird dies über einen Konjunktivknoten dargestellt. Ist eine Alternativentscheidung abzubilden, dann wird ein Alternativknoten verwendet. In Bild 32 sind zwei folgendermaßen zu interpretierende Beispiele dargestellt. Um Bauelemententyp A auf Stationstyp X zu bestücken, benötigt man Einzelkomponenten T1 **und** T2. Um Bauelemententyp B auf Stationstyp X bestücken zu können, muß die Konfiguration dieses Objektes erster Ordnung über die Einzelkomponenten T3 **oder** T4 verfügen. Analog zur Beschreibung der Konstruktionsvarianten der Objekte erster Ordnung, können auch komplexere Zusammenhänge beschrieben werden. Es stehen, abgesehen von den Regelknoten, wieder sämtliche Elemente der bereits vorgestellten Beschreibungssprache zur Verfügung. So können auch Alternativ- mit Konjunktiventscheidungen kombiniert werden.

Flachbaugruppenabhängige Einschränkung des Lösungsraums

Auch die Eigenschaften der Flachbaugruppen bewirken eine Einschränkung des Lösungsraums. Die zu beachtenden Eigenschaften der Flachbaugruppen sind:

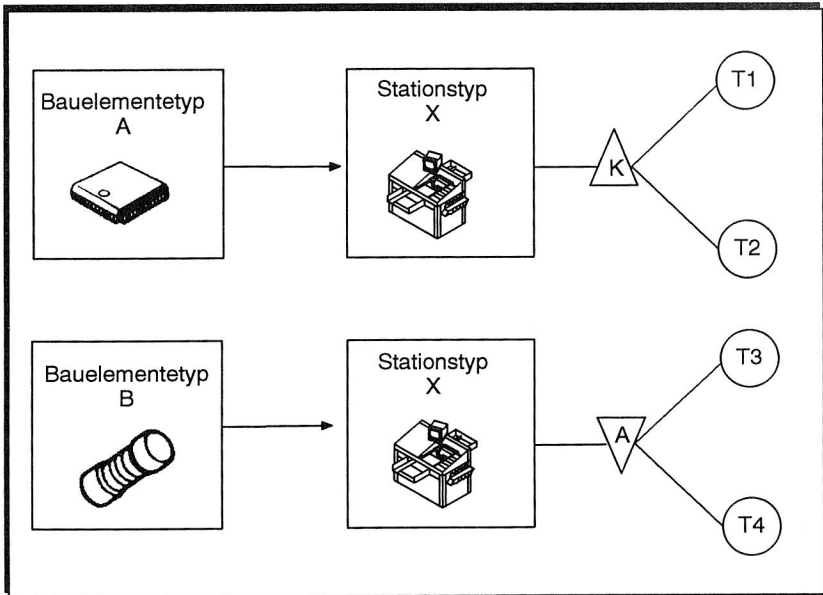


Bild 32: *Einfluß des fallspezifischen Wissens*

- Leiterplattegeometrie
- Anzahl der Paßmarken
- Anzahl der Inkpunkte
- Einzelschaltungen

Alle weiteren Eigenschaften sind direkt von den Bauelementen der Einzelschaltungen abhängig und müssen somit nicht weiter betrachtet werden. Die Eigenschaften stellen Anforderungen an das zu konfigurierende Bestücksystem. Die Leistungen der verschiedenen Konstruktionsobjekte müssen nun mit diesen Anforderungen abgeglichen werden. Daraus ergibt sich der Lösungsraum der möglichen Konfigurationen. Der dazu notwendige Anforderungs-/Leistungsabgleich ist im Konfigurator fest implementiert, so daß bei einer neuen Flachbaugruppe, außer der Angabe der Eigenschaften, keine weiteren Benutzerinteraktionen mehr notwendig sind. Dies ist aufgrund der häufigen Neudefinition von Flachbaugruppen auch unbedingt erforderlich. Denn von Kunde zu Kunde unterscheiden sich mit Sicherheit die zu fertigenden Flachbaugruppen.

Kontrollwissen

Ein weiterer Bestandteil des bereichsbezogenen Wissens ist das sogenannte Kontrollwissen (s. Bild 25). Es untergliedert sich in Reihenfolgewissen, Bearbeitungswissen und Konfliktlösungswissen. Alle drei Wissensarten zusammen betrachtet, kann man sagen, daß es sich um Wissen handelt, das die Vorgehensweise bei der Konfigurierung beschreibt. Da der Kontrollaspekt bei Expertensystemen schon in Kapitel 5 ausführlich beleuchtet worden ist, wird hier nur noch auf die Darstellung des Kontrollwissens in diesem speziellen Anwendungsfall eingegangen. Festzuhalten ist, daß die drei Wissensarten des Kontrollwissens das gesamte zur Problemlösung notwendige Wissen beinhalten. Daher wird auf dieses Wissen in Abschnitt 5.4., das die Problemlösungsmethoden zum Inhalt hat, eingegangen.

In diesem Abschnitt werden nun, in Ergänzung zu den bisherigen Ausführungen, ausschließlich die Mechanismen zur Abbildung der Abhängigkeiten der Objekttypen höherer Ordnung sowie der Vorgehensweise bei der Konstruktion erläutert. Das heißt, es wird auf die Abfolge der möglichen Konstruktionsschritte, nicht aber auf die Kriterien zur Entscheidung für oder gegen einen Konstruktionsschritt, eingegangen. In Verbindung mit der Beschreibung der Aufbaustrukturen der Objekte erster Ordnung wird der Lösungsraum aller möglichen Konfigurationen aufgespannt. Dieses Wissen wird mit Konstruktionswissen bezeichnet und dient als Basis für alle weiteren Bestandteile des Kontrollwissens und somit des gesamten Konstruktionsprozesses /20/.

Grundlage der Abbildung des Konstruktionswissens zur Erstellung eines Angebots ist, neben der in Bild 33 dargestellten Begriffshierarchie der Anwendungsdomäne, der Entscheidungsbaum zur Konfigurierung von Bestücklinien, sowie die Regelbäume zur Beschreibung der Aufbauvarianten der Objekttypen erster Ordnung. Auf den Entscheidungsbaum und die Regelbäume ist schon im Abschnitt über das Abhängigkeitswissen ausführlich eingegangen worden, so daß hier ausschließlich die Begriffshierarchie der Anwendungsdomäne betrachtet wird.

Das dem Konstruktionsprozeß zugrundeliegende Konstruktionswissen wird in einer taxonomischen Begriffshierarchie, sowie einer überlagerten Zerlegungshierarchie abgelegt /19/. Die Begriffshierarchie stellt eine strenge Spezialisierungshierarchie dar, die eine Verknüpfung der Konzepte der Domäne mittels einer *is-a* Relation ermöglicht. Ergänzend hierzu dient die Zerlegungshierarchie, die die Zerlegung der Konzepte in ihre Komponenten ermöglicht. Zur Beschreibung dient eine *has-parts* Relation. Genauere Ausführungen bezüglich der Modellierung technischer Domänen finden sich in Abschnitt 4.5.

In Bild 33 wird die, dem hier betrachteten Konstruktionsproblem zugrundeliegende, Kontrollstruktur dargestellt. Die abgebildete Begriffshierarchie stellt aus Übersichtlichkeitsgründen nur einen Ausschnitt der gesamten Anwendungsdomäne dar. Das Angebot stellt das oberste Konzept in der Hierarchie dar.

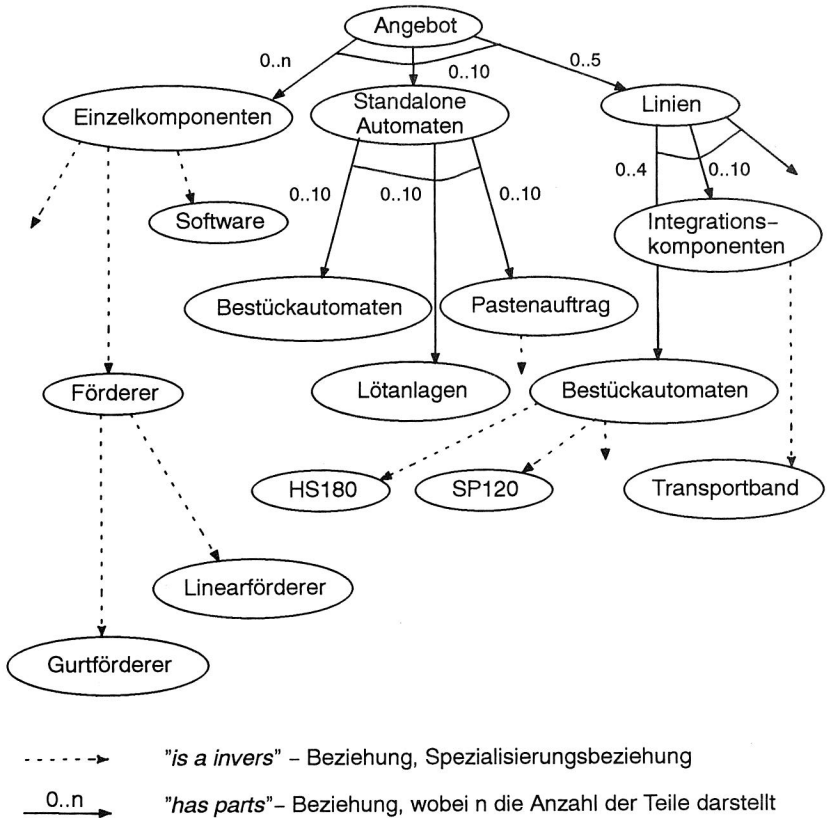


Bild 33: Begriffshierarchie für die Domäne "Angebot"

Oben ist bereits der Begriff des Objekttyps erster Ordnung eingeführt worden. Hierbei handelt es sich um Konzepte, die über keine weiteren Unterklassen mehr verfügen, also deren Instanzen aus einer Menge von Einzelkomponenten bestehen. Der Aufbau bzw. die Konfigurationsrestriktionen dieser Objekte ist bzw. sind den bereits beschriebenen Regelbäumen zu entnehmen.

Einschränkend muß erwähnt werden, daß im halbautomatischen Konfigurationsmodus nur die Konfiguration der Bestücksysteme unterstützt wird und somit nur ein Ausschnitt der gesamten Begriffshierarchie in diesem Zusammenhang relevant ist. Die anderen Konstruktionsmöglichkeiten stehen nur im interaktiven Modus zur Verfügung. Es wird also ausschließlich die Konfiguration des Bestücksystems unter-

stützt, wobei die beiden Aspekte "Konfigurierung von Standalone Automaten" und "Konfigurierung von kompletten Bestücklinien" berücksichtigt werden.

Das Konstruktionswissen zeigt somit die Varianten für den durchzuführenden Konstruktionsprozeß auf, beschreibt somit die Abfolge der möglichen Konstruktions-schritte. Es wird aber keine Aussage über die Auswahl der Konstruktionsschritte gemacht.

Im nächsten Abschnitt wird die Darstellung der während der Konfigurierung anfallenden Zwischenergebnisse und der abschließenden Endergebnisse eines Konstruktionsprozesses beschrieben.

5.3.3 Zwischenergebnisse und Problemlösungen

Bei den Zwischenergebnissen handelt es sich um temporäre Zustände des Konstruktionsprozesses. Da diese Zustände als Grundlage für den Problemlösungsmechanismus dienen, und somit für den Anwender nach Abschluß der Konfigurierung nicht mehr von Interesse sind, ist eine Datenpersistenz über den Konstruktionsprozeß hinaus nicht notwendig. Eine explizite Erklärungskomponente, die diese Zwischenstände zur Motivation der Konstruktionsentscheidungen benötigt, ist, wie eingangs des Kapitels schon erwähnt, aus Gründen der starken Einbindung des Anwenders in den Konstruktionsprozeß für die beschriebene Anwendung nicht notwendig.

Im Gegensatz dazu muß bei den Problemlösungen, die eine endgültige Konfiguration darstellen, die Datenpersistenz gewährleistet sein, da ein Angebot für einen Kunden natürlich zu einem späteren Zeitpunkt nachvollziehbar und auch modifizierbar sein muß. Ein Zwischenergebnis ist aus datentechnischer Sicht genauso aufgebaut wie eine endgültige Problemlösung. Es ist nur im Sinne der Anforderungen nicht vollständig, verfügt also nicht über alle benötigten Bestandteile, um den Wünschen des Kunden und den Anforderungen der technischen Konsistenzprüfung zu genügen.

Das hierarchisch gesehen oberste Konzept zur Darstellung der Ergebnisse ist ein Angebot. Ein Angebot hat den folgenden Aufbau (s. Bild 34):

- Linien
- Standalone Automaten
- Einzelkomponenten

Eine Linie wiederum besteht aus Bestückautomaten, den sogenannten Integrationskomponenten, das sind Automaten, die keine Bestückfunktionalität haben und sonstigen, einer Linie logisch zuzuordnender Objekte erster Ordnung. Solch ein Objekt kann z. B. der erforderliche Linienrechner sein. Alle Bestandteile einer Linie haben,

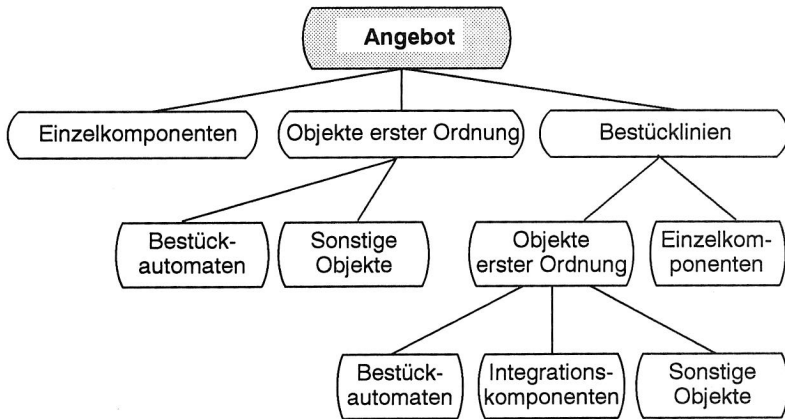


Bild 34: Aufbau eines Angebots

im Gegensatz zum Konzept der Linie, die Eigenschaft ein Objekt erster Ordnung zu sein. Das heißt, diese Objekte bestehen aus einer Menge von Einzelkomponenten, die im Kontext der Konfigurierung atomare Bestandteile darstellen.

Standalone Automaten bilden eine weitere Komponente eines Angebots. Sie sind materialflußtechnisch nicht in eine Linie integrierbar. Es kann sich um Bestückautomaten, als auch Automaten anderer Funktionalität handeln. Auf jeden Fall sind es Objekte erster Ordnung mit den bekannten Eigenschaften.

Ein weiterer Bestandteil eines Angebots sind die Objekte, die weder einer Linie noch einem Standalone Automaten logisch zuordenbar sind. Es kann sich hierbei sowohl um atomare Einzelkomponenten, als auch Objekte erster Ordnung handeln.

Der tatsächliche Aufbau eines Objekts erster Ordnung, d. h. der Instanz eines Objekttyps erster Ordnung wird mittels eines Baums abgebildet. Dies geschieht in Anlehnung an die Regelbäume, die der Konstruktion eines Objektes erster Ordnung zugrundeliegen. Das Konzept der Entscheidungspfade, das zum Beispiel zur Abbildung räumlicher Zugehörigkeiten bestimmter Einzelkomponenten angewandt wird, kann mittels eines Baums auch in die Beschreibung eines Objektes erster Ordnung übernommen werden. Von der Wurzel aus gesehen, entspricht dann jeder Ast des Baumes einem Entscheidungspfad sowie den beim Durchlaufen der Pfade getroffenen Auswahlentscheidungen (s. Bild 35).

Diese grundlegende Beschreibung der Bestandteile eines Angebots dient nun als Basis zur Speicherung der Zwischenergebnisse und sämtlicher für den Kunden be-

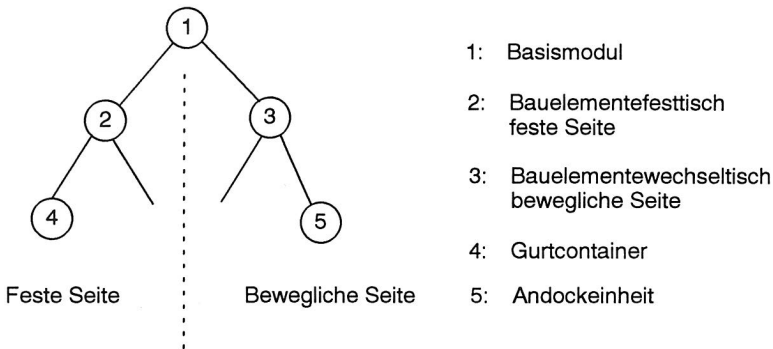


Bild 35: Konfiguration eines Objektes erster Ordnung

nötigter Informationen. Die Zwischenergebnisse sind für die Durchführung des Konstruktionsprozesses notwendig, da die Möglichkeit zur Rücknahme von Entscheidungen unbedingt erforderlich ist. Ein alter Zustand muß somit rekonstruierbar sein. Die Wissens- und Stammdatenverwaltung erfolgt in einer relationalen Datenbank. Das zugrundeliegende Datenmodell wird in Bild 36 dargestellt. Die Semantik der Symbole ist in /130/ beschrieben.

5.4 Problemlösungsmethoden

Bei einer Problemlösungsmethode handelt es sich wie in Abschnitt 4.7 bereits definiert um einen Algorithmus, der angibt wie bereichsspezifisches Wissen zur Problemlösung angewendet wird. In Abschnitt 5.3.2 ist das bereichsspezifische Wissen im Detail beschrieben. In diesem Unterkapitel wird nun auf die Wissensverarbeitung, das heißt auf die eigentliche Problemlösung, die in diesem speziellen Anwendungsfall die Erstellung eines die Anforderungen des Kunden erfüllenden Angebots ist, eingegangen.

Das System verfügt über zwei verschiedene Problemlösungsmodi, die aber als sich ergänzende Varianten zu betrachten sind. Es handelt sich hierbei um den interaktiven und den halbautomatischen Konfigurierungsmodus. Die genaue Funktionsweise und Leistung dieser beiden Konfigurierungsvarianten wird in den folgenden Abschnitten erläutert.

5.4.1 Interaktive Konfigurierung

Bei der interaktiven Konfigurierung wird der Anwender zwar bei der Auswahl des nächsten Konstruktionsschritts unterstützt, das System führt aber keine Schritte

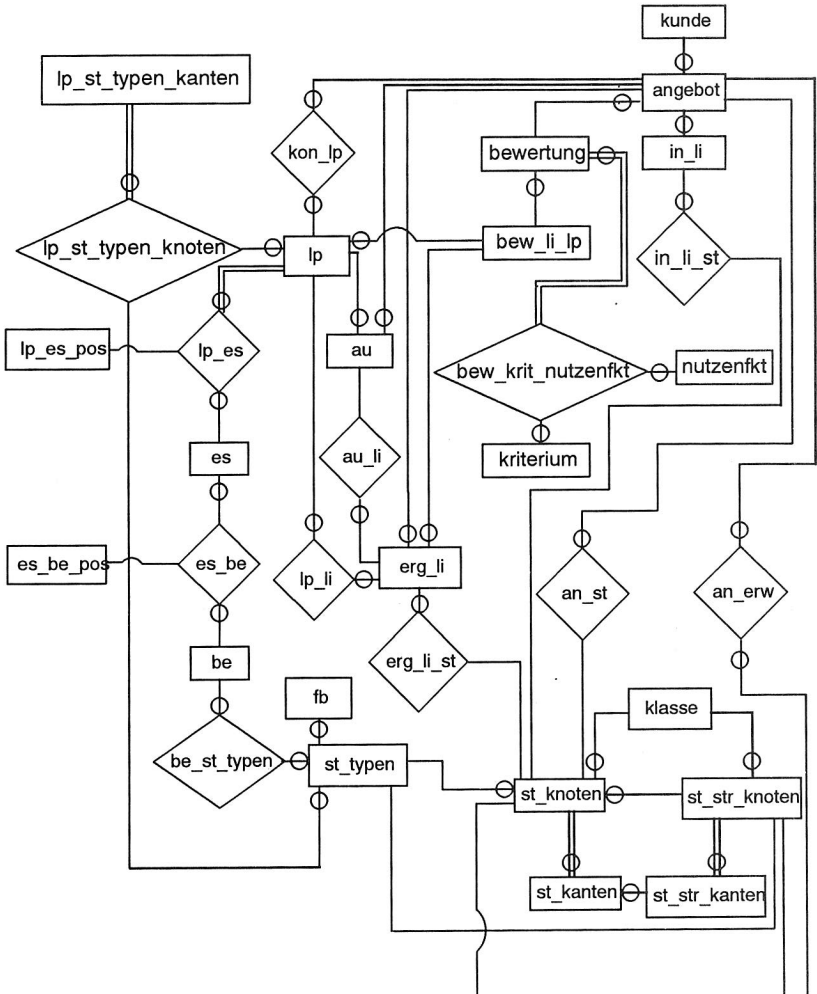


Bild 36: Ausschnitt des Entity- Relationship Diagramms des dem Konfigurator zugrundeliegenden Datenmodells

selbständig durch. Es ist in jedem Falle eine entsprechende Benutzerinteraktion notwendig. Die Unterstützung beschränkt sich auf die Reduktion der Menge der existierenden Konstruktionsschritte auf die aus technischer Sicht möglichen bzw. den Hinweis auf unbedingt erforderliche Konstruktionsschritte. Die kundenspezifischen Anforderungen werden nicht berücksichtigt, sondern ausschließlich die technischen Restriktionen der Konstruktionsobjekte verarbeitet.

Grundlage dieser intelligenten Benutzerführung sind die in Abschnitt 5.3.2 beschriebenen Regelbäume der Objekttypen erster Ordnung, die während des Konstruktionsprozesses instanziiert werden. Desweiteren wird der Entscheidungsbaum, der den möglichen Aufbau einer Linie abbildet, ausgewertet und somit die Konsistenz des Linienaufbaus sichergestellt. Mit Linienaufbau wird die Reihenfolge der Automatentypen in einer Bestücklinie bezeichnet, wobei die Materialflußrichtung das Reihenfolgekriterium darstellt. Eine Verknüpfung mit dem fallspezifischen Wissen, das die spezifischen Anforderungen des Kunden beinhaltet, findet nicht statt. Der Anwender muß die Anforderungen des Kunden also selber interpretieren und in entsprechende Konstruktionsschritte umsetzen. Die Systemunterstützung beschränkt sich somit auf die Überprüfung der technischen Konsistenz des Angebots.

So werden zum einen im Rahmen der intelligenten Benutzerführung die Konstruktionsschritte des Anwenders gesteuert und zum anderen bietet dieser Modus die technische Konsistenz der Konfiguration zu überprüfen. Im Rahmen dieses Konsistenzchecks werden fehlende und nicht zusammen konfigurierbare Komponenten angezeigt, und der Anwender kann durch entsprechende Modifikationen die Konsistenz der Konfiguration sicherstellen. Diese zusätzliche Funktionalität ist notwendig, da die Benutzerführung zwar Vorschläge zur korrekten Konfigurierung unterbreitet, aber den Benutzer nicht zwingt, die entsprechenden Schritte auszuführen. Mittels dieses Konzeptes können auch Sonderfälle, die Konsistenzverletzungen erforderlich machen, bearbeitet werden.

Im interaktiven Modus können also komplette Angebote zusammengestellt werden, wobei für sämtliche Instanzierungen der Objekttypen erster Ordnung eine intelligente Benutzerführung den Konstruktionsprozeß steuert. Das heißt, die Konfigurierung eines Bestückautomaten, also eines Objektes erster Ordnung, wird mit einer Benutzerführung, die die technische Konsistenz der Automatenkonfiguration gewährleistet, unterstützt.

Der interaktive Modus ist aber nicht als abgeschlossenes System zu betrachten, sondern dient vielmehr als Ergänzung zum halbautomatischen Modus. Systemgenerierte Angebotsvorschläge (vgl. Abschnitt 5.4.2) können in diesem Modus vom Anwender verändert werden. Im folgenden Abschnitt wird nun die halbautomatische, wesentlich komplexere Variante der Problemlösung beschrieben.

5.4.2 Halbautomatischer Konfigurierungsmodus

In diesem Modus wird für die vollständige Auslegung des Bestücksystems im Rahmen der Angebotserstellung eine Systemunterstützung angeboten. Diese Unterstützung beschränkt sich nicht nur auf eine intelligente Benutzerführung, wie im interaktiven Modus, sondern führt programmgesteuert selbständig Konstruktionsschritte durch. Dem Anwender bleibt bei jedem Schritt eine Revisionsmöglichkeit vorbehalten.

Jede Konstruktionsaufgabe beinhaltet implizit auch eine Optimierungsaufgabe, da mit der Lösung der Konstruktionsaufgabe immer ein bestimmtes Ziel verfolgt wird /35/. Zur Suche nach der optimalen Konfiguration, das heißt zur Durchführung der erforderlichen Konstruktionsschritte, bedarf es daher entsprechender Optimalitätskriterien, die nachfolgend näher beschrieben werden.

Im betrachteten Anwendungsfall soll mit dem geplanten Bestückssystem unter Berücksichtigung verschiedener Nebenbedingungen die Kundensatisfaktion maximiert werden. Die formalisierte Optimierungsaufgabe ist unten dargestellt. Diese Zielsetzung entspricht aber einer idealisierten Anforderung, da diese Größe nur sehr schwer quantifizierbar ist und sich aus mehreren Subzielen zusammensetzt. Somit ist die praktische Lösung der nachfolgend formal spezifizierten Optimierungsaufgabe mit großen Problemen verbunden. Die durch die aufwendige Modellierung der Kundenpräferenzen bedingte Systemkomplexität wird auf Kosten der zu erreichenden Benutzerakzeptanz stark anwachsen.

ZF: $KS \rightarrow \max$
u. d. N. $BL \geq 1000$ Bauelemente pro Stunde
 $FL \leq 100 \text{ m}^2$

wobei:

KS: Kundensatisfaktion
BL: Bestückleistung
FL: Flächenbedarf

Die oben aufgeführten Nebenbedingungen dienen nur als Beispiel und sind nicht vollständig. Desweiteren ist zu beachten, daß die Restriktionen von Kunde zu Kunde variieren können. Die Beispiele stellen sogenannte harte Restriktionen dar, die von einer sinnvollen Konfiguration unbedingt erfüllt werden müssen und somit auch als *KO*-Kriterien bezeichnet werden können. Desweiteren gilt es noch die weichen Restriktionen zu beachten. Hierbei handelt es sich um Kriterien deren explizite Ausprägung einen Einfluß auf die mit der Konfiguration erreichte Kundensatisfaktion haben. Das heißt, bei diesen Kriterien gibt es keine null oder eins Entscheidung im klassischen Sinne. Will man diese Kriterien in die Steuerung des Konstruktionsprozesses integrieren, bietet sich ein auf der Theorie der Nutzenmodelle basierender Ansatz an. Das heißt, das Optimierungsproblem kann als Problem der Nutzwertmaximierung angesehen werden (vgl. /35/), wobei der Nutzen für den Kunden gemeint ist. Die Unterscheidung zwischen harten und weichen Restriktionen kann sich von Kunde zu Kunde ändern, wobei generell die betrachteten Kriterien kundenabhängig sind.

Diesem Aspekt wird in Kapitel 6 Rechnung getragen. Dort wird eine Methode zur Bewertung von Konfigurationen unter Berücksichtigung der spezifischen Kundenpräferenzen vorgestellt. Um die Systemkomplexität zu verringern und somit die Be-

dienung des Werkzeugs zu vereinfachen, wird für die halbautomatische Konfigurierungsvariante eine vereinfachte Zielformulierung gewählt.

Als Grundlage der weiteren Ausführungen dient die unten spezifizierte Optimierungsaufgabe, die dem erforderlichen Optimierungsprozeß zugrundeliegt. Sie stellt quasi eine Operationalisierung und Reduktion des oben beschriebenen idealisierten Optimierungsproblems dar.

ZF:	Investitionskosten \rightarrow min
u. d. N.	Bestückleistung ausreichend
	Alle Bauelementetypen bestückbar
	Alle erforderlichen Bauelemente rüstbar

Somit ist die Zielsetzung des Konstruktionsprozesses eindeutig festgelegt und eine auf entsprechenden Heuristiken basierende Steuerung des Ablaufs möglich.

Der Ablauf des Konstruktionsprozesses basiert auf dem in Abschnitt 5.3.2 beschriebenen Konstruktionswissen, das die Grundlage des Kontrollwissens darstellt. Das Konstruktionswissen ist in der Begriffshierarchie (vgl. Bild 33) und den Regelbäumen der Objekttypen erster Ordnung abgelegt. Sie bilden somit den Rahmen des Konstruktionsablaufs und definieren für jede Teilkonstruktion alle möglichen syntaktisch korrekten Konstruktionsschritte. In diesem Kontext kann die Aufgabe der Konfiguration mit der Suche nach einer kompletten, widerspruchsfreien Instanziierung der Begriffshierarchie, unter Berücksichtigung der Kundenanforderungen, gleichgesetzt werden.

Der Ablauf des Konstruktionsvorgangs entspricht einer kontinuierlichen Weiterentwicklung der Teilkonstruktionen gemäß des durch die Begriffshierarchie vorgegebenen Rahmens und untergliedert sich in die folgenden Schritte:

1. Untersuchung der aktuellen Teilkonstruktion auf syntaktisch durchführbare Konstruktionsschritte und Generierung einer entsprechenden Agenda
2. Auswahl eines durchzuführenden Konstruktionsschrittes aus der Agenda mit Hilfe der sogenannten "Agenda-Auswahlkriterien"
3. Durchführung des Konstruktionsschritts mittels des erforderlichen Bearbeitungsverfahrens

Zur Durchführung dieser Schritte ist nun das gesamte Kontrollwissen, bestehend aus Reihenfolgewissen, Bearbeitungswissen, Konfliktlösungswissen und Fokussie-

lungswissen erforderlich. Nachfolgend wird auf die Abbildung dieser Wissensarten im Detail eingegangen /20/.

Reihenfolgewissen

Das Reihenfolgewissen, das die günstigste Sequenz der Teilaufgaben und Konstruktionsschritte festlegt, spiegelt sich in den Auswahlkriterien der Agenda wider. Der Auswahl des im Sinne eines aufwandsminimalen Konstruktionsprozesses optimalen Konstruktionsschrittes aus der aktuellen Agenda, kommt für die Erreichung einer hohen Effizienz große Bedeutung zu. Sie wird mittels eines Best-First Verfahrens /50/ durchgeführt. Hierzu ist eine Bewertungsfunktion notwendig, die alle möglichen Konstruktionsschritte evaluiert. Die Bewertungsfunktion berücksichtigt das Zielkriterium der Konfigurierung.

Bearbeitungswissen

Das Bearbeitungswissen dient zur Bestimmung des Wertes eines Konstruktionsschrittes. Es wird in den entsprechenden Bearbeitungsverfahren abgebildet. Anzumerken ist, daß es sich bei den Bearbeitungsverfahren um domänenunabhängige Verfahren handelt, wie zum Beispiel eine Benutzeranfrage oder eine Berechnungsfunktion.

Konfliktlösungswissen

Da in einem komplexen Umfeld, wie es die Konfigurierung von Bestückssystemen darstellt, die Auswahl der Konstruktionsschritte zumeist auf Heuristiken basiert, kann es im Verlauf der Konstruktion zu Konflikten kommen. Zur Auflösung dieser Konflikte werden entsprechende Konfliktlösungsregeln benötigt.

Fokussierungswissen

Das Fokussierungswissen dient zur Reduktion des Suchraums und somit der Effizienzsteigerung des Konstruktionsprozesses. Dies geschieht mittels der Einschränkung der Agenda.

Im folgenden Abschnitt wird nun der Konstruktionsvorgang im Detail vorgestellt.

Grundsätzlicher Ablauf der Konstruktion

Der Lösungsraum wird durch die Begriffshierarchie und die Regelbäume aufgespannt. Anzumerken ist, daß im Rahmen der halbautomatischen Konfigurierung nur ein Ausschnitt der Begriffshierarchie betrachtet wird. Das heißt, bestimmte Konstruk-

tionsschritte sind in diesem Modus nicht möglich und stehen nur für die interaktive Variante zur Verfügung. Sie werden in diesem Zusammenhang nicht mehr weiter betrachtet.

Grundsätzlich sind basierend auf der Begriffshierarchie drei verschiedene Typen von Konstruktionsschritten möglich:

- *Spezialisieren*
Eine Instanz eines Konzepts wird entsprechend der Begriffshierarchie zu einer Instanz eines spezielleren Konzeptes verfeinert. So kann zum Beispiel das Konzept Bestückautomat in das Konzept HS 180 mittels dieses Konstruktionsschrittes überführt werden (s. Bild 33).
- *Zerlegen*
Dieser Typ eines Konstruktionsschrittes repräsentiert eine strikte *Top-down* Vorgehensweise. Ein Aggregat wird mit diesem Schritt in seine Bestandteile zerlegt. In der Begriffshierarchie werden die Zerlegungsmöglichkeiten durch die *has-parts* Relationen abgebildet (s. Bild 33).
- *Integrieren*
Ein Konstruktionsobjekt wird einem Aggregat als Komponente zugeordnet. Dies entspricht einer *bottom-up* Vorgehensweise, die im Anwendungsfall zur Integration des fallspezifischen Wissens unbedingt erforderlich ist. Aus dem fallspezifischen Wissen läßt sich der Bedarf an bestimmten Konstruktionsobjekten bzw. Einzelkomponenten ableiten. Diese müssen bei der Konfigurierung mitunter in übergeordnete Objekte integriert werden.

Konstruktionsprozesse lassen sich zumeist in mehrere Phasen unterteilen. Jede Phase verfügt dann über eigenes Kontrollwissen, das in einer entsprechenden Strategie repräsentiert wird. Bei der Planung von Montagesystemen hat sich die Anwendung des aus der *Künstlichen Intelligenz* bekannten Konzepts des hierarchischen Planens bewährt /145/. Den Anwendungsfall kann man dieser Aufgabenklasse zuordnen. Es werden zwei voneinander abhängige Konstruktionsphasen definiert /156/.

- Strukturfestlegungsphase
- Detailkonfigurierungsphase

Beide Phasen müssen zur vollständigen Konfigurierung durchlaufen werden. Nachfolgend wird auf das zugrundeliegende Kontrollwissen und die verwendeten Heuristiken für jede Phase eingegangen.

Die Strukturfestlegungsphase stellt den ersten Schritt zur kundengerechten Planung des Bestücksystems dar. Sie ist abhängig von der Detailkonfigurierungsphase. Die Wechselwirkungen zwischen den beiden Planungsphasen machen einen iterativen

Planungsansatz notwendig, der die Möglichkeit der Rücknahme bereits getroffener Entscheidungen erfordert.

Strukturfestlegungsphase

Die Aufgabe dieser Phase ist die Bestimmung der erforderlichen Objekte höherer Ordnung. Zudem müssen die Beziehungen der Objekte untereinander festgelegt werden. Konkret bedeutet dies die Konfiguration des Bestücksystems. Bild 37 zeigt die einzelnen Teilaufgaben dieser Phase auf die nachfolgend näher eingegangen wird. Bevor die einzelnen Schritte der Strukturfestlegung beschrieben werden, wird

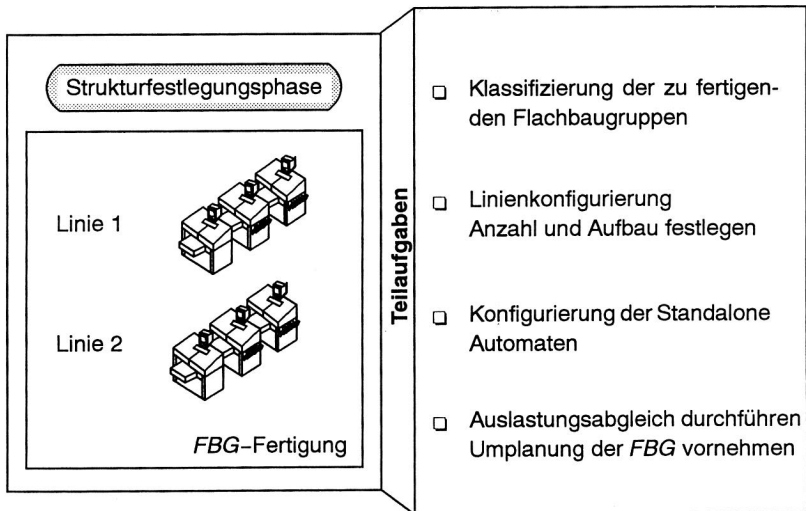


Bild 37: Aufgaben der Strukturfestlegung

in Bild 38 der Ablauf der Konfiguration in seiner Gesamtheit dargestellt. Zum besseren Verständnis sei darauf hingewiesen, daß die Anforderungen an die Strukturfestlegung sich aus den zu fertigenden Flachbaugruppen des Kunden ableiten lassen.

Phase 1: Klassifizierung der Flachbaugruppentypen

Diesem Schritt liegt eine isolierte Betrachtung der Flachbaugruppentypen zugrunde, das heißt die Konfiguration erfolgt ohne Berücksichtigung der Anforderungen der Gesamtheit der verschiedenen Flachbaugruppentypen. Die erste zu treffende Entscheidung befaßt sich mit der Frage, ob ein bestimmter Flachbaugruppentyp auf einer Standalone Maschine bestückt werden kann oder nicht. Hierzu ist die Rüstbar-

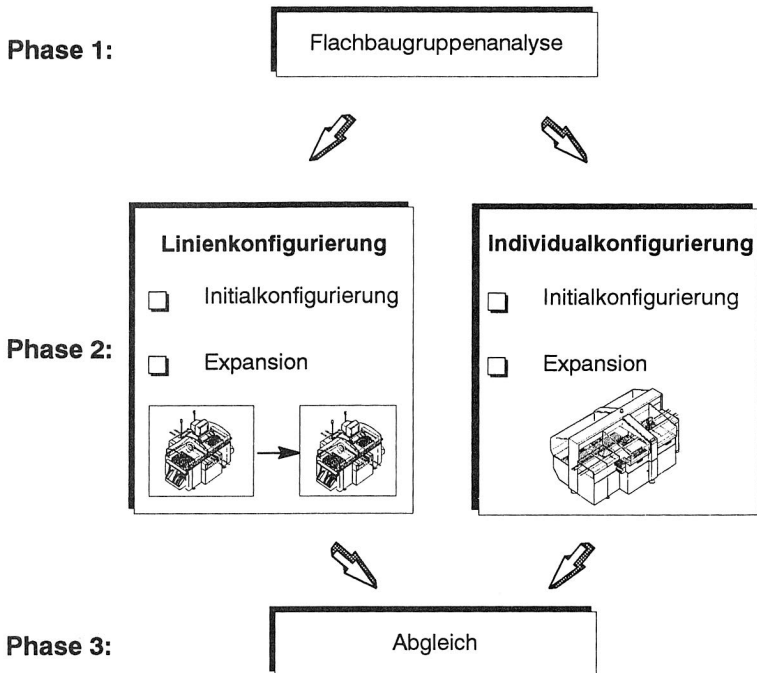


Bild 38: Ablauf der Strukturfestlegung

keit der erforderlichen Bauelementetypen abzuprüfen. Verfügt ein Flachbaugruppentyp über eine hohe Bauelementetypenvielfalt, so wird die Anzahl der Rüstplätze einer Standalone Maschine nicht ausreichen, das heißt dieser Flachbaugruppentyp muß auf einer Bestücklinie gefertigt werden. Desweiteren muß überprüft werden, ob alle Bauelementetypen aus technologischer Sicht bestückbar sind. Hier spielen vor allem die von den Rastermaßen der Bauelemente herrührenden Genauigkeitsanforderungen eine entscheidende Rolle.

Ein weiteres in diesem Zusammenhang abzuprüfendes Kriterium ist die Abschätzung der erforderlichen Bestückleistung. Ein Standalone Automat verfügt über eine geringere Bestückleistung als eine Linie, somit sind einzelne Flachbaugruppentypen aufgrund ihrer Mengenanforderungen nur für die Linienfertigung geeignet.

Als erstes Zwischenergebnis ergibt sich aus dieser isolierten Betrachtung der einzelnen Flachbaugruppentypen eine Klassifizierung in zwei Gruppen. Eine Menge, die für die Bestückung auf einem Standalone Automaten geeignet ist und eine komple-

mentäre Gruppe, die diese Eigenschaft nicht hat. Diese Nichteignung impliziert die Bestückung auf einer Linie.

Der zweite Klassifizierungsschritt ist die Gruppierung der Flachbaugruppen nach dem erforderlichen Lötverfahren. Diese Information ist für die Konfigurierung der Linien relevant, da dort der Lötöfen im Sinne des Materialflusses starr verkettet ist. Diese Klassifizierung wird für sämtliche Flachbaugruppentypen durchgeführt, da bei der nachfolgenden ganzheitlichen Betrachtung der Fertigungsaufgabe ein Flachbaugruppentyp von einem Standalone Automaten auf eine Bestücklinie umgeplant werden kann. Diese Klassifizierungsoption muß ausschaltbar sein, da sie bei der Abweichung vom klassischen Linienkonzept unter Umständen nicht mehr zu beachten ist. So kann sich der Materialfluß nach den Bestückautomaten in einer Linie aufteilen und somit nach unterschiedlichen Prinzipien arbeitende Lötöfen angesteuert werden.

Phase 2: *Linienkonfigurierung*

Ausgehend von der aus der Flachbaugruppenanalyse resultierenden Klassifizierung, wird nun in diesem Schritt die Konfigurierung der Bestücklinien vorgenommen. Hierbei handelt es sich um ein Problem mit zwei sich beeinflussenden Teilaufgaben. Die zwei miteinander verknüpften und sich gegenseitig beeinflussenden Teilaufgaben sind die Zuordnung der Flachbaugruppen zu den Linien, sowie die Konfigurierung der Linien (s. Bild 39). Die Komplexität dieser Aufgabe liegt darin, daß Zuordnungsentscheidungen die Konfigurierung der Linien und die Konfigurierung die Zuordnung der Flachbaugruppen beeinflusst.

Die Linienkonfigurierung untergliedert sich aus Gründen der Komplexitätsminimierung auf die folgenden, unten näher beschriebenen, Teilaufgaben (vgl. auch Bild 40):

- Initialkonfigurierung
- Expansion der Initialkonfigurierung

Initialkonfigurierung

Generelles Prinzip des hier vorgestellten Konfigurierungsverfahrens ist die sukzessive Eingrenzung des Lösungsraums. Dieses Vorgehen ist aufgrund der kombinatorischen Explosion der Lösungsvarianten unbedingt erforderlich. Aussagen zur Komplexität von Konstruktionsaufgaben sind in Abschnitt 4.3.1 im Rahmen der formalen Beschreibung einer Konstruktionsaufgabe zu finden.

Im ersten Schritt wird jeder Flachbaugruppentyp des Kunden individuell betrachtet. Anhand der Kriterien, Bestückbarkeit, Rüstbarkeit und Leistungsadäquanz werden alle möglichen Linienkonfigurationen bezüglich der Eignung für einen bestimmten Flachbaugruppentyp bewertet. Die Menge aller Linienkonfigurationen ist, wenn man nur die Automatentypen und deren Reihenfolge in der Linie betrachtet, gering, so daß eine Überprüfung sämtlicher Alternativen realisierbar ist. Bei dieser Aufgabe

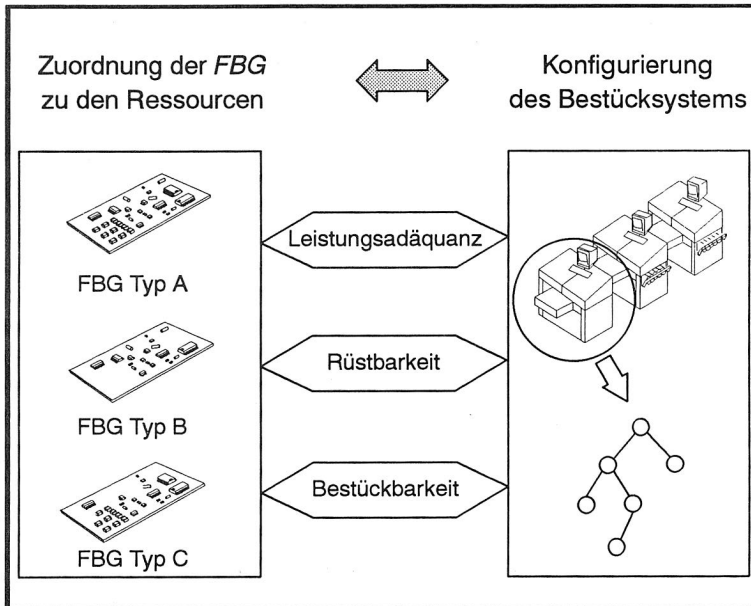


Bild 39: Interdependenzen bei der Konfiguration des Bestücksystems

spielt der Aufbau der einzelnen Stationen keine Rolle. Die abzuprüfenden Kriterien haben folgende Bedeutung:

- **Bestückbarkeit**
Hierbei wird aus technologischer Sicht untersucht, ob die Automaten einer Linie zur Bestückung sämtlicher Bauelemententypen eines Flachbaugruppentyps geeignet sind.
- **Rüstbarkeit**
Die Menge unterschiedlicher Bauelemententypen legt die minimale Anzahl erforderlicher Förderer fest. Die Linie muß für diese Förderer über ausreichend Stellplatzkapazität verfügen.
- **Leistungsadäquanz**
Die Bestückleistung einer Linie muß für den Jahresbedarf eines Flachbaugruppentyps ausreichend sein. Diese Überprüfung beruht auf der impliziten Annahme, daß ein Flachbaugruppentyp immer auf einer Bestücklinie gefertigt werden soll.

Ergebnis dieser Bewertung ist die unten abgebildete Matrix:

	<i>LKON 1</i>	<i>LKON 2</i>	<i>LKON 3</i>	<i>LKON 4</i>	<i>LKON 5</i>	Summe
<i>FBG 1</i>	0	1	1	1	0		3
<i>FBG 2</i>	1	1	1	0	0		3
<i>FBG 3</i>	0	0	0	0	1		1
<i>FBG 4</i>	1	1	1	0	0		3
<i>FBG 5</i>	1	0	1	0	0		2
.....							

wobei:

LKON: Bezeichnung für eine bestimmte Linienkonfiguration

FBG: Bezeichnung für einen bestimmten Flachbaugruppentyp

0: z. B. Linientyp *LKON 1* **nicht** für Flachbaugruppentyp *FBG 1* geeignet

1: z. B. Linientyp *LKON 1* für Flachbaugruppentyp *FBG 1* geeignet

Die obige Matrix ermöglicht nun die Festlegung der Minimalkonfiguration. Sie wird im nächsten Schritt dann, falls erforderlich, entsprechend der Leistungsanforderungen, expandiert. Eine Minimalkonfiguration kann aus einer oder mehreren Linien bestehen. Sie ist durch folgende Eigenschaften gekennzeichnet:

- Sämtliche Bauelementetypen des Flachbaugruppenspektrums müssen bestückbar sein.
- Die Bestückleistung und die Rüstbarkeit ist bei isolierter Betrachtung der Flachbaugruppentypen ausreichend bzw. gewährleistet.
- Der approximierte Zielfunktionswert ist minimal.

Basierend auf der obigen Matrix wird nun eine Rangfolge der zu betrachtenden Flachbaugruppentypen erstellt. Als Reihenfolgekriterium dient die Zeilensumme, die die Anzahl der möglichen Linienkonfigurationen für diesen Flachbaugruppentyp wiedergibt. Die Sortierung erfolgt betragsmäßig aufsteigend. Mittels dieser Information kann nun der in Bild 41 dargestellte Expansionsgraph, der der weiteren Linienkonfigurierung zugrundeliegt, aufgebaut werden.

Die Anzahl der Ebenen des Expansionsgraphen ist identisch mit der Anzahl der, im Rahmen der Konstruktionsaufgabe, zu betrachtenden Flachbaugruppentypen. Beginnend mit dem Flachbaugruppentyp, der die minimale Anzahl von Freiheitsgraden bezüglich der möglichen Linienkonfigurationen besitzt, werden die Knoten des Gra-

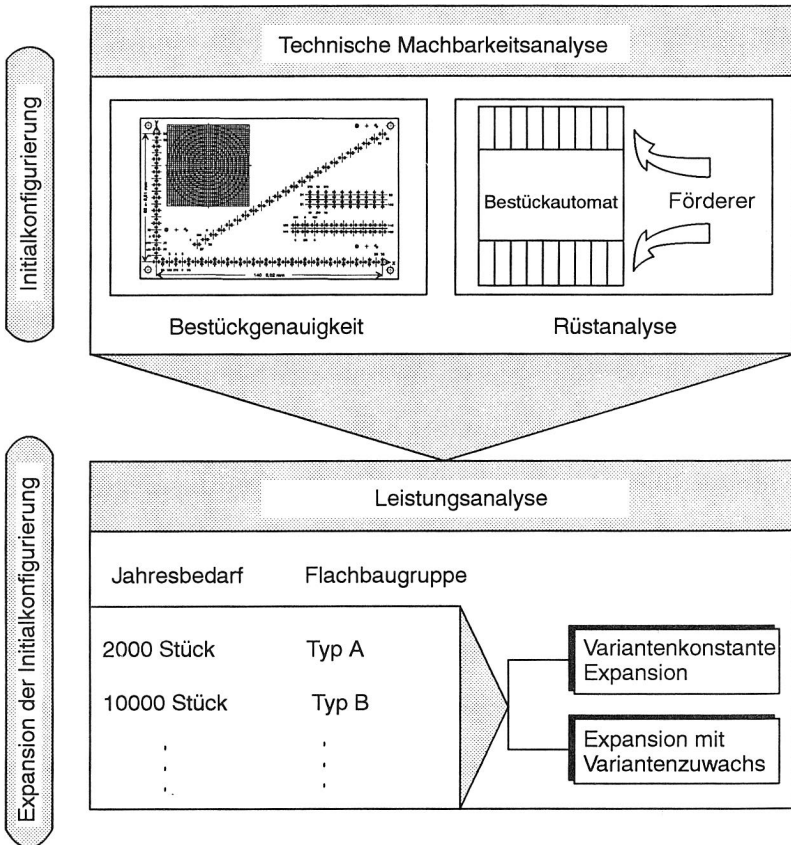


Bild 40: Phasen und Aufgaben der Linienkonfigurierung

phen für jede Hierarchiestufe generiert. Jeder Flachbaugruppentyp erfordert eine zusätzliche Ebene im Graphen. Die Anzahl der Knoten in einer Ebene entspricht der Anzahl der möglichen Linienkonfigurationen, die diesen Flachbaugruppentyp bestücken können. Existiert in einer höheren Hierarchiestufe schon dieser Knoten, so wird an Stelle des, diese Linienkonfiguration abbildenden, Knotens, ein leerer Knoten erzeugt.

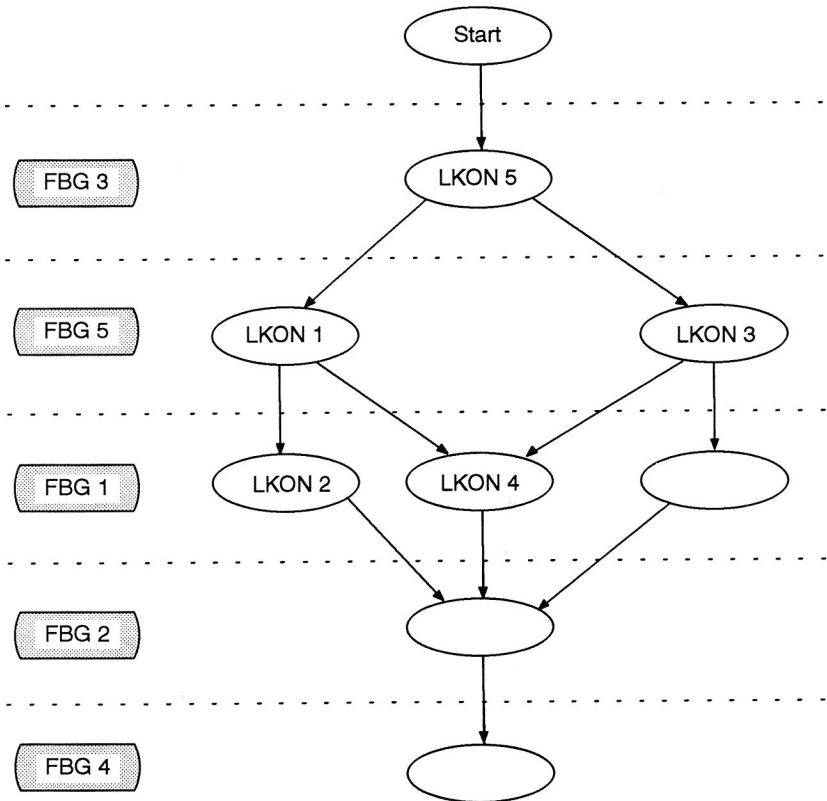


Bild 41: Beispiel eines Expansionsgraphen

Expansion der Initialkonfigurierung

Aus diesem gerichteten Graphen können nun alle möglichen Linienkonfigurationen, die sich zur Bestückung des gegebenen Flachbaugruppenspektrums eignen, entnommen werden. Jeder Pfad vom Start-Knoten zu einem beliebigen Knoten der untersten Ebene repräsentiert die Menge von Linienkonfigurationen, die zur Fertigung der Flachbaugruppentypen notwendig sind. Beinhaltet der Graph leere Knoten, so benötigt der Flachbaugruppentyp der Ebene, in dem sich dieser leere Knoten befindet, keine weitere Linienkonfiguration.

Aufbauend auf dem Graphen ergibt sich für die weitere Konfigurierung folgendes Vorgehen. Die zuvor ermittelten Minimalkonfigurationen können parallel zueinander weiterentwickelt werden. Zielsetzung hierbei ist es, den Bestückleistungsanfor-

rungen der Gesamtheit aller Flachbaugruppentypen nachzukommen. Im ersten Schritt, der zu der oben dargestellten Matrix führt, ist nur eine isolierte, das heißt eine auf einen Flachbaugruppentyp bezogene Leistungsbetrachtung erfolgt. Nun muß im Rahmen der Linienkonfigurierung der Aspekt der für alle Flachbaugruppentypen zusammen erforderlichen Bestückleistung beachtet werden.

Zur Erfüllung der Bestückleistungsanforderungen muß eine Minimalkonfiguration in der Regel expandiert werden. Die Auswahl der zu bearbeitenden Minimalkonfiguration wird vom Benutzer vorgenommen. Er erhält eine Unterstützung dahingehend, daß die Konfigurationen gemäß der Zielfunktion bewertet sind. Eine Minimalkonfiguration, die sich durch eine minimale Anzahl unterschiedlicher Linienkonfigurationen auszeichnet, wird expandiert bis die Bestückleistungsanforderung erfüllt ist. Zur Überprüfung der Bestückleistungsadäquanz ist die Zuordnung der Flachbaugruppentypen zu den unterschiedlichen Linien der Konfiguration erforderlich.

Flachbaugruppenzuordnung

Im Rahmen der durchzuführenden Flachbaugruppenzuordnung müssen verschiedene Lösungsalternativen generiert werden. Diese sind durch die für die einzelnen Flachbaugruppentypen möglicherweise existierenden Zuordnungsrestriktionen eingeschränkt. Eine Betrachtung aller möglichen Lösungen erlaubt die kombinatorische Explosion nicht. Im *Worst Case* ergibt sich gemäß unten dargestellter Berechnungsvorschrift schon bei 20 Flachbaugruppentypen und 3 Linien ungefähr eine Menge ($|M|$) von 10^9 Lösungen.

$$|M| = k^N$$

wobei:

n : Anzahl der Flachbaugruppentypen

k : Anzahl der Bestücklinien

Im Sinne des Operations Research handelt es sich hierbei um eine Spielart des klassischen Rucksackproblems /108/. Ziel bei einem Rucksackproblem ist es, eine vorhandene Ressource, z. B. die Bestückleistung einer Linie möglichst bis an die Grenzen auszunutzen. Im Anwendungsfall müssen mehrere Ressourcen gleichzeitig betrachtet werden. Dies führt zu einer Komplexitätssteigerung der Zuordnungsaufgabe. Die die Ressourcen in Anspruch nehmenden Flachbaugruppen benötigen zudem, je nach Ressourcenzuordnung, unterschiedlich viele Kapazitätseinheiten. Weiterhin ist die reale Ressourcenkapazität abhängig von der Zuordnung der Flachbaugruppen, da die Zuordnung die anfallenden Umrüstzeiten bestimmt. Zur Reduzierung der Aufgabenkomplexität werden folgende idealisierende Annahmen getroffen:

- Aufsplitten eines Flachbaugruppentyps auf unterschiedliche Ressourcen ist nicht möglich.
- Bestückleistung der Ressource ist unabhängig vom Flachbaugruppentyp und der Rüstung.

Ist ein Flachbaugruppentyp aufgrund seines Jahresbedarfs nicht auf einer der möglichen Ressourcen, das heißt Linienkonfigurationen bestückbar, so wird dies im Rahmen der Leistungsanalyse offenbar (s. Bild 40). Der Benutzer kann in diesem Fall oder aus anderweitigen, individuellen Überlegungen heraus, den Jahresbedarf eines Flachbaugruppentyps splitten und somit die Verteilung eines Flachbaugruppentyps auf unterschiedliche Linien ermöglichen.

Im Rahmen der Strukturfestlegung wird von einer theoretischen Bestückleistung der Bestückautomaten ausgegangen. Diese Leistungswerte werden aufgrund von Störungen und den individuell notwendigen Rüstungen für die einzelnen Flachbaugruppentypen in der Praxis nicht realisiert. Zur Ermittlung der exakten Bestückleistung müssen die Rüststrategien sowie die damit verbundene Auftragsreihenfolge, also die gesamte operative Planung bekannt sein /34//36/. Dies ist bei der vom System zu unterstützenden Aufgabe nicht sinnvoll, da eine so frühzeitige operative Planung mit zu vielen Unsicherheiten behaftet ist. Daher wird bei der Strukturfestlegung, die eine Lösungsraumeinschränkung nach sich zieht, mit Modellen größerer Granularität, denen vereinfachende Annahmen (s. o.) zugrundeliegen, gearbeitet.

Eine Zuordnung im Sinne einer maximalen Auslastung bis auf eine einzelne Kapazitätseinheit genau, ist aufgrund der existierenden Planungsunsicherheiten nicht erforderlich. Der hohe Rechenaufwand einer solchen Lösung steht in keinem Verhältnis zum Gütezuwachs des Planungsergebnisses. Es wird daher eine einfache, im folgenden beschriebene Zuordnungsheuristik angewendet.

Basierend auf einer intelligenten Methode werden verschiedene Zuordnungskonstellationen generiert und bewertet. Ist nach einer gewissen Anzahl (N) von Versuchen keine Zuordnung, die die Bestückung sämtlicher Flachbaugruppentypen ermöglicht, gefunden, muß die betrachtete Lösung weiter expandiert werden. N ist vom Benutzer frei konfigurierbar. Die Generierung einer Zuordnung erfolgt mittels der folgenden Schritte.

1. Zuordnung der Flachbaugruppentypen, die ausschließlich auf einer Linie bestückbar sind.
2. Sortierung der noch vorhandenen Flachbaugruppentypen absteigend nach der Bestückleistungsanforderung.
3. Sequentielle Zuordnung der Flachbaugruppentypen zu den Ressourcen mit der höchsten verbleibenden Kapazität.

Ist die Zuordnung aller Flachbaugruppentypen nicht möglich, so werden noch weitere Vertauschungsschritte durchgeführt. Sind auch diese im Sinne der Zuordnung aller Flachbaugruppentypen nicht erfolgreich, so muß die betrachtete Lösung weiter expandiert werden. Zur Durchführung der Vertauschung sind die folgenden ergänzenden Schritte notwendig:

4. Auswahl eines beliebigen Flachbaugruppentyps und Ermittlung der möglichen Tauschpartner.
5. Durchführung der Vertauschungsschritte und Überprüfung, ob bisher nicht berücksichtigungsfähige Flachbaugruppentypen nun bestückbar sind.

Ist Schritt 5 erfolgreich, oder die Maximalanzahl der durchzuführenden Vertauschungsschritte erreicht, so terminiert das Verfahren. Ansonsten wird wieder zu Schritt 4 gesprungen.

Ist die Expansion einer Minimalkonfiguration erforderlich, so geschieht dies auf zweierlei Art:

1. Variantenkonstante Erweiterung
2. Erweiterung mit Variantenzuwachs

Für beide Methoden gilt, daß die Linienanzahl immer um eine Einheit erhöht wird. Erst nach anschließender Überprüfung des Kriteriums der Bestückleistung erfolgt dann eine weitere Erhöhung der Linienanzahl. Diese Vorgehensweise basiert auf der Annahme, daß eine Lösung mit n Linien immer einer Lösung mit $n+1$ Linien vorzuziehen ist. Diese Präferenz basiert auf der Erfüllung des Optimalitätskriteriums.

Variantenkonstante Erweiterung

In der Phase der Erweiterung wird die mittels der Initialkonfigurierung gefundene Minimalkonfiguration sequentiell erweitert. Die Expansion bezieht sich auf die Anzahl der geplanten Linien, wobei in jedem Expansionsschritt die Linienanzahl um eine Einheit erhöht wird. Variantenkonstant bedeutet, daß die hinzukommende Linie vom Aufbau her identisch mit der bereits vorhandenen Linie bzw. den bereits vorhandenen Linien ist. Dies führt zu einer größeren Flexibilität bei der im Betrieb durchzuführenden Einplanung der Flachbaugruppen auf die verfügbaren Ressourcen. Bei diesem Verfahren werden mehrere Lösungen parallel weiter entwickelt, bis in einem Expansionsschritt die Leistungsanforderungen erfüllt werden. In diesem Schritt können nun mehrere Alternativen die Anforderungen erfüllen und müssen somit als potentielle Lösungen der Konstruktionsaufgabe weiterhin ins Kalkül gezogen werden. Bild 42 zeigt die prinzipielle Vorgehensweise bei der variantenkonstanten Expansion.

In einem Expansionsschritt muß abwechselnd jede vorhandene Linienkonfiguration *LKON* um eine zusätzliche Linie gleichen Aufbaus ergänzt werden. Umfaßt die Mini-

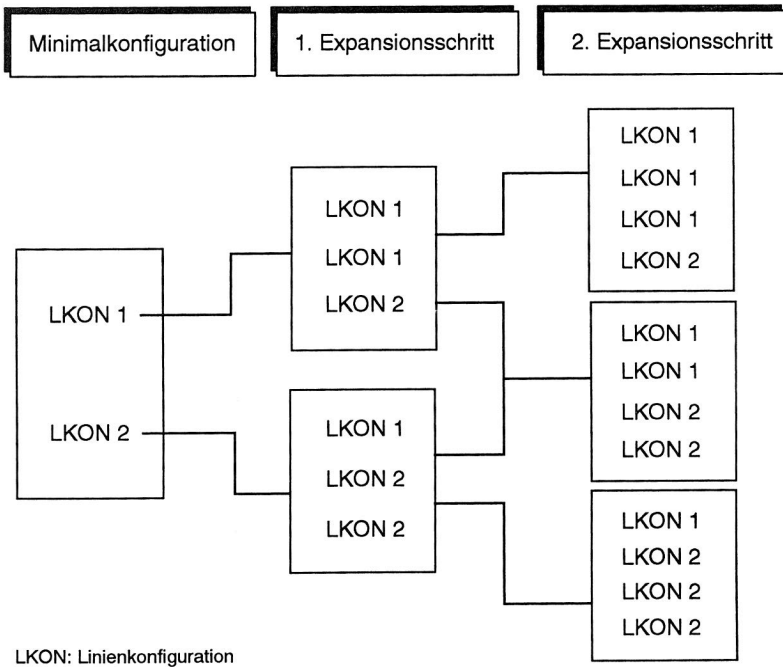


Bild 42: Variantenkonstante Erweiterung

malkonfiguration nur eine Linienkonfiguration, so ist die Expansion trivial. Bild 42 zeigt den komplexeren Fall, in dem die Minimalkonfiguration aus zwei Linien besteht.

Erweiterung mit Variantenzuwachs

Die zweite in Betracht zu ziehende Alternative bei der Expansion der Minimalkonfigurationen ist die Erweiterung mit Variantenzuwachs. Hierzu dient der in Bild 41 dargestellte Expansionsgraph als Grundlage. Die Erweiterung geht in diesem Fall auf Kosten einer neuen Linienkonfiguration. Es kommen nun alle diejenigen Lösungen in Frage, die einen Leerknoten weniger im Pfad haben. Müssen diese Lösungen aufgrund der Leistungsanforderungen weiter entwickelt werden, dienen sie als Grundlage der weiteren Expansionsschritte, die wiederum mit oder ohne Variantenzuwachs parallel ausgeführt werden können.

Das Abbruchkriterium des Expansionsverfahrens ist, unabhängig von der Expansionsmethode, die Erfüllung der Bestückleistungsanforderung. Zur Bestimmung der Anforderung ist eine testweise Zuordnung der Flachbaugruppentypen zu den Be-

stücklinien notwendig. Diese Zuordnung ist nicht eindeutig, da diverse Flachbaugruppentypen möglicherweise auf verschiedenen Linien bestückbar sind. Sie beeinflusst aber die Entscheidung, ob ein betrachtetes System über ausreichend Bestückleistung verfügt oder nicht. Deshalb werden mittels des oben beschriebenen Verfahrens verschiedene Flachbaugruppenzuordnungen zu den Ressourcen generiert.

Die Leistungsbetrachtung erfolgt auf Basis theoretischer Kennwerte der verschiedenen Automatentypen. Diese Kennwerte geben die maximale Bestückleistung wider. In der Realität ist die Bestückleistung aber primär von der speziellen Flachbaugruppe und der konkreten Rüstung der Bestückautomaten abhängig. Für eine erste Grobabschätzung im Rahmen der Strukturfestlegung sind diese Werte jedoch ausreichend. Der dadurch reduzierte Rechenaufwand ermöglicht die parallele Betrachtung mehrerer Lösungsalternativen. Die Verifikation der Ergebnisse wird in der der Strukturfestlegung folgenden Detailkonfigurierung vorgenommen.

Das Ergebnis der beiden Stufen, Initialkonfigurierung und Expansion der Initialkonfigurierung, sind nun einzelne Vorschläge bezüglich der zu konfigurierenden Linien. Der Detaillierungsgrad der Planung ist noch gering und umfaßt nur den Linienaufbau auf Automatenenebene. Das heißt, es werden nur die Anzahl und Typen der Automaten einer Linie festgelegt. Eine erste, später zu verfeinernde Festlegung der Ressourcen liegt somit vor. Der zweite Bereich der Strukturfestlegung, die Konfigurierung der Standalone Automaten, wird nun nachfolgend beschrieben.

Phase 2: *Individualkonfigurierung*

Bei der Durchführung der Flachbaugruppenanalyse haben sich zwei Gruppen von Flachbaugruppentypen ergeben. Eine Gruppe von Flachbaugruppentypen, die auf einem Standalone Automaten fertigbar ist und eine komplementäre Gruppe, die diese Eigenschaft nicht besitzt. Im Rahmen der Individualkonfigurierung werden nun für die Gruppe der auf Standalone Maschinen bestückbaren Flachbaugruppentypen die erforderlichen Ressourcen ermittelt. Dies geschieht unabhängig von der Linienkonfigurierung. Eine ganzheitliche Betrachtung, die die Konfigurierung der Linien mit der Konfigurierung der Standalone Automaten verquickt, wird im letzten Schritt der Strukturfestlegung, dem sogenannten Abgleich, durchgeführt. Nachfolgend wird auf die einzelnen Schritte der Individualkonfigurierung näher eingegangen.

Die Vorgehensweise der Individualkonfigurierung ist analog der der Linienkonfigurierung und untergliedert sich folglich in die beiden Schritte:

- Initialkonfigurierung
- Expansion der Initialkonfigurierung

Initialkonfigurierung

Ausgehend von der Flachbaugruppenanalyse, die festlegt welche Flachbaugruppentypen auf welchen Automatentypen bestückbar sind, werden die möglichen Minimalkonfigurationen bestimmt. Eine Minimalkonfiguration umfaßt die unterschiedlichen Stationstypen, die zur Bestückung sämtlicher Flachbaugruppentypen benötigt werden. Minimal bedeutet in diesem Zusammenhang, daß die Anzahl der erforderlichen Maschinentypen möglichst gering ist. Dieser Ansatz basiert auf der begründeten Annahme, daß die Anzahl der benötigten Maschinen maßgeblich den Wert der Zielfunktion, d. h. die Kosten des Bestücksystems beeinflusst.

Überprüfungskriterien bei der Bestimmung der Minimalkonfigurationen sind die erforderliche Bestückgenauigkeit, die Rüstbarkeit der Bauelemente und die Bestückleistung. Anzumerken ist, daß nur eine flachbaugruppenindividuelle, also keine ganzheitliche Betrachtung der Bestückleistung vorgenommen wird. Im nächsten Schritt werden nun diese Minimalkonfigurationen entsprechend der aus dem gesamten Flachbaugruppenspektrum erwachsenen Bestückleistungsanforderung erweitert.

Expansion der Initialkonfigurierung

Analog dem Vorgehen bei der Linienkonfigurierung werden die Minimalkonfigurationen nun Schritt für Schritt, das heißt Maschine für Maschine erweitert. Hierbei können mehrere Lösungen entwickelt werden. Ziel der Erweiterungsschritte ist es die Bestückleistungsanforderungen zu erfüllen. Zur Untersuchung dieses Sachverhalts muß eine Zuordnung der Flachbaugruppentypen zu den geplanten Ressourcen erfolgen. Ergebnis dieser Planungsphase ist eine Menge von gleichberechtigten Lösungen, die dem weiteren Konstruktionsprozeß zugrundeliegen.

Um eine sinnvolle Aussage über die erforderlichen Ressourcen zu erhalten, muß nun in der letzten Stufe der Strukturfestlegung ein Abgleich der Ergebnisse der Individual- und der Linienkonfigurierung durchgeführt werden. Nachfolgend werden die verschiedenen Aspekte des Abgleichs der Linien- und der Individualkonfigurierung näher betrachtet.

Phase 3: *Abgleich Individual- und Linienkonfigurierung*

Die vorangegangenen Schritte der Strukturfestlegung haben Lösungen für zwei voneinander isoliert betrachtete Teilprobleme erbracht. So sind im Rahmen der Linienkonfigurierung Lösungsalternativen bezüglich der benötigten Bestücklinien, sowie im Rahmen der Individualkonfigurierung Vorschläge bezüglich der Standalone Automaten erarbeitet worden. Diese, aus der isolierten Betrachtung der in der Klassifikationsphase ermittelten Gruppen von Flachbaugruppen gewonnenen Ergebnisse,

müssen nun im letzten Schritt der Strukturfestlegung, dem sogenannten Abgleich, auf eventuell vorhandene Optimierungspotentiale hin untersucht werden. Dabei muß jede einzelne Lösung der beiden Problembereiche miteinander kombiniert werden und alle möglichen Konstellationen untersucht werden.

Ziel des Abgleichs ist es, durch Umverteilung der Flachbaugruppentypen die Einsparung von Standalone Automaten zu erreichen. Umverteilung bedeutet in diesem Zusammenhang die Auflösung der zuvor gebildeten disjunkten Gruppen von Flachbaugruppen. Im Rahmen der vorhandenen Kapazitätsgrenzen und der technischen Eigenschaften der Linien wird versucht die Flachbaugruppen von den Standalone Automaten auf die Linien umzuverteilen. Die dazu notwendige Leistungsanalyse der Bestückssysteme erfolgt wiederum auf Basis experimenteller Zuordnungen und hat daher approximativen Charakter (s. Bild 43). Nachfolgend werden die einzelnen Schritte der der Umplanung zugrundeliegenden Heuristik kurz skizziert.

Ziel der Heuristik ist es mittels vorbereitender Maßnahmen den Lösungsraum sukzessive einzuschränken und somit dank der daraus resultierenden verminderten Problemkomplexität eine umfassende Suche im Lösungsraum zu realisieren.

1. Flachbaugruppentypen, die nicht auf einer der konfigurierten Linien bestückbar sind, scheiden aus der Dispositionsmenge aus. Benötigen diese Flachbaugruppentypen sämtliche Standalone Maschinen, terminiert das Verfahren nach diesem Schritt.
2. Für jede Standalone Station werden die Flachbaugruppen ermittelt, die ausschließlich auf dieser Maschine bestückbar sind. Können diese Flachbaugruppen nicht auf die Linien zugeordnet werden, muß diese Station nicht weiter betrachtet werden. Betrifft dies alle Stationen, terminiert das Verfahren.

Mittels der ersten beiden Schritte hat sich, wenn man vom *worst case* einmal absieht, die Anzahl der zu betrachtenden Flachbaugruppen, als auch der zu untersuchenden Stationen reduziert. Die verbleibenden Flachbaugruppen stellen nun die zu bearbeitende Dispositionsmenge dar.

3. Jeder Flachbaugruppentyp wird mit einem Prioritätswert versehen. In diesem Wert spiegelt sich die Eignung der Flachbaugruppe wider, bei einer Umverteilung einen Verzicht auf eine Standalone Maschine zu ermöglichen. Der Wert berechnet sich folgendermaßen:

$$PKZ_{FBG} = (ASA - ASAB_{FBG}) + ALB_{FBG}$$

wobei:

PKZ_{FBG} : Prioritätskennzahl der Flachbaugruppe FBG

ASA : Anzahl der standalone Automaten

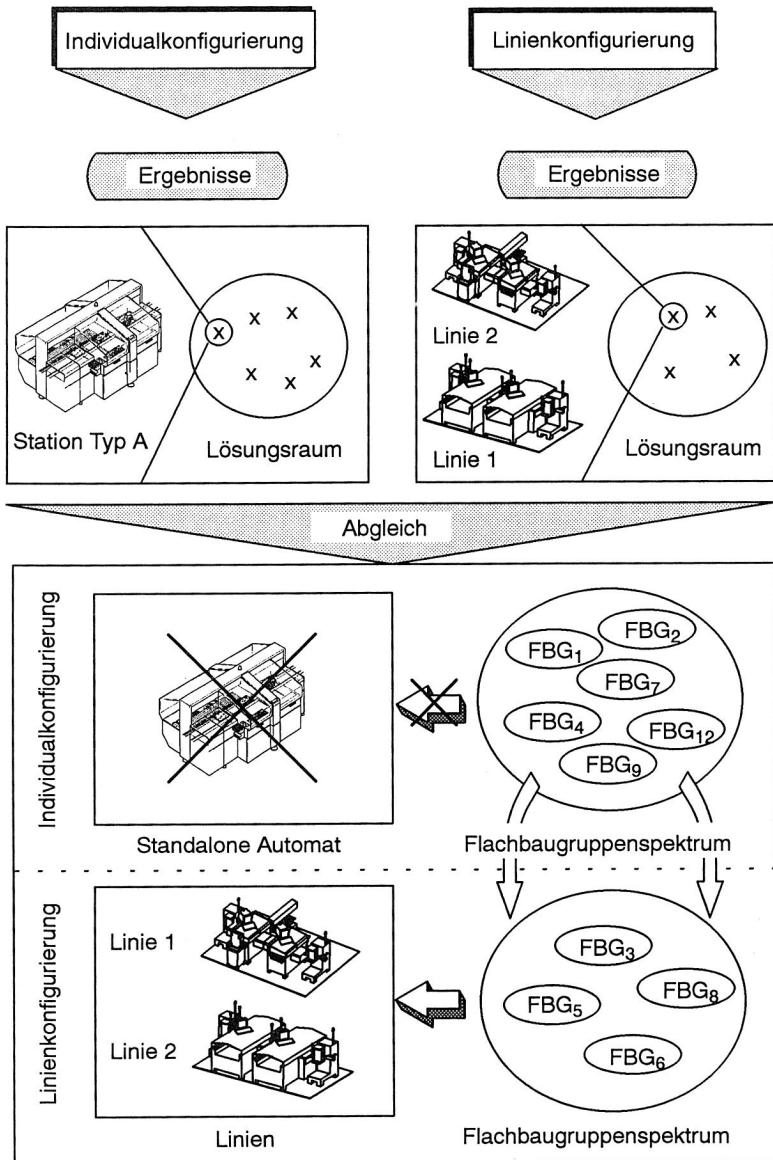


Bild 43: Zielsetzung des Abgleichs

$ASAB_{FBG}$: Anzahl der standalone Automaten, die für Flachbaugruppentyp FBG geeignet sind.

ALB_{FBG} : Anzahl der Linien auf denen der Flachbaugruppentyp FBG bestückbar ist.

4. Die disponibaren Flachbaugruppentypen werden gemäß der Prioritätskennwerte geordnet. Hierbei gilt, umso höher der Kennwert, desto wahrscheinlicher eine erfolgreiche Umplanung dieses Flachbaugruppentyps ist.
5. Die Flachbaugruppen werden den Linien zugeordnet. Dies geschieht in mehreren Stufen. Eine Stufe entspricht der bei der Zuordnung betrachteten Menge von Flachbaugruppen. So werden in der ersten Stufe alle Flachbaugruppen einzeln betrachtet. In der zweiten Stufe werden jeweils zwei Flachbaugruppentypen zusammen umgeplant usw.. Jede Zuordnung wird hinsichtlich der Zielsetzung überprüft. Das Verfahren terminiert wenn:
 - Die Zuordnung erfolgreich ist.
 - Keine Dispositionsmenge mehr vorhanden ist. Die Dispositionsmenge der Flachbaugruppen reduziert sich von Stufe zu Stufe, da folgender Sachverhalt zu beachten ist: Schlägt eine Flachbaugruppenzuordnung in der Stufe n fehl, so wird in der Stufe $n+1$ diese Konstellation nicht mehr betrachtet.
 - Eine frei konfigurierbare Anzahl von Zuordnungsexperimenten pro Dispositionsstufe erreicht ist.
6. Ist die Reduktion um eine Maschine gelungen, werden die Schritte 1 bis 6 nochmals durchlaufen. Als Planungsgrundlage dienen die verbleibenden, den Standalone Maschinen zugeordneten Flachbaugruppen. Ist keine Reduktion gelungen, terminiert das Verfahren.

Ein Problem bei dieser Heuristik stellt die Evaluierung einer Zuordnung dar. Zur Abschätzung der Eignung muß eine Bestückleistungsanalyse durchgeführt werden. Hierzu ist eine experimentelle, die Restriktionen beachtende Zuordnung der Flachbaugruppen zu den einzelnen Ressourcen notwendig. Aufgrund der Problemkomplexität kann nur ein Ausschnitt der Lösungsmöglichkeiten betrachtet und daher eventuell eine die Anforderungen erfüllende Lösung nicht gefunden werden. Diese Lösung stellt aber in der Regel eine Extremsituation dar und ist aufgrund der vielfältigen stochastischen Einflüsse sowie der sich eventuell ändernden Rahmenbedingungen in der Praxis mit großen Unsicherheiten behaftet.

Ergebnis des Abgleichs und somit der gesamten Strukturfestlegung ist nun eine initiale Festlegung der benötigten Bestücklinien sowie der Standalone Maschinen. Es werden hierbei die Typen der einzelnen Stationen und die benötigte Anzahl be-

stimmt. Eine Zuordnung der Flachbaugruppen zu den einzelnen Ressourcen ist noch nicht festgelegt. Diese Aufgabe ist Bestandteil der nachfolgend beschriebenen Phase der Detailkonfigurierung. Zu beachten ist, daß es sich nicht um eine einzige, sondern um eine Menge von Lösungen handelt. Um den Aufwand in der Phase der Detailkonfigurierung zu reduzieren, wird in einem abschließenden Schritt des Abgleichs die Rangfolge der Lösungen ermittelt. Diese Rangfolge basiert auf einer Grobabschätzung des Werts der Zielfunktion, der mit den einzelnen Lösungen erreicht wird. Der Benutzer kann nun individuell unter Zuhilfenahme dieser Ranginformationen im Rahmen der Detailkonfigurierung entscheiden, welche Lösungen er weiter betrachten bzw. verfeinern will.

Ermittlung der Rangfolge der Lösungen

Grundlage der Ermittlung der Rangfolge sind die approximativen Kosten einer Lösung. Hierzu werden die Kosten für die Minimalkonfigurationen der einzelnen Stationen ermittelt und aufsummiert. Dies geschieht auf Basis der Beschreibung der Aufbauvarianten der einzelnen Stationstypen. Dort sind unbedingt notwendige und somit zur Minimalkonfiguration gehörende Einzelkomponenten ersichtlich (s. Abschnitt 5.3.2). Kundenspezifische Anforderungen werden hierbei noch nicht berücksichtigt. Die somit generierte Rangfolge der Lösungen dient dem Benutzer als Entscheidungsgrundlage für sein weiteres Vorgehen. Er kann die zu verfeinernde Lösung selbst auswählen und hat zudem die Möglichkeit mehrere Lösungen parallel weiterzuentwickeln.

Detailkonfigurierung

Im Rahmen der Detailkonfigurierung wird analog zur Strukturfestlegung zwischen den beiden Teilaufgaben Konfigurierung der Bestücklinien und Konfigurierung der Standalone Automaten unterschieden. Ausgangspunkt sind die Ergebnisse der Strukturfestlegung, die eine Zuordnung der Flachbaugruppentypen zu diesen beiden Aufgabenfeldern beinhalten. Die bisherigen Ergebnisse sind nun unter Beachtung zweier Aufgabenschwerpunkte zu verfeinern:

- Verfeinerung der bereits ermittelten Konstruktion im Hinblick auf die Erfüllung der Kundenanforderungen bezüglich der Kriterien, Bestückgenauigkeit, Bestückleistung und Fördererstellplatzkapazität.
- Falls erforderlich, Modifikation der Ergebnisse aus der Strukturfestlegung mit der Zielsetzung z. B. durch den Einsatz alternativer Automatentypen die Anforderungen zu erfüllen.

Die aus den oben formulierten Zielsetzungen abzuleitenden Aufgaben werden nachfolgend aufgelistet. Eine Unterscheidung in die die Linienkonfigurierung und in die die Konfigurierung der Standalone Maschinen betreffenden Aufgaben ist erforderlich.

Detaillierung der Linienkonfiguration

Die Aufgaben der Detailkonfiguration für den Aspekt der Linienkonfiguration werden in Bild 44 dargestellt.

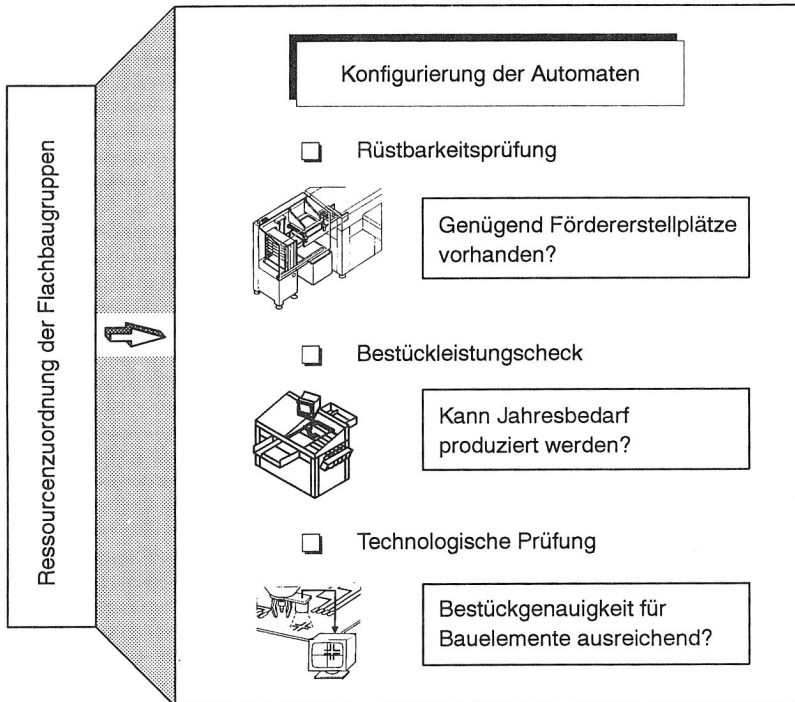


Bild 44: Detaillierung der Linien

Die erste Aufgabe beinhaltet die Zuordnung der Flachbaugruppen zu den Bestücklinien. In Bild 45 sind die zu erfüllenden Anforderungen der Flachbaugruppen dargestellt. Die explizite Zuordnung muß diesen Anforderungen entsprechen, das heißt die Bestücklinien müssen die den Anforderungen der Flachbaugruppen genügenden Eigenschaften besitzen. Ein weiterer wichtiger Punkt bei der Zuordnung ist die Beachtung des zu erwartenden Betriebsverhaltens der Bestücklinien. Konkret bedeutet dies die Antizipation der Rüstzeiten, die entscheidenden Einfluß auf den Nutzungsgrad /106/ einer Ressource haben. Zum Zeitpunkt der Konfiguration kann die operative Planung nicht vorweggenommen werden. Wird aber bei der testweisen Zuordnung der Flachbaugruppen auf die Bildung homogener Gruppen geachtet, ist im späteren Betrieb eine umrüstopoptimale Einplanung der Aufträge möglich /76/. Die Ei-

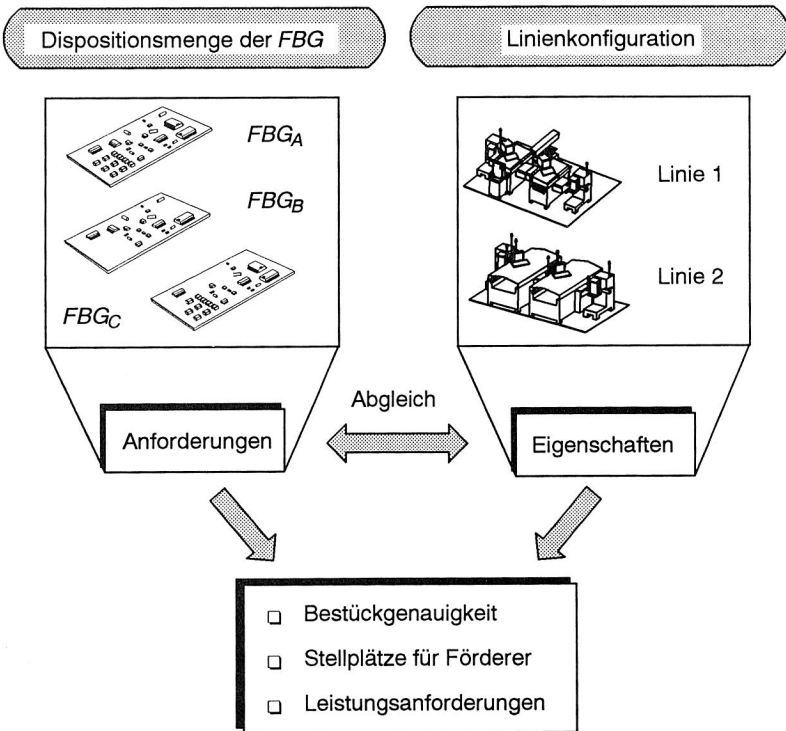


Bild 45: Flachbaugruppenzuordnung zu den Ressourcen

genschaft der Homogenität einer Zuordnung von Flachbaugruppen bezieht sich hierbei auf die Anforderungen, die die Flachbaugruppen an eine Ressource stellen.

Nachfolgend werden die einzelnen Schritte zur Durchführung der Flachbaugruppenzuordnung kurz skizziert. Zu beachten ist bei dieser Heuristik, daß die Zuordnung natürlich durch die Ergebnisse der Strukturfestlegung stark beeinflusst wird und somit nur in diesem Rahmen eine Lösung gefunden werden kann. Im ersten Schritt werden die Flachbaugruppen zugeordnet, die aufgrund ihrer Anforderungen nur auf einer Ressource bzw. Linie bestückbar sind. Die verbleibenden Flachbaugruppen bilden dann die Grundlage der weiteren Zuordnung.

Ausgehend von der bereits im Rahmen der Strukturfestlegung ermittelten Lösung wird die optimale Flachbaugruppenzuordnung bestimmt. Zur Optimierung muß eine Methode zur Bewertung einer Zuordnung entwickelt werden. Die Bewertung repräsentiert die Homogenität einer Gruppe von Flachbaugruppen und spiegelt daher die

zu erwartenden Umrüstzeiten wider. Zur Quantifizierung dieses Bewertungskriteriums wird ein Abstandsmaß als Grundlage des Vergleichs zweier Flachbaugruppentypen definiert.

$$D_{ij} = g_1 \times D_{ij}^{(1)} + g_2 \times D_{ij}^{(2)}$$

Der Abstand (D_{ij}) zwischen den Flachbaugruppentypen i und j ist eine Größe, die die Anforderungsunterschiede der beiden Flachbaugruppentypen an die Bestückressource quantifiziert. Beträgt der Wert des Abstands Null, sind die beiden Flachbaugruppentypen in Bezug auf die die Bestückung betreffenden Eigenschaften absolut identisch. Die Gewichtungsfaktoren (g_i) konstatieren den Einfluß der einzelnen Faktoren $D_{ij}^{(k)}$ auf die Anforderungsunterschiede. Nachfolgend werden die einzelnen Faktoren definiert.

$$D_{ij}^{(1)} = F(|BL_i - BL_j|)$$

mit:

BL_i : Breite der Flachbaugruppe i

$$F(x) = \begin{cases} 0 & \text{für } x = 0 \\ 1 & \text{für } x > 0 \end{cases}$$

Unterscheidet sich die Breite zweier nacheinander zu bestückender Flachbaugruppen, ist eine aufwendige Verstellung der Spurbreite der Bestücklinie notwendig. Dies bewirkt eine nicht unerhebliche Stillstandzeit des Produktionssystems. Der zweite Faktor der Distanzgröße, der die bauelementebedingten Unterschiede zweier Flachbaugruppentypen quantifiziert, ist folgendermaßen definiert:

$$D_{ij}^{(2)} = \left[1 - \left[\frac{A\ddot{U}B_{ij} \times 2}{AB_i + AB_j} \right] \right] \times F(AB_i - A\ddot{U}B_{ij}) \times F(AB_j - A\ddot{U}B_{ij})$$

mit:

$A\ddot{U}B_{ij}$: Anzahl der übereinstimmenden Bauelementetypen der Flachbaugruppentypen i und j

AB_i : Anzahl der verschiedenen Bauelementetypen des Flachbaugruppentyps i

Das Ergebnis des Bewertungsschritts ist eine symmetrische Distanzmatrix, die die Werte sämtlicher Flachbaugruppenkombinationen enthält.

	<i>FBG</i> ₁	<i>FBG</i> ₂	<i>FBG</i> ₃	·	·
<i>FBG</i> ₁	0	<i>D</i> ₁₂	<i>D</i> ₁₃	<i>D</i> _{<i>ij</i>}	<i>D</i> _{<i>ij</i>}
<i>FBG</i> ₂		0	<i>D</i> ₂₃	<i>D</i> _{<i>ij</i>}	<i>D</i> _{<i>ij</i>}
<i>FBG</i> ₃			0	<i>D</i> _{<i>ij</i>}	<i>D</i> _{<i>ij</i>}
·				0	<i>D</i> _{<i>ij</i>}
·					0

Der Kennwert, der die Homogenität einer Zuordnung widerspiegelt, berechnet sich für jede Linie, das heißt für jede Gruppe von Flachbaugruppen, folgendermaßen:

$$HKZ_l = \frac{\sum_{i=1}^N \sum_{j=i+1}^N D_{ij}}{\frac{1}{2}N(N-1)}$$

mit:

*HKZ*_{*l*} : Homogenitätskennzahl der Linie *l*

Die Summe über alle Linien ergibt den zu betrachtenden Kennwert einer Zuordnung. Auf dieser Basis kann die optimale Zuordnung der Flachbaugruppen zu den Ressourcen festgelegt werden. Die ermittelte Lösung kann zudem vom Benutzer modifiziert werden.

Im nächsten Schritt der Detailkonfigurierung werden nun die einzelnen Automaten der Linien gemäß der Anforderungen der Bauelemente- bzw. Flachbaugruppentypen konfiguriert. Beachtet wird hierbei die Bestück- und Rüstbarkeit der Bauelemente. Die Bestückleistung der Konfiguration wird erst in einem weiteren Schritt der Detailkonfigurierung in die Überlegungen mit einbezogen. In der Wissensbasis liegt assoziatives Wissen vor, das die Abhängigkeiten zwischen den Bauelementen und den Konstruktionsobjekten ermöglicht (s. Abschnitt 5.3.2). Die Anforderungen der Flachbaugruppen an die Konstruktion werden über deren Eigenschaften festgelegt. Es gibt also im Gegensatz zu den Bauelementetypen keine Abhängigkeiten, die sich ausschließlich auf einen bestimmten Flachbaugruppentyp beziehen.

Im Rahmen dieser Teilaufgabe der Detailkonfigurierung werden nun die relevanten Flachbaugruppen und deren Bauelementetypen hinsichtlich der Anforderungen an das zu konfigurierende Bestücksystem untersucht und basierend auf dem vorliegenden assoziativen Wissen die Detaillierung der Automatenkonfiguration vorgenommen. Zur Verdeutlichung dieser Vorgehensweise ist in Bild 46 ein Beispiel dargestellt. Muß zum Beispiel ein Bauelement vom *Typ PLCC 100* bestückt werden, benötigt der Automat zur Bestückung dieses Bauelements ein Visionsystem. Die Relation *PLCC 100 – Visionsystem* ist dann in der Wissensbasis abgelegt.

Voraussetzung für die Konfigurierung der Stationen einer Linie ist aber die Kenntnis, welches Bauelement auf welcher Station bestückt wird. Dies hat entscheidenden

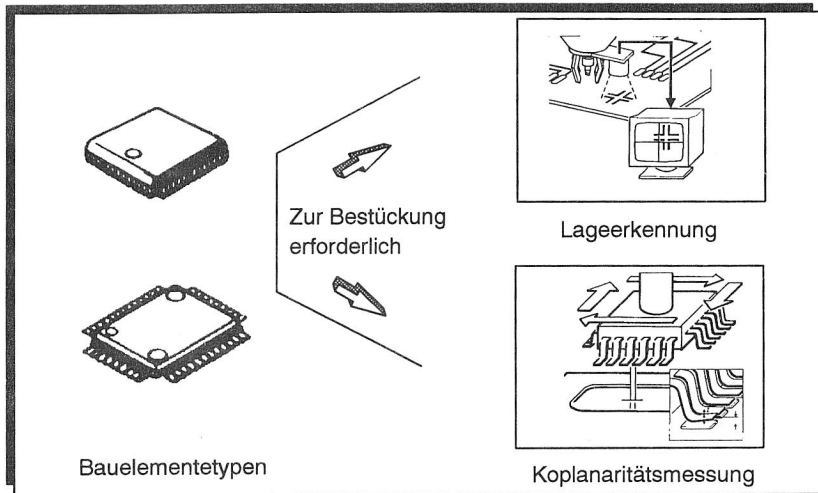


Bild 46: Assoziatives Wissen zur Konfigurierung

Einfluß auf das Bestückverhalten der gesamten Linie und auf die Entscheidung welcher Station die erforderlichen Einzelkomponenten, wie beispielsweise das Visionsystem zugeordnet werden. Diese Zuordnung ist, betrachtet man ausschließlich die technischen Restriktionen, nicht eindeutig.

Die Detailkonfigurierung der Linien hat großen Einfluß auf das operative Verhalten des Produktionssystems. Problematisch sind die gegenseitigen Abhängigkeiten zwischen der Detailkonfigurierung und der Auftragsreihenfolgeplanung mit integrierter Chargenbildung /34/. Die vorhandenen Ressourcen restringieren die Chargenbildung und beeinflussen somit die Bestückleistung des konfigurierten Systems. Andererseits ist eine explizite Chargenbildung aufgrund der noch vorhandenen Planungsunsicherheiten im Rahmen des halbautomatischen Konfigurationsmodus nicht sinnvoll. Der Modellierungsaufwand steht nicht in einer sinnvollen Relation zu der erwarteten Steigerung der Ergebnismenge. Das nachfolgend skizzierte Verfahren der Detailkonfigurierung hat daher stark interaktiven Charakter. Es stellt dem Anwender diverse Überprüfungen zur Verfügung. Desweiteren werden dem Anwender situationsbedingte Systemvorschläge zur Konfiguration präsentiert. Es handelt sich aber ausschließlich um Entscheidungshilfen, die der Anwender nach seinem individuellen Kenntnisstand zu seiner Unterstützung benutzen kann.

Die Vorgehensweise basiert auf einer isolierten Betrachtung der einzelnen Flachbaugruppen. Für jede Platine müssen die Schritte eins bis drei abgearbeitet werden.

In Schritt vier wird eine abschließende, die gesamte Menge der Flachbaugruppen berücksichtigende Untersuchung der Rüstbarkeit durchgeführt.

Schritt 1:

Alle Bauelemente, die spezielle Anforderungen an einen Bestückautomat stellen, d. h. für die neben dem Grundmodul zusätzliche Einzelkomponenten zur Bestückung notwendig sind, werden den entsprechenden Automatentypen der Linie zugeordnet. Ist die Einzelkomponente bei einer Station schon vorhanden, so wird das Bauelement dieser Station zugeordnet.

Schritt 2:

Die Rüstbarkeit, der in Schritt 1 gebildeten Bauelementezuordnung wird überprüft. Ist eine Rüstung nicht möglich wird der Anwender zur Interaktion aufgefordert. Zwei Alternativen werden ihm angeboten. Er kann die Engpaßsituation bereinigen in dem er Einzelkomponenten, die ergänzende Stellplatzkapazität zur Verfügung stellen, zusätzlich konfiguriert, oder die die Bauelementezuordnung restringierende Einzelkomponenten, falls technisch möglich, bei einer alternativen Station konfiguriert. Eine Liste der Konstruktionsalternativen wird dem Anwender zur Verfügung gestellt (s. Bild 47). Dieser Konstruktionsschritt ist erst bei einem positiven Ergebnis der Rüstbarkeitsüberprüfung abgeschlossen und muß daher eventuell mehrmals durchlaufen werden.

Auswahl von Zusatzeinrichtungen

Optionen

Zuordnung von Bauelement CPU486, Leiterplatte lp_kt_1 (oben) auf Linie 1, Station 2

Bitte waehlen Sie eine Menge von Zusatzeinrichtungen zur Bereitstellung zusätzlicher Modulplaeetze:

Beschreibung	Best Nr	Anzahl	Kosten
BE-Festtisch an der festen Seite H5/SP	120461	1	3,110.00 DM
IC-Shuttle am H5-180	145050	1	82,800.00 DM
Gesamt:			85,910.00 DM

Auswahl

Bild 47: Konstruktionsalternativen zur Erfüllung der Rüstbarkeitsanforderungen

Schritt 3:

In diesem Schritt wird festgestellt, ob die gesamte Bauelementemenge der betrachteten Flachbaugruppe rüstbar ist. Ist dies nicht der Fall, so kann dies mittels der in Schritt 2 beschriebenen Alternativen erreicht werden. Als weitere Lösungsmöglichkeit kann die Linie um eine Station erweitert werden. Im Hinblick auf die Erfüllung der Optimalitätskriterien ist die Erweiterung der Linie, da sie mit hohen Kosten verbunden ist, nach Möglichkeit zu vermeiden.

Die Schritte eins bis drei werden für jeden Flachbaugruppentyp isoliert abgearbeitet. Abschließend muß noch in Schritt 4 ein Abgleich der einzelnen Lösungen durchgeführt werden.

Schritt 4:

In den Schritten eins bis drei wird für jeden Flachbaugruppentyp eine individuelle Linienkonfiguration ermittelt. Ausgehend von der Maximalkonfiguration dieser Lösungsmenge wird überprüft, ob auch die Rüstbarkeit der Bauelemente der anderen Flachbaugruppentypen gewährleistet ist. Hierbei ist die Maximalkonfiguration durch die maximalen Anschaffungskosten gekennzeichnet. Ist das Ergebnis der Überprüfung negativ muß eine Modifikation der Linie mit den in Schritt 3 dargestellten Möglichkeiten vorgenommen werden.

Das oben skizzierte Verfahren ermittelt somit eine die Rüstanforderungen befriedigende Linienkonfiguration. Ein weiterer wichtiger Aspekt der Detailkonfigurierung ist die Überprüfung der Bestückleistung und die eventuell notwendige Modifikation der bisherigen Konfiguration. Die Vorgehensweise wird nachfolgend erläutert.

Untersuchung der Bestückleistung

Im Rahmen der halbautomatischen Problemlösungsvariante wird nur eine Grobabschätzung der zu erwartenden Bestückleistung vorgenommen. Hierfür sind mehrere Gründe verantwortlich. Zum einen ist für die zu treffenden Konstruktionsentscheidungen keine exakte Ermittlung der Bestückleistung unbedingt erforderlich, zum anderen würde eine solche Anforderung die Vorwegnahme der operativen Planung implizieren. Eine überschlagsmäßige Berechnung der Bestückleistung genügt, um Aussagen bezüglich der erforderlichen Systemstruktur und -konfiguration machen zu können. Dies beruht auf der Eigenschaft der Bestückssysteme, daß eine Bestückleistungsänderung nur durch eine beschränkte Anzahl von Modifikationsmöglichkeiten bei einem gegebenen Bestückssystem möglich ist. Zudem ist diese Veränderung nur in diskreten Schritten möglich, so daß ein geringfügiger Schätzfehler die Konstruktionsentscheidung zumeist nicht in Frage stellt.

Der andere Aspekt ist der sehr hohe Modellierungsaufwand, der notwendig ist, um eine exakte Bestückleistungsuntersuchung zu ermöglichen. Sämtliche Optimie-

rungsaufgaben der operativen Planung müßten antizipiert, das heißt eine explizite Rüst- und Umrüstoptimierung durchgeführt werden. Da aber gerade die Auftragsdaten, die die Grundlage dieser Verfahren darstellen, aufgrund der vielen externen Einflüsse mit großen Unsicherheiten behaftet sind, ist eine aufwendige Modellierung zur Bestückleistungsermittlung nicht zu rechtfertigen. Ein Verfahren zur Ermittlung der exakten Bestückleistung einer Ressource für eine gegebene Flachbaugruppe wird in Abschnitt 7 vorgestellt. Dieses Werkzeug kann als Ergänzung zu der rechnergestützten Konfigurierung angewendet werden.

Bild 48 stellt die einzelnen Aufgaben und die Vorgehensweise der Bestückleistungsuntersuchung dar. Eine rüstbare Zuordnung der Bauelemente zu den einzelnen Bestückautomaten einer Linie ist schon im Rahmen der Rüstbarkeitsuntersuchung ermittelt worden. Ausgehend von diesem Ergebnis werden nun die zu bestückenden Bauelemente gemäß der zur Bestückung erforderlichen Einzelkomponenten klassifiziert. Hinter diesen Einzelkomponenten verbergen sich die zur Bestückung dieses Bauelementetyps notwendigen Zusatzoperationen der Automaten. Über die vorgegebenen Zeitzuschläge für die einzelnen Zusatzoperationen, die in der Regel bauelementeabhängig sind, kann nun die Bestückleistung einer Station für ein gegebenes Bauelementespektrum ermittelt werden. Dies muß in einer isolierten Betrachtung für jeden Flachbaugruppentyp geschehen. Das Resultat sind die Bestückzeiten t_{ij} für die einzelnen Flachbaugruppentypen auf den Stationen der Linie. In der sich anschließenden ganzheitlichen Betrachtung aller einer Linie zugeordneten Flachbaugruppentypen muß die nachfolgend spezifizierte Ungleichung erfüllt sein.

$$\sum_{i=1}^M JB_i \times \max_{j=1, \dots, N} (t_{ij}) + LPWZ \leq \hat{T}_N^i$$

mit:

M :	Anzahl der unterschiedlichen Flachbaugruppentypen
N :	Anzahl der Stationen in der Linie
t_{ij} :	Bestückzeit der Flachbaugruppe i auf der Station j
\hat{T}_N^i :	Schätzung der Nutzungszeit der Linie i nach VDI-Richtlinie 3423 /106/
$LPWZ$:	Leiterplattenwechselzeit /107/
JB_i :	Jahresbedarf der Flachbaugruppe i

Ist diese Ungleichung nicht erfüllt, muß die Bestückleistung der Linie erhöht werden. Zwei Alternativen sind möglich:

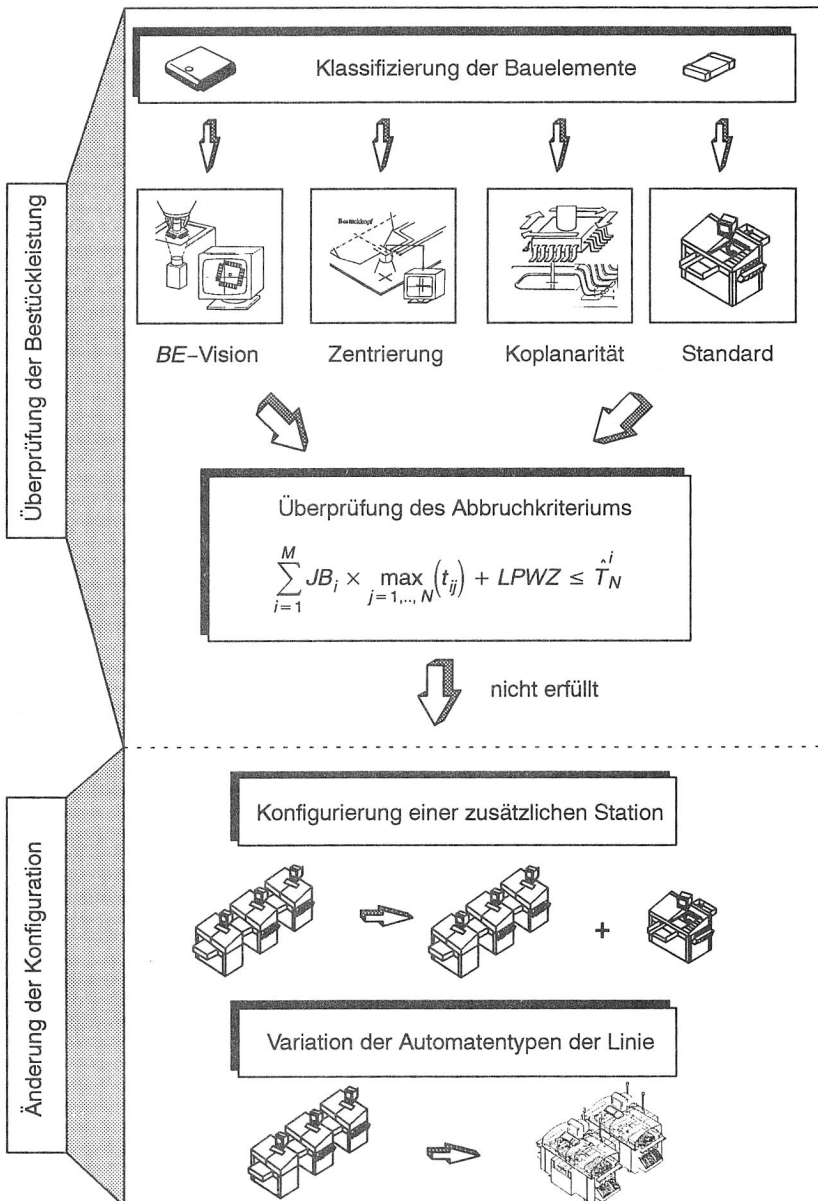


Bild 48: Ablauf der Bestückleistungsuntersuchung

- Konfigurierung einer zusätzlichen Station
- Variation der Automatentypen der Linie

Die Entscheidung, welcher Weg eingeschlagen wird, bleibt dem Benutzer vorbehalten. Die verschiedenen technologisch korrekten Möglichkeiten der beiden Alternativen werden zur Selektion angeboten. Der Zyklus Konfigurieren und Überprüfen muß unter Umständen mehrmals durchlaufen werden. Diese sukzessive Modifikation der Linie wird bis zur Erfüllung der Bestückleistungsanforderungen durchgeführt. Die Detailkonfigurierung der Linien ist somit abgeschlossen.

Detailkonfigurierung für Standalone Maschinen

Die Detailkonfigurierung der Standalone Automaten verläuft grundsätzlich analog der Linienkonfigurierung. Sie unterscheidet sich nur in einigen wenigen Punkten. So entfällt im Rahmen der Rüstbarkeitsprüfung die Verteilungsproblematik der Bauelemente auf die einzelnen Stationen einer Linie. Desweiteren unterscheiden sich die Modifikationsmöglichkeiten einer die Rüst- bzw. die Bestückleistungsanforderungen nicht erfüllenden Station von der Vorgehensweise bei einer Linie:

- Erweiterung der Station mit zusätzlichen Fördererstellplatzkapazitäten
- Wechsel des Stationstyps
- Konfigurierung einer Linie

Nach Abschluß der Konfigurierung der Standalone Automaten ist die Konfigurierung des Bestücksystems im Rahmen des halbautomatischen Modus abgeschlossen.

Eine Ergänzung der Ergebnisse der Detailkonfigurierung für die Linien als auch für die Standalone Automaten im interaktiven Modus (s. Abschnitt 5.4.1) bleibt dem Benutzer vorbehalten. Dies ist eventuell erforderlich, da sich nicht alle Konstruktionsentscheidungen aus dem Inhalt der Wissensbasis ableiten lassen. Es gibt zum Beispiel individuelle kundenspezifische Anforderungen, die die Konfigurierung beeinflussen, aber nicht mit vertretbarem Modellierungsaufwand in der Wissensbasis abbildbar sind.

Im nächsten Abschnitt wird nun auf die Benutzerschnittstelle des Konfigurators näher eingegangen.

5.5 Die Benutzerschnittstelle des Systems

Die verschiedenen Möglichkeiten der Mensch – Maschine Interaktion werden, nach den Funktionen von ANKON gegliedert, vorgestellt.

5.5.1 Wissensakquisition

Ein zentraler Bestandteil mit großer Bedeutung für die Benutzerakzeptanz des Systems ist die Wissenserwerbskomponente. Gerade bei der Konfiguration technischer Produkte sind häufige Änderungen der Konstruktionsobjekte, sowie deren Abhängigkeiten untereinander, zu berücksichtigen. Das heißt die Modifikation des zur Konfiguration notwendigen Wissens muß für den Anwender einfach und ohne Kenntnisse der Implementierungsdetails möglich sein.

Das assoziative Wissen zur Transformation der Anforderungsspezifikation in die Funktionsanforderung, sowie die Beschreibung der Einzelkomponenten kann über einfache Datenbankmasken eingegeben werden. Die Bearbeitung der Struktur der Objekttypen erster Ordnung hingegen erfordert höheren Aufwand. Hier wird dem Benutzer ein graphisch, interaktives Werkzeug zur Erzeugung der Aufbaustrukturen an die Hand gegeben. Mittels dieses Werkzeugs kann er vorhandene Beschreibungen modifizieren und neue Strukturbeschreibungen generieren. Bild 49 zeigt die Oberfläche des Werkzeugs. Ergänzend ist exemplarisch ein Teilausschnitt der Modellierung eines Bestückautomaten zu sehen.

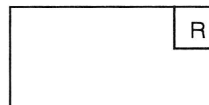
Dem Anwender stehen zur Modellierung der Aufbaustrukturen der Objekttypen erster Ordnung bei der Benutzung des Werkzeugs die nachfolgend dargestellten Grafiksymbole zur Verfügung. Die Sprachelemente, deren Semantik nachfolgend erläutert wird, sind im einzelnen:

- Teileknoten

<Bestellnummer>
<Beschreibung>

Sie dienen zur Darstellung der Einzelkomponenten eines Objekttyps erster Ordnung. Bei einem Bestückautomaten sind dies zum Beispiel alle konfigurierbaren und nicht mehr weiter unterteilbaren Bestandteile.

- Regelknoten



Die Semantik des Knoten wird durch den hinterlegten Regeltext festgelegt. Somit wird z. B. die Abbildung von über die Objekttypen erster Ordnung hinausgehenden Restriktionen ermöglicht. Der Regelknoten kann nur in Verbindung mit Optionalkanten verwendet werden.

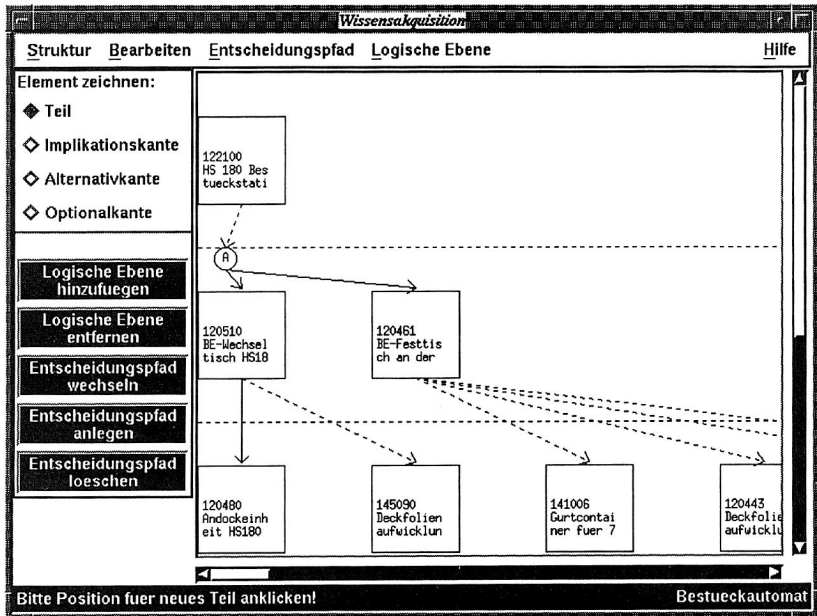


Bild 49: Oberfläche zur Generierung der Aufbaustrukturen der Objekttypen *erster Ordnung*

- Alternativknoten



Er dient zur Modellierung der logischen Disjunktion, d. h. einer exklusiven Auswahlentscheidung.

- Optionalkante



Optionalkanten ermöglichen die Abbildung von Konstruktionsmöglichkeiten, die keinen Restriktionen unterliegen.

- Implikationskante



Die Implikationskante dient zur Abbildung unbedingt erforderlicher Konstruktions-schritte. Diese Situation tritt z. B. auf, wenn eine Einzelkomponente nur in Verbindung mit einer anderen funktionsfähig ist.

Allgemein dienen die Kanten auch zur Modellierung der Kontrollstruktur des Konstruktionsprozesses. Die Pfeilrichtung gibt den Ablauf der Konfigurierung wider.

Eine weitere Eigenschaft dieser Beschreibungsmethode ist die Möglichkeit den Konstruktionsablauf zu untergliedern. Vom Benutzer können sogenannte Entscheidungspfade, die eine Unterteilung des Konstruktionsprozesses in mehrere Teilprozesse ermöglichen, definiert werden. Im Rahmen der interaktiven Konfigurierung (s. Abschnitt 5.4.1) kann nun der Fokus auf einen Entscheidungspfad eingeschränkt und dieser dann separat abgearbeitet werden. Diese Strukturierung in Teilprozesse wird zum Teil durch die physikalischen Gegebenheiten eines Objektes erster Ordnung impliziert. Bei der Konfigurierung eines Bestückautomaten ist zum Beispiel eine Unterscheidung in die beiden Seiten des Automaten sinnvoll.

Im nächsten Abschnitt wird auf die Benutzerschnittstelle der Problemlösungskomponente eingegangen.

5.5.2 Problemlösungskomponente

Zur Konfigurierung eines Angebots stehen zwei komplementäre Werkzeuge zur Verfügung. Das eine bietet dem Benutzer eine Unterstützung bei der interaktiven Zusammenstellung aller Komponenten eines Angebotes. Das andere Werkzeug unterstützt primär die Konfigurierung der Bestücksysteme, die zentraler Bestandteil eines Angebots sind. Es beinhaltet intelligente Strategien zur Konfigurierung der Bestücksysteme. Das heißt der Konstruktionsprozeß wird programmgestützt gesteuert. Im Verlauf des Konstruktionsprozesses werden immer wieder vordefinierte Entscheidungspunkte erreicht, an denen der Benutzer den Fortgang des Prozesses durch seine eigenen Entscheidungen beeinflusst. Nachfolgend werden zuerst die Interaktionsmöglichkeiten des intelligenten, interaktiven Konfigurators näher beleuchtet.

Intelligente Interaktive Konfigurierung

Bild 50 zeigt die Oberfläche dieses Werkzeugs, das die folgende Funktionalität besitzt:

- Programmgesteuerte Strukturfestlegung und Detailkonfigurierung des Bestücksystems
- Test der Konfiguration auf technische Konsistenz
Es wird überprüft, ob die Konfiguration aus technischer Sicht vollständig ist und die Abhängigkeiten der Einzelkomponenten untereinander berücksichtigt werden. Kundenanforderungen werden bei diesem Test nicht verarbeitet.
- Modifikation bereits existierender Konfigurationen
Mittels dieser Funktion können auch die automatisiert generierten Konfigurationen verändert werden.

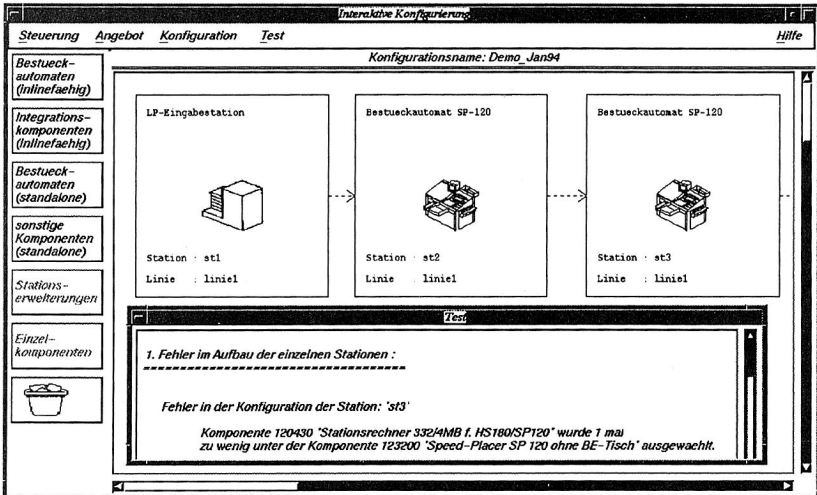


Bild 50: Oberfläche des interaktiven, intelligenten Konfigurators

- Überprüfung der Bestückleistung und der Fördererstellplätze des konfigurierten Systems bezüglich der Kundenanforderungen.

Werden mit dem interaktiven Konfigurator Objekttypen erster Ordnung, wie z. B. Bestückautomaten, instanziiert, wird dem Anwender die Vorgehensweise vorgeschlagen. Dieser Konstruktionsablauf beruht auf den zuvor definierten Entscheidungspfaden. Dem Anwender werden somit beim Konfigurieren eines Objekts sequentiell die Entscheidungsvarianten präsentiert und zur Selektion angeboten (s. Bild 51). Der Entscheidungsraum wird somit durch die technischen Restriktionen und das Konzept der Entscheidungspfade eingegrenzt. Es handelt sich aber hierbei nur um Hinweise, die vom Benutzer ignoriert werden können. Dies kann für den Fall spezieller Kundenanforderungen, die auf dem spezifischen Umfeld des Kunden beruhen, sinnvoll sein.

Das Werkzeug verfügt zudem über eine Funktion mit der eine erstellte Konfiguration auf technische Konsistenz geprüft werden kann. Die Fehler der Konfiguration werden dann in einer Übersicht dargestellt und können anschließend sukzessive mit entsprechender Systemunterstützung behoben werden (s. Bild 50).

Halbautomatische Konfiguration

Im Rahmen der halbautomatischen Konfiguration müssen in einem ersten Schritt die Anforderungen des Kunden spezifiziert werden. Hierzu ist es erforderlich die zu

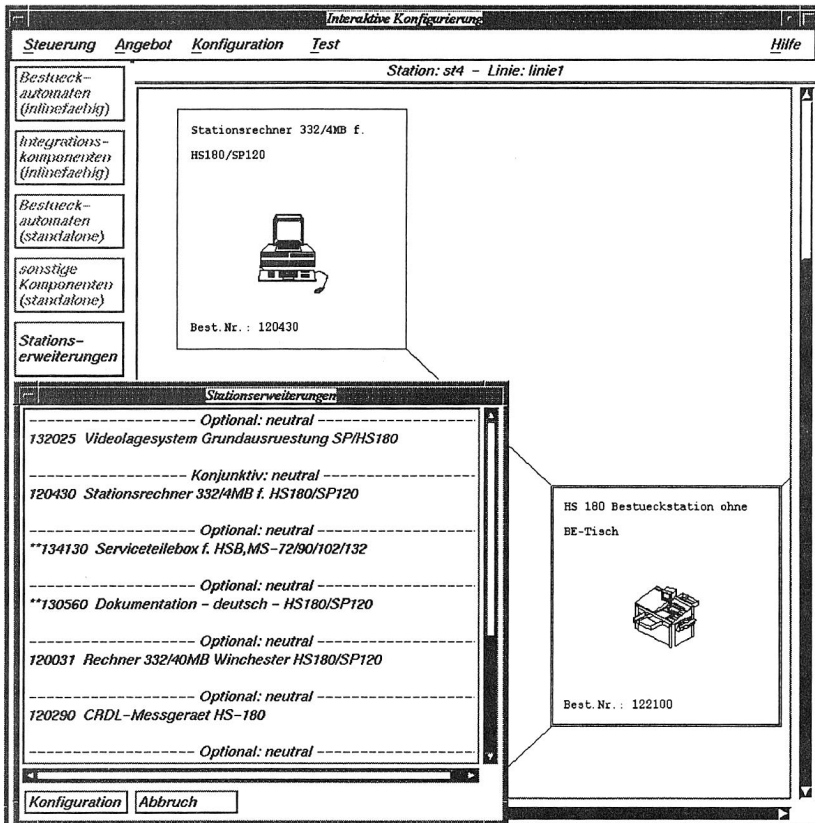


Bild 51: Systemgeführte Eingrenzung des Entscheidungsraums

fertigenden Flachbaugruppentypen, sowie die damit korrespondierenden Stückzahlen festzulegen. Zudem kann es der Wunsch des Kunden sein, das bereits vorhandene Bestücksystem in die Konstruktionsüberlegungen mit einzubeziehen. Dies kann auf zweierlei Arten geschehen:

- Additive Konfigurierung
- Substantive Konfigurierung

Bei der additiven Konfigurierung werden die bereits vorhandenen Ressourcen nicht geändert, aber bei der Lösung der Zuordnungsproblematik mit in Betracht gezogen. Bei der substantiven Konfigurierung ist eine Änderung der vorhandenen Ressourcen

möglich. Hierbei ist natürlich der schwer quantifizierbare Änderungsaufwand der bisherigen Konfiguration ein entscheidendes Kriterium bei den zu treffenden Konstruktionsentscheidungen. Der Aspekt der substantiven Konfigurierung ist nicht Gegenstand dieser Arbeit.

Zur Eingabe der Kundenanforderungen dient die in Bild 52 dargestellte Oberfläche. Ergänzend hierzu benötigt man einen nicht dargestellten Editor zur Eingabe der Flachbaugruppenbeschreibungen oder man nutzt eine standardisierte Schnittstelle zu einem *ECAD* System zur Eingabe der Flachbaugruppendaten. Die anschließend erforderliche Umwandlung der Anforderungsspezifikation in die Funktionsanforderung geschieht dann mittels des in der Wissensbasis abgelegten assoziativen Wissens (vgl. Bild 32).

The screenshot shows a window titled "Anforderungsdaten editieren". Inside, there is a section labeled "Optionen". At the top, "Angebotsname:" is followed by a text box containing "konf_test_3". Below this are two main panels. The left panel, "Wahlbare Leiterplatten:", contains a table with four rows of PCB names: LTK500_LTK500L, LTM100_5041102, LTM100_5041102_R1, and LTM100_5041102_R2. The right panel, "Zu fertigende Leiterplatten:", contains a table with four rows: HDM_NU5022L00 (500), LTM100_5041102_R1 (100), LTM100_5041102_R2 (1000), and LTK500_LTK500L (250). At the bottom are two buttons: "Anforderungen speichern" and "Schliessen".

Wahlbare Leiterplatten:	
Lp Name	
LTK500_LTK500L	
LTM100_5041102	
LTM100_5041102_R1	
LTM100_5041102_R2	

Zu fertigende Leiterplatten:	
Lp Name	Menge
HDM_NU5022L00	500
LTM100_5041102_R1	100
LTM100_5041102_R2	1000
LTK500_LTK500L	250

Bild 52: Oberfläche zur Aufnahme der Kundenanforderungen

Nachfolgend werden die wichtigsten Interaktionsmöglichkeiten des Benutzers im Rahmen der Strukturfestlegung und der Detailkonfigurierung näher betrachtet. Eine zentrale Aufgabe der Strukturfestlegung ist die Expansion der Initialkonfigurierung. Hierbei wird der Entscheidungsraum für den Benutzer gezielt eingeschränkt und ihm nur seinen Anforderungen entsprechende Expansionsvarianten angeboten. Somit kann er die Struktur des Bestücksystems Schritt für Schritt entwickeln.

Zur Durchführung der sich an die Strukturfestlegung anschließenden Detailkonfigurierung ist eine eindeutige Zuordnung der Flachbaugruppentypen zu den Ressourcen erforderlich. Mittels eines auf Clusterverfahren basierenden Zuordnungsalgorithmus wird eine Verteilung der Flachbaugruppen auf die Ressourcen ermittelt. Der Anwender hat die Möglichkeit diese Zuordnung bei Bedarf zu ändern (s. Bild 53).

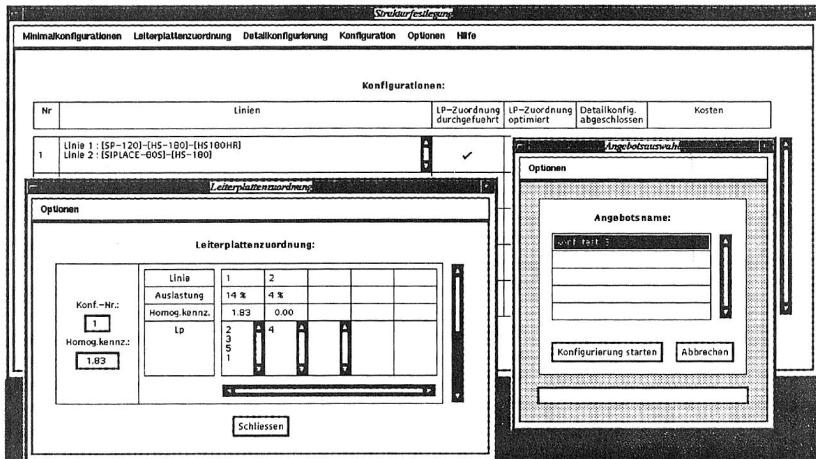


Bild 53: Überprüfung und Modifikation der Ressourcenzuordnung

Die Ergebnisse der sich anschließenden Detailkonfiguration der einzelnen Stationen können mit dem interaktiven Konfigurator angesehen und modifiziert werden.

Nach der Vorstellung der wesentlichen Aspekte der Mensch-Maschine Interaktion zur Konfiguration eines Angebots wird im nächsten Abschnitt die Ergebnispräsentation näher betrachtet.

5.5.3 Visualisierung des Angebots

Zur Effizienzsteigerung der Angebotserstellung ist neben der Unterstützung des Konstruktionsprozesses auch die Präsentation des fertig konfigurierten Angebots ein wichtiger Gesichtspunkt. ANKON bietet daher drei Varianten der Ergebnisdarstellung. Die jeweiligen Informationsschwerpunkte der unten aufgelisteten Alternativen differieren.

- Strukturierte Darstellung sämtlicher Bestandteile eines Angebots
- Volumenorientierte Darstellung des konfigurierten Bestücksystems
- Automatisch generierte, kundenspezifische Angebotsunterlagen

Darstellung sämtlicher Komponenten eines Angebots

Diese Visualisierungsvariante bietet dem Benutzer eine Übersicht über alle Bestandteile des Angebots. Die Darstellung basiert auf der Struktur des konfigurierten Be-

Detailkonfiguration fuer Konfiguration Nr. 1

Bauelementezuordnung Bestueckleistungsprüfung Optionen Hilfe

Linien:

Nr.	Name	Bz	Bl
1	2000-2-1-1-1	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
3	Schwallinie	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>

Bz = Bauelemente
 zugeordnet
 Bl = Bestueckleistung
 geprüft

Stationen:

Station: Nr.: 2

Name: Pick and Place

Automatentyp: Bestueckautomat HS-180

Kosten: 451.150,00 DM

Bauelemente		Packungsform
Lp Nr	Be Name	
5	C3.3uf16V	SOT23
5	R750k	MM
5	R62.5	MM

Zusatzleistungen der Station

Beschreibung	Kosten	Anzahl
BE-Feststisch an der festen Seite HS/SP	3.110,00 DM	1
IC-Shuttle am HS-180	82.800,00 DM	1
Stationsrechner 332/4MB f. HS180/SP120	33.950,00 DM	1

Schliessen

Bild 54: Oberfläche für die automatisierte Detailkonfiguration

stücksystems. Ein wichtiger Informationsaspekt sind die Kosten des geplanten Angebots (s. Bild 55).

Volumenorientierte Darstellung des konfigurierten Produktionssystems

Bei dieser Darstellungsvariante wird dem Benutzer das konfigurierte Bestücksystem wirklichkeitsgetreu visualisiert. Hierzu sind ein Teil der konfigurierbaren Einzelkomponenten im CAD-System modelliert, das heißt es liegen die erforderlichen geometrischen Informationen vor. Dem Benutzer steht die volle Funktionalität des CAD-Systems zur Verfügung. Ergänzend kann aus den hinterlegten geometrischen Informationen ein Aufstellplan der Maschinen für den Kunden automatisch generiert werden.

Automatisierte Generierung der kundenspezifischen Angebotsunterlagen

Hier werden die Informationen der beiden oben beschriebenen Darstellungsalternativen zusammengefaßt und ein entsprechendes Dokument für den Kunden automatisch erzeugt (s. Bild 56). Zur Unterstützung dieser Funktion wird ein marktgängiges DTP-System mit offengelegter Seitenbeschreibungssprache eingesetzt. Ein in C geschriebener Generator erzeugt aus den in der Datenbank beschriebenen Informationen über den Aufbau des Angebots die erforderlichen Dokumente. Sie können, falls gewünscht, in der DTP-Anwendung individuell nachbearbeitet werden.

Angebote-Frame

Steuerung Optionen

Angebote

Bezeichnung	Datum	Kunde	Bearbeiter	Kosten
Demo_Jan94	12-jan-1994	Koch, Martin Universität-Erlangen, Tel.:	martin	1908150.00DM

Beschreibung einer Linie

Steuerung

Angebot: Demo_Jan94

Linie: linie1 Kosten: 852450.00DM

st1

Preis = 38350.00DM

st2

Preis = 230270.00DM

st3

Preis = 190100.00DM

Einzelkomponenten der Stationen:

Bild 55: Strukturierte Visualisierung des Angebots

5.6 Die Entwicklungsumgebung von ANKON

Ein wichtiges Kriterium bei der Entscheidung für die einzusetzenden Werkzeuge ist der zu beachtende Integrationsaspekt. ANKON ist nur eine Funktion des Gesamtsystems ESA. Aus dieser Konstellation heraus erwachsen spezielle Anforderungen an die Realisierung. Dies sind im einzelnen:

- Parallele Anwendung der verschiedenen Funktionen von ESA
- Das Gesamtsystem muß mehrbenutzerfähig sein

Diese Anforderungen leiten sich aus den betrieblichen Randbedingungen der Zielumgebung ab. Die daraus erwachsende Konsistenzproblematik der Datenhaltung impliziert den Einsatz einer Datenbank zur Wissensverwaltung. Das einer Datenbank zugrundeliegende Transaktionskonzept, sowie die weiter unten näher spezifizierte Verfahren zur Wahrung der referentiellen Integrität der Daten, dienen der Konsistenzsicherung /152/.

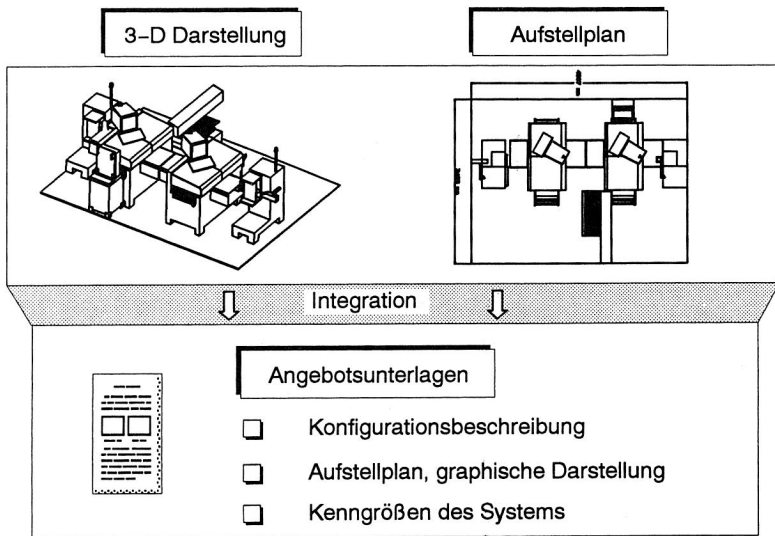


Bild 56: Automatisch generierte Angebotsunterlagen

Bild 57 zeigt das Realisierungskonzept von *ANKON*. Der Konfigurator wird an eine relationale Datenbank gekoppelt /86//95/. Die Wissensbasis wird von einem Datenbankmanagementsystem verwaltet und kann somit von mehreren Applikationen parallel genutzt werden. Die referentielle Integrität in der Datenbank wird durch entsprechende Trigger und Datenbankprozeduren sichergestellt /80/. Dieses Feature moderner, relationaler Datenbankmanagementsysteme ermöglicht die Verlagerung der Aufgaben der Sicherung der referentiellen Datenintegrität von den Applikationen weg in die Datenbank. Die Entwicklung der Anwendungen vereinfacht sich hierdurch.

Die Wissensmodellierung bei *ANKON* umfaßt einen statischen und einen dynamischen Teil. In der Datenbank werden die häufig zu ändernden Daten gehalten. Fest implementierte Auswerteprozeduren übernehmen das Datenretrieval und versehen die Daten mit der zur Konfiguration notwendigen Semantik (s. Bild 57). Die Codierung der Auswerteprozeduren muß bei Änderungen der Wissensbasis nicht geändert werden /95/.

Die Implementierung des Konfigurators wird auf *HP-Workstations* unter *X-Windows* in *C* bzw. *C++* vorgenommen. Für einzelne Teilaufgaben der Entwicklung werden unterstützende Werkzeuge eingesetzt (vgl. auch Abschnitt 3.3). So wird zum Beispiel zur Realisierung der Benutzungsoberflächen ein auf *OSF/MOTIF* /87/ basierendes grafisch interaktives Werkzeug eingesetzt /105/.

Im nächsten Kapitel werden eine Methode und ein Werkzeug zur Bewertung alternativer Angebotsvarianten vorgestellt. Hierbei werden die individuellen Präferenzen des Kunden berücksichtigt.

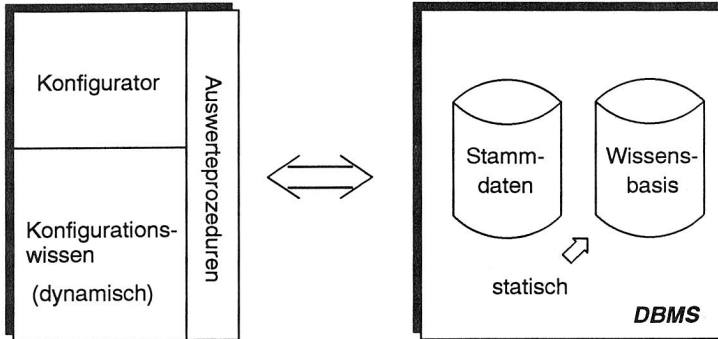


Bild 57: Realisierungskonzept der Daten- und Wissensverwaltung von AN-KON

6 Präferenzmodelle zur Evaluierung von Angebotsvarianten

In der Regel werden dem Kunden mehrere Lösungen zur Erfüllung seiner Anforderungen präsentiert. Diese Vorgehensweise ist durch die zumeist ungenaue Spezifikation der Anforderungen bedingt. Der Kunde und ebenso der Anbieter haben dann die Schwierigkeit die beste Variante zu bestimmen. In diesem Kapitel wird eine Methode vorgestellt, die zum einen die Spezifikation der Kundenanforderungen unterstützt, zum anderen die Bewertung dieser Angebotsvarianten ermöglicht. Verschiedene qualitative und quantitative Kriterien, die in ihrer Bedeutung für die Entscheidungsfindung von Kunde zu Kunde variieren, müssen bei der Bewertung der Alternativen berücksichtigt werden.

Daher wird nachfolgend, ausgehend von einer grundsätzlichen Betrachtung der Methoden zur Lösung multiattributiver Entscheidungsprobleme, ein Bewertungsmodell zur Evaluierung von Angeboten, unter Berücksichtigung der spezifischen Kundenpräferenzen, entwickelt. Dieses Modell findet im Werkzeug *EVAL*, das integraler Bestandteil von *ESA* ist (s. Bild 12), seine Anwendung. Somit kann sowohl die Angebotserstellung seitens des Anbieters, als auch die Entscheidungsfindung des Kunden, wirkungsvoll unterstützt werden (s. Bild 58).

Dem Anbieter wird ermöglicht sein Angebot im Detail auf die Bedürfnisse des Kunden abzustimmen. Der Kunde auf der anderen Seite kann aufgrund seiner zuvor explizit formulierten Anforderungen unterschiedliche Systemlösungen qualifiziert vergleichen und die erforderliche Entscheidung vorbereiten.

6.1 Entscheidungsfindung bei mehreren Zielkriterien

Bei der Lösung vieler praxisrelevanter Entscheidungs- bzw. Optimierungsprobleme müssen mehrere, konkurrierende Zielkriterien berücksichtigt werden. Die Entwicklung von Lösungsmethoden für diese multiattributiven Entscheidungsprobleme ruft daher großes Interesse in der Wissenschaft hervor. Dies belegen zahlreiche Veröffentlichungen zu erfolgreichen Anwendungen /85//158/. Für den Problembereich der Entscheidungsfindung bei mehreren Zielkriterien hat sich in der Literatur der englische Begriff *multiple criteria decision making (MCDM)* eingebürgert /136/.

MCDM kann in zwei separate Felder unterteilt werden:

- multiattribute decision analysis (*MADA*)
- multiple criteria optimization (*MCOP*) /30/

MADA wird bei Problemen mit stochastischen Einflüssen und wenigen Lösungsalternativen angewendet. *MCOP* hingegen kommt bei deterministischen Problemen mit einer Vielzahl von Lösungsalternativen zum Einsatz.

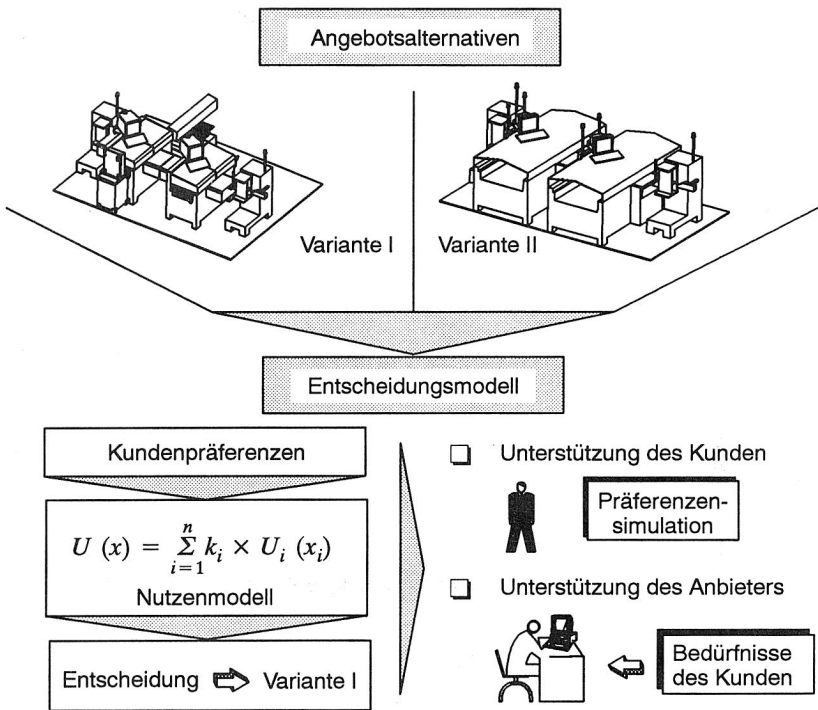


Bild 58: Intention und Nutzen der Bewertung von Angebotsvarianten

Für den betrachteten Anwendungsfall konzentrieren wir uns auf *MADA*-Methoden, da die Intention des in diesem Kapitel beschriebenen Werkzeugs *EVAL* die Unterstützung der Entscheidungsfindung bei der Auswahl der adäquaten Angebotsvariante ist. Hierbei wird nur eine kleine Anzahl von Alternativen betrachtet. Einen Überblick über die verschiedenen Bewertungsmethoden gibt Fishburn /38/. Zur Evaluierung von Produktionssystemen haben sich u. a. die folgenden Verfahren etabliert /11/:

- Nutzenmodelle /71/
- Analytic Hierarchy Process /120/
- Goal programming

Gerade die Nutzentheorie eignet sich als Grundlage für ein Entscheidungsmodell zur Auswahl von Angebotsvarianten. Sie ermöglicht die Abbildung der spezifischen Kundenpräferenzen. Der grundsätzliche Gedanke der Theorie ist die Dekomposition des Problems in einzelne Teilprobleme. So wird für jedes einzelne Zielkriterium der Nut-

zen für den Kunden bestimmt und mittels der entsprechenden Nutzenfunktion der Gesamtnutzen einer Alternative bestimmt. Die Festlegung der Gestalt der Nutzenfunktion hängt von der Art der Nutzenunabhängigkeit der einzelnen Zielkriterien ab /71/. Es gilt zwischen der multilinearen, der multiplikativen und der additiven Nutzenfunktion zu unterscheiden.

Die Forderung nach der Nutzenunabhängigkeit der Attribute macht auch gleich die Beschränkung des Ansatzes deutlich. Bei vielen realen Problemen, wie auch der in diesem Kapitel beschriebenen Problematik, bedarf es hierzu einer gewissen Idealisierung.

Die Grundform der Nutzenfunktionen ist die multilineare Funktion. Ihr liegt die schwächste Unabhängigkeitsforderung zugrunde. Die additive (s. u.) bzw. multiplikative Funktion sind Spezialformen.

$$U(x) = \sum_{i=1}^n (U(x_i, \bar{x}_i^0)) = \sum_{i=1}^n k_i \times U_i(x_i)$$

wobei:

$U(x_i, \bar{x}_i^0)$	=Nutzen für das Kriterium x_i ; Alle anderen Kriterien nehmen den Wert des schlechtesten Nutzen (\bar{x}_i^0) an.
\bar{x}_i	Komplement des Kriteriums x_i ; alle Kriterien außer x_i
x_i^0	Wert von x_i , bei dem Nutzen minimal
x_i^*	Wert von x_i , bei dem Nutzen maximal
k_i	Gewicht des i -ten Attributes
$U_i(x_i)$	Nutzen des Wertes x_i des i -ten Attributes

U ist normiert:

$$U(x_1^0, x_2^0, \dots, x_n^0) = 0$$

$$U(x_1^*, x_2^*, \dots, x_n^*) = 1$$

$$U_i(x_i^0) = 0 \quad \forall i = 1, \dots, N$$

$$U_i(x_i^*) = 1 \quad \forall i = 1, \dots, N$$

$$k_i = U(x_i^*, \bar{x}_i^0) \quad \forall i = 1, \dots, N$$

Im folgenden Abschnitt werden die einzelnen Bestandteile des Entscheidungsmodells zur Auswahl von Angebotsvarianten näher betrachtet.

6.2 Modell zur Bewertung von Bestückssystemen

Die Bewertung einer Angebotsvariante entspricht der technisch-wirtschaftlichen Bewertung des geplanten Bestücksystems. Dies stellt eine Beschränkung des Ansatzes dar, da weitere, nicht direkt das Bestücksystem betreffende Kriterien bei der Evaluierung nicht berücksichtigt werden. Andererseits ist gerade die technisch-wirtschaftliche Bewertung des Bestücksystems die komplexeste und zugleich wichtigste Aufgabe beim Alternativenvergleich. Ein Werkzeug zur Unterstützung gerade dieser Aufgabe ist daher für den Anbieter, als auch für den Kunden von großem Nutzen.

Das diesem Werkzeug zugrundeliegende Entscheidungsmodell verfügt über zwei zentrale Bestandteile. Zum einen muß die Abbildung der Kundenpräferenzen ermöglicht werden, zum anderen sind Berechnungsmodelle zur Nutzenermittlung erforderlich (s. Bild 59).

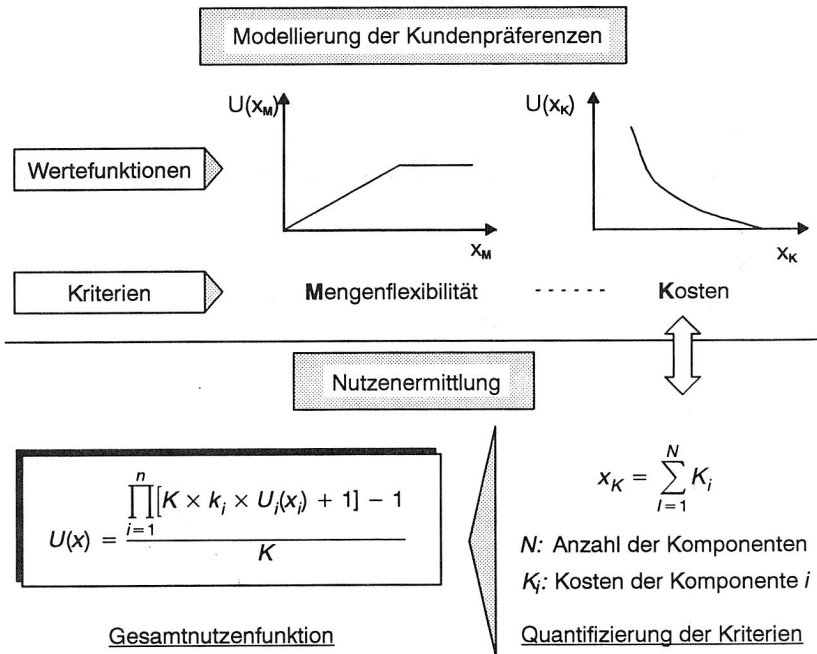


Bild 59: Komponenten des Entscheidungsmodells zur Bestücksystemevaluierung

Die grundsätzliche Vorgehensweise bei der Durchführung der Evaluierung wird in den nachfolgend aufgelisteten Schritten aufgezeigt:

1. Entscheidungskriterien festlegen
2. Wertefunktionen für die einzelnen Kriterien bestimmen
3. Gewichte der Kriterien bestimmen
4. Werte der Teilnutzen bestimmen
5. Gesamtnutzen ermitteln

Diese allgemeine Vorgehensweise wird in Abschnitt 6.3 weiter verfeinert. Es werden die Methoden zur Durchführung der einzelnen Schritte, sowie deren Umsetzung in *EVAL* vorgestellt.

6.3 Realisierung des Bewertungswerkzeugs

Die Umsetzung der oben aufgeführten Schritte zur Bewertungsdurchführung in *EVAL* wird nachfolgend erläutert:

Schritt 1:

Zur Bewertung der Bestückssysteme werden dem Anwender eine Reihe relevanter Kriterien zur Verfügung gestellt. Hierbei handelt es sich sowohl um qualitative als auch quantitative Kriterien. Qualitative Kriterien, wie z. B. Prozeßflexibilität, müssen für die Verarbeitung im Entscheidungsmodell quantifiziert werden. Der Anwender kann nun die für ihn bedeutenden Kriterien auswählen (s. Bild 60). Generell gilt es zwischen drei Klassen von Kriterien zu unterscheiden:

- *Ko*-Kriterien
- Schwellenwert-Kriterien
- Weiche Kriterien

Ko-Kriterien müssen auf jeden Fall erfüllt werden. Dies sind im betrachteten Anwendungsfall die für das zu fertigende Produktspektrum erforderliche Bestückleistung und die vom zu verarbeitenden Bauelementespektrum herrührenden Anforderungen an Bestückgenauigkeit und Bestückbarkeit.

Bei den Schwellenwert-Kriterien wird bei Unter- bzw. Überschreiten des Schwellenwerts die Angebotsvariante sofort verworfen. Ein entsprechendes Beispiel ist der Flächenbedarf des geplanten Systems. Bei diesem Kriterium ist möglicherweise aufgrund der gegebenen räumlichen Situation des Kunden ein Grenzwert vorhanden.

Weiche Kriterien haben keinen ausschließenden Charakter, sondern gehen gemäß ihrer Ausprägung und ihrer Gewichtung in die Gesamtbewertung ein.

In Bild 60 werden die verfügbaren Kriterien in der Übersicht gezeigt. Die Integration neuer, benutzerdefinierter Kriterien ist zur Laufzeit des Programms nicht möglich, da die Prozeduren zur Ermittlung der Ausprägung des Kriteriums implementiert werden müssen. Die einzelnen Kriterien erhalten ihre Bedeutung durch die zu entwickelnden Berechnungsprozeduren zur Ermittlung der Ausprägung eines Kriteriums für eine bestimmte Bestücksystemvariante.

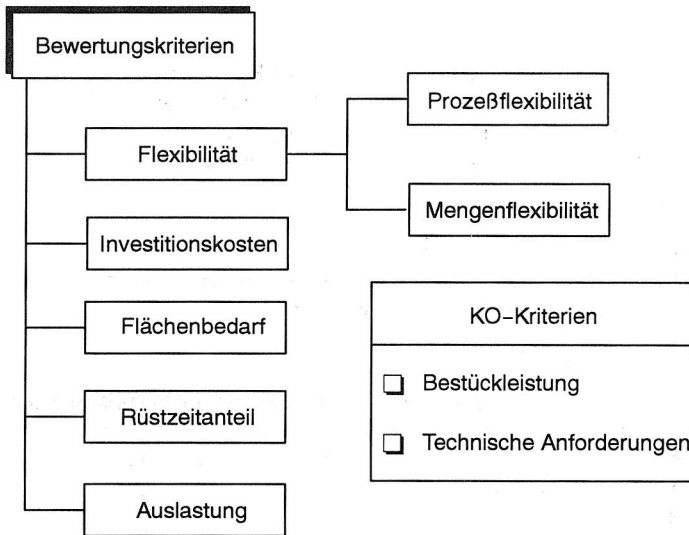


Bild 60: Relevante Kriterien zur Bewertung von Bestücksystemen

Nachfolgend wird auf die Bedeutung der einzelnen Kriterien eingegangen. Für die qualitativen Kriterien werden die Berechnungsvorschriften vorgestellt.

- Erreichen der erforderlichen Bestückleistung

Aus dem zu fertigenden Produktspektrum ergibt sich auf Basis der geforderten Jahresbedarfe eine notwendige Bestückleistung. Diese ermittelte Bestückleistung muß durch das geplante Bestücksystem realisiert werden, ansonsten ist eine weitere Betrachtung dieser Lösung nicht notwendig.

- Erfüllen der technischen Anforderungen

Bestimmte Bauelemente bzw. Platinen benötigen beim Bestücken Sonderabläufe. Diese Sonderabläufe, die nachfolgend aufgelistet sind, implizieren entsprechendes Zusatzequipment auf den Bestückstationen /112/.

- Bauelemente zentrieren
- Bauelementelageerkennung
- Leiterplattenlageerkennung
- Koplanaritätsmessung
- Adapterwechsel
- Pipettenwechsel

Desweiteren implizieren die Bauelementetypen (z. B. Finepitch) bestimmte Automatentypen zur Durchführung der Bestückung. Die Automatentypen sind für ein festgelegtes Bauelementespektrum ausgelegt. Ein ergänzendes wichtiges technisches Eignungskriterium ist die Rüstbarkeit der Bauelemente auf der Bestücklinie.

- Investitionskosten für das Produktionssystem

Ein Kriterium zur Bewertung einer Lösung sind sicherlich die anfallenden Investitionskosten. Der in die Wertefunktion eingehende Wert wird durch die Addition sämtlicher Kosten der benötigten Komponenten berechnet.

- Flexibilitätswertung

Die Definition der Flexibilitätskenngrößen erfolgt nach Suresh /140/. Bei allen Arten der Flexibilität tritt die Problematik der Quantifizierung dieser qualitativen Merkmale auf. Es gilt nun Kenngrößen des zu bewertenden Produktionssystems zu identifizieren, die als Maß für den Wert der jeweiligen Flexibilitätsart dienen.

Prozeßflexibilität

Unter Prozeßflexibilität wird der im Produktionsprozeß anfallende zeitliche Aufwand bei Produkt- bzw. in diesem Fall Wechsel der Flachbaugruppe verstanden. Als Maß eignen sich die bei Produktwechsel anfallenden Rüstzeiten. Je niedriger die Rüstzeiten bei Produktwechsel gehalten werden können, desto höher ist die Prozeßflexibilität zu bewerten.

Die Maßzahl ist folgendermaßen definiert:

$$fmp = 1 - \frac{\sum_{j=1}^M (fmp_j)}{j}$$

wobei:

$$fmp_j = \frac{\sum_{i=1}^{K_j} afe_i}{fk_j \times K_j}$$

und

fmp :	Quantitatives Maß für Prozeßflexibilität
fmp_j :	Quantitatives Maß für Prozeßflexibilität für Linie j
K_j :	Anzahl unterschiedlicher Flachbaugruppen auf Linie j
afe_i :	Anzahl der benötigten Feedermodule für Produkt i
M :	Anzahl der Linien
fk_j :	Anzahl verfügbarer Modulplätze auf Linie j

Die Idee, die dieser Berechnungsvorschrift zugrundeliegt, ist die Annahme, daß der Umrüstaufwand bei einer wachsenden Anzahl von freien Modulplätzen abnimmt.

Mengenflexibilität

Die Mengenflexibilität ist die Eignung des Produktionssystems größere Stückzahlen zu fertigen. Als charakteristisches Maß bietet sich die erforderliche Bestückleistung der einer Linie zugeordneten Platinen in Relation zu der verfügbaren Bestückleistung an. Die Berechnungsvorschrift ist unten dargestellt. Die Werte beziehen sich auf einen fest vorgegebenen Planungshorizont.

$$fmm = 1 - \frac{\sum_{j=1}^M fmm_j}{M}$$

wobei:

$$fmm_j = \frac{\sum_{i=1}^{K_j} m_{ij} \times bk_{ij}}{lk_j} \quad \forall j = 1, \dots, M$$

fmm :	Flexibilitätsmaßzahl Menge
fmm_j :	Flexibilitätsmaßzahl Menge für Linie j
m_{ij} :	Anzahl der Flachbaugruppen vom Typ i die auf Linie j zu fertigen sind
bk_{ij} :	Bestückdauer von Flachbaugruppe i auf Linie j
K_j :	Anzahl unterschiedlicher Flachbaugruppen auf Linie j
lk_j :	Zur Verfügung stehende Bestückzeit der Linie j

• Flächenbedarf

Gerade bei beengten Raumverhältnissen, wie sie oftmals im Fertigungsbereich anzutreffen sind, kann der Flächenbedarf des geplanten Produktionssystems von großer Bedeutung sein. Die Quantifizierung dieses Faktors bereitet keine Probleme, da die Maßzahl direkt aus dem Flächenverbrauch der einzelnen Komponenten des Bestücksystems berechenbar ist.

- Auslastung des Produktionssystems

Auf Basis der vorgegebenen Produktionsmengen der einzelnen Platinen kann die Dauer, in der das Bestücksystem bzw. die Bestücklinien belastet sind, ermittelt werden. Die Auslastung des Produktionssystems ergibt sich dann als Mittelwert über alle betrachteten Linien. Die Auslastung der einzelnen Bestücklinien wird gemäß VDI-Richtlinie 3423 /100/ ermittelt.

- Rüstzeitanteil

Eine Rüstzeitabschätzung ist zu einer qualifizierten Bestückleistungsberechnung unbedingt erforderlich. Problematisch hierbei sind die aufgrund des frühen Planungszeitpunkts nicht exakt ermittelbaren Randbedingungen. Gerade die operative Planung hat entscheidenden Einfluß auf die anfallenden Rüstzeiten. Zur Abschätzung der Rüstzeiten müssen daher im Rahmen der Arbeit nicht weiter erläuterte Idealisierungen vorgenommen werden.

Schritt 2:

Nach der Festlegung der Bewertungskriterien müssen die Wertefunktionen für die einzelnen Kriterien bestimmt werden. Dem Anwender steht hierzu eine Auswahl von Funktionsgrundformen zur Verfügung. Durch geeignete Parametrierung können diese Funktionen den Anforderungen des Anwenders angepaßt werden (s. Bild 61).

Schritt 3:

Zur Ermittlung der Gewichte wird die Methode von Keeney und Raiffa angewandt /71/. Hierbei werden ausgehend von der, der Bedeutung der Kriterien entsprechenden Reihenfolge der einzelnen Attribute, über die Festlegung der *Indifferenten Äquivalente* zweier Kriterien, die Gewichte bestimmt (vgl. auch /11/) (s. Bild 62). Die Normierung der Wertebereiche der Kriterien auf ein Standardintervall ist bei dieser Methode nicht erforderlich.

Schritt 4:

Gemäß der jeweiligen Berechnungsvorschriften für die zu quantifizierenden Kriterien werden nun, unter Berücksichtigung der Wertefunktionen, die Teilnutzen bestimmt. Ergänzend wird die Einhaltung der *Ko*-Kriterien überprüft.

Zur Ermittlung der Ausprägungen der Kriterien ist die Antizipation der operativen Planung erforderlich. Das heißt, es muß die Zuordnung der zu fertigenden Flachbaugruppen zu den zu bewertenden Linien getroffen werden. Ergänzend muß die Rüstung der Automaten der Linie vorhergesagt werden. Unter Rüstung wird in diesem

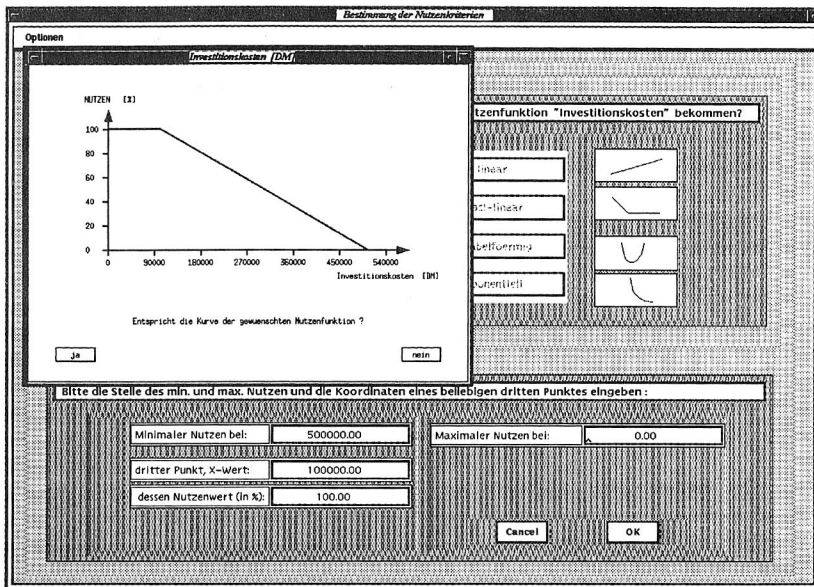


Bild 61: Auswahl der Kriterien und Definition der Wertefunktionen

Zusammenhang die Verteilung der zu bestückenden Bauelemente auf die Automaten einer Linie verstanden. Im Unterschied zur operativen Planung wird diese Aufgabe basierend auf einem vereinfachten Automatenmodell gelöst und die aufgabenimmanenten Optimierungsaspekte /36/ nur in zweiter Linie berücksichtigt.

Dies ist aufgrund der Planungsunsicherheiten bezüglich der zu fertigenden Flachbaugruppen legitim und effizient. Die Genauigkeit der Ergebnisse ist für den Vergleich unterschiedlicher Systemlösungen in dieser frühen Planungsphase ausreichend.

Ein weiterer Aspekt, neben der Bestimmung der Rüstung der Automaten, ist die darauf aufbauende Approximation der Bestückleistung. Mittels eines Zeitmodells, dem für die einzelnen Grundoperationen der Automaten Defaultzeiten zugrundeliegen, wird die Bestückdauer für die einzelnen Flachbaugruppen ermittelt. Als Grundoperationen werden hierfür eingeführt:

- Standardbauelement bestücken
- Optisches Zentrieren
- Koplanarität messen
- Bauelementelagererkennung

Gewichtung der Attribute

Optionen

Mögliche relative Attribute:

Attributliste:

Investitionskosten

Bitte den gewünschten relativen X-Wert eingeben:

Gewichtung der Attribute					
Rang	Attribut	gewünschter X-Wert	relatives Attribut	relativer X-Wert	Gewichtung
1	Investitionskosten	0,000	Nicht Benötigt	0,000	0,800
2	Flächenbedarf	15,0000	Investitionskosten	0,000	0,200

OK

Bild 62: Bestimmung der Kriteriengewichte mittels der Indifferenten Äquivalente

- Leiterplattenlageerkennung
- Sonderbauelement bestücken (Reduzierte Geschwindigkeit)

Mit der Festlegung der Rüstungen des Bestücksystems und der darauf aufbauenden Möglichkeit die Bestückdauer der einzelnen Flachbaugruppen zu ermitteln, sind die Voraussetzungen zur Quantifizierung bzw. Überprüfung aller Kriterien gegeben.

Schritt 5:

Zur Ermittlung des Gesamtnutzens muß die anzuwendende Gesamtnutzenfunktion bestimmt werden. In Abhängigkeit der Art der Nutzenunabhängigkeit der verschiedenen Kriterien (vgl. Abschnitt 6.1) wird die Funktion bestimmt. Die Berechnung des Gesamtnutzens einer Lösungsvariante ist somit abgeschlossen.

Der Vorteil der rechnergestützten Bewertung alternativer Systemlösungen ist die Möglichkeit anhand eines aggregierten Wertes den qualifizierten Vergleich unterschiedlicher Angebote auf der Grundlage sowohl qualitativer, als auch quantitativer Kriterien effizient durchführen zu können. Aufgrund der einfachen Modellierung der Kundenpräferenzen kann auch eine Präferenzsimulation durchgeführt werden. Die Auswirkungen alternativer Kriteriengewichte oder Wertefunktionen können sofort ermittelt werden.

Bei den in den vorangegangenen Kapiteln vorgestellten Methoden zur Unterstützung der Konfigurierung der Bestückssysteme und zum Vergleich von Angebotsalternativen wird die Bestückleistung nur approximiert. In der Regel will der Kunde aber die Bestückleistung für eine von ihm vorgegebene Flachbaugruppe garantiert haben. Im folgenden Kapitel wird daher ein Verfahren zur exakten Bestückleistungsermittlung beschrieben.

7 *Empirische Leistungsanalyse von Bestückssystemen*

In diesem Abschnitt wird die Problematik der exakten Leistungsermittlung für die dem Kunden angebotenen Produktionsressourcen behandelt. Von Interesse ist hierbei, aufgrund der schwierigen Ermittlung primär die Leistung der Bestückautomaten. Das aus diesen Überlegungen heraus entstandene Werkzeug zur Unterstützung der Bestückleistungsermittlung ist ein weiterer Modul des entscheidungsunterstützenden Systems zur Angebotserstellung (ESA).

Einleitend wird die Aufgabenstellung kurz motiviert und anschließend werden die verfügbaren Lösungsansätze näher betrachtet. Darauf aufbauend wird eine versuchsorientierte Methode zur Bestückleistungsanalyse entwickelt und abschließend die Validierung der Methode anhand experimenteller Untersuchungen vorgenommen.

7.1 *Intention der Leistungsanalyse*

Der Kunde fordert in der Regel, daß im Angebot des Herstellers bzw. Vertreibers exakte Leistungsangaben des geplanten Bestücksystems unter Berücksichtigung seiner speziellen Fertigungsaufgaben vorhanden sind. Diese Daten benötigt er, um zum einen die Eignung der Lösung für seine Anforderungen zu bewerten, und zum anderen einen Vergleich verschiedener Hersteller durchführen zu können. Sie sind ein entscheidendes Kriterium für die Auftragserteilung. Der Kunde wird diese Zusagen bezüglich der zu erwartenden Bestückleistung im Falle einer Auftragserteilung in seinem Pflichtenheft festschreiben. Bei der Maschinenabnahme müssen dann die zugesicherten Werte vom Hersteller nachgewiesen werden.

Die vielfältigen Einflüsse auf die Bestückleistung der Produktionsressourcen erschweren die Ermittlung dieses Wertes und machen aufwendige Berechnungen notwendig (s. Bild 63). Rechnergestützte Verfahren bieten sich daher zur Unterstützung der Bearbeitung dieser Aufgabe an. Im nächsten Abschnitt wird ein Überblick über die gebräuchlichen Verfahren mit ihren Vor- und Nachteilen gegeben. Primäres Unterscheidungsmerkmal sind die angewendeten Ansätze zur Modellierung des Verhaltens der Bestücksysteme.

7.2 *Verfahren zur Leistungsermittlung*

Primär gilt es zwischen zwei nachfolgend näher beschriebenen Klassen von Verfahren zu unterscheiden:

- Simulative Verfahren
- Analytische Verfahren

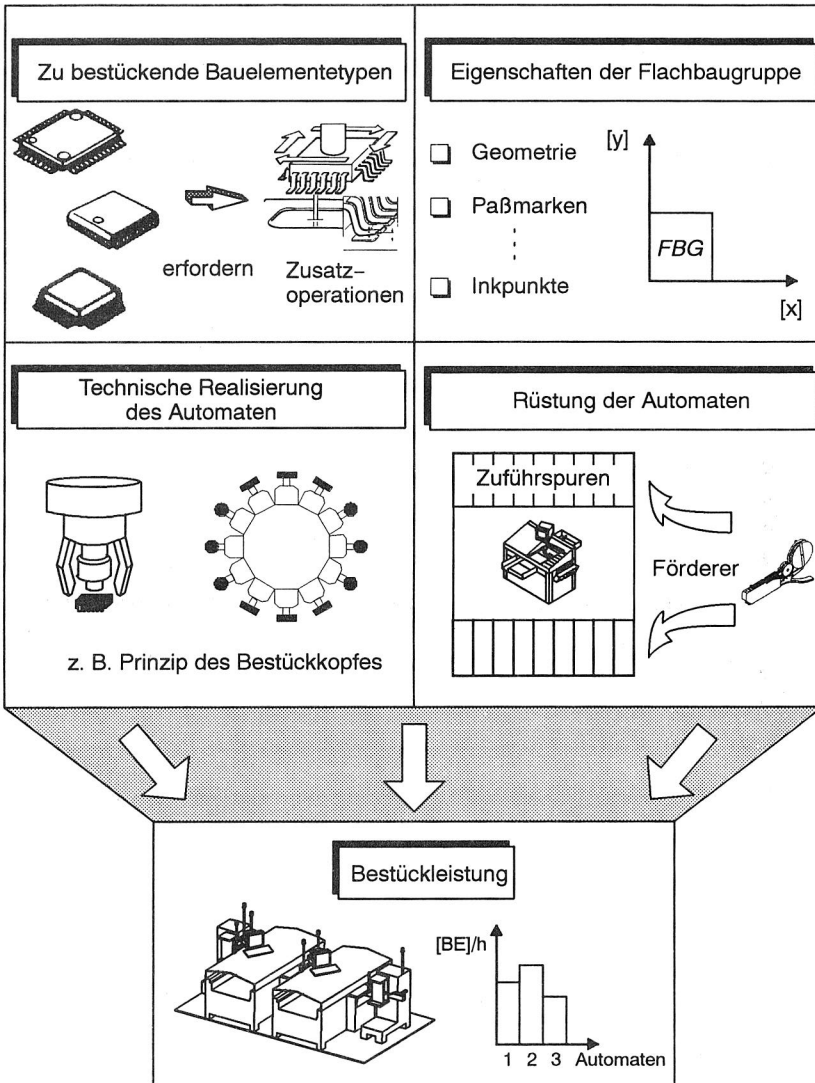


Bild 63: Einflußfaktoren auf die Bestückleistung

Simulative Verfahren

Die Simulationstechnik wird zur Analyse des Verhaltens komplexer Systeme eingesetzt. So findet sie auch bei technischen Aufgabenstellungen ihre Anwendung /146/. Die Vorgehensweise bei der Durchführung einer Simulationsstudie umfaßt zwei zentrale Schritte. Zum einen die Abbildung der realen Welt in einem Modell und zum anderen die Interpretation der bei der Durchführung von Simulationsexperimenten gewonnenen Ergebnisse. Die Experimente werden an dem dafür erstellten Modell durchgeführt.

Angewendet wird die Simulationstechnik bei deterministischen Problemen für die auf Grund ihrer Komplexität keine Standardlösungsverfahren existieren, sowie bei stochastischen Problemstellungen /108/. Anzumerken ist, daß die Simulation kein Optimierungsverfahren ist.

Analytische Verfahren

Im Gegensatz zur Simulation wird bei diesen Verfahren die reale Welt in einer geschlossenen mathematischen Beschreibung abgebildet. Auf dieser Basis können dann die Werte der Lösungsparameter berechnet werden. Für viele Problemstellungen ist diese Vorgehensweise nicht anwendbar, da die Modellierung zu komplex ist. So haben zum Beispiel Verfahren basierend auf der Theorie der Warteschlangen nur geringfügige Bedeutung für die Auslegung von Montagesystemen. Neben der sehr komplexen Modellierung müssen zur Anwendung der Warteschlangentheorie noch zahlreiche vereinfachende Randbedingungen erfüllt werden /78//155/.

Nach dieser einleitenden Betrachtung der grundsätzlichen Verfahrensklassen, die zur Bestückleistungsanalyse zur Verfügung stehen, wird nachfolgend auf die Anwendbarkeit dieser Verfahren speziell für die oben skizzierte Aufgabenstellung und Zielsetzung eingegangen.

Da die vielfältigen Einflußgrößen auf die Bestückleistung einer Produktionsressource in einem analytischen Modell nur schwer abbildbar sind, ist für diese Aufgabe ein simulativer Ansatz sinnvoll. Die existierenden stochastischen Einflüsse auf die Bestückleistung können hierbei in zwei komplementäre Klassen eingeteilt werden:

- Faktoren, die die primäre Maschinenfunktionalität **nicht** beeinflussen
- Faktoren, die die primäre Maschinenfunktionalität beeinflussen

Unter der primären Maschinenfunktionalität eines Bestückautomaten wird die Erfüllung der Bestückaufgabe im Rahmen der Qualitätsanforderungen verstanden. Die Einflußfaktoren der ersten Gruppe spielen für diese Maschinenfunktionalität keine Rolle. Als Beispiel läßt sich die Beschleunigung der Achsen der Automaten anführen. Ergänzend hierzu gibt es die zweite Klasse von Einflußfaktoren, die den ordnungsge-

mäßen Bestückprozeß unterbinden. Unter diese Klasse fallen sämtliche, durch technische Defekte hervorgerufenen Störungen. Zum Beispiel kann der Ausfall eines Feeders eine solche Ursache darstellen.

Bei der Bestimmung der garantierten Bestückleistung spielen die Faktoren der zweiten Gruppe keine Rolle, da der zu bestimmende Wert nur für den störungsfreien Betrieb gilt. Die Faktoren der ersten Gruppe beeinflussen die Bestückleistung, sind also im Rahmen einer Bestückleistungsuntersuchung zu berücksichtigen. Problematisch hierbei sind zwei Punkte. Zum einen sind diese Einflußfaktoren schwierig zu detektieren und zum anderen ist der Modellierungsaufwand sehr hoch.

Der Einsatz analytischer und simulativer Modelle für die Bestückleistungsuntersuchung hat nicht zum Erfolg geführt. Sie ermöglichen lediglich eine sehr grobe Approximation der Leistung. Im Hinblick auf die Ermittlung der im Pflichtenheft garantierten Bestückleistung des angebotenen Produktionssystems bieten sie aber keine Unterstützung. Zwei Gründe sind hierfür primär zu nennen.

Aufgrund der vielfältigen Einflüsse entsteht ein sehr komplexes Modell des Maschinenverhaltens. Eine stärkere Abstraktion und somit die Vereinfachung des Modells lassen die Anforderungen an die Ergebnisgenauigkeit nicht zu. Der entscheidende Nachteil dieser Ansätze ist der extrem hohe Modifikationsaufwand des Modells bei technischen Änderungen der Maschinen. Diese Änderungen treten gerade in einem dynamischen Umfeld, wie es die Elektronikfertigung darstellt, sehr häufig auf. Schon kleine Veränderungen an Einzelkomponenten eines Bestückautomaten können das Bestückverhalten beeinflussen und somit aufwendige Modelländerungen erforderlich machen.

Diese Defizite führen zu dem im nächsten Abschnitt näher beschriebenen versuchsorientierten Ansatz.

7.3 Methode der versuchsorientierten Leistungsermittlung

Primäres Ziel dieser Methode ist es, den Aufwand zur Anpassung der Berechnungssoftware bei technischen Änderungen der betrachteten Ressourcen zu minimieren und trotzdem eine hohe Genauigkeit der ermittelten Werte zu erreichen. Die Grundidee dieser Methode basiert auf folgender Annahme:

Die Bestückdauer einer Flachbaugruppe auf einem Automaten wird ausschließlich durch den Typ des Automaten und durch die Eigenschaften der Flachbaugruppe bestimmt.

Zentraler Ansatzpunkt dieser Methode sind also die Eigenschaften der Flachbaugruppen, wobei nicht alle Merkmale für die Bestückleistungsermittlung relevant sind.

Die Analyse der Funktion der Bestückautomaten, sowie die Auswirkungen der Flachbaugruppeneigenschaften auf das Bestückverhalten führen zur Festlegung der zu berücksichtigenden Eigenschaften. Zum Beispiel wird eine Flachbaugruppe mit vielen *IC*-Baelementen aufgrund der dafür erforderlichen Zentrieroperationen zur Bestückung mehr Zeit benötigen, als eine Flachbaugruppe mit derselben Anzahl von Baelementepositionen, aber überwiegend passiven Baelementen. Die daraus abzuleitende Eigenschaft der Flachbaugruppe ist somit die Anzahl der Baelemente, die eine Zentrierung benötigen. Alle bestückzeitrelevanten Eigenschaften der Flachbaugruppen werden quantifiziert und in einem aggregierten Wert, dem sogenannten Bestückzeitindikator (*BZI*) abgebildet. Die detaillierte Auflistung der zu betrachtenden Eigenschaften folgt nach der näheren Beschreibung der einzelnen Schritte des Verfahrens.

Die Vorgehensweise zur versuchsorientierten Bestückleistungsermittlung ist in Bild 64 dargestellt. Es gilt zwei zentrale Aufgaben zu bearbeiten:

- Ermittlung der Bestückleistungskurve für die verschiedenen Automatentypen, sowie ihrer zu berücksichtigenden Varianten
- Berechnung der Bestückleistung des Produktionssystems für eine gegebene Flachbaugruppe

Nachfolgend wird auf diese zwei Teilaufgaben der Bestückleistungsermittlung im Detail eingegangen.

Ermittlung der Bestückleistungskurven

Grundlegende Aufgabe im Rahmen dieser versuchsorientierten Methode ist die Berechnung der Bestückleistungskurve für jeden verfügbaren Automatentypen. Die Bestückleistungskurve quantifiziert die Relation zwischen dem Wert des Bestückzeitindikators (*BZI*) einer Flachbaugruppe und der zu erwartenden Bestückzeit für diese Flachbaugruppe auf diesem Automatentyp. Die hierbei durchzuführenden Teilaufgaben sind:

1. Referenzleiterplatten definieren
2. Bestückzeitindikator für Referenzleiterplatten berechnen
3. Referenzleiterplatten bestücken und Bestückdauer ermitteln
4. Ermittlung der Bestückleistungskurve durch Interpolation

Im ersten Schritt müssen sogenannte Referenzleiterplatten definiert werden. Bei den Referenzleiterplatten handelt es sich um Flachbaugruppen, die entweder auf einem oder auf mehreren Stationstypen fertigbar sind. Das heißt, es existiert eine Menge

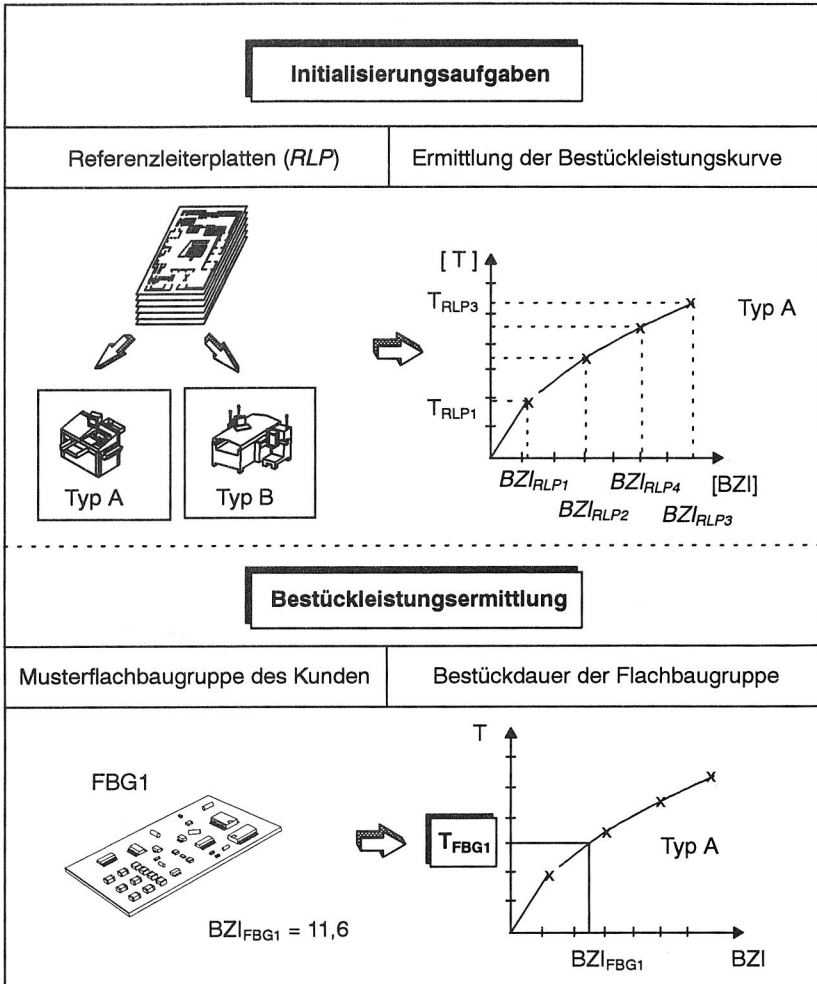


Bild 64: Methode der Bestückleistungsermittlung

von Platinen für alle verfügbaren Automatentypen, wobei einzelne Flachbaugruppen nicht für alle Automatentypen geeignet sind. Bei der Bestimmung der Bestückleistungskurve eines bestimmten Stationstyps werden nun aus der Menge der Referenzplatinen, die für diesen Stationstyp adäquaten Flachbaugruppen ausgewählt.

Beim Entwurf der Referenzplatinen ist darauf zu achten, daß zur Bestückung dieser Leiterplatten auch sämtliche Funktionen der Automaten benötigt werden. Nur dann

ist gewährleistet, daß die bestückzeitrelevanten Einflüsse sich auch in der ermittelten Bestückleistungskurve wiederfinden.

Im nächsten Schritt werden die Bestückzeitindikatoren der Referenzleiterplatten berechnet. Der *BZI* hat folgende Berechnungsvorschrift:

$$BZI = \frac{g_1}{n_1} \times FL + \frac{g_2}{n_2} \times DI + \frac{g_3}{n_3} \times UT + \frac{g_4}{n_4} \times PA + \frac{g_5}{n_5} \times KO + \frac{g_6}{n_6} \times PI \\ + \frac{g_7}{n_7} \times AD + \frac{g_8}{n_8} \times ZE + \frac{g_9}{n_9} \times BP$$

wobei:

$$\sum_{i=1}^9 g_i = 1 \quad \text{und} \quad g_i \in [0..1]$$

<i>FL</i> :	Fläche der Leiterplatte
<i>DI</i> :	Mittlerer Abstand zwischen zwei Bestückpositionen
<i>UT</i> :	Anzahl unterschiedlicher Bauelementtypen
<i>PA</i> :	Anzahl Paßmarken auf der Leiterplatte
<i>ZE</i> :	Anzahl der Zentrierungen
<i>KO</i> :	Anzahl Koplanaritätsmessungen
<i>PI</i> :	Anzahl verschiedener Pipettentypen
<i>AD</i> :	Anzahl unterschiedlicher Adaptertypen
<i>BP</i> :	Anzahl der Bestückpositionen der Flachbaugruppe

Die Gewichte g_i der einzelnen Faktoren des Bestückzeitindikators ermöglichen die Adaption der Berechnungsvorschrift an die speziellen Eigenschaften der unterschiedlichen Automatentypen. Die Festlegung der Werte erfolgt empirisch. Die Wertebereiche der zu berücksichtigenden Faktoren müssen, um einer impliziten Gewichtung vorzubeugen, normiert werden. Hierzu dienen die Normierungsfaktoren n_i , die jeweils dem größten Wert den der Faktor i bei der Berechnung der *BZI* für die Referenzleiterplatten annimmt, entsprechen.

Im nächsten Schritt werden nun die für den betrachteten Stationstyp ausgewählten Referenzleiterplatten bestückt und die benötigte Bestückdauer gemessen. Die Ausrüstung des Automaten erfolgt gemäß der bekannten Optimalitätskriterien /36/. Daran anschließend wird aus den ermittelten Wertepaaren der Flachbaugruppen (*BZI*, Bestückdauer) mittels Interpolation die Bestückleistungskurve berechnet (s. Bild 64 und Bild 65).

Nachfolgend werden die Vor- und Nachteile der einzelnen Interpolationsverfahren aufgezeigt und deren Eignung für den Anwendungsfall überprüft. Die Verfahren lassen sich in vier Untergruppen unterteilen:

Bestueckleistungskurven

Daten

Ermittlung der Bestueckleistungskurve fuer die verschiedenen Automatentypen

Auswahl des Automatentypen:

- Bestueckautomat HS180HR
- Bestueckautomat MS-102
- Bestueckautomat MS-132
- Bestueckautomat SIPLACE-80S
- SIPLACE-1000-1000

Auswahl der Referenzleiterplatten:

Referenzleiterplatte: 0000

001-Entwurf: 0000

002-Entwurf: 0000

003-Entwurf: 0000

004-Entwurf: 0000

005-Entwurf: 0000

>> hinzufügen >>

<< entfernen <<

Referenzleiterplatte: 0000

001-Entwurf: 0000

002-Entwurf: 0000

003-Entwurf: 0000

004-Entwurf: 0000

005-Entwurf: 0000

Gewichte zur Berechnung des Bestueckzeitindikators:

Flaeche: 0.500

Dichte der Bestueckpositionen: 0.500

Anzahl der Bestueckpositionen: 0.500

Anzahl unterschiedlicher Bestueckpositionen: 0.500

Anzahl der Passmarken: 0.500

Anzahl der Koplanaritaeten: 0.500

Anzahl der Zentrierungen: 0.500

Anzahl verschiedener Pip: 0.500

Anzahl unterschiedlicher Bestueckpositionen: 0.500

INGRES/WindowsGL

Bitte geben Sie die Bestueckzeit fuer die Leiterplatte ZSK_5010100_1 in Sekunden ein:

412

OK

Bild 65: Ermittlung der Bestueckleistungskurve

- Interpolation durch Polynome
- Interpolation mit rationalen Funktionen
- Trigonometrische Interpolation
- Spline – Interpolation

In den einzelnen Verfahrensklassen gibt es unterschiedliche, je nach Aufgabenstellung anwendbare Algorithmen. Die Auswahl der adäquaten Verfahrensklasse, sowie des optimalen Algorithmus, wird durch die speziellen Anforderungen der Aufgabenstellung und die spezifischen Eigenschaften der einzelnen Verfahren bestimmt.

Bei der Interpolation durch Polynome hängt die Güte des Ergebnisses stark von der Verteilung der Stützpunkte über dem Interpolationsintervall ab. Vor allem an den

Randbereichen des betrachteten Intervalls müssen die Stützstellen enger beieinander liegen. Diese Eigenschaft stellt zusätzliche Anforderungen an den Entwurf bzw. die Auswahl der Referenzplatinen.

Die Interpolation mit rationalen Funktionen liefert bessere Ergebnisse als die Polynominterpolation, wenn die zu approximierende Funktion Polstellen oder eine schiefe bzw. horizontale Asymptote aufweist. Nachteil des Verfahrens ist, daß die Interpolationsaufgabe nicht immer gelöst werden kann.

Bei der trigonometrischen Interpolation wird ein Polynom $p(x)$ der Gestalt

$$p(x) := \beta_0 + \beta_1 e^{xi} + \beta_2 e^{2xi} + \dots + \beta_{N-1} e^{(N-1)xi}$$

mit β_j komplex zur Approximierung der gesuchten Funktion ermittelt. Diese Variante der Interpolation findet zum Beispiel bei der näherungsweise Berechnung von Fourierkoeffizienten mittels Abminderungsfaktoren seine Anwendung /137/.

Bei der Spline – Interpolation werden die Stützstellen durch eine relativ glatte Kurve verbunden. Daher findet diese Interpolationsmethode auch ihre Anwendung bei der Bahnplanung für Roboter /133/. Das Interpolationsintervall wird in einzelne Teilbereiche zerlegt und für jedes Teilintervall wird ein entsprechendes Polynom bestimmt. Diese Polynome gehorchen bestimmten Übergangsbedingungen. Die aus den einzelnen Polynomen zusammengesetzte Funktion wird als Spline – Funktion bezeichnet. Sind die Polynome der Teilintervalle 3. Ordnung, so spricht man von *kubischen Splines*. *Kubische Splines* haben die Konvergenzeigenschaft, das heißt bei einer immer weitergehenden Verfeinerung der Teilintervalle konvergiert die Spline – Funktion gegen die gesuchte Funktion.

Die Bewertung der verschiedenen Interpolationsverfahren, unter Berücksichtigung der speziellen Anforderungen des betrachteten Anwendungsfalles, führt zu dem Ergebnis, daß nur die Interpolation durch Polynome, insbesondere die Spline–Interpolation für die Aufgabenstellung geeignet ist.

Berechnung der Bestückleistung

Soll nun für eine gegebene Flachbaugruppe die Bestückleistung des geplanten Produktionssystems ermittelt werden, müssen zwei unterschiedliche Fälle betrachtet werden:

- Bestückung der Leiterplatte auf einer Standalone Maschine
- Bestückung der Leiterplatte auf einer Linie

Bei der Bestückung auf einer Standalone Maschine ist die Ermittlung der zu erwartenden Bestückdauer sehr einfach. Für die Flachbaugruppe wird der entsprechende

Bestückzeitindikator berechnet, und in der Bestückleistungskurve die korrespondierende Bestückdauer abgelesen (s. Bild 64). Die gesuchte Bestückleistung der betrachteten Produktionsressource kann nun mit der folgenden Berechnungsvorschrift ermittelt werden. Sie wird in der Einheit "Anzahl der bestückten Bauelemente pro Stunde" angegeben.

$$BL_R^{FBG} = \frac{3600}{BD_R^{FBG}} \times AB_{FBG}$$

wobei:

BL_R^{FBG} : Bestückleistung der Ressource R für Flachbaugruppe FBG

BD_{FBG}^R : Bestückdauer der Flachbaugruppe FBG auf Ressource R

AB_{FBG} : Anzahl der Bauelemente auf der Flachbaugruppe FBG

Die Angabe der Bestückleistung einer Ressource ist immer nur im Zusammenhang mit der Produktionsaufgabe sinnvoll. Denn gerade die Auswahl der Bauelementtypen der Flachbaugruppen beeinflusst die zu erwartende Bestückleistung.

Der zweite Fall, die Ermittlung der Bestückleistung einer Bestücklinie für eine gegebene Flachbaugruppe, ist etwas komplexer. Bild 66 zeigt den Ablauf in diesem Fall. Im ersten Schritt müssen die Bestückpositionen der Flachbaugruppe auf die einzelnen Bestückstationen der Linie verteilt werden. Die Verteilung der Bauelemente ist für die realisierbare Bestückleistung von äußerster Bedeutung. Die erzielbare Taktzeit in einer starr verketteten Linie wird durch die langsamste Station in der Linie bestimmt. Daher muß auf eine gleichmäßige Auslastung der einzelnen Stationen der Linie unbedingt geachtet werden /34/. Desweiteren muß festgestellt werden, welche Paßmarken für die einzelnen Stationen relevant sind. Die Paßmarken zur Leiterplattenlageerkennung sind für alle Stationen gleichermaßen von Bedeutung. Die Paßmarken für die Bauelementelageerkennung sind aber vom Bauelementtyp abhängig und somit kann sich die zu betrachtende Anzahl von Station zu Station unterscheiden.

Anschließend wird nun die Bestückdauer BD_{FBG}^i der Flachbaugruppe auf jeder Station i ermittelt. Hierzu werden die zuvor bestimmten Bestückleistungskurven herangezogen. Die Berechnung der Bestückleistung erfolgt dann gemäß nachfolgender Formel:

$$BL_L^{FBG} = \frac{3600}{\max_i (BD_{FBG}^i)} \times AB_{FBG}$$

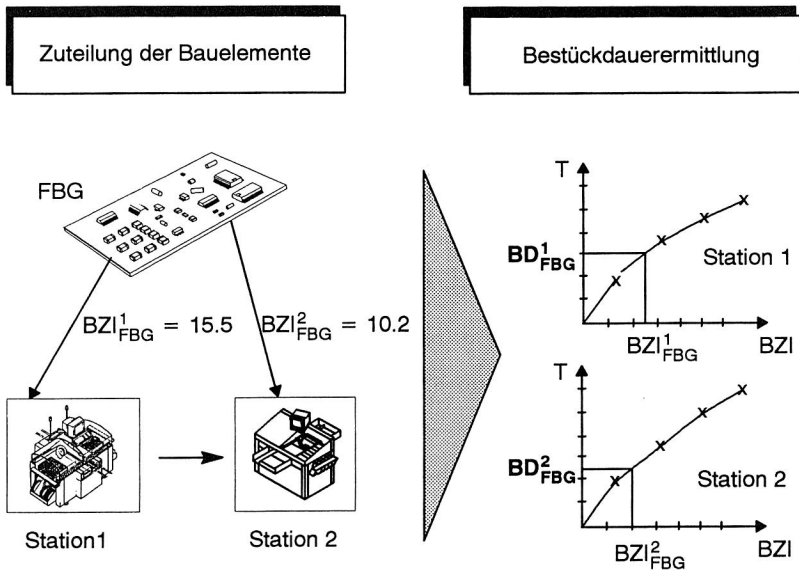


Bild 66: Bestückleistung einer Bestücklinie

wobei:

BD_{LP}^i : Bestückdauer der Flachbaugruppe FBG auf der Station i der Linie L

Die anderen Variablen sind oben bereits näher erläutert worden. Mit dem beschriebenen Verfahren steht nun eine leistungsfähige Methode zur Bestückleistungsanalyse zur Verfügung. Dem Kunden kann somit für von ihm vorgegebene Flachbaugruppen eine exakte Leistungsaussage für das angebotene Bestücksystem gemacht werden. Der Vorteil des Verfahrens liegt primär im vergleichsweise geringen Modellierungsaufwand und der einfachen Anpaßbarkeit bei Änderungen der zu betrachtenden Bestückautomaten. Im nächsten Abschnitt wird die Qualität des Verfahrens anhand eines entsprechenden Versuchs bestimmt.

7.4 Validierung der Methode

Zur Bewertung der Methode wird eine exemplarische Untersuchung durchgeführt. 3 verschiedene Flachbaugruppen werden auf einer Bestücklinie mit zwei identischen Automaten bestückt und die anfallenden Bestückzeiten gemessen (s. Tabelle 1). Die in Tabelle 1 eingetragenen Zeiten entsprechen dem arithmetischen Mittel von 50 Meßwerten.

Flachbaugruppe	Bestückdauer [sec] Station1	Bestückdauer [sec] Station 2
EWK_5021L04	241	254
HAK2_7061L01	123	135
HLM_9584L02	165	110

Tabelle 1: Gemessene Bestückdauern der Flachbaugruppen

Zur Bestimmung der Bestückleistungskurve des in der Linie vorhandenen Automaten-
typs werden vier Referenzplatinen bestückt und die jeweilige Bestückdauer ge-
messen (s. Tabelle 2). Auch hier ist die Bestückdauer der Mittelwert aus 50 Meßwer-
ten.

Referenzplatine	Bestückdauer [sec]	BZI
FCK_5215L02_R1	77	70,8
EAM_1011L02_R1	110	108,6
EWK_5022L00_R1	260	185,3
ZSK_5010L00_R2	395	260,0

Tabelle 2: Gemessene Bestückdauer der Referenzleiterplatten

Basierend auf den Bestückzeitindikatoren und den gemessenen Bestückdauern (s.
Tabelle 2) läßt sich die in Bild 67 dargestellte Bestückleistungskurve für den Automa-
tentypen berechnen.

Auf dieser Grundlage kann nun die Bestückleistung beliebiger zu fertigender Flach-
baugruppen bestimmt werden. In Tabelle 3 wird für drei Flachbaugruppen die be-
rechnete, der empirisch ermittelten Bestückleistung gegenübergestellt (vgl. auch
Bild 68).

Flachbaugruppe	Berechnete Bestückleistung	Gemessene Bestückleistung
EWK_5021L04	10416	10729
HLM_9584L02	7101	7461
HAK2_7061L01	10125	10400

*Tabelle 3: Gegenüberstellung der gemessenen und berechneten Bestück-
leistung*

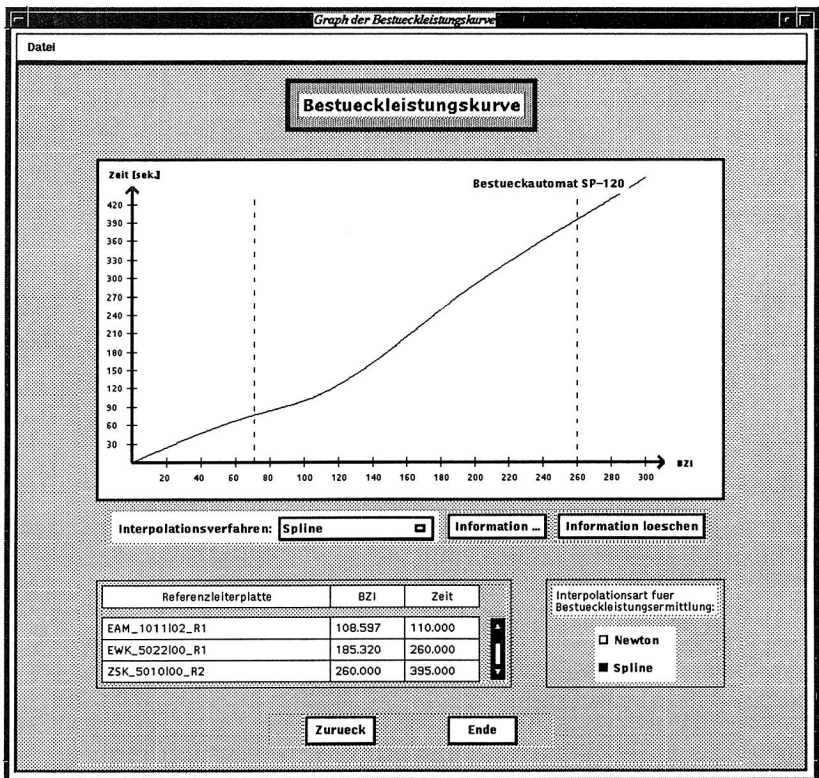


Bild 67: Bestueckleistungskurve für den zu betrachtenden Automatentyp

Die Abweichungen der berechneten von der tatsächlichen Bestueckleistung liegen bei den drei verwendeten Flachbaugruppen unter fünf Prozent, Diese Genauigkeit ist für den Anwendungsfall ausreichend und bestätigt exemplarisch die Leistungsfähigkeit der Methode. Auf die Grenzen des Verfahrens wird im nächsten Abschnitt eingegangen.

Grenzen des Verfahrens

Technische Änderungen der Automaten haben in der Regel keinen Einfluß auf das Berechnungsverfahren. Wird ein neues technisches Feature, das Auswirkungen auf die Bestueckleistung der Automaten hat, eingeführt, so ist dies unproblematisch solange eine im Bestueckzeitindikator berücksichtigte Eigenschaft der Flachbaugruppen

Ergebnisdarstellung

Datel

Ergebnis der Bestueckleistungsermittlung

Bestuecklinie: Rennerlinie

Bestueckautomaten und Bestueckzeiten:

Bestueckautomat	Bestueckzeit [s]
Bestueckautomat SP-120	253
Bestueckautomat SP-120	262

Flachbaugruppe: EWK_5021L04

Seite der Flachbaugruppe: oben

Bestueckleistung: 10416 Bauelemente in der Stunde

Ende Zurück

Bild 68: Ermittlung der Bestückerleistung für eine bestimmte Flachbaugruppe

pen die Nutzung dieses Features quantifiziert. Ist dies nicht der Fall, muß die Berechnungsvorschrift des BZI durch Aufnahme einer neuen Eigenschaft angepaßt werden. Erhalten die Automaten neue bestückzeitrelevante Komponenten, deren Einflüsse auf die Bestückzeit sich nicht aus den Eigenschaften der Flachbaugruppen ableiten lassen, scheitert das Verfahren.

Die Auswahl der Referenzplatten hat ebenso einen Einfluß auf die Ergebnishüte. Es ist eine möglichst gleichmäßige Verteilung der Stützstellen der Kurve auf der Abszisse anzustreben.

8 Zusammenfassung

Die Effizienz der Angebotsbearbeitung bei Herstellern von komplexen, erklärungsbedürftigen Investitionsgütern ist ein wichtiger Wettbewerbsfaktor. Die Effektivität wird in diesem Kontext durch die Ausprägung der Merkmale Qualität, Kosten und Dauer der Angebotsbearbeitung ausgedrückt. Diese Kriterien haben maßgeblichen Einfluß auf die Wettbewerbsfähigkeit des Anbieters am Markt. Daher muß der Optimierung der Angebotsbearbeitung im Sinne der oben aufgeführten Zielkriterien große Aufmerksamkeit geschenkt werden.

Im Rahmen der Arbeit wird ein rechnergestütztes, integriertes System zur Angebotsbearbeitung vorgestellt, das die wesentlichen Aspekte der Angebotsbearbeitung unterstützt und damit zur rationelleren Abwicklung der einzelnen Aufgaben beiträgt. Im Mittelpunkt des Systems steht ein Werkzeug, das zur Ermittlung der technischen Problemlösung eingesetzt wird. Diesem Programm liegt ein wissensbasierter Ansatz zugrunde.

Am Beginn der Arbeit werden die Anforderungen an ein integriertes System zur Angebotsbearbeitung ermittelt. Dies geschieht zum einen basierend auf den verschiedenen Aufgaben und zum anderen aufgrund der ermittelten Ziele und Defizite der technischen Angebotsbearbeitung bei Herstellern von komplexen Investitionsgütern. Insbesondere werden hier Spezifika der Hersteller von Produktionssystemen für die Flachbaugruppenfertigung berücksichtigt. Zusätzlichen Einfluß auf die Anforderungen hat die Stellung der Angebotsbearbeitung in der Unternehmensorganisation.

Im Anschluß an die Anforderungsspezifikation werden die einzelnen Aufgaben, die durch das *Entscheidungsunterstützende System zur Angebotsbearbeitung (ESA)* unterstützt werden, identifiziert. Daraus wird das Konzept des Gesamtsystems sowie die Funktionalität der einzelnen Programmodule abgeleitet. Drei zentrale Ansatzpunkte der Entscheidungsunterstützung werden definiert:

- Konfigurierung des Angebots
- Bewertung alternativer Angebote
- Ermittlung technischer Kennwerte für die Maschinenabnahme

Der erste Punkt, die Konfigurierung des Angebots, ist mit der Ermittlung der technischen Problemlösung gleichzusetzen. Bei der Realisierung wird auf wissensbasierte Methoden zurückgegriffen. Gerade das Wissen über technisch mögliche und für spezielle Anforderungen sinnvolle Lösungen ist in der Regel in einem Unternehmen auf mehrere Wissensquellen verteilt und daher zumeist nur partiell verfügbar. Die Abbildung des Wissens in einer Wissensbasis sowie die Implementierung adäquater Problemlösungsmethoden können dieses Dilemma beheben und den Konfigurierungs-

prozeß hinsichtlich des Ressourcenverbrauchs und der Qualität des Ergebnisses verbessern. Der Konfigurator hat stark interaktiven Charakter und ermöglicht somit dem Anwender eigenes Wissen in den Konfigurierungsprozeß einzubringen. Auf der Basis systemgenerierter Konfigurationsvorschläge, die primär die technischen Anforderungen des Kunden berücksichtigen, kann der Anwender adäquate Lösungen entwickeln.

Zur Bewertung der Eignung eines Angebots für einen Kunden müssen aber neben den Kriterien, die ausschließlich die Erfüllung der Produktionsaufgabe sicherstellen, weitere Entscheidungskriterien des Kunden berücksichtigt werden. Hierzu ist die Modellierung der kundenspezifischen Präferenzen erforderlich. Ein auf der Nutzentheorie basierender Ansatz wird als Grundlage für die rechnergestützte Bewertung von Angebotsvarianten angewendet.

Eine weitere Aufgabe im Rahmen der Angebotserstellung ist die Ermittlung bestimmter technischer Kennwerte des angebotenen Produktionssystems. Der Kunde fordert in der Regel für eine von ihm vorgegebene Flachbaugruppe eine Aussage bezüglich der zu erwartenden Bestückleistung. Diese Leistung wird vom Hersteller garantiert und muß bei der Maschinenabnahme erreicht werden. Zur exakten Ermittlung der Bestückleistung bedarf es des Rechnereinsatzes. Hierzu wird ein auf einer versuchsorientierten Methode basierendes Werkzeug vorgestellt. Der Vorteil des zugrundeliegenden Verfahrens ist der vergleichsweise geringe Modellierungsaufwand sowie der geringe Aufwand bei technischen Änderungen der Produkte.

Die vorgestellten Methoden und Verfahren sowie deren Integration in ein rechnergestütztes Angebotsplanungssystem unterstützen den Prozeß der Angebotsbearbeitung. Verbesserungen treten bei der Angebotsqualität, der Dauer der Angebotsbearbeitung und somit bei den anfallenden Kosten zur Angebotserstellung auf. Zur Ausschöpfung weiterer, im Bereich der Angebotsbearbeitung vorhandener Rationalisierungspotentiale, bedarf es der Integration von Konzepten des Workflowmanagements /118/. Denn gerade an der Erstellung von Angeboten sind verschiedene Personen an verschiedenen Orten des Unternehmens beteiligt.

9 **Literatur**

- /1/ Barker, V. E.; O'Connor, D. E.
Expert Systems for Configuration at Digital: XCON and Beyond.
in: Communications of ACM, 32, Nr. 3, S. 298–318, 1989
- /2/ Bauer, C.-O.
Qualitätselement Angebotsbearbeitung
In: VDI Berichte 1052, S. 69–89
Düsseldorf: VDI-Verlag 1993
- /3/ Beichter, S.
Rechnergestützte Technische Problemlösung bei der Angebotserstellung von
Flexiblen Drehzellen.
Karlsruhe: Dissertation 1991
- /4/ Biundo, S. et al.
Planen und Konfigurieren.
In: Einführung in die Künstliche Intelligenz. (Hrsg) Görz, G., S. 767–828
Amsterdam u.a.: Addison-Wesley 1993
- /5/ Boley, H.
A Relational/ Functional Language and its Compilation of Technical Know-
ledge
In: SEKI-Report SR-90-05, S., Universität Kaiserslautern, 1990
- /6/ Bonissone, P.; Ayub, S.
Similarity Measures for Case-Based Reasoning Systems.
In: IPMU'92-Advanced Methods in AI, (Hrsg) Bouchon-Meunier, B. et al.
S.161–172
Heidelberg, Berlin: Springer 1993
- /7/ Booch, G.
Object Oriented Design with Applications.
Redwood City: Benjamin Cummings, 1991
- /8/ Brinkop, A.; Laudwein, N.
Configuration of Industrial Mixing-Machines – Development of an Know-
ledge-Based System.
In: Proc. of IEA/AIE-92, S. 431–440
Heidelberg, Berlin: Springer 1992
- /9/ Bub, T.; Jacobi, U.
Das Prinzip heißt "Einbettung, nicht Reorganisation"
In: KI 1/1993, S. 57–60, 1993

-
- /10/ Busch, R.
Operations–Research–Modelle und Expertensysteme als Wissensmodule intelligenter Decision–Support–Systeme.
In: Operations Research und Wissensbasierte Systeme. (Hrsg.) Busch, R., S.1–25
Berlin, Heidelberg: Springer 1991
- /11/ Canada, J. R.; Sullivan, W. G.
Economic and Multiattribute Evaluation of Advanced Manufacturing Systems.
Englewood Cliffs: Prentice–Hall 1989
- /12/ Chandrasekaran, B.
Towards a functional Architecture for Intelligence Bases on Generic Information Processing Tasks.
In: IJCAI–87, S. 1183–1192, 1987
- /13/ Chandrasekaran, B.
Design Problem Solving: A Task Analysis.
In: AI Magazine , S. 59–71, Winter 1990
- /14/ Chitta, A. et al.
A Decision Support System for Process Planning.
In: Computers in Industry 14, S. 307–318, 1990
- /15/ Clancey, W. J.; Bock, C.
Representing Control Knowledge as Abstract Task and Metarules.
Report Stanford No. STAN_CS–87–1168, 1987
- /16/ Connell, N.; Powell, P.
A Comparison of Potential Applications of Expert Systems and Decision Support Systems.
In: J. of the Operational Research Society Vol. 41, No. 5, S.431–439, 1990
- /17/ Coyne, R. D.
Knowledge Based Design Systems.
Amsterdam: Addison Wesley 1990
- /18/ Cunis, R. et al.
Das PLAKON–Buch
Berlin, Heidelberg: Springer 1991
- /19/ Cunis, R.
Modellierung technischer Systeme in der Begriffshierarchie.
In: Das PLAKON–Buch, (Hrsg.) Cunis, R. et al., S. 58–76,
Berlin, Heidelberg: Springer 1991

-
- /20/ Cunis, R.; Günter, A.
Flexible Control in Expert Systems for Construction Tasks.
In: Journal of Applied Intelligence 2, S. 369–385, 1992
- /21/ Dallery, Y.; Frein, Y.
An efficient Method to determine the optimal Configuratiojn of a Flexible Manufacturing System.
In: Annals of Operations Research 15, S. 207–225, 1988
- /22/ Davis, R.
Applications of Meta-Knowledge to the Construction, Maintenance and Use of Large Knowledge Bases.
In: Knowledge Based Systems in AI
New York u.a.: McGraw Hill 1982
- /23/ De Kleer, J.
An Assumption-Based TMS.
In: Artificial Intelligence 28, S. 127–162, 1986
- /24/ Deutschländer, A.
Integrierte rechnerunterstützte Montageplanung.
München, Wien: Carl Hanser Verlag 1989
- /25/ Dewan, R.
An economic perspective on the usefulness of decision support systems.
In: Decision Support Systems 8, S. 293–305, 1992
- /26/ Dörner, H.
Modelle für wissensbasiertes Konfigurieren.
Halle (Saale): Habilitation 1991
- /27/ Doyle, J.
A Truth Maintenance System.
In: Artificial Intelligence 12, S. 231–272, 1979
- /28/ Edwards, J.
Expert Systems in management and administration – Are they really different from Decision Support Systems.
In: European Journal of Operational Research 61, S.114–121, 1992
- /29/ Engelmores, E.; Morgan, T.
Blackboard Systems.
Amsterdam: Addison-Wesley 1988
- /30/ Evans, G.
An Overview of Techniques for Solving Multiobjective Mathematical Programs.
In: Management Science Vol. 30, No. 11, S. 1268–1282, 1984

- /31/ Eversheim, W. et al.
Rechnerunterstützter Vertrieb auf Basis einer Produktstruktur.
In: *ZwF/CIM* 88, 7–8, S.327–329, 1993
- /32/ Eversheim, W.; Katzy, R.
Wege zur kundenorientierten Angebotserstellung.
In: *VDI-Z* 135, 6, S. 78–81, 1993
- /33/ Feldmann, K. et al.
MOPLAN: Entwurf eines Expertensystems zur Planung von Montageanlagen.
In: *Beiträge zum 1. Workshop Planen und Konfigurieren*, S. 133–146, Karlsruhe 1987
- /34/ Feldmann, K. et al.
Optimale Rüst- und Umrüststrategien steigern die Produktivität.
In: *Leiterplattentechnik*, S. 46–50. Mai 1992
- /35/ Feldmann, K; Koch, M.
Optimierungsbasiertes Konfigurieren unter besonderer Berücksichtigung von Präferenzmodellen.
In: *Beiträge zum 8. Workshop Planen und Konfigurieren*, (Hrsg.) Bergmann, R. et al., S. 46–58, Kaiserslautern, 1994
- /36/ Feldmann, K; Roth, N.
Optimization of Set-up Strategies for Operating Automated SMT Assembly Lines.
In: *Annals of the CIRP*, Vol 40/1, s. 433–436, 1991
- /37/ Feldmann, K.; Ehmman, B.
Flexible Produktionssysteme für innovative Elektronik.
In: *Tagungsband zur Fachtagung Productronica 93*, 1993
- /38/ Fishburn, P.
A Survey of Multiattribute/ Multicriterion Evaluation Theories.
In: *Multiple Criteria Problem Solving*, (Hrsg.) Zionts, S. 181–223
Berlin, Heidelberg: Springer 1977
- /39/ Flohr, R.
Beitrag zur optimalen Verbindungstechnik in der Oberflächenmontage (SMT)
München, Wien: Carl Hanser Verlag, zgl. Dissertation 1991
- /40/ Floss, P.; Tavalage, J.
A Knowledge-based Design Assistant for Intelligent Manufacturing Systems.
In: *Journal of Manufacturing Systems* 9, 2, S.87–102, 1990
- /41/ Friedrich, C.; Posthoff, C.
Default-Reasoning ohne Belief Revision.
In: *Wiss. Zeitung der TU Chemnitz*, 33, Nr. 2/3, S. 285–299, 1991

-
- /42/ Ganghoff, P.
Wissensbasierte Unterstützung der Planung technischer Systeme.
Karlsruhe: Dissertation 1993
- /43/ Gero, J.
Design Prototypes: A Knowledge Representation Schema for Design.
In: AI – Magazine, S. 26–36, Winter 1990
- /44/ Geyer, G.
Entwicklung problemspezifischer Verfahrensketten in der Montage.
Erlangen: Carl Hanser Verlag, zgl. Dissertation 1991
- /45/ Goldschlager, L.; Lister A.
Informatik. Eine moderne Einführung.
München, Wien: Carl Hanser Verlag 1984
- /46/ Gottinger, H.; Weimann, P.
Intelligent decision support systems.
In: Decision Support Systems 8, S. 317–332, 1992
- /47/ Grabowski, H.
Ein System zur Technischen Angebotsplanung in Unternehmen mit auftrags-
gebundener Fertigung.
Aachen: Dissertation 1972
- /48/ Günter, A.
Flexible Kontrolle in Expertensystemen zur Planung und Konfigurierung in
technischen Domänen.
Sankt Augustin: Infix Verlag 1992
- /49/ Günter, A. et al.
Das Projekt PROKON: Problemspezifische Werkzeuge für die wissensba-
sierte Konfigurierung.
PROKON Bericht Nr. 1, 1991
- /50/ Günter, A.
Begriffshierarchie-orientierte Kontrolle
In: Das PLAKON-Buch. (Hrsg.) Cunis, R. et al., S. 92–110,
Berlin, Heidelberg: Springer 1991
- /51/ Günter, A.; Pfitzner, K.
Fallbasiertes konstruieren mit Bibliothekslösungen.
In: Das PLAKON-Buch. (Hrsg.) Cunis, R. et al., S. 131–144,
Berlin, Heidelberg: Springer 1991
- /52/ Günter, A.
Verfahren zur Auflösung von Konfigurationskonflikten in Expertensystemen.
In: KI 1/93, S. 16–23, 1993

- /53/ Güsgen, W.
CONSAT: A System for Constraint Satisfaction.
Heidelberg, Berlin: Springer 1989
- /54/ Haag, A.; Hammer, W.
Erfahrungen mit einer ATMS-basierten Problemlösung bei der interaktiven Konfigurierung von CNC-Steuerungen.
In: Beiträge zum 4. Workshop Planen und Konfigurieren, (Hrsg.) Kratz, N. et al., S. 89–99,
Ulm: 1990
- /55/ Harmon, P.
How DEC is living with XCON.
In: Expert System Strategies, Vol. 5 No. 12, S.1–5, 1989
- /56/ Hayes-Roth, F. et al.
Building Expert Systems
Amsterdam: Addison-Wesley 1983
- /57/ Harmon, P.; King, D.
Creating Expert Systems for Business and Industry
New York: John Wiley & Sons 1990
- /58/ Hein, M.
Effizientes Lösen von Konfigurierungsaufgaben.
Berlin: Dissertation 1991
- /59/ Hein, M.; Tank, W.
Einordnung der Konfigurationsaufgabe in die Welt der Design-Probleme.
In: Beiträge zum 4. Workshop Planen und Konfigurieren, (Hrsg.) Kratz et al., S. 171–178, 1990
- /60/ Heinrich, M.
Ressourcen-orientierte Modellierung als Basis modularer technischer Systeme.
In: Beiträge zum 5. Workshop Planen und Konfigurieren, (Hrsg.) Günter, A. et al., S. 61–74, 1991
- /61/ Hermann, G. et al.
Handbuch der Leiterplattentechnik, Band 3
Saulgau: Leuze 1993
- /62/ Hertzberg; J.
Planen: Einführung in die Planerstellungsmethoden der Künstlichen Intelligenz.
Mannheim u.a.: BI Wissenschaftsverlag 1989

- /63/ Hölzler, E.
Qualitäts- und Effizienzsteigerung durch EDV-Einsatz bei der Angebotserstellung.
In: VDI Berichte 1052, S. 53–67
Düsseldorf: VDI-Verlag 1993
- /64/ Holsapple, C.; Whinston, A.
Decision Support Systems: Theory and Applications.
Berlin, Heidelberg: Springer 1987
- /65/ Horz, A.; Weiner, J.
Ein Vorschlag zur Begriffsbildung.
In: Beiträge zum 4. Workshop Planen und Konfigurieren, (Hrsg) Kratz et al., S. 189, 1990
- /66/ Howard O.; Methason J.
Readings on the Principles and Applications of Decision Analysis.
Stanford: Strategic Decisions Group 1989
- /67/ Jones, C.
User Interface Development and Decision Support Systems.
In: Recent Developments in Decision Support Systems. (Hrsg) Holsapple, C. et al., S. 181–209
Berlin, Heidelberg: Springer 1991
- /68/ Kahle, E.
Betriebliche Entscheidungen. 2. Auflage
München: Oldenbourg Verlag 1990
- /69/ Karbach, W.; Linster, M.
Wissensakquisition für Expertensysteme.
München, Wien: Carl Hanser Verlag, 1990
- /70/ Keen, P.
Value Analysis: Justifying Decision Support Systems
In: MIS Quarterly 5, No. 1, 1981
- /71/ Keeney, R.; Raiffa, H.
Decisions with multiple Objectives: Preferences and Value Tradeoffs.
New York: Cambridge 1993
- /72/ Klein, M.; Methlie, L.
Expert Systems: A Decision Support Approach.
Reading: Addison-Wesley 1990

- /73/ Klein, R.
Constructive Problem Solving: A model generation approach to configuration.
In: Beiträge zum Workshop "Modelle beim Konfigurieren", (Hrsg) Günter, A.,
S. 70–83, 1993
- /74/ Kleine Büning, H. et al.
Wissensbasierte Produktkonfiguration.
In: VDI-Z 132, Nr. 10, S. 161–164, 1990
- /75/ Klevers, T.
Systematischer Einsatz zukunftsorientierter Hilfsmittel für die Angebotsbearbeitung/ Projektierung.
In: VDI Berichte 1052, S. 45–51
Düsseldorf: VDI-Verlag 1993
- /76/ Koch, M.; Rothhaupt, A.
Wirtschaftlich SMD-Bestücken.
In: Produktion Nr. 22, S.6, 1992
- /77/ Köhne, A. et al.
Integration von Aktionsplanung und Konfigurierung in der Planung flexibler Montagesysteme.
In: Beiträge zum 5. Workshop Planen und Konfigurieren, (Hrsg) Günter, A. et al., S. 92–99, 1991
- /78/ Konvelis, P.; Tirupati, D.
Approximate Performance Modeling and Decision Making for Manufacturing Systems: A Queuing Network Optimization Framework.
In: Journal of Intelligent Manufacturing 2, S. 107–134, 1991
- /79/ Kopisch, M.; Günter, A.
Configuration of a Passenger aircraft Cabin based on Conceptual Hierarchy, Constraints and flexible Control.
In: Proceedings of the 5th International conference IEA/AIE–92, S. 421–430, Berlin, Heidelberg: Springer Verlag 1992
- /80/ Kotz, A. M.
Triggermechanismen in Datenbanken. IFB 201
Berlin: Springer 1989
- /81/ Krups, R.
SMT-Handbuch
Würzburg: Vogel Verlag 1991

- /82/ Lange, V.; Glöckner, M.
Dialogorientierte rechnergestützte Konfigurierung Flexibler Fertigungsanlagen.
In: Beiträge zum 5. Workshop Planen und Konfigurieren, (Hrsg) Günter, A. et al., S. 84–91, 1991
- /83/ Laux, H.
Entscheidungstheorie.
Berlin, Heidelberg: Springer Verlag 1982
- /84/ Lea, C.
A scientific Guide to Surface Mount Technology.
Ayr: Electrochemical Publishers, 1988
- /85/ Lee, Shyanglin; Wang, Hsu-Pin
Modified simulated annealing for multiple-objective engineering design optimization.
In: Journal of Intelligent Manufacturing 3, S. 101–108, 1992
- /86/ Lockemann, P. C. et al.
Databases for Knowledge Bases: Empirical Study of a Knowledge Based Management System for a Semantic Network.
In: Data and Knowledge Engineering 7, S. 115–154, 1991
- /87/ MacMinds, D.
Mastering OSF/Motif widgets. 2. Auflage
Reading: Addison-Wesley 1993
- /88/ Marcus, S. et al.
VT: An Expert Elevator Designer that uses Knowledge-Based Backtracking.
In: AI-Magazine Spring 88, S. 95–112, 1988
- /89/ Martin, J.; Odell, J.
Principles of Object-Oriented Analysis and Design.
London: Prentice-Hall 1993
- /90/ Mc Dermott, J.
R1: A Rule-Based Configurer of Computer Systems.
In: Artificial Intelligence 19, S. 39–88, 1982
- /91/ Mc Dermott, J.
Preliminary Steps Toward a Taxonomy of Problem-Solving Methods.
In: Automating Knowledge Acquisition for Expert Systems. (Hrsg) Marcus, S., S. 225–256,
Dordrecht u.a.: Kluwer Academic Publishers 1988

- /92/ Meerkamm, H.
Design System mfk – an important step towards an engineering workbench.
In: Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers. Part B Journal of Engineering Manufacture Vol. 207, S. 105–116, 1993
- /93/ Meerkamm, H. et al.
Wissensmodellierung und –verarbeitung für das Fertigungsgerechte Konstruieren.
In: Tagungsband zur Fachtagung CAD'94, Paderborn, S. 439–452, 1994
- /94/ Mellichamp, J. et al.
FMS Designer: An expert system for flexible manufacturing system design.
In: Int. J. of Prod. Research Vol. 28 No. 11, S. 2013–2024, 1990
- /95/ Miller, G. S.; Colton, J. S.
The Complementary Roles of Expert Systems and Database Management Systems in a Design for Manufacture Environment.
In: Engineering with Computers 8, S. 139–149, 1992
- /96/ Neumann, B.
Über den Sinn und Zweck von Modellen für das Konfigurieren.
In: Beiträge zum Workshop "Modelle beim Konfigurieren", (Hrsg.) Günter, A., S. 14–16, 1993
- /97/ Neumann, K.; Morlock, M.
Operations Research
München; Wien: Carl Hanser Verlag 1993
- /98/ Nii, H. P.
Blackboard Systems: The BB Model of Problem Solving and the evolution of BB Architecture.
In: AI-Magazine, S. 38–53, Summer 1986
- /99/ Nilsson, N. J.
Principles of Artificial Intelligence.
Berlin, Heidelberg: Springer Verlag 1982
- /100/ N. N.
VDI-Richtlinie 3423. Auslastungsermittlung für Maschinen und Anlagen.
Berlin, Köln: Beuth Verlag 1991
- /101/ N. N.
Angebotserstellung in der Investitionsgüterindustrie. (Hrsg.) VDI-EKV
Düsseldorf: VDI-Verlag 1983
- /102/ N. N.
Prokappa Users Guide.
Mountain View: IntelliCorp Inc. 1991

- /103/ N. N.
KEE – Software Development System, Technical Manuals, KEE
Menlo Park: Intellicorp 1993
- /104/ N. N.
Unigraphics II: UFUNC Manual
Cypress: McDonnell Douglas Corporation 1991
- /105/ N. N.
Ingres Windows 4GL Application Editors Guide.
Alambra: Ingres Corporation, 1992
- /106/ N. N.
VDI-Richtlinie 3423: Auslastungsermittlung für Maschinen und Anlagen
Berlin, Köln: Beuth 1991
- /107/ N. N.
Entwurf VDI/VDE-Richtlinie 3712: Bestimmung der Genauigkeit und der Leistung von SMD-Bestückungsautomaten.
Berlin, Köln: Beuth 1991
- /108/ Neumann, K.; Morlock, M.
Operations Research
München; Wien: Carl Hanser Verlag 1993
- /109/ Pahl, G.; Beitz, W.
Konstruktionslehre, 3. Auflage
Berlin u. a.: Springer Verlag 1993
- /110/ Paulokat, J.
IDAX – Ein Modell der strukturorientierten Konfiguration.
In: Beiträge zum Workshop "Modelle beim Konfigurieren", (Hrsg.) Günter, A.,
S. 26–32, 1993
- /111/ Paulokat, J.; Wache, H.
The Integration of an ATMS and a Constraint-System in IDA.
In: (A)TMS in Expert Systems, (Hrsg) Paulokat, J.
Kaiserslautern: SEKI Report SR-92-06 (SFB) 1992
- /112/ Pawlischek, H.
SM Placement Technology.
In: Soldering and Surface Mount Technology 15, S.53–58, 1993
- /113/ Petkovic, D.
Ingres.
Bonn u. a.: Addison-Wesley 1992

- /114/ Ponader, M.
Wissensbasierte Subventions- und Finanzierungsberatung im Rahmen der Angebotsunterstützung.
Erkangen: Dissertation 1992
- /115/ Prasad, R.
Surface Mount Technology.
New York: Van Nostrand Reinhold, 1989
- /116/ Puppe, F.
Einführung in die Expertensysteme.
Berlin u.a.: Springer Verlag 1991
- /117/ Puppe, F.
Problemlösungsmethoden in Expertensystemen.
Berlin u.a.: Springer Verlag 1990
- /118/ Reinwald, B.
Workflow-Management in verteilten Systemen.
Stuttgart u. a.: Teubner Verlag, zgl. Dissertation 1993
- /119/ Richter, M.
Modellanforderungen in der Konfiguration.
In: Beiträge zum Workshop "Modelle beim Konfigurieren", (Hrsg) Günter, A., S. 11-13, 1993
- /120/ Saaty, T; Kearns, K.
Analytical Planning. The Organization of Systems.
Oxford u. a.: Pergamon Press 1985
- /121/ Sanders, J.
Design of Assembly Systems.
In: Intelligent Design and Manufacturing, (Hrsg.) Kusiak, A.
New York: John Wiley & Sons 1992
- /122/ Sasse, J.
Konkurrenzfähige Angebotsgestaltung im europäischen Markt.
In: VDI Berichte 1052, S. 1-4
Düsseldorf: VDI-Verlag 1993
- /123/ Schädler, K.; Kampa, B.
Chemisches Konfigurieren mit Plakon.
In: Beiträge zum 7. Workshop Planen und Konfigurieren, (Hrsg.) Horz, A., S. 132-142, 1993
- /124/ Schmitgen, S.
Aspekte der Aktualisierung und Pflege regelbasierter Systeme.
Duisburg: Dissertation 1989

- /125/ Schwanke, A.
CASE-Einsatz bei der Entwicklung eines Konfigurierungssystems.
In: Informationssysteme und Künstliche Intelligenz, (Hrsg.) Studer, R.,
S.129–143,
Berlin, Heidelberg: Springer Verlag 1992
- /126/ Schwetz, W.
Computerunterstützte Angebotserstellung im Rahmen integrierter Vertriebs-
steuerungssysteme.
In: VDI-Bericht 839: S.121–145
Düsseldorf: VDI-Verlag 1990
- /127/ Sebastian, H.-J.
Modelling an Expert System Shell for the Configuration of Technical Systems
including Optmization-Based Reasoning.
In: Proceedings of the IFIP Conference "Modelling the Innovation",
S.581–591,
Rom: 1990.
- /128/ Sebastian, H.-J.
Wissensbasiertes Entwerfen und Konfigurieren von Systemen unter Einbezie-
hung von Optmierungsverfahren in die Kontrollstrategien.
Leipzig: Forschungsbericht Technische Hochschule1991.
- /129/ Sharit, J.
A proposed theoretical framework for design of decision support systems in
computer-integrated manufacturing systems: A cognitive engineering appro-
ach.
In: Int. J. of Production Research, Vol. 26, No. 6, S.1037–1063, 1988
- /130/ Sinz, E.
Datenmodellierung im strukturierten Entity-Relationship-Modell (SERM)
Bamberg: Universität 1992
- /131/ Soloway, E. et al.
Assessing the maintainability of XCON-in_RIME: Coping with the problems of
a very large rule-base.
In: Proceedings of AAAI-87, S. 824–829, 1987
- /132/ Sommer, C.
MoKon – Ein Ansatz zur wissensbasierten Konfiguration von Variantenerzeu-
gnissen.
Sankt Augustin: Infix Verlag 1993

-
- /133/ Sommer, E.
Multiprozessorsteuerung für kooperierende Industrieroboter in Montagezeilen.
München, Wien: Carl Hanser Verlag, zgl. Dissertation 1992
- /134/ Steels, L.
Components of Expertise.
In: AI-Magazine, Summer, 1990
- /135/ Steinmetz, R.
Multimedia-Technologie.
Heidelberg, Berlin u.a.: Springer-Verlag 1993
- /136/ Steuer, R.
Multiple criteria optimization.
Malabar: Krieger 1989
- /137/ Stoer, J.
Numerische Mathematik
Heidelberg, Berlin: Springer Verlag 1993
- /138/ Stoyan, H.
Programmiermethoden der Künstlichen Intelligenz. Band 1
Berlin, Heidelberg: Springer 1988
- /139/ Suresh, N.
Towards an integrated evaluation of flexible automation investments.
In: Int. J. of Prod. Research Vol. 28 No. 9, S. 1657-1672, 1990
- /140/ Suresh, N.
An extended multi-objective replacement model for flexible automation investments.
In: Int. J. of Prod. Research Vol. 29 No. 10, S. 1823-1844, 1991
- /141/ Syska, I.; Cunis, R.
Constraints in PLAKON.
In: Das PLAKON-Buch, (Hrsg) Cunis, R. et al.
Berlin, Heidelberg: Springer 1991
- /142/ Tank, W.
Modellierung von Expertise in technischen Domänen.
St. Augustin: Infix 1992
- /143/ Tank, W.
Wissensbasiertes Konfigurieren: Forschungs- und Entwicklungsaktivitäten in Deutschland.
In: KI 1/93, S. 62-64, 1993

- /144/ Tank, W.
Wissensbasiertes Konfigurieren: Ein Überblick.
In: KI 1/93, S. 7–10, 1993
- /145/ Tate, A. et al.
A Review of AI Planning Techniques.
In: Readings in Planning, (Hrsg) Allen, J. et al.
San Mateo: Morgan Kaufman 1990
- /146/ Thim, C.
Rechnerunterstützte Optimierung von Materialflußstrukturen in der Elektronikmontage durch Simulation.
Erlangen: Carl Hanser Verlag, zgl. Dissertation 1991
- /147/ Tönshoff, H. K.; Lange, V.
Fertigungsanlagen wissensbasiert entwerfen.
In: ZWF CIM 87, 6, S. 314–318, 1992
- /148/ Tönshoff, H. K. et al.
A Knowledge-Based System for Automated Assembly Planning.
In: Annals of the CIRP Vol. 41/1, S. 19–24, 1992
- /149/ Turban, E.
Decision Support and Expert Systems: Managerial Perspectives.
New York: Macmillan, 1988
- /150/ Wachsmuth, I. (Hrsg.)
Expertensysteme, Planen und Problemlösen.
In: Einführung in die Künstliche Intelligenz, (Hrsg.) Görz, G., S. 713–828, 1993
- /151/ Wedekind, H.
Konstruktionserklären und Konstruktionsverstehen.
In: ZWF/CIM 84, 11, S. 623–629, 1989
- /152/ Weikum, G.
Transaktionen in Datenbanksystemen
Amsterdam: Addison Wesley 1988
- /153/ Weiner, J.
Aspekte der Konfigurierung technischer Anlagen.
Duisburg: Dissertation 1991
- /154/ Weule, H. et al.
Teilefertigung und Montage rechnergestützt planen.
In: ZWF CIM 85, 11, S. 598–601, 1990
- /155/ Wiendahl, H.-P.; Lorenz W.
Simulation von Fertigungsabläufen.
In: VDI-Z 129, Nr. 12, S. 38–45, 1987

-
- /156/ Wieser, R.
Methoden zur rechnergestützten Konfigurierung von Fertigungsanlagen.
Karlsruhe: Dissertation 1989
- /157/ Wong, H; Leu, M.
Adaptive Genetic Algorithm for Optimal Printed Circuit Board Assembly Planning.
In: Annals of the CIRP Vol 42/1, S.17-20, 1993
- /158/ Zeleney, Milan
MCDM: Past Decade and Future Trends
Greenwich: JAI Press, 1994

Lebenslauf

Martin Koch

geb. am 4.12.1963 in Esslingen/ Neckar

verheiratet, 1 Kind

1969–1973	Grundschule in Dittelbrunn bei Schweinfurt
1973–1979	Alexander–von–Humboldt–Gymnasium Schweinfurt
8/1979–7/1980	High School in Mesick im U.S. Bundesstaat Michigan
1980–1983	Carl–Benz–Gymnasium Ladenburg
7/1983	Abschluß: Abitur
1983–1989	Studium des Wirtschaftsingenieurwesens an der Universität Karlsruhe (TH)
12/1989	Abschluß: Dipl.–Wirtschaftsingenieur
1990–1994	Wissenschaftlicher Mitarbeiter am Lehrstuhl für Fertigungsautomatisierung und Produktionssystematik an der Universität Erlangen–Nürnberg; Lehrstuhlinhaber: Prof. Dr.–Ing. K. Feldmann

Reihe Fertigungstechnik Erlangen

Band 1

Andreas Hemberger

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

208 Seiten, 107 Bilder. 1988. Kartoniert.

Band 2

Detlef Classe

**Beitrag zur Steigerung der Flexibilität automatisierter Montage-
systeme durch Sensorintegration und erweiterte Steuerungskonzepte**

194 Seiten, 70 Bilder. 1988. Kartoniert.

Band 3

Friedrich-Wilhelm Nolting

Projektiertung von Montagesystemen

201 Seiten, 107 Bilder, 1 Tabelle. 1989.

Kartoniert.

Band 4

Karsten Schlüter

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

177 Seiten, 97 Bilder. 1989. Kartoniert.

Band 5

Shir-Kuan Lin

Aufbau von Modellen zur Lageregelung von Industrierobotern

168 Seiten, 46 Bilder. 1989. Kartoniert.

Band 6

Rudolf Nuss

**Untersuchungen zur Bearbeitungsqualität im Fertigungssystem
Laserstrahlschneiden**

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

Band 7

Wolfgang Scholz

**Modell zur datenbankgestützten Planung automatisierter
Montageanlagen**

194 Seiten, 89 Bilder. 1989. Kartoniert.

Band 8

Hans-Jürgen Wißmeier

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

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

Band 9

Rainer Eisele

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

183 Seiten, 86 Bilder. 1990. Kartoniert.

Band 10
Rolf Pfeiffer
Technologisch orientierte Montageplanung am Beispiel der Schraubtechnik
216 Seiten, 102 Bilder, 16 Tabellen. 1990. Kartoniert.

Band 11
Herbert Fischer
Verteilte Planungssysteme zur Flexibilitätssteigerung der rechnerintegrierten Teilefertigung
201 Seiten, 82 Bilder. 1990. Kartoniert.

Band 12
Gerhard Kleineidam
CAD/CAP : Rechnergestützte Montagefeinplanung
203 Seiten, 107 Bilder. 1990. Kartoniert.

Band 13
Frank Vollertsen
Pulvermetallurgische Verarbeitung eines übereutertoiden verschleißfesten Stahls
XIII + 217 Seiten, 67 Bilder, 34 Tabellen. 1990. Kartoniert.

Band 14
Stephan Biermann
Untersuchungen zur Anlagen- und Prozeßdiagnostik für das Schneiden mit CO₂- Hochleistungslasern
VIII + 170 Seiten, 93 Bilder, 4 Tabellen. 1991. Kartoniert.

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

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

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

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

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

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

Band 21
Egon Sommer
**Multiprozessorsteuerung für kooperierende
Industrieroboter in Montagezellen**
188 Seiten, 102 Bilder. 1991. Kartoniert.

Band 22
Georg Geyer
**Entwicklung problemspezifischer Verfahrensketten
in der Montage**
192 Seiten, 112 Bilder. 1991. Kartoniert.

Band 23
Rainer Flohr
**Beitrag zur optimalen Verbindungstechnik in der
Oberflächenmontage (SMT)**
186 Seiten, 79 Bilder. 1991. Kartoniert.

Band 24
Alfons Rief
**Untersuchungen zur Verfahrensfolge Laserstrahlschneiden
und –schweißen in der Rohkarosseriefertigung**
VI + 145 Seiten, 58 Bilder, 5 Tabellen. 1991. Kartoniert.

Band 25
Christoph Thim
**Rechnerunterstützte Optimierung von Materialflußstrukturen
in der Elektronikmontage durch Simulation**
188 Seiten, 74 Bilder. 1992. Kartoniert.

Band 26
Roland Müller
CO₂ – Laserstrahlschneiden von kurzglasverstärkten Verbundwerkstoffen
141 Seiten, 107 Bilder, 4 Tabellen. 1992. Kartoniert.

Band 27
Günther Schäfer
Integrierte Informationsverarbeitung bei der Montageplanung
195 Seiten, 76 Bilder. 1992. Kartoniert.

Band 28
Martin Hoffmann
**Entwicklung einer CAD/CAM – Prozeßkette für die Herstellung
von Blechbiegeteilen**
149 Seiten, 89 Bilder. 1992. Kartoniert.

Band 29
Peter Hoffmann
**Verfahrensfolge Laserstrahlschneiden und –schweißen :
Prozeßführung und Systemtechnik in der 3D – Laserstrahlbearbeitung von Blech-
formteilen**
186 Seiten, 92 Bilder, 10 Tabellen. 1992. Kartoniert.

Band 30
Olaf Schrödel
Flexible Werkstattsteuerung mit objektorientierten Softwarestrukturen
180 Seiten, 84 Bilder. 1992. Kartoniert.

Band 31
Hubert Reinisch
**Planungs – und Steuerungswerkzeuge zur impliziten
Geräteprogrammierung in Roboterzellen**
XI + 212 Seiten, 112 Bilder. 1992. Kartoniert.

Band 32

Brigitte Bärnreuther

**Ein Beitrag zur Bewertung des Kommunikationsverhaltens
von Automatisierungsgeräten in flexiblen Produktionszellen**

XI + 179 Seiten, 71 Bilder. 1992. Kartoniert.

Band 33

Joachim Hutfless

**Laserstrahlregelung und Optikdiagnostik in der Strahlführung
einer CO₂-Hochleistungslaseranlage**

175 Seiten, 70 Bilder, 17 Tabellen. 1993. Kartoniert.

Band 34

Uwe Günzel

**Entwicklung und Einsatz eines Simulationsverfahrens für operative
und strategische Probleme der Produktionsplanung und -steuerung**

XIV + 170 Seiten, 66 Bilder, 5 Tabellen. 1993. Kartoniert.

Band 35

Bertram Ehmann

**Operatives Fertigungscontrolling durch Optimierung auftragsbezogener
Bearbeitungsabläufe in der Elektronikfertigung**

XV + 167 Seiten, 114 Bilder. 1993. Kartoniert.

Band 36

Harald Kolléra

**Entwicklung eines benutzerorientierten Werkstattprogrammiersystems
für das Laserstrahlschneiden**

129 Seiten, 66 Bilder, 1 Tabelle. 1993. Kartoniert.

Band 37

Stephanie Abels

**Modellierung und Optimierung von Montageanlagen
in einem integrierten Simulationssystem**

188 Seiten, 88 Bilder. 1993. Kartoniert.

Band 38

Robert Schmidt-Hebbel

**Laserstrahlbohren durchflußbestimmender
Durchgangslöcher**

145 Seiten, 63 Bilder, 11 Tabellen. 1993. Kartoniert.

Band 39

Norbert Lutz

**Oberflächenfeinbearbeitung keramischer Werkstoffe mit
XeCl-Excimerlaserstrahlung**

187 Seiten, 98 Bilder, 29 Tabellen. 1994. Kartoniert.

Band 40

Konrad Grampp

**Rechnerunterstützung bei Test und Schulung an
Steuerungssoftware von SMD-Bestücklinien**

178 Seiten, 88 Bilder. 1995. Kartoniert.

Band 41

Martin Koch

**Wissensbasierte Unterstützung der Angebotsbearbeitung
in der Investitionsgüterindustrie**

169 Seiten, 68 Bilder. 1995. Kartoniert.