

Herbert Reichel

*Optimierung der Werkzeugbereitstellung
durch rechnergestützte Arbeitsfolgenbestimmung*

Herbert Reichel

*Optimierung
der Werkzeugbereitstellung
durch rechnergestützte
Arbeitsfolgenbestimmung*

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:	16. 07. 1990
Tag der Promotion:	10. 01. 1991
Dekan:	Prof. Dr.-Ing. habil. G. Kuhn
Berichterstatter:	Prof. Dr.-Ing. K. Feldmann
	Prof. Dr.-Ing. M. Geiger

Die Deutschen Bibliothek - CIP-Einheitsaufnahme

Reichel, Herbert:

Optimierung der Werkzeugbereitstellung durch rechnergestützte
Arbeitsfolgenbestimmung / Herbert Reichel - München; Wien;
Hanser 1991

(Fertigungstechnik - Erlangen; 17)

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

ISBN 3-446-16453-7

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 1991

Herstellung: Copy Center 2000, Erlangen-Eltersdorf

Printed in Germany

Vorwort

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

Daher danke ich Herrn Prof. Dr.-Ing. K. Feldmann, dem Leiter des Lehrstuhls für Fertigungsautomatisierung und Produktionssystematik am Institut für Fertigungstechnik, für die wohlwollende und großzügige Förderung dieser Arbeit.

Herrn Prof. Dr.-Ing. M. Geiger, Leiter des Lehrstuhls für Fertigungstechnologie am Institut für Fertigungstechnik, danke ich für die Übernahme des Kooreferats und für seine wohlwollende Unterstützung.

Ferner gilt mein Dank allen Studenten und Kollegen, die durch fruchtbare Diskussionen und Anregungen die Arbeit gefördert haben, insbesondere Herrn Dipl.-Inf. Josef Scheller und Herrn Dipl.-Inf. Herbert Fischer. Herrn Dipl.-Inf. W. Steger und Herrn stud. rer. pol. C. Engelhard gebührt mein Dank für Ihre praktische Unterstützung, durch die sie zum Erfolg der Arbeit beigetragen haben.

Herbert Reichel

Abkürzungsverzeichnis

AG	Arbeitsgang
APL	Arbeitsplan
EDV	Elektronische Datenverarbeitung
FA	Fertigungsauftrag
FIFO	Prioritätsregel: first in, first out
FFS	Flexibles Fertigungssystem
FFZ	Flexible Fertigungszelle
FHM	Fertigungshilfsmittel
MM	Maschinen-Werkzeugmagazin
PPS	Produktionsplanung und -steuerung
TA	Teileart
TPW	Transportwagen
WS	Werkstück
WST	Werkstückträger
WZ	Werkzeug
ZL	zentrales Werkzeuglager eines FFS

Optimierung der Werkzeugbereitstellung durch rechnergestützte Arbeitsfolgenbestimmung

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	1
1.1	Ausgangssituation in der Fertigung	1
1.2	Bedeutung der Fertigungshilfsmittel	2
1.3	Zielsetzung der Arbeit	4
2	Komponenten moderner Fertigungsstrukturen	7
2.1	Flexible Fertigungseinrichtungen	7
2.1.1	Eigenschaften	7
2.1.2	Ausprägungen flexibler Fertigungseinrichtungen	9
2.2	Hierarchische Systemstrukturen	12
2.2.1	Aufgabenteilung und Rechnerinseln in Fertigungsbetrieben	12
2.2.2	Gründe für die Einführung der Rechner- hierarchie in flexiblen Fertigungssystemen	12
2.3	Planungssysteme in Fertigungsbetrieben	14
2.3.1	Aufgabenbereiche	14
2.3.2	Dreistufige Planungshierarchie in PPS-Systemen	16
2.3.3	Fertigungssteuerung	18
2.4	Neue Anforderungen an die Fertigungsplanung durch den Einsatz flexibler Fertigungssysteme	19
2.4.1	Wirtschaftliche Ziele der Fertigungs- planung	19
2.4.2	Planungsaufgaben in der operativen Ebene	20
2.4.3	Schnelle Verarbeitung der Betriebsdaten	23
2.5	Abbildung der Planungsaufgaben auf das hierarchische Steuerungskonzept	25

3	Fertigungshilfsmittel in flexiblen Fertigungssystemen	27
3.1	Das Aufgabengebiet der FHM-Versorgung und -Verwaltung	27
3.1.1	Die Aufbauorganisation	27
3.1.2	Die Ablauforganisation	31
3.1.2	Organisatorische Schwachstellen	33
3.2	Technische Lösungen für Handhabung und Transport	36
3.2.1	Funktionsträger von Werkzeugtransport- systemen	36
3.2.2	Werkzeugwechsel und Werkzeugaustausch	37
3.2.3	Einzel- und Palettentransport von Werkzeugen	38
3.2.4	Versorgung mit weiteren Fertigungshilfs- mitteln	38
3.3	Stellung der Fertigungshilfsmittel innerhalb der Steuerungskonzepte flexibler Fertigungssysteme	42
3.4	Bisherige Untersuchungen zur Fertigungshilfsmittel- versorgung	44
3.5	Hilfsmittel zur Untersuchung von Steuerungs- und Planungsstrategien	46
3.5.1	Nachbildung als Modell	46
3.5.2	Simulationssoftware	48
3.5.3	Modellierung flexibler Fertigungssysteme	51
4	Simulationsstudie zur Werkzeugversorgung flexibler Fertigungssysteme	53
4.1	Das Simulationswerkzeug GRAFSIM	53
4.2	Aufgaben und Ziele der Simulationsexperimente	55
4.3	Das Systemmodell	57
4.3.1	Bearbeitungsmaschinen	57
4.3.2	Transportsysteme	58
4.3.3	Ablaufstrategien	58
4.3.4	Das Auftragsspektrum	59
4.3.5	Weitere Randbedingungen und Annahmen	61
4.4	Nutzung der Pfadauswahlflexibilität	62
4.4.1	Vergleich zweier Werkzeug-Austausch- strategien	62

4.4.2	Pfadauswahl nach Werkzeugüberdeckung und Arbeitsvorrat	68
4.5	Einfluß der Werkzeugüberdeckung	71
4.5.1	Überarbeitung des Auftragsspektrums	71
4.5.2	Modellparameter der weiteren Untersuchungen	73
4.5.3	Bedeutung der Pfadauswahlstrategie bei verschiedener Fertigungsverwandtschaft	74
4.6	Weitere Variationen der Simulationsdaten	77
4.6.1	Prioritätsvorgaben für ausgewählte Fertigungsaufträge	77
4.6.2	Warteschlangenbildung durch die Ablaufsteuerung	78
4.6.3	Reduktion des Werkzeugbedarfs je Arbeitsgang	80
4.7	Anforderungen an ein Steuerungssystem	82
4.7.1	Angepasste Pfadauswahl	83
4.7.2	Auswählbare Werkzeugaustauschstrategie	84
4.7.3	Optimierende Belegungsplanung	85
4.7.4	Beispiel einer Anforderungshierarchie für das modellierte Fertigungssystem	87
5	Grundlagen der operativen Planung- und Steuerung flexibler Fertigungsbereiche	89
5.1	Einordnung der operativen Planung und Steuerung	89
5.2	Strukturierung der Software	91
5.3	Aufgabenfelder innerhalb der operativen Planung und Steuerung	96
5.3.1	Trennung von Planungs- und Steuerungsaufgaben	96
5.3.2	Detaillierungsschritte	97
5.4	Mathematische Hilfsmittel für das Planungssystem	99
5.4.1	Problemfelder	99
5.4.2	Enumeration	101
5.4.3	Lineare und Nicht-Lineare Programmierung	102
5.4.4	Branch and Bound	103
5.4.5	Heuristiken	104
5.4.6	Verwendete Begriffe der Graphentheorie	106

6	Entwicklung eines Planungs- und Steuerungskonzeptes	108
6.1	Übersicht	108
6.2	Schnittstellen	111
6.3	Konzeption einer Werkstattplanung	113
6.3.1	Start des Planungsprogramms	113
6.3.2	Auswahl der einzuplanenden Aufträge	115
6.3.3	Simultane Arbeitsstationswahl und Fertigungsfamilienbildung	120
6.3.4	Kritische Betrachtung der Maschinenfest- legung	135
6.3.5	Erster Kapazitätsabgleich für Rüst- und Nebenfunktionen	137
6.3.6	Arbeitsgangterminierung auf Basis von Transportlosen	140
6.3.7	Planung der FHM-Vorbereitung	145
6.4	Konzept einer Ablaufsteuerung	148
6.4.1	Aufgaben und Umfeld der Ablaufsteuerung	148
6.4.2	Interner Aufbau des Steuerungsmoduls	150
6.4.3	Reaktionen auf die Verfügbarkeits- änderungen der Systemelemente	153
6.4.4	Eintrag eines Transportloses in eine Stationswarteschlange	156
6.4.5	Verbindung der Ablaufsteuerung zum Materialfluß	162
7	Zusammenfassung	164
8	Literaturverzeichnis	166

1 Einleitung

1.1 Ausgangssituation in der Fertigung

Die Konkurrenzsituation des Marktes verlangt von vielen Betrieben, vermehrt auf spezielle Kundenwünsche einzugehen. Die Orientierung am Kundenwunsch führt jedoch dazu, daß die mögliche Minimierung der Produktkosten durch entsprechend hohe Losgrößen nicht mehr gegeben ist. Vielmehr bestehen die Anforderungen, daß die Unternehmen Produkte hoher Qualität, zu günstigen Preisen, nach den Spezifikationen der Kunden, in kurzer Zeit liefern können. In den Produktionsbereichen muß daher trotz der sinkenden Losgrößen, der erhöhten Teilevielfalt und häufiger Produktwechsel kostengünstiger als in der Vergangenheit gefertigt werden [49, 121, 130].

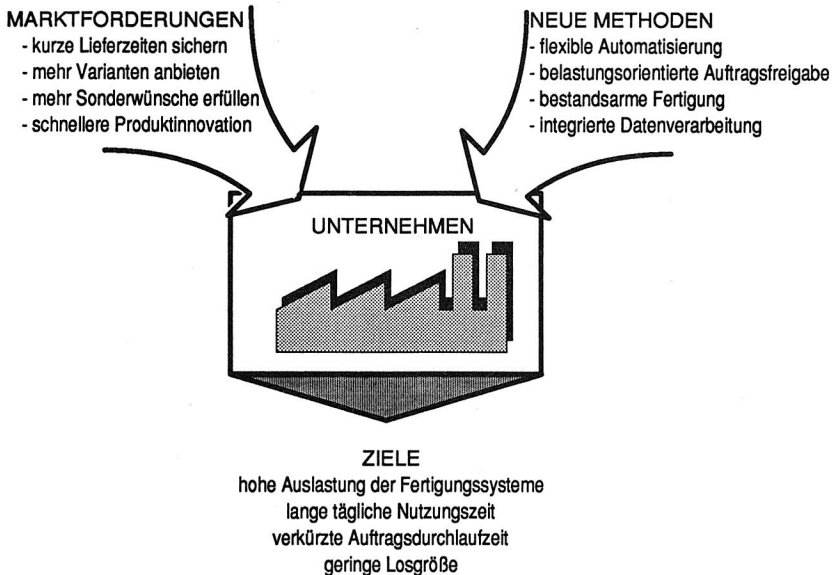


Bild 1.1: Neue Marktforderungen und Methoden führen zu veränderten Produktionsbedingungen

Um diesen prinzipiell gegenläufigen Anforderungen gerecht zu werden, wird die Fertigung in zunehmendem Maße flexibel automatisiert, um dadurch die Produktwechsel kostengünstig durchzuführen und durch Automatisierung die Fertigung in die bisher ungenutzten Zeiten der Pausen und der 2. oder 3. Schicht auszudehnen. Die maximale, zeitliche Nutzungs- und hohe Kapazitätsauslastung kann u.a. durch eine ausreichende Zahl an den Kapazitätsstellen wartender Aufträge erreicht werden [128]. Die höhere Liegezeit erhöht ihre Durchlaufzeit und die Bestandskosten. Andererseits verlangt der Kunde eine schnelle Lieferbereitschaft selbst für Sonderanfertigungen und somit eine kurze Durchlaufzeit.

1.2 Bedeutung der Fertigungshilfsmittel

Fertigungshilfsmittel (FHM) sind ein Teil der Betriebsmittel. Vom AWF [3] werden die Betriebsmittel u.a. in Fertigungsmittel sowie in Meß- und Prüfmittel unterteilt. Fertigungsmittel sind "Betriebsmittel zur Form- und Substanzveränderung mechanischer bzw. chemisch-physikalischer Art." Dabei kann man noch zwischen Fertigungsmitteln unterscheiden, die aktiv eine solche Veränderung bewirken, wie den Werkzeugmaschinen, und jenen Betriebsmitteln, die in diesem Prozeß als Hilfsmittel eingesetzt werden, eben den Fertigungshilfsmitteln. Als Fertigungshilfsmittel werden Werkzeuge, Vorrichtungen, Spannmittel, Greifer etc. bezeichnet. Im Sinne der folgenden Betrachtungen kann man auch Meß- und Prüfmittel mit unter den Begriff Fertigungshilfsmittel ziehen, wenn sie im Fertigungsablauf ähnlich behandelt werden wie z.B. Werkzeuge. Die Verfügbarkeit der benötigten Fertigungshilfsmittel ist eine wesentliche Startvoraussetzung für jeden Bearbeitungsvorgang. Da die Werkzeuge in der spanenden Fertigung den bedeutendsten Teil der FHM darstellen, liegt der Schwerpunkt vieler Betrachtungen, vor allem seitens der Maschinenhersteller, auf diversen Konzepten zu

Werkzeughandhabung und -transport. Auch in dieser Arbeit findet eine Konzentration auf den WZ-Bereich statt.

		Fertigungshilfsmittel
Fertigungsmittel	Maschine, Automat,	Werkzeug, Vorrichtung
Meß- und Prüfmittel	Koordinatenmeßgerät,	Meßtaster, Meßvorrichtung
Fördermittel	Transportfahrzeuge,	Einsätze, Magazine
Lagermittel		
Versorgungs- und Entsorgungsanlagen		
Organisationsmittel		
Innenausstattung		

Bild 1.2: Klassifizierung der Betriebsmittel nach VDI [83]

Oftmals kann die Fertigung nicht aufgenommen werden, obwohl Fertigungskapazität vorhanden ist und weitere Voraussetzungen erfüllt sind, da Fertigungshilfsmittel und Informationen nicht zeitgerecht zur Verfügung stehen (Bild 1.3), weil die vorbereitenden Tätigkeiten, wie die Werkzeugvoreinstellung, nicht durchgeführt wurden. Meist wurde der Anstoß für diese Tätigkeiten zu spät gegeben oder ihr Aufwand ist unerwartet groß [40, 129].

In den der Fertigung vorgelagerten Planungsbereichen gibt es kaum eine Möglichkeit, den aktuellen Fertigungszustand, insbesondere den der notwendigen Fertigungshilfsmittel, in die Planung einzubeziehen. Jedoch kann auf der Werkstattebene direkt der aktuelle Zustand aufgenommen und in entsprechenden Planungs- und Dispositionsroutinen verarbeitet werden. Hier ist der Verantwortungsbereich, in dem die Fertigungssteuerung Werkzeuge, Vorrichtungen oder auch NC-Programme berücksichtigen muß, um die übergeordneten Ziele, wie kurze Durchlaufzeit, Termintreue und hohe Auslastung zu erreichen.

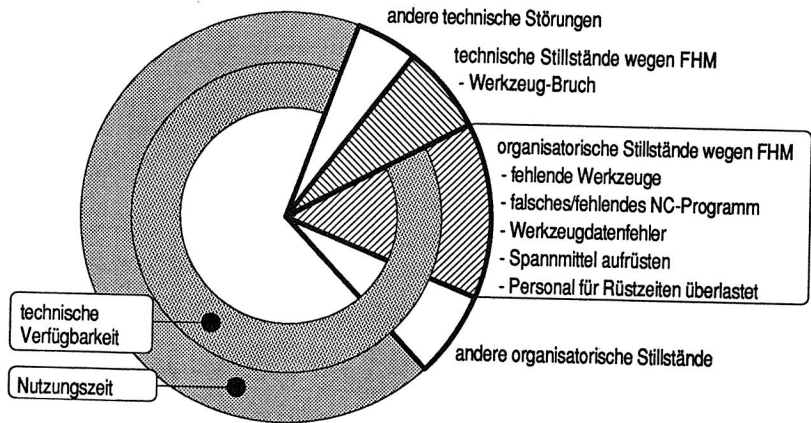


Bild 1.3: Große Bedeutung der Fertigungshilfsmittel als Störungsursache (qualitativ nach [40, 129])

1.3 Zielsetzung der Arbeit

Durch die dargelegten Anforderungen an die Fertigung, die aus den verringerten Losgrößen und der großen Teilevielfalt resultieren, nimmt die Anzahl der Rüstvorgänge zu [30, 126].

Daher ist es ein Ziel dieser Arbeit, das Verhalten der FHM-Versorgung von Fertigungssystemen unter wechselnden Belastungen zu untersuchen, um daraus Rückschlüsse auf die Wirksamkeit von Algorithmen der Ablaufsteuerung zu ziehen. Darauf aufbauend wird eine integrierte, kurzfristige Fertigungsplanung und Ablaufsteuerung für den werkstattnahen Bereich entwickelt.

Um die notwendigen Werkzeuge zeitgerecht an die Bedarfsstellen zu verteilen, ist eine prozeßnahe Werkzeugorganisation notwendig. Im Rahmen der Arbeit wird ein Softwaresystem entwickelt, das innerhalb der Werkzeugorganisation rechtzeitig die Bereitstelllaufträge an das Personal und automatisierte Zuführeinrichtungen ausgibt.

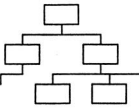
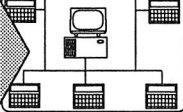

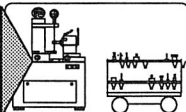
PROBLEMFELD		LÖSUNGSMÖGLICHKEIT
komplexe Betriebsstruktur		hierarchische Steuerungssysteme
erhöhte Teilevielfalt		direkte Auftragsverfolgung mit EDV
vermehrte Rüstvorgänge		Rüstzeitverminderung durch Reihenfolgeplanung
verzögerte FHM-Bereitstellung		rechnergestützte Planung und Steuerung der FHM-Vorbereitung

Bild 1.4 Lösungsansätze für Problemfelder der Fertigung

Es sollen weiter Möglichkeiten entwickelt werden, auch Rüstvorgänge und die dafür auszuführenden, vorbereitenden Tätigkeiten mit Hilfe dieses werkstattnahen Softwaresystems anzustoßen und zu überwachen. Darüberhinaus wird angestrebt, die überhaupt für diese Tätigkeiten erforderliche Zeitspanne zu reduzieren, was durch angepaßte Optimierungsstrategien für den Fertigungsablauf bewerkstelligt werden kann. Um eine ungestörte Fertigung mit kurzer Durchlaufzeit zu erreichen genügt es nicht, nur die direkten Fertigungskapazitäten und

Termine zu beachten, sondern es ist empfehlenswert, on-line auf die Fertigungshilfsmittel, abhängig von der aktuellen Situation an den Arbeitsplätzen, steuernd einzuwirken.

Ein weiteres Ziel der Arbeit ist es, Möglichkeiten zur Reduzierung des Rüstaufwandes durch eine rechnergestützte Optimierung der Fertigungsfolgen darzustellen und die dadurch erreichbaren Verbesserungen der Auslastung bei flexiblen Fertigungssystemen mittels dynamischer Simulationen zu untersuchen.

2 Komponenten moderner Fertigungsstrukturen

2.1 Flexible Fertigungseinrichtungen

2.1.1 Eigenschaften

Die meistgenannte Eigenschaft moderner Fertigungseinrichtungen war in den letzten Jahren die Flexibilität. Durch die bereits genannten Marktentwicklungen, denen sich die herstellende Industrie ausgesetzt sieht, hat die Bedeutung dieser Eigenschaft zugenommen. Mertins [69] versteht die Flexibilität "als die Fähigkeit eines Fertigungssystems, eine vorgegebene Vielfalt von Fertigungsaufgaben bei zufälligen oder systembedingten Änderungen der Eingangsgrößen zu bewältigen, ohne daß das System in seiner Grundkonzeption verändert werden muß".

Nun können sich die Eingangsgrößen für ein Fertigungssystem in verschiedener Weise ändern, und das System wird nicht auf jede Änderung gleich flexibel reagieren. Deshalb unterscheidet man mehrere Ausprägungen der Flexibilität, für deren detaillierte Betrachtung z.B. auf Mertins [69] verwiesen wird. Lediglich die "Pfadauswahlflexibilität" wird hier erklärt:

Ein Fertigungssystem aus mehreren Fertigungsmaschinen oder Stationen besitzt die Eigenschaft der Pfadauswahlflexibilität, wenn für jedes (oder die meisten) der Werkstücke in ihm mehrere alternative Reihenfolgen (Pfade) bestehen, in denen die Arbeitsgänge durchgeführt werden können. Die Alternativen können auf Grund von bestimmten Parametern (Maschinenzustände, Auslastung, Stückzahlen) ausgewählt werden.

Zunächst bezog sich die Bezeichnung "flexibles Fertigungssystem" auf die Automatisierung der Serienfertigung [17]. Zur selben Zeit bzw. kurz darauf wurden die Begriffe "Flexible Fertigungsinsel", "Flexible Fertigungszelle", "Flexible Fertigungslinie" und "Flexibles Fertigungsnetz" [69] einge-

führt, wobei in Einzelheiten unterschiedliche Definitionen verwendet wurden. Alle diese Ausprägungen bestehen aus folgenden Teilsystemen:

einem **Bearbeitungssystem**

einem **Materialflußsystem** und

einem **Informations- und Steuerungssystem**

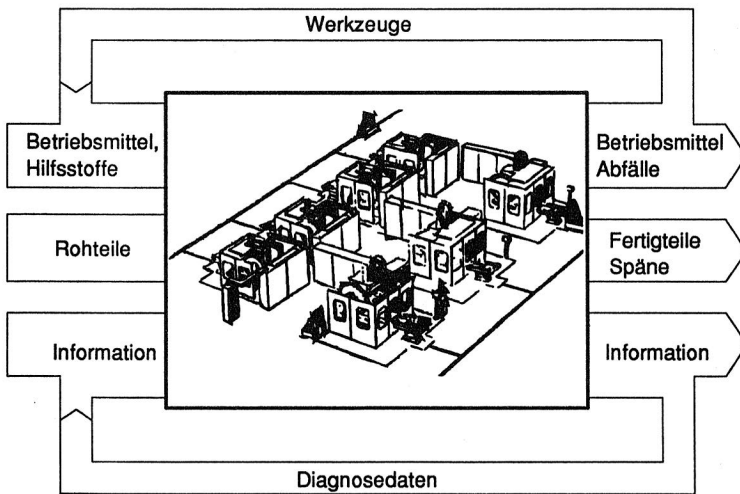


Bild 2.1: Betriebsmittel, Material- und Informationsfluß durch flexible Fertigungseinrichtungen nach [106]

Es besteht zwischen diesen Definitionen eine gewisse Grauzone, die auch in der Literatur, durch in Einzelheiten abweichende Verwendung der Begriffe, zu Tage tritt. Teilweise ist es auch möglich, ein konkretes System mehreren Definitionen zuzuordnen. Deshalb wird hier folgende Abgrenzung der Begriffe (Bild 2.2) vorgenommen:

Im Unterschied zur Zelle mit einem Bearbeitungsverfahren werden in einer Fertigungsinsel mehrere Teilefamilien mit unterschiedlichen Bearbeitungstechnologien hergestellt [134]. Bei hierarchischen FFS existiert zwischen dem Leit-

rechner und der Steuerungsebene eine zusätzliche Hierarchiestufe der Datenverarbeitung, die in Fertigungsinseln und zentral strukturierten FFS fehlt. Die flexible Fertigungsline zeichnet sich durch einen gerichteten und getakteten Materialfluß aus. In einem Fertigungsnetz wird nicht unbedingt ein Leitrechner gefordert, es ist aber eine komplexe, automatisierte Materialflußstruktur vorhanden.

	Reihenfolgeflexibilität	Mengenflexibilität	Teileflexibilität	Produktauswahlflexibilität	Integrationsflexibilität	integriertes Steuerungssystem	eine Bearbeitungstechnologie	mehrere Bearbeitungstechnologien	an Teilefamilien orientierte Zusammenfassung	an Produktgruppen orientierte Zusammenfassung
Fertigungssystem	●	●	●	●	◐	●		◐	◐	◐
Fertigungszelle	●	●	◐	◐	○	●	●		●	
Fertigungsinsel	●	●	●	●	●	◐		●		●
Fertigungsline	○	◐	○	—	—	○		○	●	
Fertigungsnetz				●	◐	○		○		
Flexibilitätseigenschaften						technologische und organisatorische Eigenschaften				
● stark / ◐ mittel / ○ mäßig ausgeprägt — nicht vorhanden / leer: keine genaue Aussage möglich										

Bild 2.2: Charakteristika flexibler Fertigungseinrichtungen

2.1.2 Ausprägungen flexibler Fertigungseinrichtungen

A) Flexible Fertigungssysteme

Relativ einheitliche Definitionen existieren für den übergreifenden Begriff "Flexibles Fertigungssystem" soweit sie das Bearbeitungssystem und den Materialfluß betreffen.

Eine Definition sei stellvertretend zitiert: [111]

"Ein Flexibles Fertigungssystem enthält mehrere automatisierte Werkzeugmaschinen in Universal- oder Sonderbauart sowie ggf. weitere manuelle oder automatisierte Arbeitsstationen, die durch ein automatisiertes Werkstückflußsystem so flexibel verknüpft sind, daß ein gleichzeitiges Bearbeiten verschiedener Werkstücke, die das System auf verschiedenen Pfaden durchlaufen, möglich ist."

Implizit verlangt eine solche Definition, insbesondere zur flexiblen Steuerung des Materialflusses, nach einem übergeordneten, rechnergestützten Steuerungssystem.

B) Flexible Fertigungszellen

Eine flexible Fertigungszelle (FFZ) besteht aus einer oder mehreren Bearbeitungszentren (CNC-Werkzeugmaschinen) der gleichen Bearbeitungstechnologie mit zugehörigen Werkzeug- und Werkstück-Transport-Einrichtungen (Handhabungseinrichtungen). Die Werkzeugmaschine ist deshalb in der Lage, mehr als eine Bearbeitungsoperation an mehr als einem Werkstück auszuführen. Automatische Reinigungs-, Meß- und Entgratmaschinen können als Hilfsgeräte noch mit in die Zelle integriert sein [34, 41, 53, 73, 119, 124].

Eine einzelne Fertigungszelle muß nicht materialflußmäßig mit einem externen Transportsystem verkettet sein. Wohl aber existieren innerhalb der Zelle Transport- und Speichereinrichtungen für WZ und WS, welche die Zellenkomponenten verbinden. Durch Integration von Hilfseinrichtungen (im komplexen Fall) ist eine Fertigungszelle zur Komplettbearbeitung von definierten Teilefamilien in der Lage. Die Koordination, Steuerung und Verwaltung aller Zellenkomponenten obliegt einem Zellenrechner, der auch die Verbindung zur ggf. vorhandenen überlagerten Produktionssteuerung herstellt. Eine Zelle ist aber auch prinzipiell autark arbeitsfähig.

Als Beispiel dafür kann die Drehzelle des Lehrstuhls für Fertigungsautomatisierung und Produktionssystematik der Universität Erlangen dienen (Bild 2.3). Diese Drehzelle besteht aus einer CNC-Drehmaschine, einem Portalroboter und einem Werkstück- und Werkzeugspeichersystem. Gesteuert wird der vollautomatische Arbeitsablauf der Zelle durch den Zellrechner, der außer den on-line Steuerungsfunktionen noch vielfältige interaktive Aufgaben bei der Ablaufplanung und Datenverwaltung für diese Anlage besitzt. Um eine hohe Flexibilität der Anlage zu erreichen, besitzt die Drehmaschine sowohl Futterbacken als auch Werkzeuge, die einen automatisierten Austausch durch das Handhabungsgerät zulassen. Wegen der konstruktiven Gestaltung der Drehmaschine bedeutet jeder Umrüstvorgang einen Maschinenstillstand. Somit kommt dort einer Reihenfolgeplanung, die die Umrüstungen optimiert, hohe Bedeutung zu. Die automatisierten Abläufe setzen weiterhin voraus, daß die notwendigen Fertigungshilfsmittel (Futterbacken, Werkzeuge) durch Planungsfunktionen des Zellrechners rechtzeitig angefordert werden sowie daß die Umrüstanweisungen an die Maschinen durch das Rechnersystem generiert werden.



Bild 2.3: Die Drehzelle der Universität Erlangen

2.2 Hierarchische Systemstrukturen

2.2.1 Aufgabenteilung und Rechnerinseln in Fertigungsbetrieben

Im Bereich der Fertigungssteuerung bedeutet hierarchisch, die große Gesamtaufgabe der Fertigungssteuerung in detailierte, geordnete Funktionen zu zerlegen, die über definierte Schnittstellen miteinander in Interaktion treten. Dabei kontrolliert eine übergeordnete Funktion mehrere unterlagerte Funktionen. So erhält man örtlich und zeitlich festgelegte Zuständigkeiten der Funktionen.

Jede dieser Funktionen wird einem Teil des verteilten Rechnersystems [91] zugeordnet. Hierbei ist nun nicht eine Funktion unabänderlich einer bestimmten Konfiguration der EDV-Hardware zugeteilt, aber die Hierarchie der Funktionen darf bei einer Änderung nicht zerstört werden. In Zusammenhang mit Verteilung und Hierarchie wird gefordert, daß nur eine vertikale Kommunikation der Rechnersysteme stattfinden soll, also ein Rechner in einer Hierarchiestufe nur mit den direkt übergeordneten Funktionen der höheren Ebene oder den direkt unterlagerten Funktionen in Verbindung steht. Die Arbeitsfähigkeit eines Teilsystems in einer Hierarchiestufe soll so unabhängig von den anderen Teilsystemen der gleichen Stufe werden, was besondere Anforderungen an die Verteilung der Funktionen auf die Teilsysteme der Steuerung stellt.

2.2.2 Gründe für die Einführung der Rechnerhierarchie in flexiblen Fertigungssystemen

In neuerer Zeit werden von FFS verstärkt ein modularer Aufbau bezüglich der Maschinen und eine problemlose Erweiterbarkeit gefordert. Wegen der Aufgabenhäufung für den Leitrechner kann dies von einem zentral strukturierten FFS schwer erfüllt werden, da schnell die Kapazitätsgrenze des Rechners erreicht wird. Um dieser Anforderung gerecht zu werden und auch den Kapitaleinsatz für die Erstinstallation

zu vermindern, werden in letzter Zeit hierarchische FFS [73] aufgebaut. Die Industrie bevorzugt bei der Neueinführung Klein-FFS oder FFZ, die die Option zur Erweiterung und Integration besitzen [28].

Daneben ist durch die hierarchische Verteilung der Aufgaben eine einfachere Übereinstimmung zwischen den Anforderungen an ein EDV-System und seiner Leistungsfähigkeit zu erreichen. So können z.B. für zeitkritische Reaktionen spezielle Steuerungskomponenten verwendet werden. Die Elemente einer Stufe wirken außerdem als Datenkonzentratoren gegenüber der übergeordneten Schicht. Über definierte Schnittstellen läßt sich sehr heterogene Hard- und Software in das Steuerungssystem integrieren.

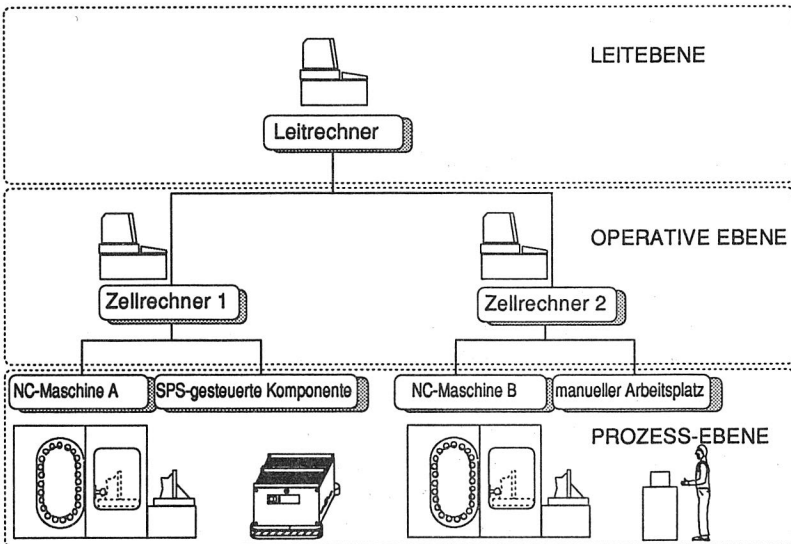


Bild 2.4: Struktur eines hierarchischen FFS

Für die Rechnebenen werden im weiteren die Begriffe Prozessebene, operative Ebene und Leitebene verwendet. Dabei werden in der Prozessebene ausschließlich die von der opera-

tiven Ebene den Arbeitsplätzen vorgegebenen Anordnungen ausgeführt und so der Fertigungsfortschritt bewirkt. In der operativen Ebene erfolgt eine kurzfristige Planung und darauf aufbauend die Generierung von Anordnungen an die Prozeßebene. Die Leitebene koordiniert die unterlagerten Bereiche, eine Instanz der Leitebene ist jeweils für mehrere operative Bereiche zuständig.

Für den Bereich der Fertigungshilfsmittel bedeutet eine solche Hierarchie, daß die überlagerte Ebene (Leitebene) zunächst datenmäßig die Verfügbarkeit von Fertigungshilfsmitteln für mehrere Elemente der operativen Ebene kontrolliert. Durch die operative Ebene jedoch werden konkrete Aktionen veranlasst, um die physikalische Verfügbarkeit der Fertigungshilfsmittel festzustellen oder diese verfügbar zu machen.

2.3 Planungssysteme in Fertigungsbetrieben

2.3.1 Aufgabenbereiche

Durch die Vielzahl der Produktvarianten, deren Komponenten und der Kundenaufträge sind in einem Betrieb eine große Zahl von Daten zu verwalten und aktuell zu halten. Diese Aufgaben stellen ein traditionelles Einsatzgebiet der EDV dar. Es wird hier der Begriff "Produktionsplanungs- und Steuerungssystem" (PPS) [11] verwendet. Die Verarbeitung dieser Datenmengen ist rechenintensiv. Daher können PPS-Systeme trotz der fortgeschrittenen Rechnertechnik meist keine zeitkritischen Steuerungsaufgaben in der Fertigungsüberwachung übernehmen. Typische Aufgabenbereiche sind vielmehr die Materialverwaltung und -planung, die Auftragsverwaltung, Kapazitätsplanung mit Zeitwirtschaft und Lohnbuchhaltung, die Produktionsprogrammplanung und weitere strategische, periodisch durchgeführte, Planungsaufgaben [93].

Für alle erwähnten Aufgabenbereiche wird eine einheitliche Grunddatenverwaltung durchgeführt. Diese Grunddaten umfassen Betriebsmitteldaten, Stücklisten und Arbeitspläne, auf die sich die Aufträge beziehen [8, 39]. Aus den Grunddaten werden Material- und Kapazitätsbedarf sowie die Ecktermine für die Fertigung der Aufträge abgeleitet. Mit diesem Ergebnis wird in die Zukunft geplant, um Materialbestellung, Auftragseinlastungstermin und die Kapazitätsbelegung festzustellen. Diese Vorgehensweise kann jedoch nicht in einem Schritt für beliebige Detaillierungsstufen oder beliebig lange Zeitintervalle durchgeführt werden, da die Datenmengen schnell anwachsen und unterschiedliche Algorithmen eingesetzt werden müssen.

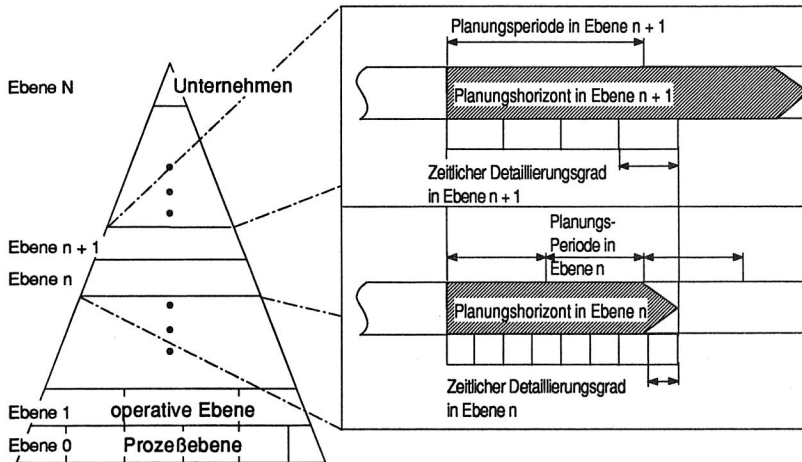


Bild 2.5: Planungshorizonte im hierarchischen Planungsmodell bei rollierender Planung

Bei einer hierarchischen Planung gilt, daß die Planungsergebnisse einer übergeordneten Stufe entweder in einer unterlagerten Steuerungsinanz als Vorgaben zur Steuerung verwendet werden oder erneut als Eingabedaten einer detaillierteren Planung verarbeitet werden. Üblicherweise steht in der unterlagerten Planungsstufe dem detaillierten Datenmate-

rial eine Verkürzung des zeitlichen Horizonts gegenüber (Bild 2.5). Die Vorgaben der höheren Ebene werden in der unterlagerten Planungsebene auf mehrere Planungsvorgänge aufgeteilt. Theoretisch sind der Anzahl der Planungsstufen und Detaillierung keine Grenzen gesetzt, wohl aber durch das Verhältnis von Aufwand und Nutzen. Mehrfach wird daher eine dreistufige, hierarchische, Produktionsplanung für die Serienfertigung in der Literatur beschrieben [5, 11, 85].

2.3.2 Dreistufige Planungshierarchie in PPS-Systemen

In einer langfristigen Planung werden die umfassenden Perspektiven des Unternehmens betrachtet. Der Planungshorizont bewegt sich im Bereich mehrerer Jahre, jedoch ist die Detaillierung gering. Das Zeitraster liegt zwischen einem Monat und einem Quartal. Typische Planungsgegenstände sind die Gesamtabsatzzahlen von Teilefamilien, die Entwicklung neuer Produktbaureihen und Änderungen der Betriebsstruktur.

Die mittelfristige Planungsstufe übernimmt die Ergebnisse der vorhergehenden Stufe als Planungsrahmen, innerhalb dem sie die Aufträge auf die Kapazität verteilen soll. Die einzelnen Werkstücke des Sekundärbedarfs lassen sich mit bekannten Formeln und Kriterien zu Losen zusammenfassen. Das Ziel einer flexiblen Fertigung ist, die wirtschaftliche Losgröße minimal zu halten, um so die Lagermengen zu verringern. Dadurch wird es nicht nur bei Sonderanfertigungen zur "Losgröße 1" kommen; bei ausgesprochenen Auftragsfertigungen kann es darüber hinaus notwendig sein, die Verbindung jedes einzelnen Werkstücks zum Endprodukt, mithin zum Kundenauftrag, in den Daten mitzuführen. Neben dem Materialbedarf wird in dieser Planungsstufe auch der Kapazitätsbedarf bestimmt. Zwischen dem Materialbedarf und der Kapazitätswirtschaft gibt es Zusammenhänge und Rückkopplungen, um diese gut anzunähern wurden verschiedene Algorithmen vorgestellt, so der Simultanansatz und die Sukzessivplanung [18,93,113].

Bereits in dieser zweiten Planungsphase wird die Auftragsdurchlaufzeit mittels der statistischen Werte von Übergangszeiten zwischen den einzelnen Arbeitsstationen bzw. Maschinengruppen festgelegt. Aus den Arbeitsplänen kann auch die statische Rüstzeit für die Arbeitsgänge übernommen und berücksichtigt werden.

Die Kapazitätsterminierung wird ausschließlich für die Fertigungseinrichtungen durchgeführt, nicht für das Umfeld der Fertigung. So werden hier auch nicht Überlastungssituationen der Fertigungshilfsmittel-Bereitstellung erkannt. Die daraus in der Fertigung tatsächlich resultierenden Verzögerungen der Arbeitsgänge erhöhen die Auftragsdurchlaufzeit und verringern die regulär verplanbare Kapazität. Sie schlagen sich teilweise in den Erfahrungswerten für "Übergangszeiten" und den Nutzungsgrad nieder. Es ist aber festzustellen, daß in dieser vorlaufenden Planungsphase diese Werte nicht direkt steuernd beeinflußt werden können, sondern nur als Ergebnisse früherer Fertigungsperioden verwendet werden.

Das Ergebnis der mittelfristigen Planung ist eine mehr oder weniger realistische Kapazitätsauslastung für die betrachtete Planungsperiode sowie eine theoretisch gesicherte Materialversorgung.

Zunächst ist unbestritten, daß sich die sekundengenaue Fertigung über längere Zeitabschnitte kaum vorplanen läßt, da immer wieder unerwartete Ereignisse wegen ungenauer Eingabedaten und in Form von Störungen auftreten. So werden in der kurzfristigen Planungsstufe des PPS meist nicht die aktuellen Maschinenzustände oder Pufferbelegungen und auch nicht die Fertigungshilfsmittelbereiche berücksichtigt.

Trotzdem legen bekannte PPS-Systeme mit recht großem Vorlauf sekundengenau terminiert AG-Folgen fest. Da sich diese Termine meist nicht halten lassen, führt die Fertigung teilweise ein Eigenleben am PPS vorbei. Die tatsächliche Durchsetzung der Fertigungsaufträge liegt in der Kompetenz

von Betriebsleitern und Meistern, die als steuernde, operative Instanz tätig werden. Besser und der Realität entsprechender wäre es, die Fertigungstermine in dieser Planungsstufe mit einer gewissen Unschärfe zu bestimmen.

2.3.3 Fertigungssteuerung

Dem Personal bleibt meist noch ein Freiraum, in dem es die Bearbeitungsfolgen an den Kapazitätsstellen bestimmt. Dabei kann es für Optimierungen durchaus auf Hilfestellungen der EDV in der operativen Ebene -falls vorhanden- zurückgreifen. Das steuernde Personal, (die Meisterebene des Fertigungsbetriebs) führt dann ebenfalls Planungsläufe aus, die mit den Begriffen "Fertigungsleitstand" oder "Werkstattsteuerung" (Bild 2.6) verbunden werden. Wird dem Fertigungsleitstand diese Werkstattplanung EDV-technisch zugeordnet, so handelt es sich dabei um die vierte Planungsstufe. Sie ist die formale Fassung einer Kompetenz, welche bereits traditionell

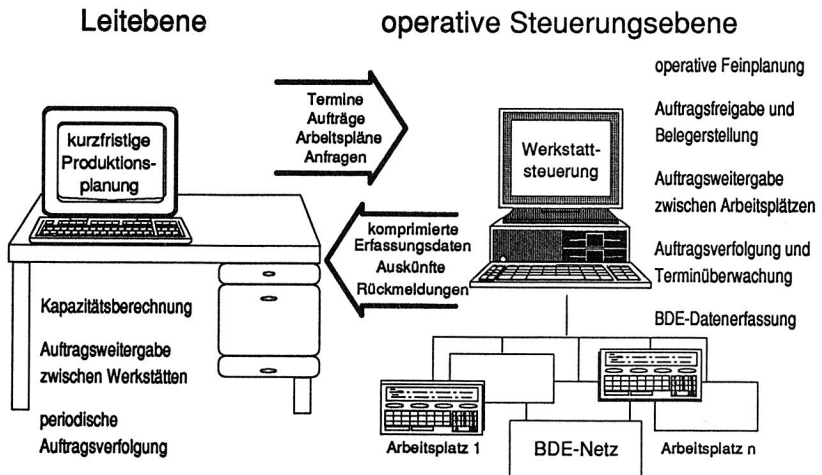


Bild 2.6: Aufgabenteilung zwischen kurzfristigem PPS und Leitstand

der Meisterebene in Fertigungsbetrieben zugeordnet ist [15]. Diese Methode setzt aber voraus, daß für jeden dieser Planungsläufe aktuellste Daten über den Fertigungszustand vorhanden sind.

Da das übergreifende PPS-Rechnersystem oft nicht in der Lage ist, on-line die Daten zu erfassen, werden hierzu dezentrale BDE-Einrichtungen vor Ort eingesetzt. Es liegt nahe, die kurzfristige Planungs- und Steuerungsfunktion auf diese Rechner zu verlagern. Bei einer guten Abstimmung zwischen PPS und diesen dezentralen Systemen bezüglich der Aufgaben und Datenformate läßt sich die Steuerungsfunktion insgesamt erheblich verbessern, da nach Ansicht kompetenter Autoren [93] (S.42) diese Funktionen in den aktuell verfügbaren PPS-Systemen nur spärlich realisiert sind.

Ein wichtiger Teil der Aufgaben der Werkstattsteuerung ist die Reihenfolgebestimmung der Arbeitsgänge innerhalb ihres Planungshorizontes. Wie oben angeführt, werden vor einer Kapazitätsstelle oder einer Maschinengruppe mehrere Aufträge auf Bearbeitung warten. Eine vorteilhafte Reihenfolge dieser Arbeitsgänge an den Maschinen zu bestimmen, ist ein anspruchsvolles kombinatorisches Problem.

2.4 Neue Anforderungen an die Fertigungsplanung durch den Einsatz flexibler Fertigungssysteme

2.4.1 Wirtschaftliche Ziele der Fertigungsplanung

Die Investitionssumme für flexible Fertigungssysteme ist bedeutend höher als jene, die für die gleiche Maschinenanzahl beim Einsatz konventioneller CNC-Fertigungsmaschinen notwendig wäre, da zusätzlich noch die Komponenten für die Automatisierung und Rechnersteuerung zu beschaffen sind. [32, 103]

Daher ist es besonders wichtig, den wirtschaftlichen Einsatz der Systeme (Bild 2.7) sicherzustellen [2, 130]. Ein wichtiger Punkt für die wirtschaftliche Nutzung dieser Systeme ist deren große jährliche Nutzungszeit, von welcher der Platzstundensatz [32] wegen der hohen Fixkosten erheblich abhängt. Die Systeme sollten zumindest in 2 Schichten täglich genutzt werden. Innerhalb der geplanten Nutzungszeit sind Stillstände durch organisatorische Mängel zu vermeiden. Weiterhin erlauben die Automatisierungskomponenten der Anlagen eine Reduktion des Personaleinsatzes, bis zur bedienerlosen Fertigung in Arbeitspausen und dem Auslauf in einem Teil der 3. Schicht. Diese Optionen können aber nicht für alle Werkstücke - abhängig von ihrer Prozeßsicherheit - genutzt werden. Die Auslastung der Fertigungseinrichtungen ist aber nicht nur davon abhängig, daß genügend durchführbare Fertigungsaufträge vorhanden sind, sondern auch von der zwischen den Aufträgen anfallenden Rüstzeit, die ebenso gering gehalten werden soll.

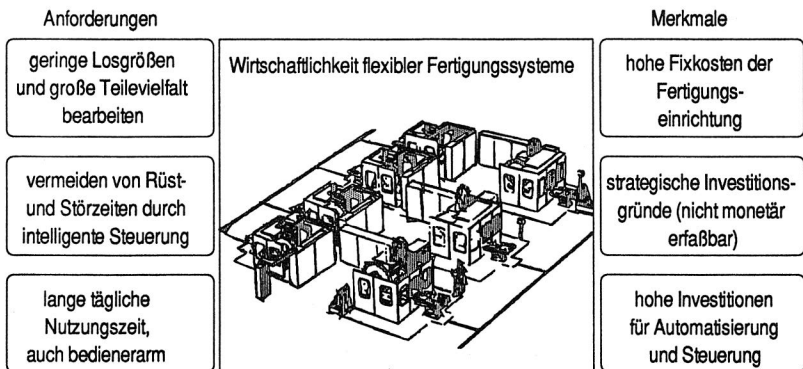


Bild 2.7: Anforderungen und Merkmale, welche die Wirtschaftlichkeit flexibler Fertigungssysteme beeinflussen

2.4.2 Planungsaufgaben in der operativen Ebene

Flexible Fertigungssysteme sind selbstverständlich in die, den Gesamtbetrieb umfassenden, Produktionsplanungsvorgänge

eingebunden. Die beschriebene, dreistufige Vorgehensweise wird daher vorausgesetzt. Jedoch bedürfen die operativen Planungs- und Steuerungsfunktionen für flexible Fertigungssysteme noch einer weiteren Detaillierung.

Es wird angenommen, daß die kurzfristige Kapazitätsplanung eine realistisch durchführbare Auftragsmenge an die Planungsinstanz der operativen Ebene übergibt. Während jedoch den überlagerten Bereichen der aktuelle Systemzustand verborgen ist, kennt ihn diese Steuerungsinstanz in allen Einzelheiten und muß ihn berücksichtigen. (Bild 2.8) Dabei sind die aktuellen Daten zum Fertigungsfortschritt, die Maschinenzustände und die vorhandenen oder reservierten Fertigungshilfsmittel mit einzubeziehen. Insbesondere die Daten der Fertigungshilfsmittel sind den weiter vorhergehenden PPS-Planungsstufen nicht bekannt. In der operativen Planung für begrenzte Fertigungsbereiche besteht aber die Chance, auch die Kapazität der Nebenarbeitsplätze und deren Verkopplung mit den direkten Fertigungsarbeitsplätzen einzubeziehen.

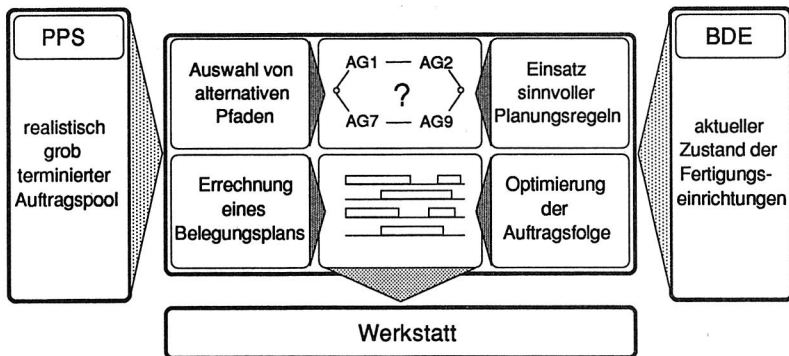


Bild 2.8: Planungsaufgaben in der operativen Ebene

Darüberhinaus erfolgt hier die Optimierung der Auftragsfolgen nach ausgewählten Zielkriterien. Es kann nach Erfahrungswerten (interaktiv) oder nach hinterlegten Regeln eine Fertigungsplanung durchgeführt werden. Wie bereits Seliger

[103] zeigte, ist die zeitliche Belegung einzelner Maschinenkapazitäten durch das gleiche Auftragspektrum u.a. von der Auftragsdurchlaufstrategie (Bild 2.9) beeinflusst. Abhängig von den ausgewählten Zielkriterien (Bild 2.10) kann also zwischen diversen Auftragsdurchlaufarten im flexiblen Fertigungssystem gewählt werden.

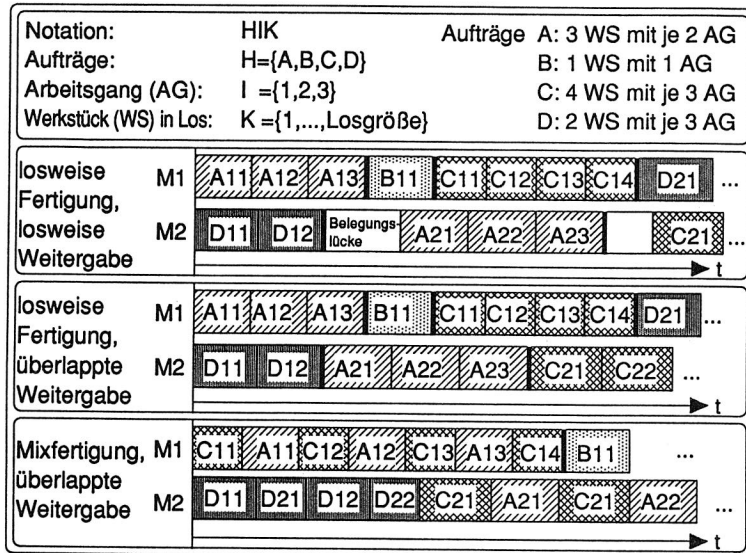


Bild 2.9: Übliche Auftragsdurchlaufstrategien in flexiblen Fertigungssystemen [103]

Die Zahl der möglichen Kriterien ist hoch und kann hier nicht vollständig aufgezählt werden. Da nicht alle Ablaufkriterien tatsächlich für jede Fertigung relevant sind, muß für einen konkreten Einsatz zunächst die Reduktion auf eine bewältigbare Anzahl erfolgen. Weiterhin kann die exakte analytische Lösung von Optimierungsrechnungen (Rechenzeit, Lösungswege) meist nicht ausgeführt werden, so daß an Stelle dieser Rechnungen einfache Auswerteregeln treten müssen. Die operative Fertigungsplanung in FFS muß unter Berücksichti-

gung des aktuellen Systemzustandes und der Zielkriterien den Aufträgen eine verfügbare Kapazität zuweisen. Dabei wird ein Zeitplan für den folgenden Fertigungsabschnitt erstellt. Das Ergebnis der Planung soll eine Auftragsverteilung und Arbeitsgang-Reihenfolge sein, die nach den aktuellen, der Planung zugrundeliegenden Daten, einen durchführbaren, optimierten Fertigungsablauf darstellen.

OPTIMIERUNGS- KRITERIUM	AUFTRAGS- DURCHLAUFART						
		losweise Fertigung losweise Weitergabe	losweise Fertigung überlappte Weitergabe	Mixfertigung, losweise Weitergabe	Mixfertigung, überlappte Weitergabe	voll ersetzende Stationen "Gesamtmix" über Periode	voll ersetzende Stationen (Mixfertigung)
Anzahl der Rüstzeiten		●	●	●	●	●	●
Dauer der Rüstzeiten		●	●	●	●	●	●
Lose/Periode durchführbar		●	●	●	●	●	●
Vorrichtungsbedarf		○	○	●	●	●	●
Vorrichtungsrüstzeiten		○	○	●	●	●	●
Werkzeugvoreinstellung		○	○	●	●	○	●
Sonderwerkzeugbedarf		○	○	●	●	○	●
Auslastung		○	●	●	●	●	●
Auftragsdurchlaufzeit		●	●	○	●	○	●

○ = ungünstig ● = mäßig ● = gut

Bild 2.10: Qualitative Bewertung der Kombination von Auftragsdurchlaufarten und Optimierungskriterien

2.4.3 Schnelle Verarbeitung der Betriebsdaten

Durch die direkte Verbindung von Maschinensteuerungen, BDE-Terminals und Leitrechnersystemen können eine Vielzahl von Betriebsdaten on-line aufgenommen werden. Diese Daten lassen sich in aktuellen Entscheidungsprozessen verwenden und zu statistischen Aussagen verarbeiten, die später, durch spezielle Auswertungen, wiederum als Grundlage zur Steuerung

des Systems verwendet werden . Denkbar sind hier Ansätze zur vorausschauenden Diagnose oder Strategiewahl.

Im Sinne eines Regelkreises kann auf Grund der erfassten Daten auch z.B. eine Änderung der Fertigungsdurchlaufart notwendig sein, um bestimmte Einsatzziele des FFS zu erreichen. Diese Entscheidung sollte eine on-line-Steuerung des Fertigungssystems treffen. Bekannte Softwaresysteme arbeiten bei der organisatorischen Steuerung des Materialflusses starr die von der Disposition errechneten Reihenfolgen ab (siehe [59], S. 82) oder gehen nach einer einfachen FIFO-Strategie [104] vor, bei der teilweise von außen vorgegebene Prioritäten berücksichtigt werden. Die erste Möglichkeit läßt außer Betracht, daß zwischen der kurzfristigen Fertigungsplanung und dem aktuellen Systemzustand Ereignisse auftreten können, durch welche der vorgeplante Ablauf nicht mehr geeignet ist, die wirtschaftlichen Planungsziele zu erreichen. Die andere Möglichkeit verzichtet völlig auf die Chance, den Fertigungsablauf zu optimieren.

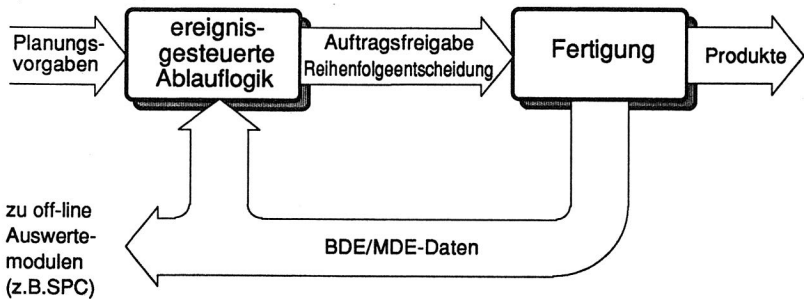


Bild 2.11: Ziel eines organisatorischen Regelkreises in der operativen Ebene

Im Gegensatz dazu wird hier gefordert, jeweils ausgewählte Kriterien als Steuerungsalgorithmen zur Reihenfolgebestimmung an den Maschinen des Systems heranzuziehen, die über o.g. Strategien hinausgehen. Weiterhin wird durch die im

weiteren spezifizierte operative Steuerung überprüft, ob für eine festgelegte Zeit im Voraus die notwendigen Bereitstellungsvorgänge der Fertigungshilfsmittel durchgeführt werden können.

2.5 Abbildung der Planungsaufgaben auf das hierarchische Steuerungskonzept

Es ergibt sich eine Vielzahl von möglichen Ausprägungen der Planungsstufen, die sich in einem oder mehreren Parametern unterscheiden. Das vorgestellte Modell soll so zur Einordnung der Planungs- und Steuerungsvorgänge für Fertigungshilfsmittel in einem umfassenden Zusammenhang dienen. Die bisher referierte Sicht der Planungs- und Steuerungsaufgaben wurde aufgabenspezifisch und ohne Betrachtung der verwendeten EDV-Hilfsmittel durchgeführt. Bei einer Realisierung ist jedoch eine Zuordnung zwischen physikalisch vorhandenen Systemen (Rechner, Betriebsmittel, Arbeitskräften) und Aufgaben zu leisten.

Für das weitere Vorgehen wird als Referenzkonfiguration (Bild 2.12) eine Rechnerhierarchie vorausgesetzt, die in vier Ebenen einteilbar ist:

- Planungs- und Verwaltungsebene
- Leitebene
- operative Ebene
- Prozeßebene

Die vorgestellten Aufgaben der langfristigen und mittelfristigen Planung werden allgemein [39] dem Bereich Produktionsplanungssysteme und somit der Planungs- und Verwaltungsebene zugeordnet. Die kurzfristigen Planungsaufgaben, die ohne die direkte Berücksichtigung des Makro-Zustandes der Fertigungseinrichtungen durchgeführt werden können, sind der Leitebene (oder noch der Planungsebene) zugeordnet. Es wird

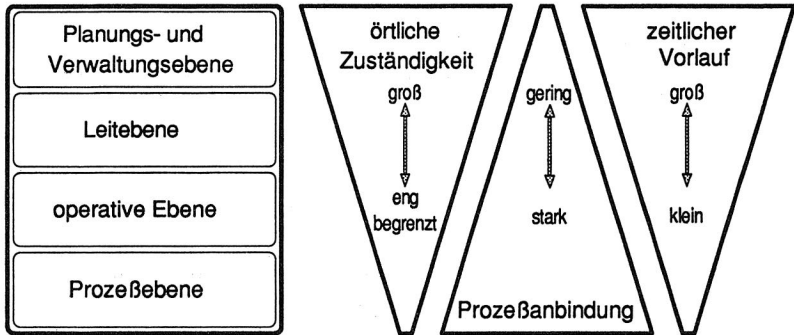


Bild 2.12: Planungs- und Steuerungsebenen im hierarchischen Steuerungskonzept

hier ein umfassender Kapazitätsabgleich bezüglich der wesentlichen Fertigungsvorgänge¹ durchgeführt, ohne jedoch Restriktionen bezüglich der Fertigungshilfsmittel zu betrachten. Es erfolgt eine Auswahl des Fertigungsverfahrens aus ggf. vorhandenen Alternativen und eine Zuordnung von Arbeitsgängen der primären Fertigungsverfahren zu den Elementen der operativen Ebene. Jene kurzfristigen Planungsaufgaben, die unter der Berücksichtigung des Makro-Zustandes der Prozeßebene durchgeführt werden, finden in der operativen Ebene statt. Hier werden nicht nur die primären Fertigungsverfahren einbezogen, sondern der Arbeitsplan ggf. um Hilfs- und Vorbereitungsfunktionen ergänzt und alle Vorgänge den Kapazitätsstellen zugeordnet. Weiterhin werden die Vorgänge der Fertigungshilfsmittelbereitstellung, Umrüstung und der Materialtransporte geplant und gesteuert. Dabei besteht dann die Möglichkeit, Verzögerungen der Fertigung durch eine optimierende Reihenfolgeplanung und on-line-Steuerung der Arbeitsgänge zu vermeiden.

1. Für diese Vorgänge wird im Folgenden der Begriff "primäre Fertigungsverfahren" verwendet. Beispielsweise fällt beim Ablängen von Stangenmaterial der Sägevorgang darunter, aber nicht ein folgendes Entgraten.

In der Prozeßebene finden keine planenden Vorgänge im Sinne dieser Arbeit statt, obwohl auch dort gewisse Freiheitsgrade vorhanden sein können. Als Beispiel sei die planende Verfahrensoptimierung der Steuerung eines Regalförderzeugs in einem Hochregallager genannt. Diese Prozesse haben jedoch bezüglich der Fertigungshilfsmittelbereitstellung, wie sie hier untersucht wird, keine Bedeutung.

3 Fertigungshilfsmittel in flexiblen Fertigungssystemen

3.1 Das Aufgabengebiet der FHM-Versorgung und -Verwaltung

In allen Ebenen des hierarchischen Steuerungskonzepts sind Aufgaben bezüglich der Fertigungshilfsmittel vorhanden. Ebenso wie für die Bildung von Fertigungsaufträgen und die Ablaufplanung bei den primären Fertigungsverfahren gilt es, eine Planungs- und Verwaltungsstruktur für Fertigungshilfsmittel zu bilden.

In bisherigen Veröffentlichungen wird hauptsächlich der Bereich der Werkzeuge angesprochen. In der Tat handelt es sich dabei um den bedeutendsten Teil der Fertigungshilfsmittel in der spanenden Fertigung. Das Aufgabengebiet der FHM - bzw. Werkzeugversorgung wird aus verschiedenen Blickwinkeln betrachtet: z. B. aus aufbauorganisatorischer, ablauforganisatorischer und technisch-maschinenbaulicher Sicht.

3.1.1 Die Aufbauorganisation

Wird die hierarchische, aufgabenorientierte Zusammenfassung der beteiligten Mitarbeiter des Werkzeugwesens betont, so liegt eine aufbauorganisatorische [19] Sichtweise auf die

Werkzeugversorgung vor. Mayer, Storr, Balbach [4, 67, 115] gliedern das Werkzeugwesen in die Funktionsbereiche Werkzeugplanung, Werkzeugbewirtschaftung, Werkzeugversorgung und Werkzeugeinsatz. Diese funktionale Aufteilung wird in dieser Arbeit auf die Fertigungshilfsmittel übertragen. Die Funktionen bei Versorgung und Einsatz werden im Folgenden genauer als bisher gegeneinander abgegrenzt und die Funktionsbereiche nun als

- Fertigungshilfsmittelplanung
- Fertigungshilfsmittelbewirtschaftung
- Fertigungshilfsmittelvorbereitung
- Fertigungshilfsmittelnutzung

bezeichnet.



Bild 3.1: Aufbau der Fertigungshilfsmittelorganisation

Fertigungshilfsmittelplanung

Die Fertigungshilfsmittelplanung ist eine Teilaufgabe bei der Erstellung der Fertigungsunterlagen. Die benötigten Betriebsmittel werden hier unabhängig von einem konkreten Fertigungsauftrag einmalig festgelegt. Funktional und zeitlich ist die Werkzeugplanung für die spanende NC-Fertigung eng mit der NC-Programmierung verknüpft. Durch die Zuordnung von Werkzeugen zu einer Fertigungsaufgabe wird ursächlich die Menge der unterschiedlichen, im Betrieb verwendeten, Werkzeugtypen bestimmt, indem z.B. neue Elemente eines Werkzeugkatalogs (mit Stücklisten, Montagebeschreibung, Sollwerten usw.) festgelegt werden. Die Werkzeugplanung ist somit ein die Werkzeugkosten und den Rüstaufwand stark beeinflussender Funktionsbereich. Daher wird der Fertigungshilfsmittelplanung auch die Aufgabe zugeordnet, die Anzahl der Typen zu bereinigen oder gering zu halten [50]. Dieses Ziel ist jedoch nur in einer engen Verbindung zur Konstruktion erreichbar.

Fertigungshilfsmittelbewirtschaftung

Die Fertigungshilfsmittelbewirtschaftung deckt den materialwirtschaftlichen Teil des Werkzeugwesens ab und beschäftigt sich mit der vorausschauenden Bewirtschaftung des Hilfsmittelbestandes. Der Ersatz- oder Neubedarf wird hier teilweise nach bekannten materialwirtschaftlichen Verfahren beschafft. Es gilt, die Verfügbarkeit der Fertigungshilfsmittel auftragsunabhängig sicherzustellen. Die von der Fertigungshilfsmittelplanung generierten Daten werden verarbeitet und in Beschaffung neuer Komponenten oder Mengenänderungen umgesetzt. Übereinstimmend mit Mayer [67] wird festgestellt, daß die Datengrundlage der Werkzeugbewirtschaftung für eine Beschaffungsperiode gilt. Insgesamt sind die Aufgaben der Fertigungshilfsmittelbewirtschaftung in der mittelfristigen Planungsstufe des hierarchischen Planungsmodells nach Kap. 2 einzuordnen. Sie werden in Verbindung mit der dort durchge-

fürten Materialwirtschaft für Werkstücke, Rohteile und Verbrauchsmaterial erledigt.

Fertigungshilfsmittelvorbereitung

Die Fertigungshilfsmittelvorbereitung leistet die auftragsabhängige Zusammenstellung der benötigten Fertigungshilfsmittel. Sie umfasst zu einem großen Teil die Aufgaben der "Werkzeugversorgung" nach [67], mit Ausnahme des Werkzeugtransports. Die Aufgaben der Fertigungshilfsmittelvorbereitung werden für Werkzeuge am Werkzeugvoreinstellplatz, für Vorrichtungen bei der Vorrichtungsmontage, ausgeführt. Meist handelt es sich um manuelle Vorrichtungen, wobei bereits Ansätze zur Automatisierung [6, 64] bekannt sind. Die FHM-Vorbereitung besitzt vielfältige Schnittstellen zu den umgebenen Modulen eines hierarchischen Steuerungskonzepts. Die zeitliche Kapazität der Arbeitsplätze, welche die FHM-Vorbereitung ausführen, ist begrenzt, so daß sie als "ein von der Fertigungssteuerung zu berücksichtigendes Arbeitssystem" zu betrachten sind [129].

Fertigungshilfsmittelnutzung

Die Fertigungshilfsmittelnutzung betrifft alle Vorgänge bei Transport und Einsatz der Fertigungshilfsmittel. Es werden tatsächlich vorhandene FHM genutzt. So fällt unter die FHM-Nutzung der Transport von Werkzeugen zwischen Werkzeugvoreinstellplatz und Fertigungssystem, der interne Werkzeugtransport im Fertigungssystem und der Einsatz der Werkzeuge in der Maschine. Die Steuerung der Fertigungshilfsmittelnutzung ist eine Teilfunktion der Fertigungssteuerung und betrifft logistische Vorgänge (Transport von FHM) in Verbindung mit den Arbeitsgangfolgen an den Bearbeitungsmaschinen.

3.1.2 Die Ablauforganisation

Die Funktionen des Fertigungshilfsmittelwesens sind zur Abwicklung ihrer Aufgaben in definierte Abläufe, die Ablauforganisation [19], eingebunden. Für die Werkzeugorganisation [63] wurden diverse Ablaufkonzepte und integrierte Ansätze entwickelt. So bieten die namhaften Hersteller von Werkzeugen und Fertigungssystemen eigene Datenbanken, Verwaltungs- und Organisationsprogramme für Werkzeuge an [44, 45, 78, 79, 80, 101, 82]. Außerdem beschäftigen sich die Arbeiten von Mayer [67] u.a. mit den Datenformaten und Zugriffen der Funktionsbereiche auf die Datenbanken und den internen Abläufen der Funktionsbereiche. Obwohl die Autoren meist nur von Werkzeugen sprechen, sind ihre Darstellungen auch auf andere FHM übertragbar. Die Aufgaben des FHM-Wesens werden bei Arbeitsvorbereitung, Materialwirtschaft und Fertigungssteuerung ausgeführt und verbinden die o.g. Funktionsbereiche. Dabei sind für den Anstoß der Funktionen jeweils Datenaustauschvorgänge notwendig.

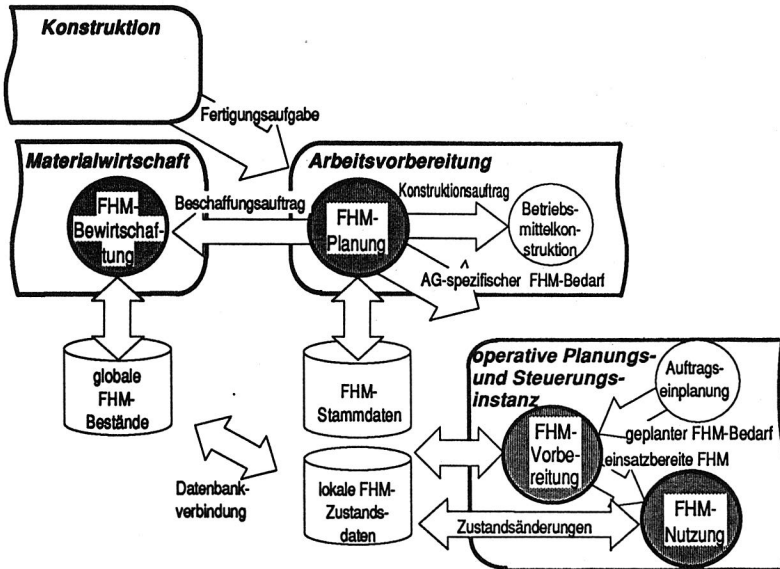


Bild 3.2: Einordnung des Werkzeugwesens im Betrieb

Die Arbeitsvorbereitung führt auf Grund der von der Konstruktionsabteilung übergebenen Unterlagen die technologische Planung der Bearbeitung durch. Dazu gehört die Festlegung der Fertigungshilfsmittel, die FHM-Planung. In speziellen Fällen wird ein separater Konstruktionsvorgang für die Fertigungshilfsmittel angestoßen (Werkzeugbau). Werden neue, extern zu beschaffende Fertigungshilfsmittel definiert, muß die Materialwirtschaft mit einem entsprechenden Beschaffungsauftrag versorgt werden.

Die Produktionsplanung- und Steuerung gibt Aufträge in die Fertigung, wodurch dort ein Bedarf an FHM ausgelöst wird. Die Bedarfsmengen leiten sich aus den von der Arbeitsvorbereitung erstellten Unterlagen ab. Durch die Verarbeitung dieser Daten ließe sich auch die benötigte FHM-Kapazität betrachten und ein FHM-Belegungsplan analog zur Kapazitätsplanung für Arbeitsplätze erstellen [115]. Eine solche Vorgehensweise ist jedoch noch nicht Stand der Technik. Mit den Fertigungsaufträgen kann die FHM-Vorbereitung angestoßen werden. Der rechtzeitige Anstoß ist entscheidend für den störungsfreien Ablauf der Fertigung.

Mit der Bereitstellung der FHM in der Fertigung beginnt der Bereich der FHM-Nutzung. Die FHM befinden sich dann unter der Kontrolle der operativen Fertigungssteuerung, die jedoch bisher sehr selten die FHM tatsächlich berücksichtigt. Ein Teil der FHM unterliegt einem Verschleiß, der die Notwendigkeit des Ersatzes nach sich zieht, der in Zusammenarbeit mit der FHM-Vorbereitung durchzuführen ist.

Nach der FHM-Nutzung werden die FHM meist wieder von den Arbeitsplätzen entfernt und im Zugriff der FHM-Vorbereitung eingelagert. Die FHM-Vorbereitung führt hier eine Nachkontrolle an den FHM aus. Hierdurch entsteht der vielfach erwähnte Werkzeugkreislauf. (Bild 3.3) Durch den aufgetretenen Verschleiß ändern sich die Daten der FHM-Bestände, auf denen wiederum die FHM-Bewirtschaftung aufsetzt.

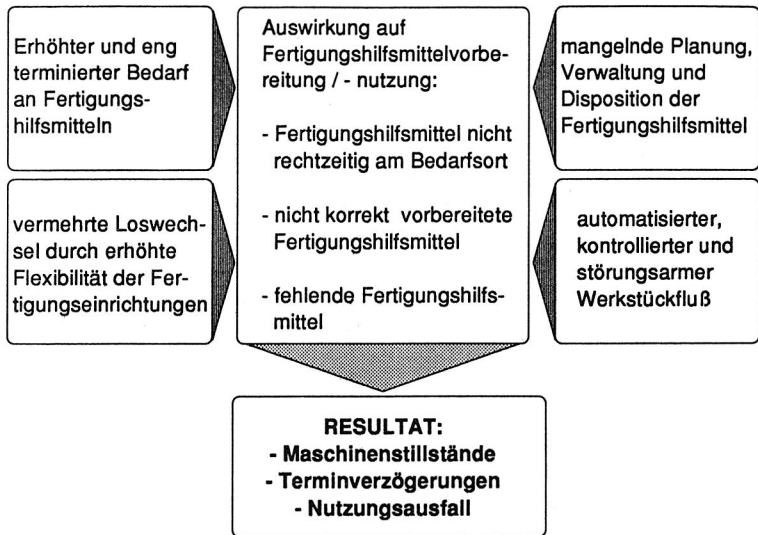


Bild 3.4: Schwachstelle Fertigungshilfsmittel

Die Grundanforderung für alle Systeme zur Fertigungshilfsmittelversorgung ist, eben genau die benötigten Elemente zur richtigen Zeit am richtigen Ort, zusammen mit den dazugehörigen Daten, bereitzustellen. Wegen der verstärkten Nutzung der Teile- und Reihenfolgeflexibilität flexibler Fertigungseinrichtungen und des daraus resultierenden großen FHM-Bedarfs [48] wird es immer aufwendiger, dieser Anforderung gerecht zu werden.

In verschiedenen Untersuchungen wurden die aufgetretenen Störungen nach Störgründen, Anzahl und Dauer betrachtet. Dabei erwies sich der Bereich der Fertigungshilfsmittel, besonders die Versorgung mit Werkzeugen und Vorrichtungen, als äußerst störanfällig. Es traten dabei meist organisatorische Mängel auf [31, 40, 129]. Daraus ist zu schließen, daß die Ablauf- und/oder die Aufbauorganisation für FHM noch eingehender Verbesserungen bedarf, damit diese organisatorischen Mängel behoben werden können.

Die Probleme der Werkzeugversorgung können verringert werden, indem man die Anzahl der direkt an der Maschine bereitgehaltenen Werkzeuge erhöht. Dadurch entfällt teilweise die Notwendigkeit, wegen der Teileflexibilität ein Werkzeug auszutauschen. Diesen Weg sind viele Maschinenhersteller gegangen und vergrößerten die Werkzeugmagazine der Maschinen. Es wurden deshalb Werkzeugmagazine bis zu einer Kapazität von 200 Werkzeugen angeboten [126].

Trotzdem bleibt die unmittelbar an einer Werkzeugmaschine speicherbare Anzahl von Werkzeugen begrenzt, da die großen Magazine ein maschinenbauliches Problem (Dynamik, Raumbedarf, Zeitverhalten) darstellen. Daher werden Anstrengungen unternommen, die Maschinen aus einem zentralen Werkzeuglager zu versorgen. Auf rein konstruktiven Weg können jedoch nicht die Anforderungen an die Werkzeugversorgung befriedigt werden, denn die Leistung der eingesetzten Einrichtungen ist immer in Zusammenhang mit ihren Steuerungs- und Planungsalgorithmen zu sehen.

3.2 Technische Lösungen für Handhabung und Transport

3.2.1 Funktionsträger von Werkzeugtransportsystemen

Für die Realisierung automatisierter Transportsysteme ist es oft notwendig, die in den Funktionsbereichen FHM-Planung, -Bewirtschaftung und -Vorbereitung gleich behandelten FHM wieder in ihren Ausprägungen als Werkzeuge, Spannmittel, Greifer usw. zu unterscheiden. Die großen Abweichungen bei Einsatzzweck, Einsatzort und handhabungsrelevanten Parametern erfordern diese Trennung.

Der Werkzeugtransport stellt die Verbindung zwischen der Werkzeugvorbereitung und dem Einsatz des Werkzeugs in der Maschinenspindel her. Er wird zur Werkzeugnutzung gerechnet, da das Werkzeug bereits für einen bestimmten Einsatz reserviert ist. Am Werkzeugtransport sind verschiedene maschinen-technische Funktionsträger beteiligt. Diese Funktionsträger wurden bereits mehrfach systematisch dargestellt und untersucht. [23, 66, 112, 118, 121]. Feldmann [21, 23] untersuchte die Beschickung und Werkzeughandhabung an Drehmaschinen. Viehweger [121] bietet einen Überblick zu den möglichen technisch-konstruktiven Lösungen für automatisierte Werkzeughandhabungs- und Transporteinrichtungen.

Funktionsträger (Bild 3.5) in diesem Bereich sind Transportsysteme, Handhabungseinrichtungen sowie Lager und Speicher in diversen Ausprägungen. Eine allgemeine Struktur (z.B. für Bearbeitungszentren) kann folgende Komponenten umfassen:

- » Transportsystem zwischen Werkzeugvorbereitung und systemumfassendem Lager für Komplettwerkzeuge
- » Systemlager für Komplettwerkzeuge
- » Transportsystem zwischen Systemlager und Maschinenmagazin
- » Maschinenmagazin
- » Handhabungs- und Puffereinrichtung zwischen Maschinenmagazin und Arbeitsspindel

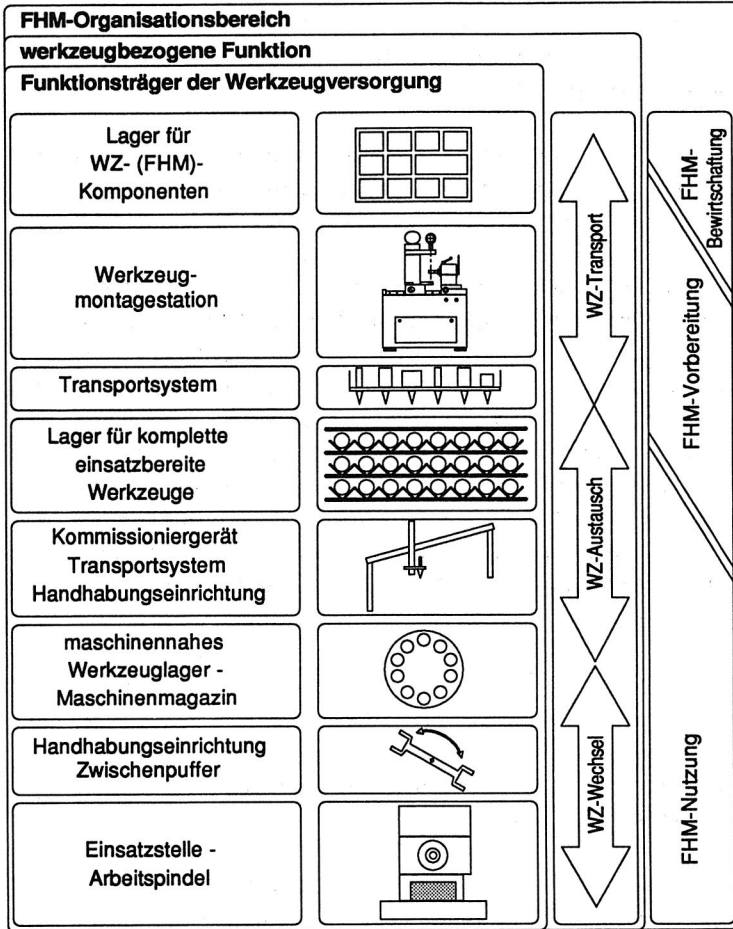


Bild 3.5: Funktionsträger im Bereich der WZ-Bereitstellung

3.2.2 Werkzeugwechsel und Werkzeugaustausch

Die Versorgung der Arbeitsspindel der NC-Maschine mit dem jeweils für den nächsten Bearbeitungsschritt benötigten Werkzeug (aus dem Maschinenmagazin) wird als "Werkzeugwechsel" bezeichnet. Der Werkzeugwechsel wird von der CNC-Steuer-

erung der Werkzeugmaschine überwacht. Er bietet im Rahmen der Untersuchungen dieser Arbeit keinen Ansatzpunkt für Planungsvorgänge und wird daher nicht weiter betrachtet.

Der Transport von Werkzeugen zwischen dem Systemlager und dem Maschinenmagazin wird als "Werkzeugaustausch" bezeichnet. Für den Werkzeugaustausch wurden bereits mehrere automatisierte Systeme [42, 43, 60, 94, 122, 132] vorgestellt, er wird aber meist manuell ausgeführt. Er stellt einen Rüstvorgang an der Werkzeugmaschine dar. Deshalb fällt die Organisation dieses Ablaufs in den Bereich der Rüststrategie und sollte durch die Fertigungssteuerung zumindest kontrolliert werden. In Verbindung mit den vielfältigen Funktionsträgern sind viele Strategievarianten zur Organisation des Werkzeugaustausches möglich [66, 123]. Ein Augenmerk der weiteren Arbeit liegt auf der Überwachung und dem Anstoß des Werkzeugaustausches und dessen Verbindung zur Werkstückversorgung bzw. Arbeitsgangfestlegung für die Bearbeitungsstation.

3.2.3 Einzel- und Palettentransport von Werkzeugen

Bezüglich der Transportmengen [29] werden zwei Transportmethoden unterschieden:

- » der Werkzeugeinzeltransport, bei dem jedes auszutauschende Werkzeug z.B. von einem verfahrbaren Handhabungsgerät einzeln transportiert wird.
- » der Werkzeugpalettentransport, bei dem mehrere Werkzeuge in einem Transportvorgang geliefert werden.

Beim Werkzeugpalettentransport können die Werkzeuge zwischen der Palette und dem Maschinenmagazin einzeln oder in Form der ganzen Transporteinheit ausgetauscht werden. Daher spricht man dann vom Werkzeug-Einzelaustausch oder Mehrfach-austausch.

Automatisierte Werkzeugeinzeltransportsysteme (Bild 3.6) eignen sich meist nur für geringe Austauschhäufigkeiten und die Bedienung von wenigen Maschinen bei der Versorgung der Maschinenmagazine aus einem System-Werkzeuglager [122]. Die geringen Austauschhäufigkeiten treten auf, wenn nur Verschleißwerkzeuge auszutauschen sind. Dies läßt sich erreichen, wenn je ein Werkzeug aller benötigten Werkzeugtypen im Maschinenmagazin Platz findet oder über längere Zeiträume derselbe Arbeitsgang durchgeführt wird. Trotzdem können bei einem Auftragswechsel längere Rüstzeiten entstehen. Bezüglich der Flexibilität der Anlagen bedeutet dies, daß eine eingeschränkte Mengen- und Teile-Flexibilität besteht. Vorteile bietet aber der bei einem Einzeltransportsystem meist mögliche wahlfreie Zugriff auf alle im System vorhandenen Werkzeuge. Es läßt sich so z.B. die Nutzung von Sonderwerkzeugen durch mehrere Maschinen innerhalb einer Fertigungsperiode erreichen und durch Mehrfachnutzung anderer Werkzeuge prinzipiell die Standzeitausnutzung der eingebrachten Werkzeuge verbessern.

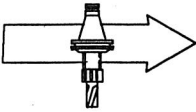
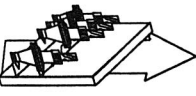
	Vorteile:	Nachteile:
Werkzeugeinzeltransport 	<ul style="list-style-type: none">- schneller Zugriff auf einzelne Werkzeuge- Nutzung eines Werkzeugs durch mehrere Stationen- schneller Ersatz von Verschleißwerkzeugen	<ul style="list-style-type: none">- nur für geringe Austauschhäufigkeit- eingeschränkte Teileflexibilität- eingeschränkte Mengenflexibilität
Werkzeugmehrfachtransport (Paletten) 	<ul style="list-style-type: none">- schnelle Umrüstung bei Auftragswechsel- geringe Transportfrequenz- große Transportkapazität	<ul style="list-style-type: none">- schwieriger Zugriff auf Einzelwerkzeuge- bei geringer Transportmenge nicht ausgelastet- relativ langsamer Austausch von Einzelwerkzeugen

Bild 3.6: Eigenschaften des WZ-Einzel- und Mehrfachaustausches

Der Werkzeugmehrfachaustausch (Bild 3.6), z.B. mit Paletten, erlaubt eine schnelle Umrüstung der Maschinen bei einem Auftragswechsel, obwohl ein Transportvorgang meist mehr Zeit als ein Einzeltransport benötigt. Es wird die Anzahl der notwendigen Transporte gering gehalten. Andererseits ist bei einem Bedarf an einzelnen Verschleißwerkzeugen das Transportsystem mit der Transportmenge nicht ausgelastet, muß aber umgehend die Versorgung durchführen. Beim Austausch von Verschleißwerkzeugen tritt also ein schlechteres Zeitverhalten als beim Einzeltransport auf. Je nach der Lagerorganisation und dem Aufbau der Maschinenmagazine erfordert der Zugriff auf bestimmte einzelne Werkzeuge einen hohen Aufwand oder ist nicht möglich. Das Beladen einer Transporteinheit an der Maschine erfordert z.B. Sortier- und Umladevorgänge im Maschinenmagazin, welche die Fertigung oder den Werkzeugtransport unvorhersehbar behindern können. Daher sind bei einem Mehrfachaustausch der Nutzung eines Werkzeugs durch mehrere Maschinen enge Grenzen gesetzt. Gut durchführen läßt sich das auftragsweise Rüsten der Maschinen.

3.2.4 Versorgung mit weiteren Fertigungshilfsmitteln

Bei anderen Fertigungshilfsmitteln besteht im Vergleich zu Werkzeugen nicht so sehr das Problem des Transports großer Stückzahlen, da häufig für jeden Auftrag nur ein Typ benötigt wird. Vielmehr geht es um die rechtzeitige und lagerichtige Bereitstellung am Bedarfsort und den korrekten Anstoß zur Nutzung dieser Betriebsmittel. Das Problemfeld der Leistungsfähigkeit des Transportsystems nimmt also ab, die organisatorische Einbindung dieser FHM bleibt aber weiterhin eine hohe Anforderung.

Während für die Werkzeuge ein Materialkreislauf wegen des Verschleißes und der großen Vielfalt nicht zu umgehen ist, sind für andere FHM prinzipiell folgende Vorgehensweisen (Bild 3.7) denkbar:

- » die FHM aller möglichen Aufträge bleiben immer maschinennah verfügbar und verlassen das Bearbeitungssystem nicht.
- » die FHM für jede Teileart werden jeweils auftragsspezifisch oder periodisch zusammengestellt und aus einem Lager mit einem eigenen Transportvorgang zur Einsatzstelle gebracht
- » die FHM für spezielle Arbeitsgänge werden jeweils mit den zu bearbeitenden Werkstücken im System transportiert und an die Arbeitsstationen gebracht

	Vorteile:	Nachteile:
alle FHM permanent maschinennah gespeichert	kaum organisatorische Probleme keine Verzögerungen	hoher Kapitaleinsatz
benötigte FHM periodisch kommissioniert	durch Planung und Vorbereitung weniger Störungen weniger Investitionen für FHM	hohe Investition für FHM-Transportsystem
benötigte FHM mit Material zur Maschine transportieren	weniger Investitionen für FHM	organisatorische Probleme bei Verbindung von WS- und FHM-Transport

Bild 3.7: Eigenschaften verschiedener organisatorischer Möglichkeiten zur FHM-Versorgung

Beispielsweise die Backensätze für verschiedene Spanndurchmesser können durchaus andauernd innerhalb einer flexiblen Drehzelle gelagert werden. Es handelt sich um FHM, die nicht verschleßen und durch ihre geringe Stückzahl nur eine vernachlässigbare Kapitalbindung bedeuten. Eine Nutzung durch mehrere Maschinen ist so aus wirtschaftlichen Gesichtspunkten nicht notwendig. Jedoch bedeutet die Änderung des Rohteildurchmessers bei der Drehbearbeitung grundsätz-

lich einen Maschinenstillstand zur Umrüstung des Spannfutters. Wenn dieser Rüstaufwand minimiert werden soll, muß die Ablaufsteuerung einer automatisierten Drehzelle versuchen, die Arbeitsgangfolgen mit Rücksicht darauf festzulegen.

Weiterhin können z.B. spezielle Greifer eines Handhabungsgerätes für eine Teileart gleichzeitig mit den Teilen auf einem Transportmittel zur Verfügung gestellt werden. Das Transportmittel ist so auszurüsten, daß Teile und FHM in definierter Lage angeliefert werden. Trotzdem bedeutet die Übernahme dieser Betriebsmittel in die Station einen Rüstvorgang, der nicht immer hauptzeitparallel ausführbar ist.

In flexiblen Fertigungssystemen werden die Werkstücke meist auf Paletten transportiert, die zur Aufnahme der Werkstücke mit speziellen Vorrichtungen ausgerüstet sind. Diese Vorrichtungen benötigen zur Montage und Vorbereitung eine gewisse Arbeitskapazität des Bedienpersonals. Jedoch wird diese Arbeitsleistung z. Zt. nicht bei der Reihenfolgeplanung in FFS berücksichtigt. In einer hochflexiblen Fertigung kleiner Lose treten aber gerade besonders häufig solche Umrüstungen auf, da meist jede Teileart eine eigene Vorrichtung benötigt. Das Bereitstellen der Vorrichtung ist eine Vorbedingung für den Beginn der Fertigung und bestimmt daher die möglichen Bearbeitungsfolgen mit. Deshalb muß eine Optimierung der FHM-Versorgung auch den Bereich der Spannvorrichtungen mit einbeziehen. Weiterhin sind neben dem manuellen Rüsten der Vorrichtungen noch Ansätze zur automatisierten Montage durch Roboter [64] bekannt.

3.3 Stellung der Fertigungshilfsmittel innerhalb der Steuerungskonzepte flexibler Fertigungssysteme

Die rechnergeführte, technische und organisatorische Steuerung flexibler Fertigungseinrichtungen war bereits Gegenstand vieler Untersuchungen. Anfangs stand die Sicherstel-

lung der unmittelbaren Funktionen für Bearbeitungsanstoß und Werkstückversorgung im Mittelpunkt [16, 26, 86]. Module für Ablaufplanung und Ablaufstrategie wurden nicht betrachtet, ebensowenig wie die Bereitstellung von Betriebsmitteln.

In anderen Arbeiten [35, 59] liegt der Schwerpunkt auf der Anpassbarkeit der Steuerungssoftware an unterschiedliche Anlagenkonfigurationen, um den hohen Programmieraufwand der Software durch mehrere Installationen wirtschaftlich zu rechtfertigen. Kohen [59] definiert die Steuerungssoftware als eine Zusammenstellung einzelner Module mit bestimmten Aufgaben, die über festgelegte Schnittstellen kommunizieren. Für spezielle Anforderungen gibt es mehrere Ausprägungen eines Moduls, die sich in ihrem inneren Ablauf unterscheiden. Ein solches Softwaremodul kann durchaus auch die Werkzeugplanung- und Steuerung sein. Als Besonderheit wird von Groha [35] der Zugriff mehrerer Stationen auf "permanent gemeinsame Betriebsmittel" beschrieben, wobei er speziell ortsbewegliche Handhabungsgeräte untersucht. Daneben wird dort auch erwähnt, daß es diverse Möglichkeiten zur Optimierung der Auftragsfolge, z.B. nach minimalem Rüstaufwand, gibt, ohne jedoch detailliert darauf einzugehen.

In der Arbeit von Schmitz-Mertens [99] wird kurz die Einordnung des Betriebsmittelbaus zwischen zentraler und dezentraler Auftragsveranlassung angesprochen, dabei beauftragt die zentrale Auftragsveranlassung den Betriebsmittelbau mit der Vorbereitung von Fertigungshilfsmitteln, deren Verfügbarkeit anschließend von der dezentralen Auftragsveranlassung mit Feinterminen überprüft wird.

Weiter wurden bereits mehrfach flexible Fertigungssysteme [28, 42, 56, 66, 112, 125] u.a. realisiert, die über ein Werkzeugtransportsystem verfügen. Das Transportsystem reagiert dabei auf den Werkzeugbedarf der Maschinen, wobei das Leitsystem noch ggf. zu entnehmende Werkzeuge ermittelt. Ein übliches Verfahren hierbei ist z.B. die sog. "Fenster Technik" [38, 117], bei der an Hand von Werkzeugeinsatzlisten

die jeweils nächsten Werkzeugeinsätze ausgewertet werden. Der Anstoß für diesen Vorgang ist der Werkzeugwechsel zwischen Arbeitsspindel und Maschinenmagazin. Dieses Verfahren erlaubt es, auch mit Maschinenmagazinen, deren Aufnahmefähigkeit kleiner ist als die Werkzeuganzahl eines NC-Programms, die Fertigung durchzuführen. Ein anderes Steuerungsverfahren ist die periodisch-zeitgesteuerte Vorausberechnung der notwendigen Werkzeugaustauschvorgänge zwischen den Maschinenmagazinen und dem Lager.

3.4 Bisherige Untersuchungen zur Fertigungshilfsmittelversorgung

In den grundlegenden Arbeiten liegt der Schwerpunkt auf der maschinenbaulichen Auslegung von Werkzeugversorgungssystemen. Steinhilber [112] entwickelt eine Planungsmethodik und stellt die möglichen Funktionsträger dar. Viehweger [121] führt eingehende Simulationen mit dem Ziel Konfiguration flexibler Systeme durch. Insbesondere die Leistungsfähigkeit diverser Werkzeugtransportsysteme wird betrachtet. Er weist auf die Möglichkeit hin, durch intelligente Bildung von Auftragsfolgen den Werkzeugbedarf eines flexiblen Fertigungssystems zu verringern, erarbeitet jedoch kein Daten- oder Ablaufkonzept, das diese Möglichkeit nutzt. Der Schwerpunkt in seiner Arbeit liegt bei der Planung flexibler Fertigungssysteme auf Basis eines festgelegten Bearbeitungsspektrums.

Balbach [4] betrachtet in erster Linie die Seite der Werkzeugbewirtschaftung mit Hilfe von Simulationen. Er geht von den Kenngrößen des Werkzeugverbrauchs und der Neubeschaffung aus und simuliert u.a. die Aufgaben der Bedarfsermittlung, Bestellrechnung und Bestandsführung. Weiterhin schlägt er einen Algorithmus zur Auftragsreihenfolgeermittlung vor, der den Werkzeugbedarf minimiert.

<div> <div>Unter- suchungsgebiet</div> <div>Quelle</div> </div>	Balbach	Hopp	Mayer	Schmitz-Mertens	Soliman	Stecke	Steinhilper	Viehweiger
Systemplanung							●	●
Transportsysteme							●	●
FHM-Bewirtschaftung	●							
FHM-Bereinigung		●						
Datenbanken		●	●					
Organisationsstruktur					●			
Reihenfolgeplanung	●			●		●		
Ablaufsteuerung				●		●		
Simulation	●				●			●

Bild 3.8: Abgrenzungsmatrix

Mayer [67] hingegen konzentriert sich auf die Architektur von Werkzeugdatenbanken und die Zugriffe auf die dort abgelegten Daten. Für die Abläufe in der Fertigungshilfsmittelorganisation wird jedoch immer von einer festen Vorgabe der Arbeitsgänge an den Maschinen ausgegangen, an Hand derer die Werkzeugbedarfsermittlung durchgeführt wird. Die Arbeitsgangverteilung auf Kapazitätsstellen wird ohne Rücksicht auf die daraus resultierenden Anforderungen an Werkzeugversorgung und -einsatz durchgeführt. Es herrscht die Annahme vor, daß alleine die integrierte Datenhaltung und rechnergeführte Durchsetzung der Anforderungen die Ablaufprobleme löst (siehe [67] S.32). Eine Verbindung von Steuerungs- und Planungsrechnungen mit der Werkzeugversorgung im Sinne einer abgestimmten Festlegung der Bearbeitungsfolgen wird nicht erwähnt.

Soliman [105] bildet die Organisationsstrukturen im Betriebsmittelfluß in ein Simulationsmodell ab und wertet Ergebnisse betriebswirtschaftlich aus.

Die Möglichkeit, durch eine integrierte, kurzfristige Fertigungsplanung und Ablaufsteuerung, die auch die Fertigungshilfsmittelbereiche einbezieht, wichtigen Anforderungen des aktuellen Betriebsumfeldes, wie kurzen Durchlaufzeiten und großer Maschinenauslastung, gerecht zu werden, wurde noch nicht untersucht. Weiterhin werden zwar viele Planungs- und Optimierungsalgorithmen, z.B. durch Stecké [107] und Vits [123], vorgeschlagen, die jedoch meist den Arbeitsaufwand in der FHM-Versorgung vernachlässigen.

3.5 Hilfsmittel zur Untersuchung von Steuerungs- und Planungsstrategien

3.5.1 Nachbildung als Modell

Zwischen der Erstellung eines betriebsinternen Fertigungsauftrags und der tatsächlichen Ausführung der einzelnen Arbeitsgänge liegen Vorgänge der Planung und Fertigungssteuerung. Die weiter fortschreitende Durchdringung der Fertigungsplanung und -steuerung mit EDV erfordert, diese Vorgänge in Algorithmen zu fassen, damit nachvollziehbare Abläufe entstehen. Die Bewertung und Codierung bisheriger Entscheidungswege ist aber gerade im systemnahen Fertigungsbereich sehr teilweise schwierig, da die Entscheidungen oft zufällig und von der aktuellen Tagesverfassung der Entscheidungspersonen (Meisterebene) abhängig sind, wobei die Vorgaben höherer Planungssysteme durch eine "Steuerung am PPS-System vorbei" [20] übergangen werden. Für derartige komplexe Entscheidungssituationen bietet das Fachgebiet des Operation Research (OR) Lösungsmöglichkeiten an. Es liegt nahe, vor der Implementierung einer Software zur Werkstattsteuerung

die Wirksamkeit und Anwendungsmöglichkeiten der spezifizierten Entscheidungsalgorithmen zu überprüfen.

Der Vergleich unterschiedlicher Steuerungsstrategien in einem realen Fertigungssystem würde sehr zeitaufwendig sein. Um die Funktionsfähigkeit zu beweisen, müßte, nachdem ein eingeschwungener Zustand erreicht ist, noch über mehrere Planungs- und Steuerungsperioden die Untersuchung weitergeführt werden. In zumutbarer Zeit sind damit keine Ergebnisse zu erwarten. Außerdem scheidet die Durchführung von Versuchen in einer realen Fertigungsumgebung aus, da dabei sehr hohe Kosten durch Produktionsausfälle entstehen. Damit wird es unumgänglich, den Untersuchungsgegenstand in ein abstrahierendes und vereinfachendes Modell abzubilden.

Ein Modell kann in physischer oder mathematischer Form die Wirklichkeit annähern [54, 95, 97]. Physische Modelle sind z.B. die Dummy-Körper bei Crash-Versuchen im Automobilbau. Für die Repräsentation der Planungs- und Fertigungsvorgänge kommt diese Art von Modellen nicht in Betracht.

Die mathematischen Modelle werden häufig in analytische und numerische Modelle unterteilt [121]. Für beide Modellklassen stellt das Fachgebiet des OR methodische Hilfen bereit. Hier sind die Differentialrechnung, Statistik, lineare Programmierung sowie die Warteschlangen- und Graphentheorie zu nennen. Die Verfahren der Differentialrechnung und Linearen Programmierung eignen sich nur bedingt für die umfassende Untersuchung umfangreicher Produktionsanlagen und ihrer Steuerung, sie lassen sich aber wohl für Teilaufgaben einsetzen. Für die Probleme der Materialflußrechnung werden Warteschlangen- und Graphentheorie [37] empfohlen. Numerische Modelle sind die Abstraktionsform in der Simulationstechnik. Das Modell wird in einer Programmiersprache formuliert und an einem Digitalrechner eingegeben. Die Simulation vollzieht dabei am Modell die Abläufe des Produktionssystems nach. Der besondere Vorteil der Simulation liegt in der Nachbildung analytisch nicht faßbarer Vorgänge, wie z.B. der

Reaktion auf stochastisch verteilte Störungen. Diese Methode fand bisher ein großes Einsatzgebiet im Bereich der Auslegung und Planung von Fertigungssystemen [24, 25, 95, 121].

3.5.2 Simulationssoftware

Eine Simulation errechnet den Zustandsverlauf des Simulationsmodells im Untersuchungszeitraum. Ein wichtiges Unterscheidungsmerkmal liegt in den Anforderungen des zu modellierenden Systems in Bezug auf die Länge des Zeitinkrements, das den Takt der Zustandsverfolgung darstellt.

Wenn das Zeitinkrement gegen Null geht, so spricht man von einem kontinuierlichem System. Die mathematische Modellierung solcher Systeme erfordert die Aufstellung und Lösung der systembeschreibenden Differentialgleichungen. Diese Aufgabe setzt voraus, daß ganz bestimmte Hilfsmittel und Methoden der höheren Mathematik von der Simulationssoftware unterstützt werden. Ein technisches Beispiel ist die Nachbildung der Lageregelung eines Vorschubantriebs in einer Werkzeugmaschine.

Andererseits gibt es viele Systeme, in denen nur zu diskreten Zeitpunkten bestimmte, meist "sprunghafte" Zustandsänderungen eintreten bzw. modelliert werden. Diese diskreten Systeme erfordern eine andere Art der Simulation: es werden hier nur die möglichen Zeitpunkte von Zustandsänderungen der Systemkomponenten verfolgt. Die konventionelle und flexible Fertigung einzelner Werkstücke ist ein diskretes System. Im Fertigungsablauf sind nur sprunghafte Zustandsänderungen von Interesse: Arbeitsgang abgeschlossen, Maschine gestört, Auftrag freigegeben. Auch bei den Bereichen der Auftragseinschaltung, Arbeitsverteilung, Fertigungshilfsmittelversorgung und Transportsysteme handelt es sich um diskrete Vorgänge.

Die zunehmende Verwendung der Simulationstechnik führte zur Entwicklung spezialisierter Hilfsmittel, die die Durchführung von Simulationsuntersuchungen erleichtern. Die Programmierfähigkeit an Simulationsmodellen wird nur noch vereinzelt mit reinen höheren Programmiersprachen geleistet. Viel häufiger werden spezialisierte Simulationssprachen oder parametrisierbare Simulationsmodelle eingesetzt. Schmidt schreibt: [96] "Nur besonders eigenwillige Benutzer, die fest davon überzeugt sind, daß ihr Problem einzigartig ist werden sich der Mühe unterziehen müssen, alles selbst zu programmieren." Daher wird im folgenden ein kurzer Überblick zur Klassifizierung von Simulationstools gegeben.

Zunächst kann zwischen reinen Simulationssprachen und anwendungsspezifischen Tools unterschieden werden. Mit Programmiersprachen lassen sich - mit Einschränkungen - beliebige technische Systeme modellieren. Die Tools sind auf spezielle Anwendungen eingeschränkt.

Die Sprachen gliedern sich in Niedere und Höhere Simulationssprachen. Vom Konzept her stellen sie sich dem Anwender ähnlich wie eine höhere, universelle Programmiersprache dar. Niedere Simulationssprachen sind häufig als Erweiterung bestehender Programmiersprachen entstanden. Höhere Simulationssprachen besitzen gegenüber den Niederen weitere Hilfsmittel, die das Formulieren von Modellen erleichtern. Hierbei handelt es sich um vordefinierte Systemelemente, z.B. Puffer, Warteschlangen oder Arbeitsstationen. Der Benutzer hat weiterhin Zugriff auf interne Variable der Elemente, die er wiederum in einbindbaren Programmen, die in einer allgemeinen Programmiersprache erstellt sind, verwenden kann. Beispiele für solche Simulationssprachen sind SLAM II und GPSS-Fortran.

Auf ein spezielles Untersuchungsgebiet eingeschränkt sind die anwendungsspezifischen Tools, unter die systemorientierte Simulationssprachen und parametrisierbare Simulationsmodelle fallen. Die systemorientierten Simulationssprachen bieten

Modellelemente an, die sich nur für ausgewählte Untersuchungsgegenstände eignen. Es existiert eine große Anzahl solcher Tools, z.B. für Rechnersysteme, Eisenbahnnetze und Krankenhäuser [96].

Ein Problem in der Anwendung der Simulationssprachen stellt die oft zeitaufwendige Einarbeitung in diese Sprache dar. Der Anwender kommt aber häufig aus Arbeitsbereichen, in denen eine intensive Beschäftigung mit der Programmierung nicht möglich ist. Solchen Anforderungen kommen parametrisierbare Simulationsmodelle entgegen: der Anwender muß nur die Definition der Parameter beherrschen, die Simulationssoftware als Quellcode tritt für ihn nicht in Erscheinung. Diese Modelle sind zwar in ihrer Anwendungsbreite sehr eingeschränkt, erlauben aber ihre Verwendung ohne die Mitarbeit eines Simulationsexperten. Ein Beispiel für diese Klasse von Tools ist der Simulator GRAFSIM, der u.a. in der folgenden Untersuchung verwendet wurde. GRAFSIM erlaubt in sehr bedienerfreundlicher Weise die Modellierung flexibler Fertigungssysteme [77], wobei die Systemstruktur bestimmten Einschränkungen (Bild 3.9) unterworfen ist:

- » die Werkstücke werden auf Paletten durch die Fertigung geschleußt, die Verkettung der Arbeitsstationen geschieht durch ein Palettentransportsystem
- » die Arbeitsstationen entsprechen üblichen Bearbeitungszen-tren
- » das zu untersuchende Fertigungssystem wird über sog. Spannplätze mit Werkstücken versorgt

Mit GRAFSIM lassen sich die Bearbeitungsfolge, der Werkstücktransport, die Rüstvorgänge und der Werkzeugtransport simulieren. Weiterhin wird die Ablaufsteuerung des Fertigungssystems nachgebildet. Eine eingehende Beschreibung des Einsatzes von GRAFSIM erfolgt im Kapitel 4. Weitere Bereiche der Fertigungsorganisation, wie Werkzeugvoreinstellung und kurzfristige Planung, können aber nicht untersucht werden.

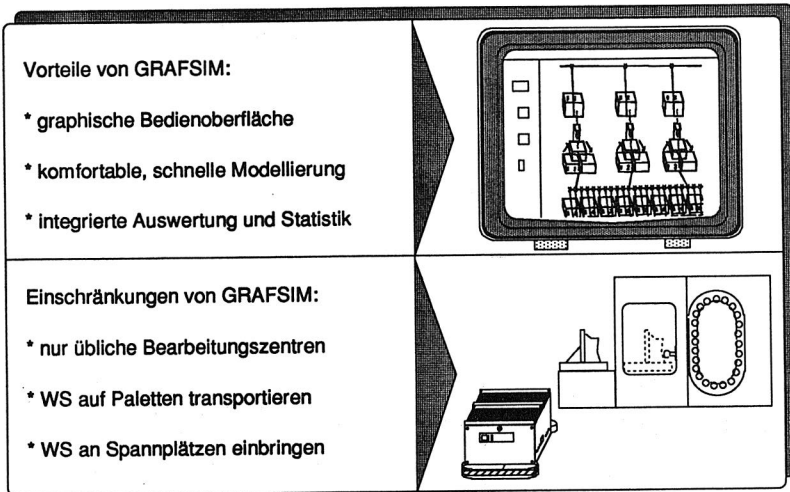


Bild 3.9 Vorteile und Einschränkungen des Simulators

3.5.3 Modellierung flexibler Fertigungssysteme

Die Abbildung der Realität in ein Modell beinhaltet eine Abstraktion und Vereinfachung. Die tatsächlichen Gegebenheiten müssen analysiert und strukturiert werden. Dabei ist zunächst der Zweck des zu bildenden Modells mitbestimmend für das Ergebnis.

Flexible Fertigungssysteme bestehen aus den drei Komponenten Informationssystem, Bearbeitungssystem und Materialflusssystem. Diese Elemente finden sich in den von FFS gebildeten Modellen wieder. Im Blickpunkt mancher Untersuchungen mit Simulationsmodellen stand bisher die Auslegungsplanung [24, 32, 121] für FFS. Daher wurden dort besonders detailliert die Teile Bearbeitungssystem und Materialflusssystem abgebildet.

Für den vorliegenden Zweck reicht es aus, wenn das Modell des Bearbeitungssystems den Zeitverbrauch des Arbeitsgangs,

der Arbeitsgangvorbereitung und die notwendigen Voraussetzungen, besonders bezüglich der Fertigungshilfsmittel, berücksichtigt.

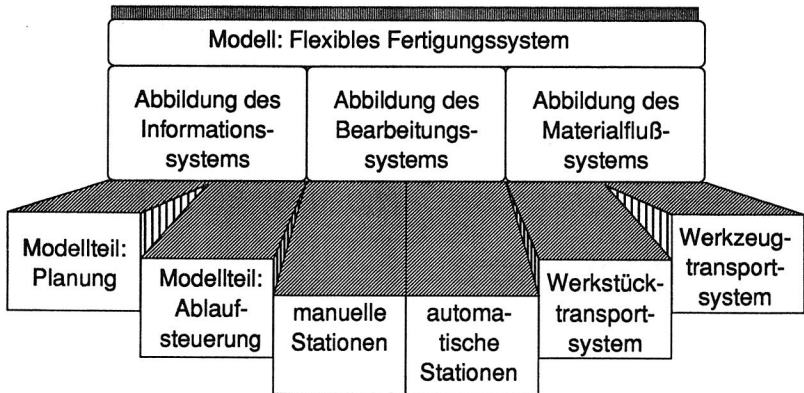


Abb. 3.10: Komponenten des Modells von FFS

Weiterhin sind neben den reinen Bearbeitungsstationen für die Abbildung der FHM-Versorgung noch die nebengeordneten Stationen, z.B. die Werkzeug- und Spannmittelmontage zu berücksichtigen.

Als Materialflusssystem sind unterschiedliche Transportsysteme abzubilden. So wird in flexiblen Fertigungszellen ein Handhabungsgerät für die Werkzeuge und ein schienengebundenes Fahrzeug für die Werkstücke eingesetzt.

Weniger untersucht wurde bisher das Informationssystem. Die Ablaufsteuerung wird z.B. durch die Logik eines Simulationsmodells dargestellt. Der Planungsteil [52] bildet die relevanten Vorgänge operativen Planung ab. An Modellteil "Informationssystem" besteht die Anforderung, verschiedene Planungs- und Ablaufstrategien darzustellen.

Im weiteren wird die Methode der Simulation zur Untersuchung von FFS eingesetzt. Dazu ist die Beschreibung der Fertigung als numerisches Modell durchzuführen. Da im Blickpunkt die Reaktion des Systems auf verschiedene Variationen der Auftragsbelastung und der Ablaufstrategie liegt, sind die dafür relevanten Parameter durch das Modell darzustellen.

Die Ergebnisse stellen sich als Systemauslastung, gefertigte Aufträge usw. dar. Daraus werden Rückschlüsse auf die Wirkungen verschiedener Planungs- und Steuerungsalgorithmen gezogen.

4 Simulationsstudie zur Werkzeugversorgung flexibler Fertigungssysteme

4.1 Das Simulationswerkzeug GRAFSIM

Das zur Untersuchung [90, 110] benutzte Simulationswerkzeug, der graphische Simulator GRAFSIM, ermöglicht die Modellierung flexibler Fertigungssysteme, wobei Bearbeitungsstationen aus der spanenden Fertigung (z.B.: Bearbeitungszentren) simuliert werden [77]. Zusätzlich kann das zu untersuchende Fertigungssystem folgende Komponenten (Bild 4.1) enthalten:

- » Spannplätze
- » Ablageplätze
- » verschiedene Transportsysteme:
 - induktiv gesteuerte Fahrzeuge
 - gleisgebundene Fahrzeuge
 - Transport mit Gabelstaplern
 - Portalkran
 - Elektrohängbahn
- » Arbeitspläne und Stückzahlvorgaben
- » Werkzeugtransport, Werkzeugmagazine

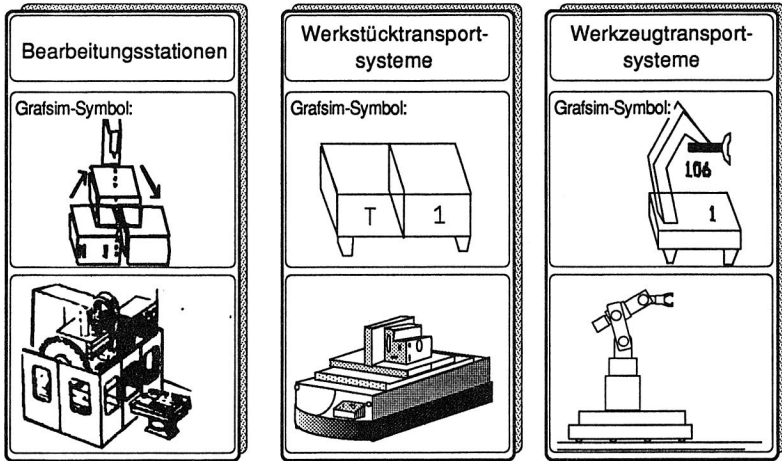


Bild 4.1: Systemelemente in GRAFSIM

GRAFSIM (Bild 4.2) unterstützt sowohl die Planungsphase flexibler Fertigungssysteme als auch die Zusammenstellung von Fertigungsaufträgen in der Fertigungsvorbereitung. Jedoch kann das Simulationssystem nur die dynamischen Ereignisse, den Fertigungsablauf darstellen. Ein Modul zur Simulation der Fertigungsplanung selbst ist nicht vorhanden. Es können folgende Einsatzfälle auftreten:

- A) Planung und Konfiguration des Maschinenbaus von FFS
 - Bewertung des Anlagenentwurfs eines FFS
 - Beurteilung von alternativen Systemlösungen
 - Optimierung von Anlagenkomponenten:
 - Anzahl der Maschinen, Pufferplätze, Transportwagen usw.
- B) Fertigungsvorbereitung für vorhandene Fertigungssysteme
 - Bewertung eines Fertigungsauftragsmixes
 - Zusammenstellung des optimalen Auftragsmixes
- C) Konzeption von Steuerungsstrategien
 - Untersuchung unterschiedlicher Ablaufstrategien zur Pfadauswahlflexibilität
 - Bewertung fester Prioritäten von Fertigungsaufträgen
 - Untersuchung verschiedener Werkzeugaustauschstrategien

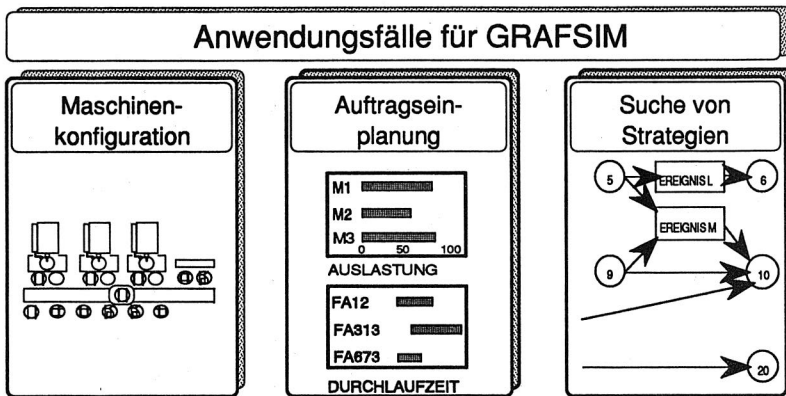


Bild 4.2: Einsatzfälle für GRAFSIM

4.2 Aufgaben und Ziele der Simulationsexperimente

Der Schwerpunkt der Untersuchungen liegt auf Steuerungsstrategien und der Werkzeugversorgung flexibler Fertigungssysteme. Daher wurde ein Modell gewählt, dessen Maschinenkonfiguration, insbesondere der Werkstückfluß, bereits optimiert war. An den Parametern dieser Systemkomponenten werden keine Veränderungen vorgenommen.

Dagegen werden umfangreiche Kombinationen unterschiedlicher Steuerungsstrategien bei gleichzeitiger Variation ausgewählter Kenngrößen der Auftragsbelastung untersucht.

Der Simulator kann eine Pfadauswahlflexibilität in seinen Algorithmen berücksichtigen, wenn ersetzende Maschinen in den Arbeitsplänen eingetragen werden. Aus den vorhandenen Alternativen kann unmittelbar vor der Zuteilung eines Bearbeitungsvorgangs nach zwei Regeln ausgewählt werden:

- A) den Zuschlag erhält die Maschine mit dem geringsten Arbeitsvorrat.

- B) den Zuschlag erhält die Maschine, bei der die wenigsten Werkzeuge zusätzlich benötigt werden.

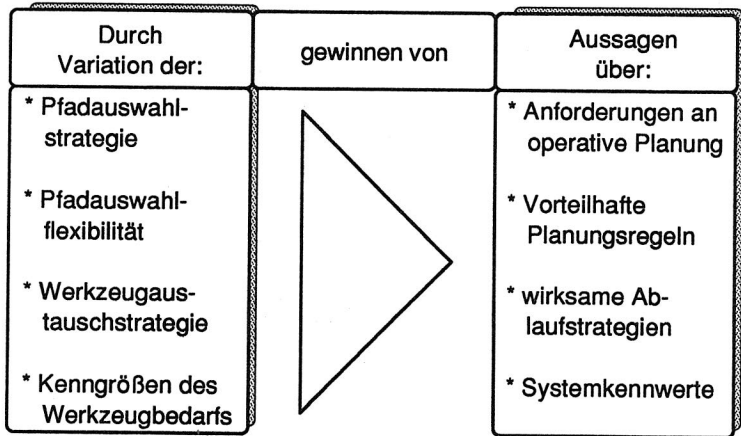


Bild 4.3: Ziele der Simulationsexperimente

Zwischen beiden Kriterien kann nach einer bestimmten Formel gewichtet werden [76]. Im Rahmen der Experimente sollten sowohl die Anzahl zur Verfügung stehender Alternativen wie auch die beiden Strategien variieren. Die Untersuchungsziele waren die Auswirkungen auf die Systemauslastung und die Anforderungen an die Werkzeugversorgung des Systems.

Weiterhin stellt der Simulator zwei Strategien zur Organisation des Werkzeugtransports bereit. Sie betreffen jeweils die Entnahme von Werkzeugen aus den Maschinenmagazinen:

- A) Entnahme unmittelbar nach Einsatz (Ende der Bearbeitung)
- B) Entnahme nur bei Platzbedarf für neue Werkzeuge

Die erste Strategie sorgt für möglichst geringe Füllung des Maschinenmagazins, während die zweite das Magazin meist komplett mit Werkzeugen auslastet. Die Strategie bezieht sich aber immer nur auf den Austausch zwischen ersten und zweiten Teil des Maschinenmagazins, die Werkzeuge im zweiten Teil stehen dem Austausch zwischen den Maschinen zur Verfügung.

4.3 Das Systemmodell

Dieser Abschnitt beschreibt den Aufbau des zugrundeliegenden Fertigungssystems, dessen vereinfachten Grundriß Bild 4.4 zeigt. Es werden die verschiedenen Systemkomponenten mit den relevanten technischen Daten und deren Modellierung bei der Simulation aufgeführt. Es besteht aus folgenden Teilsystemen:

4.3.1 Bearbeitungsmaschinen

Die Maschinen 1 bis 5 stellen Bearbeitungszentren dar. Sie haben die spezielle Eigenschaft, daß auf einen Teil des Werkzeugmagazins zum Werkzeugaustausch fast unabhängig vom Werkzeugwechsel zur Spindel zugegriffen werden kann. Dies kann maschinentechnisch z.B. durch zwei gekoppelte Kettenmagazine geschehen. Die Werkzeuge werden vom Werkzeugtransport in die zweite Kette eingebracht. Die Übergabe von der ersten zur zweiten Kette übernimmt eine Handhabungseinrichtung. Bei Maschine 6 handelt es sich um eine Waschmaschine. Sie hat die Aufgabe, die Werkstücke nach dem letzten Arbeitgang von Spänen und Kühl-/ Schmiermittelresten zu säubern. Die wichtigsten technischen Daten der Waschmaschine (Übergabezeiten der Paletten) entsprechen denen der Bearbeitungszentren.

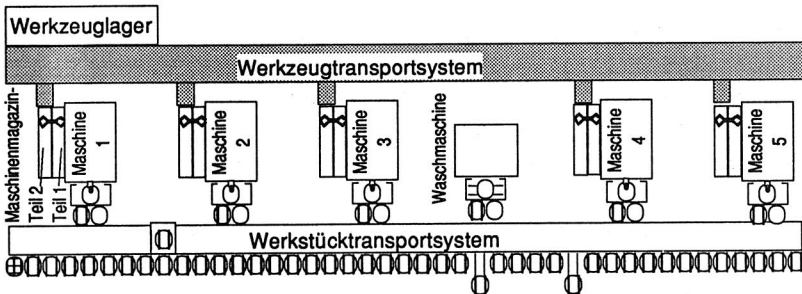


Bild 4.4: Struktur des simulierten Fertigungssystems

4.3.2 Transportsysteme

Das Werkstücktransportsystem setzt sich aus einem Transportfahrzeug (TPW), zwei Spannplätzen und 43 Ablageplätzen für Werkstückpaletten zusammen.

In der Simulation stellt das Zentrallager (= ZL) die Verbindung zum Werkzeugvoreinstellplatz dar. In dem ZL werden ausgemusterte WZ aus dem System entfernt und neue WZ eingeschleust. Man geht dabei von der Vorstellung aus, daß ein Arbeiter im ZL die WZ kommissioniert und rechtzeitig bereitstellt. Deshalb kann die Übergabezeit für ein WZ zwischen ZL und Transportsystem auf 1 s (symbolischer Rechenwert) gesetzt werden. Das Werkzeugtransportsystem verfügt über ein Fahrzeug mit begrenzter Transportkapazität. Es kann als Modell für ein automatisiertes Werkzeughandhabungssystem oder auch für eine manuelle Versorgung der Bearbeitungszentren stehen.

Die weiteren simulationsrelevanten Daten bestehen aus der:

- » Geschwindigkeit des TPWs für WZ: 1,00 m/s
- » Transportkapazität je Transportspiel: 20 WZ
- » Kapazität des Zentrallagers: 1000 Lagerplätze
- » Übergabezeit eines Transports zwischen TPW und ZL: 20 s

4.3.3 Ablaufstrategien

Werkzeugbedarfsminimierung

Grundsätzlich war es ein Ansatz der Untersuchungen, einen möglichst geringen Werkzeugbedarf des Systems zu erreichen. Dies ist bei vorgegebenen Fertigungsaufträgen durch eine möglichst große Standzeitausnutzung vorhandener Werkzeuge und einen flexiblen Austauschtransport der Werkzeuge zwischen den Bearbeitungsmaschinen möglich. Daher wurde das Modell so gebildet, daß jeweils auch aus dem zweiten Teil der Maschinenmagazine Werkzeuge abgerufen werden können, die an anderen Maschinen benötigt werden.

Pfadauswahl

Die Pfadauswahlflexibilität des Fertigungssystems wurde in 3 Stufen genutzt:

» Flexibilität 1:

jedem AG wird genau eine Maschine zur Abwicklung zugewiesen; es existiert keine Pfadauswahlflexibilität

» Flexibilität 2:

zwei gleichwertige, einander ersetzende Maschinen; dadurch bestehen jeweils zwei Alternativen je Arbeitsgang

» Flexibilität 5:

fünf gleichwertige, einander ersetzende Maschinen je Arbeitsgang

4.3.4 Das Auftragspektrum

Das Auftragspektrum (siehe auch Bild 4.5) umfasste mit 26 Aufträgen über insgesamt 590 Werkstücke die Auftragsmenge für die Dauer einer Woche bei dreischichtigem Fertigungsbetrieb des FFS. Die Aufträge besaßen jeweils eine bis vier Aufspannungen, wobei die NC-Bearbeitungszeit je Aufspannung zwischen 54 sec. und 10000 sec. lag. Insgesamt standen 66 verschiedene Arten von NC-Bearbeitungsvorgängen an.

Die Losgrößen lagen zwischen 4 und 60 Werkstücken. In diesen Daten spiegelt sich die geforderte, hohe Flexibilität des Systems wieder. Dabei ist zu beachten, daß es sich nur um einen repräsentativen Ausschnitt des gesamten für das System vorgesehenen Arbeitsspektrums handelte. Im Durchschnitt fallen die zugrundliegenden Zahlen in die Größenordnungen anderer bekannter FFS-Realisierungen [28, 69].

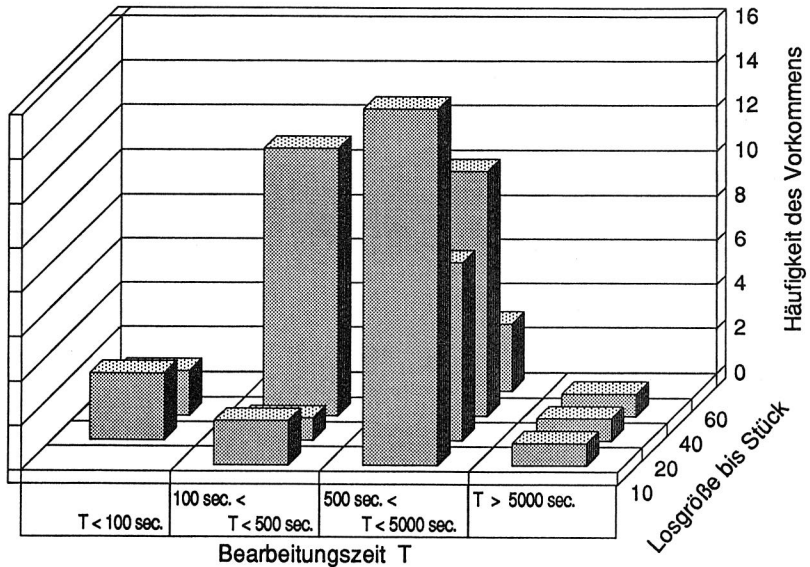


Bild 4.5: Übersicht zum untersuchten Auftragsspektrum

Die folgende Aufstellung beinhaltet die Ergebnisse der statistischen Untersuchungen des Werkzeugbedarf der Arbeitsgänge:

- » Anzahl eingesetzter Werkzeugtypen: 280
- » mittlere WZ-anzahl pro NC-Programm: 13,45
- » Streuung um die mittl. WZ-anzahl pro NC-Programm: 10,99
- » WZ-anzahl / mittl. WZ-anzahl pro NC-Programm: 20,81
- » Standzeit aller WZ / mittl. Einsatzzeit aller WZ: 15,27
d. h. im Mittel können mit einem WZ 15 Werkstücke gefertigt werden
- » mittlere Anzahl übereinstimmender WZ: 1,31
d. h. im Durchschnitt gibt es bei jeweils zwei NC-Programmen nur 1,31 WZ, die in beiden NC-Programmen vorkommen.
- » Streuung um die mittl. Anzahl übereinstimmender WZ 3,80
- » mittl. Anzahl übereinstimmender WZ / mittl. WZ-anzahl pro NC-Programm 0,10
d.h. ungefähr 10 % der WZ eines NC-Programms kann bei einer beliebigen AG-Folge weiterverwendet werden.

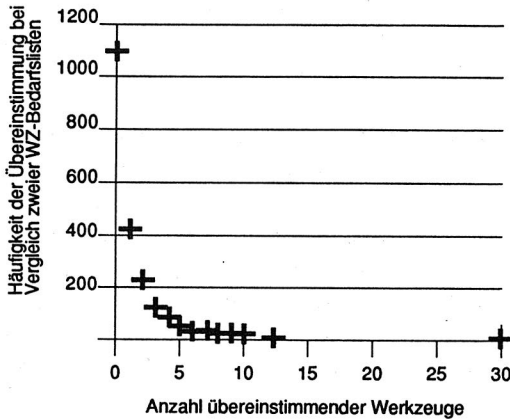


Bild 4.6: Vorkommen einer bestimmten Zahl übereinstimmender WZ beim Vergleich zweier WZ-Bedarfslisten (ursprüngliche NC-Programme)

Auf der einen Seite gibt es sehr viele Werkzeuge, die nur ein- oder zweimal gebraucht werden, auf der anderen Seite existieren sehr wenige Werkzeuge, die mehrfach verwendet werden. Zwischen den meisten NC-Programmen ist kein gemeinsames WZ vorhanden. Die NC-Programme mit einer oder zwei Übereinstimmungen treten am häufigsten auf (Bild 4.6).

4.3.5 Weitere Randbedingungen und Annahmen

Für die Simulation werden einige Annahmen gemacht:

- » alle WZ sind gleich groß und belegen jeweils einen Platz in Lagern, Transportmitteln und Magazinen
- » es tritt kein WZ-bruch auf, der ein WZ vor Ende seiner Standzeit zerstört
- » fordert eine Maschine ein WZ an, das nicht im System zur Verfügung steht, wird automatisch im ZL ein Exemplar des

gewünschten WZ generiert

- » ausgemusterte WZ werden aus dem ZL entfernt
- » es gibt keine Stamm- und Sonderwerkzeuge
- » die Werkzeuglager und Maschinenmagazine werden bei Simulationsbeginn mit den benötigten Werkzeugen entsprechend der Aufteilung der Fertigungsaufträge auf die einzelnen Maschinen vorbelegt. Dadurch entfällt ein Einschwingvorgang.
- » das Werkstücktransportsystem hat eine ausreichende Leistungsfähigkeit, d.h. durch das Transportsystem entstehen kaum Wartezeiten beim An- bzw. Abtransport der Werkstücke
- » es existiert für die Entstörung der Maschinen genügend Personal, d. h. gleichzeitig auftretende Störungen können parallel bearbeitet werden
- » das Fertigungsauftragsspektrum verändert sich nicht durch Eilaufträge
- » die Ablage bzw. das Wiedereinführen von Werkstücken, die sich im Umspannpool befinden, verursacht keine Warte- und Störzeiten

4.4 Nutzung der Pfadauswahlflexibilität

4.4.1 Vergleich zweier Werkzeug-Austauschstrategien

Dieser Abschnitt beschreibt die durch die Simulation erkannten Einflüsse, welche unterschiedlich genutzte Pfadauswahlflexibilitäten [90] auf das Fertigungssystem ausüben. Zusätzlich erfolgt eine Gegenüberstellung unterschiedlicher Lagerkapazitäten bei gleichzeitiger Variation der Werkzeugaustauschstrategie. Die Parameter können folgende Werte annehmen:

» Flexibilität:

Flexibilität 1 / Flexibilität 2 / Flexibilität 5

» Kapazität der Maschinenmagazine:

Für ihre Größe sind zwei Möglichkeiten vorgesehen:

- Kapazität der MM - Teil 1: 80 Plätze und
Kapazität der MM - Teil 2: 68 Plätze
- Kapazität der MM - Teil 1: 48 Plätze und
Kapazität der MM - Teil 2: 60 Plätze

» WZ-austauschstrategie

Es wurden die Werkzeugaustauschstrategien des Simulators genutzt:

- Entnahme unmittelbar nach Einsatz (Ende der Bearbeitung)
- Entnahme nur bei Platzbedarf für neue Werkzeuge

» Pfadauswahl und Inhalt des Maschinenmagazins

Bei der Auswahl alternativer Maschinen geht nur der Arbeitsvorrat in die Bewertung ein. Die Auswahl einer ersetzenden Maschine geschieht hierbei nach der Strategie 'Maschine mit der kleinsten Restbearbeitungszeit'.

» es gibt nur einen TPW für WZ im System, wodurch zu einem Zeitpunkt nur eine Maschine versorgt werden kann.

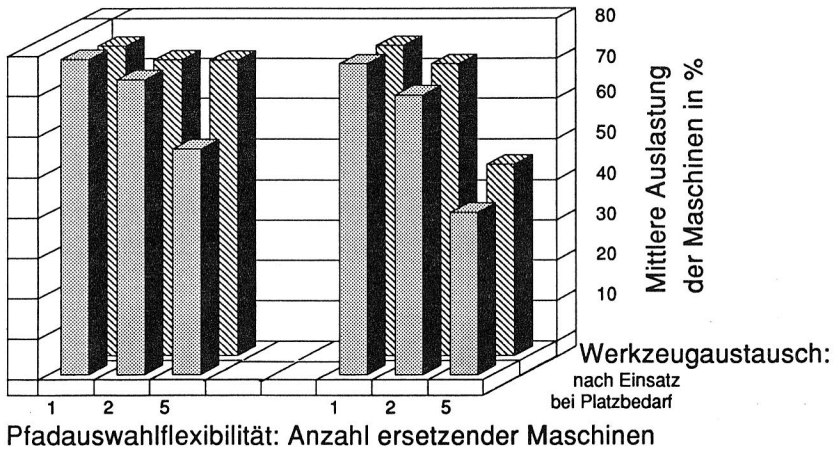
Im weiteren erfolgt eine Analyse der Ergebnisse der verschiedenen Simulationen. Bild 4.7 zeigt die mittlere Auslastung der Maschinen im FFS. Auf der linken Seite sind die Ergebnisse bei großen, auf der rechten Seite bei kleinen Maschinenmagazinen dargestellt.

Aus der graphischen Darstellung sind grundlegende Tendenzen abzulesen:

- » eine höhere Flexibilität führt zu einer geringeren Auslastung der Maschinen
- » die Strategie WZ-Austausch bei Platzbedarf hat eine größere Reduzierung der Auslastung mit zunehmender Flexibilität zur Folge als die Strategie 'WZ-Austausch nach Einsatz'
- » kleinere Maschinenmagazine bewirken eine schlechtere Auslastung

Mit wachsender Flexibilität steigt die Wartezeit auf Werkzeuge vor allem bei der Strategie 'WZ-Austausch bei Platzbedarf'. Eine sprunghafte Erhöhung der Wartezeit ist bei Flexibilität 5 und der Strategie 'WZ-Austausch nach Einsatz'

festzustellen. In kleineren Magazinen können weniger der an den Maschinen benötigten Werkzeuge vorrätig gehalten werden, deshalb erhöht sich die Wartezeit auf Werkzeuge.



links: Maschinenmagazin 148 Plätze
rechts: Maschinenmagazin 108 Plätze

Bild 4.7: Mittlere Auslastung der Maschinen
(in Abhängigkeit von der genutzten Pfadauswahlflexibilität und der WZ-Austauschstrategie)

Das WZ-Transportsystem bildet den Engpaß des modellierten FFS. Die Auslastung des WZ-Transportsystems zeigt sich besonders gut aus der Wartezeit seines TPWs auf Auftrag. In Bild 4.8 und 4.9 ist die folgende Entwicklung dargestellt:

» mit steigender Flexibilität sinkt die Wartezeit des WZ-TPS auf Auftrag. Sie vermindert sich z.B. von 79,3% bei Flexibilität 1 auf 6,1% bei Flexibilität 5 (große Magazine, WZ-austausch bei Platzbedarf)

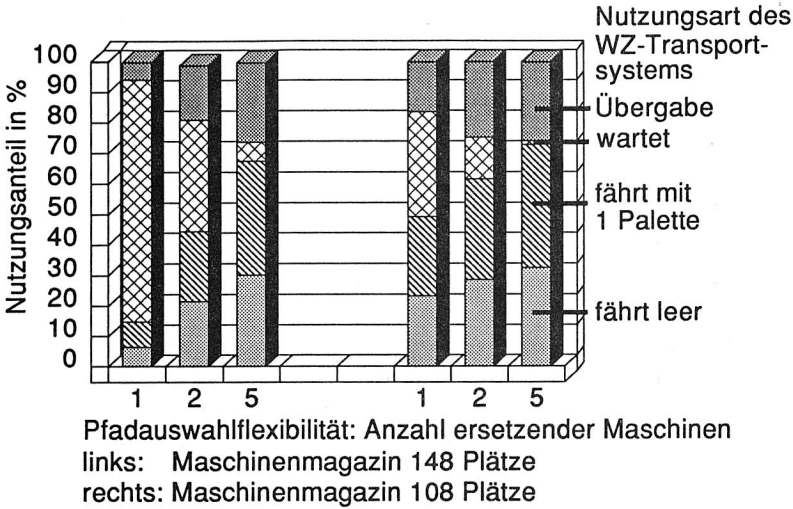


Bild 4.8: Auslastung des TPWs für WZ (in Abhängigkeit von der Flexibilität, WZ-austausch bei Platzbedarf)

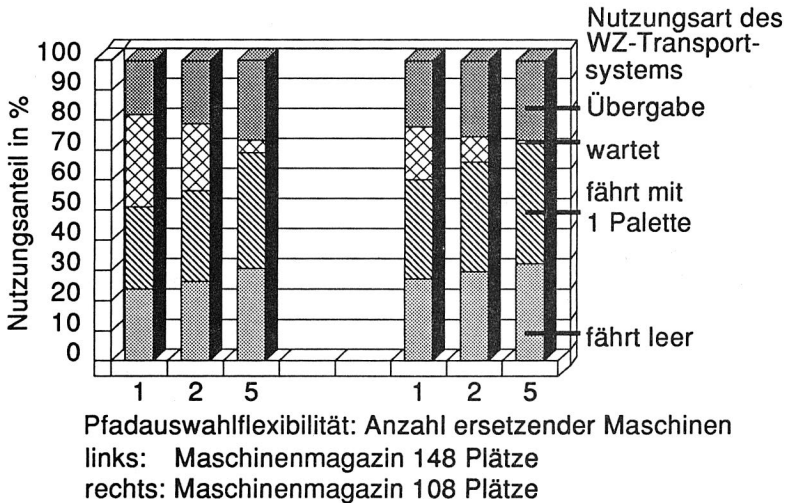


Bild 4.9: Auslastung des TPWs für WZ (in Abhängigkeit von der Flexibilität, WZ-austausch nach Einsatz)

- » die Strategie 'WZ-austausch nach Einsatz' stellt größere Anforderungen an das Transportsystem für Werkzeuge. Der Wartezeit von 30,8 % bei WZ-austausch nach Einsatz steht eine Wartezeit von 79,3 % bei der alternativen Strategie gegenüber. Die Werte gelten bei großen Magazinen und Flexibilität 1
- » kleinere Maschinenmagazine führen ebenfalls zu einer stärkeren Auslastung des Transportsystems. Im Vergleich wartet der TPW bei Flexibilität 1 und kleinen Magazinen nur 34,3 %, bei großen aber 79,3 %.

In Bild 4.10 wird die mittlere Belegung für große Magazine bei beiden WZ-austauschstrategien dargestellt. Die Erkenntnisse aus Bild 4.10 gelten in entsprechender Weise auch für kleine Magazine. Es lassen sich die folgenden Sachverhalte festhalten:

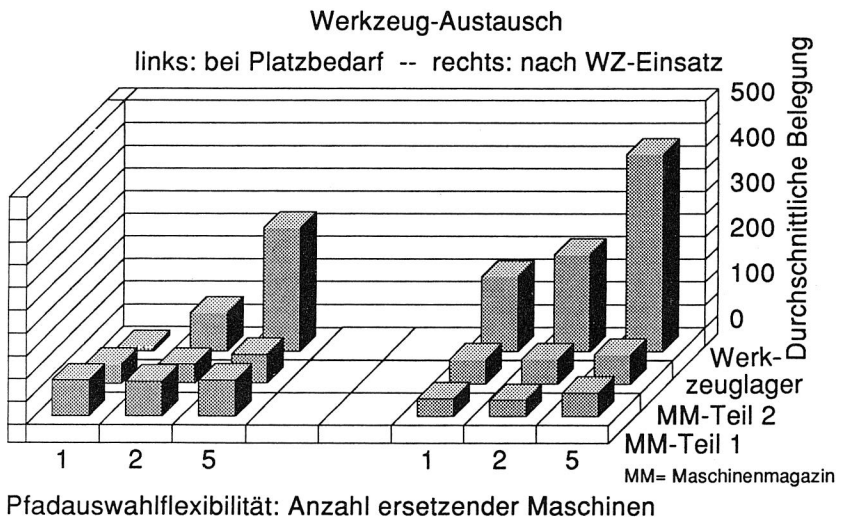


Bild 4.10: Mittlere Belegung des WZ-lagers und der Maschinenmagazine (in Abhängigkeit von der Flexibilität)

- » bei der Strategie 'WZ-austausch bei Platzbedarf' sind die Maschinenmagazine (Teil 1) immer maximal belegt. Mit steigender Flexibilität benötigen die Maschinen mehr WZ. Dies ist an einer höheren Belegung des Maschinenmagazins - Teil 2 und vor allem des Zentrallagers ersichtlich.
- » die Strategie 'WZ-austausch nach Einsatz' kommt mit kleineren Maschinenmagazinen für die Versorgung der Maschinenspindel aus. Dafür vergrößert sich die Belegung des zweiten Teils der MM und des Werkzeuglagers. Wiederum führt eine wachsende Flexibilität zu einer höheren Belegung des ZL.

Der mit der Flexibilität zunehmende WZ-bedarf schlägt sich auch in der Anzahl der eingesetzten WZ nieder. Da dieser Sachverhalt von der Magazinkapazität und der WZ-austauschstrategie unabhängig ist, werden für die Tabelle 4.1 die Werte bei großen MM und WZ-austausch bei Platzbedarf herangezogen. Es erfolgt eine Normierung der Werte auf eine Maschinenauslastung von 100 %.

Tabelle 4.1: Anzahl der eingesetzten Werkzeuge

Pfadauswahl-		
flexibilität	Anzahl eingesetzter WZ	Faktor
=====	=====	=====
1	1692	1
2	1881	1,11
5	2480	1,46

Die zusammenfassende Beurteilung der Versuchsreihe lautet:

- » mit zunehmender Flexibilität steigt die Anzahl der an den Maschinen benötigten Werkzeuge, da mehr unterschiedliche Fertigungsaufträge an den einzelnen Bearbeitungszentren gefertigt werden müssen. Dies führt zu einer Erhöhung des WZ-bestandes, weil gleiche Werkzeuge an mehreren Bearbei-

tungszentren bereitzuhalten sind. Die Kapazitäten der Maschinenmagazine sind je doch begrenzt. Aus diesem Grund müssen mit wachsender Flexibilität mehr Werkzeuge durch das Transportsystem für WZ zu den Maschinen befördert werden. Bei Flexibilität 5 reicht die Leistungsfähigkeit des Transportsystems nicht mehr aus. Daraus resultiert eine hohe Wartezeit der Maschinen auf Werkzeuge und somit eine Reduzierung der Auslastung.

- » die Strategie 'WZ-austausch nach Einsatz' ist der Strategie 'WZ-austausch bei Platzbedarf' vorzuziehen. Die Ursache liegt in der großen Vielfalt an Werkzeugen in den NC-Programmen. Von den 280 verschiedenen Werkzeugtypen werden nur 38 Werkzeuge in mehr als drei Arbeitsgängen eingesetzt. Da bei der Strategie 'WZ-austausch bei Platzbedarf' die Maschinenmagazine immer maximal belegt sind, müssen vor der Einlagerung der Werkzeuge eines neuen NC-Programms sehr viele andere ausgelagert werden, um Platz zu schaffen. Bei sehr unterschiedlichem Werkzeugbedarf beansprucht die Auslagerung viel Zeit, wodurch sich die Auslastung der Maschinen verringert.
- » eine geringere Flexibilität führt zu einer besseren Standzeitausnutzung der WZ, d. h. es werden mehr Werkzeuge ausgemustert und durch neue ersetzt.
Bei Flexibilität 1 muß man beispielsweise 944 Werkzeuge ausmustern - bei Flexibilität 5 nur 784. Die Zahlen gelten bei einer auf 100% hochgerechneten Maschinenauslastung.

4.4.2 Pfadauswahl nach Werkzeugüberdeckung und Arbeitsvorrat

Die zweite Versuchsreihe befaßt sich mit verschiedenen Strategien, die zur Auswahl unter alternativen Maschinen herangezogen werden können. Die Möglichkeiten für die unterschiedlichen Strategien und die weiteren Parameter des FFS sind:

» Bewertungsfaktor des WZ-vorrats bei Maschinenauswahl alternativer Maschinen:

- 0 %, d. h. es ist nur der Arbeitsvorrat ausschlaggebend. Die Auswahl einer ersetzenden Maschine geschieht nach der Strategie 'Maschine mit der kleinsten Restbearbeitungszeit'
- 50 %, d. h. WZ-vorrat und Arbeitsvorrat gehen gleichgewichtig in die Bewertung ein
- 100 %, d.h. es wird nur der WZ-vorrat berücksichtigt

» Kapazität der Maschinenmagazine:

Für die Größe der Magazine wurde gewählt:

- Kapazität der MM - Teil 1: 80 Plätze und
- Kapazität der MM - Teil 2: 68 Plätze

» WZ-austauschstrategie

Es wurden die Werkzeugaustauschstrategien des Simulators genutzt:

- Entnahme unmittelbar nach Einsatz (Ende der Bearbeitung)
- Entnahme nur bei Platzbedarf für neue Werkzeuge

» Pfadauswahlflexibilität

Es sind fünf gleichwertige, ersetzende Maschinen angenommen

Bild 4.11 beinhaltet die mittlere Auslastung der Maschinen bei dieser Parameterkonstellation. Man erkennt, daß die Auslastung der Maschinen von der Bewertung des WZ-vorrats fast unabhängig ist. Für alle drei Bewertungsfaktoren ist die Auslastung in Abhängigkeit von der WZ-austauschstrategie annähernd konstant. Das gleiche Verhalten ist für die Wartezeit der Maschinen auf Werkzeuge und für die Auslastung des Transportsystems für Werkzeuge festzustellen.

Im Falle der Bewertung des WZ-vorrats mit 100 % steigt die Wartezeit des WZ- Transportsystems auf Auftrag um 1 % an. Dies spiegelt sich auch in den normierten Werten der Anzahl der WZ-transporte wieder. Die Bewertung des WZ-vorrats mit 100 % bei der Auswahl ersetzender Maschinen reduziert die Anzahl der WZ-transporte minimal.

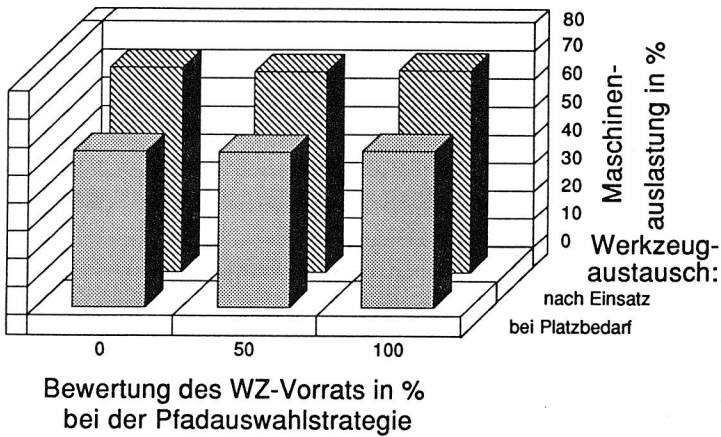


Bild 4.11: Mittlere Auslastung der Maschinen (in Abhängigkeit von der Bewertung des WZ-vorrats und der WZ-wechselstrategie)

Alle weiteren Simulationsläufe unterstrichen die bisherigen Erkenntnisse: mit dieser Parameterkonstellation und diesem Fertigungsauftragsspektrum ist eine Unabhängigkeit der Maschinenauslastung von der Bewertung des WZ-vorrats bei der Pfadauswahl festzustellen.

Die Ursache ist in der großen Vielfalt der Werkzeuge zu sehen. Da nur wenige Werkzeuge in mehreren NC-Programmen eingesetzt werden, verbessert die Bewertung des WZ-vorrats mit 100 % nicht die Ausbringung des FFS. Die ungünstigen Voraussetzungen der Arbeitspläne lassen sich durch die untersuchten Strategien zur Pfadauswahl während des Systemlaufs nicht ausgleichen. Wohl aber zeigt sich durchaus ein Einfluß der WZ-austauschstrategie, wobei unter den gegebenen Systemvoraussetzungen der Austausch nach Einsatz die besseren Ergebnisse erbringt. Ein weiteres Ziel sollte sein, die Vielzahl verschiedener Werkzeuge in der Arbeitsvorbereitung und Planung zu vermindern und gleichzeitig Werkzeuge mehrfach einzusetzen.

4.5 Einfluß der Werkzeugüberdeckung

4.5.1 Überarbeitung des Auftragsspektrums

Die Simulationen, über die bisher berichtet wurde, hatten ein reales Auftragsspektrum aus einem Industriebetrieb zur Grundlage. Jedoch waren die Arbeitsgänge dieser Aufträge noch nicht speziell für den Einsatz in einem FFS überarbeitet. Die hohen Anforderungen an die FHM-Vorbereitung und den FHM-Transport resultieren aus den Werkzeug-Bedarfszahlen der Arbeitsgänge und der benötigten Typenvielfalt, die hauptsächlich aus der großen Anzahl der Bohroperationen herrührt. Die Charakteristika des untersuchten Auftragsspektrums stimmen insofern mit Berichten anderer Autoren überein, die teilweise Vorschläge zur Werkzeugbereinigung erstellt haben [50, 122]. Dazu ist u.a. eine technologische Überarbeitung der Steuerdaten des Systems durchzuführen sowie die WZ-Vielfalt durch Restriktionen einzuschränken. Diese Einschränkungen können bedeuten:

- » nur noch wenige Ausspannlängen für Bohrwerkzeuge zulassen
- » die Bohrdurchmesser auf eine Auswahlreihe begrenzen und damit auch die Gewindevielfalt einschränken
- » Verzicht auf spezielle Schneidstoffe für seltene Operationen, soweit dies technologisch und wirtschaftlich vertretbar ist
- » Verzicht auf Sonderwerkzeuge soweit wie möglich

Weiterhin besteht die Möglichkeit, häufig vorkommende Operationsfolgen in einem Mehrfachwerkzeug zusammenzufassen. Ein Teil dieser Vorschläge zur Werkzeugbereinigung wurde auch auf das Auftragsspektrum in mehreren Schritten angewendet.

Tabelle 4.2:

Mittelwert und Streuung der Anzahl übereinstimmender WZ

	Mittelwert	Streuung
=====	=====	=====
Schritt 0	1,31	3,78
Schritt 1	1,47	2,94
Schritt 2	1,67	2,19
Schritt 3	1,87	2,20
Schritt 4	2,29	2,74
Schritt 5	2,62	3,23
Schritt 6	3,10	3,34

Für das weitere Vorgehen ist vor allem der Mittelwert der Anzahl übereinstimmender WZ von Bedeutung. Durch eine Überarbeitung der NC-Programme wird versucht, diesen Mittelwert in Stufen zu erhöhen. Sowohl die Gesamtwerkzeuganzahl als auch die mittlere WZ-anzahl pro NC-Programm bleiben, mit Ausnahme des letzten Schritts, konstant. Hier verringert sich die Gesamtwerkzeugvielfalt durch eine Bereinigung der WZ-Typen von 280 auf 241 WZ.

In Tabelle 4.2 sind die daraus resultierenden Werte für den Mittelwert der Anzahl übereinstimmender WZ und den zugehörigen Streuungen aufgelistet.

Es würde zu weit führen, für sämtliche Mittelwerte die dazugehörigen Häufigkeitsverteilungen der Anzahl übereinstimmender WZ darzustellen. Dies soll als Beispiel nur für den Mittelwert von 3,10 übereinstimmenden WZ geschehen (siehe Bild 4.12). Durch einen Vergleich mit der Häufigkeitsverteilung der ursprünglichen NC-Programme läßt sich erkennen:

- » die Fälle, in denen es keine Übereinstimmung der Werkzeuge (keine Fertigungsverwandtschaft) zwischen NC-Programmen gibt, haben sich um den Faktor drei verkleinert.
- » es stimmen wesentlich häufiger mehr als 10 WZ zwischen zwei NC- Programmen überein.

» der Schwerpunkt liegt zwischen drei und neun übereinstimmenden Werkzeugen.

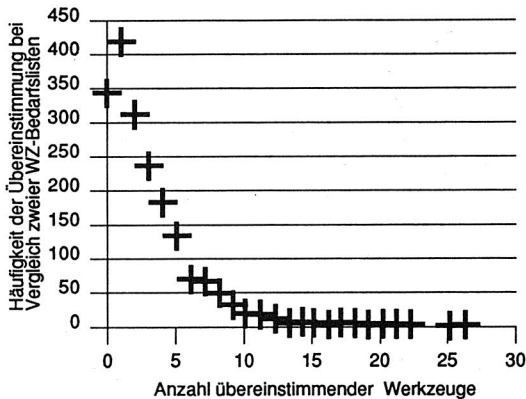


Bild 4.12: Vorkommen einer bestimmten Zahl übereinstimmender WZ beim Vergleich zweier WZ-Bedarfslisten (bei einem Mittelwert von 3,10)

4.5.2 Modellparameter der weiteren Untersuchungen

Mit Hilfe der weiteren Simulationsläufe wurde gezeigt, daß durch eine Erhöhung der Anzahl der übereinstimmenden WZ in den NC-Programmen eine Verbesserung der Auslastung der Maschinen bewirkt werden kann. Es werden als Parameter für die weiteren Simulationen festgelegt:

- » Pfadauswahlflexibilität
es wird die Flexibilität 5 gewählt, da 5 ersetzende Maschinen die höchsten Anforderungen an das Transportsystem für WZ stellen
- » WZ-austauschstrategie
der WZ-austausch erfolgt nach der Strategie 'WZ-austausch bei Platzbedarf'.
- » Maschinenauswahl alternativer Maschinen
die Auswahl einer ersetzenden Maschine geschieht nach der

Strategie 'Maschine mit kleinster Restbearbeitungszeit', falls der Bewertungsfaktor für den WZ-vorrat mit 0 % belegt wird

- » es gibt nur einen TPW für WZ
- » alle Aufträge haben die gleiche Priorität
im Gegensatz zu den vorhergehenden Simulationsläufen haben alle Aufträge die gleiche Priorität, die Startzeitpunkte werden jedoch beibehalten. In der Realität bedeutet dies, daß die Aufträge der Nachtschicht in die Tagschicht hineinlaufen können und Aufträge der Tagschicht auch in der Nacht gefertigt werden.

4.5.3 Bedeutung der Pfadauswahlstrategie bei verschiedener Fertigungsverwandtschaft

Die zu variierenden Parameter sind:

- » Mittelwert der Anzahl der übereinstimmenden WZ
- » Bewertungsfaktor des WZ-vorrats bei der Pfadauswahlstrategie
 - 0 % : es ist nur der Arbeitsvorrat ausschlaggebend
 - 100 % : nur der WZ-vorrat spielt eine Rolle

Als Ergebnis der Simulationsläufe dieser Konfiguration des FFS gibt Bild 4.13 die mittlere Auslastung der Maschinen wieder. Bild 4.13 belegt, daß die Auslastung der Maschinen mit der Anzahl der übereinstimmenden WZ zunimmt - unabhängig von der Strategie 'Bewertung des WZ-vorrats'. Der Grund für die steigende Auslastung der Maschinen ist in der sinkenden Wartezeit der Maschinen auf WZ zu sehen.

Bei wenigen übereinstimmenden WZ ist das Transportsystem für WZ total überlastet. Erst ab einem bestimmten Mittelwert tritt eine Wartezeit des TPWs für WZ auf Auftrag ein. Die Wartezeit beruht auf der Tatsache, daß bei Wechsel der NC-Programme weniger WZ ein- und damit auch ausgelagert werden, da mehr WZ der vorhergehenden NC-Programme wiederverwendet werden können.

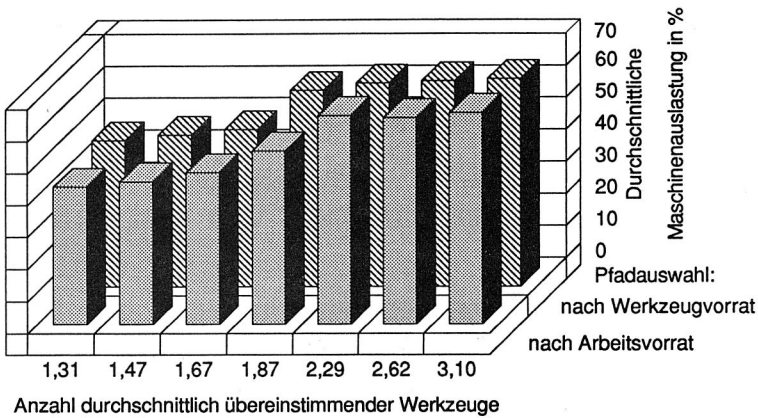


Bild 4.13: Mittlere Auslastung der Maschinen (in Abhängigkeit von der Anzahl der übereinstimmender WZ und der Bewertung des WZ-vorrats)

Im aktuellen Fall liegt dieser Mittelwert bei 2,29 übereinstimmenden WZ. Für eine Planungsperiode sollte also eine bestimmte Mindestanzahl übereinstimmender Werkzeuge in den NC-Programmen erreicht werden. Der Wert könnte mit Hilfe der Simulation oder BDE-Statistik berechnet werden.

Um eine Erklärung für dieses Verhalten zu finden, müssen bei beiden Strategien die entstehenden Wartezeiten untersucht werden. Bei beiden Strategien wartet das neu an die Maschine gelieferte Werkstück einige Zeit auf dem Anlieferplatz auf seine Bearbeitung. In dieser Zeit können die fehlenden Werkzeuge herangeschafft werden, je mehr übereinstimmende WZ in den NC-Programmen vorkommen, umso geringer wird die Wahrscheinlichkeit, daß der Werkzeugtransport die WZ nicht bis zum Bearbeitungsbeginn geliefert hat. Die Wartezeit auf das Ende der Bearbeitung des vorhergehenden Werkstücks bleibt davon unbeeinflusst. Die Differenz zwischen den entstehenden Wartezeiten beider Strategien verringert sich also mit zunehmender Anzahl übereinstimmender WZ. Dieser Effekt wird durch Werkzeuge unterstützt, die nur einmal verwendet wer-

den. Solche WZ müssen auch bei der Bewertung des WZ-vorrats mit 100 % erst zu den Maschinen transportiert werden.

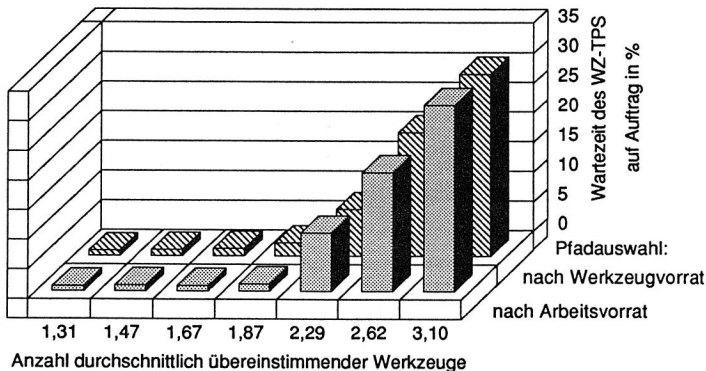


Bild 4.14: Wartezeit des TPWs für WZ auf Auftrag
(in Abhängigkeit von Anzahl übereinstimmender WZ
und der Bewertung des WZ-vorrats bei der Pfadauswahl, jeweils Maschinenmagazine mit 148 Plätzen)

Aus Bild 4.14 ist ersichtlich, daß das WZ-Transportsystem bei einem Mittelwert von 2,29 übereinstimmender WZ 9,8 % der Zeit auf Auftrag wartet - bei geringerer Fertigungsverwandtschaft ist das Transportsystem überlastet. Das bedeutet aber, daß unterschiedlich hohe Anforderungen der Strategien ab diesem Wert durch das Transportsystem ausgeglichen werden können. Für die Arbeitsplanung ergibt sich daraus die Forderung, diesen Schwellwert der Anzahl übereinstimmender Werkzeuge in den NC-Programmen zu erreichen. Gelingt dies nicht, sollte die Strategie 'Bewertung des WZ-vorrats' mit 100 % eingesetzt werden.

4.6 Weitere Variationen der Simulationsdaten

4.6.1 Prioritätsvorgaben für ausgewählte Fertigungsaufträge

Zwischen dem Auftragsspektrum nach Kap. 4.4.2 und dem der Simulationsläufe in Kap. 4.5.3 besteht ein Unterschied in der Prioritätsvorgabe für ausgewählte FA im ersten Teil. Ein Vergleich der Systemauslastung bei identischen Arbeitsgängen und Auftragsterminen, aber mit und ohne Priorität ergibt folgendes Bild:

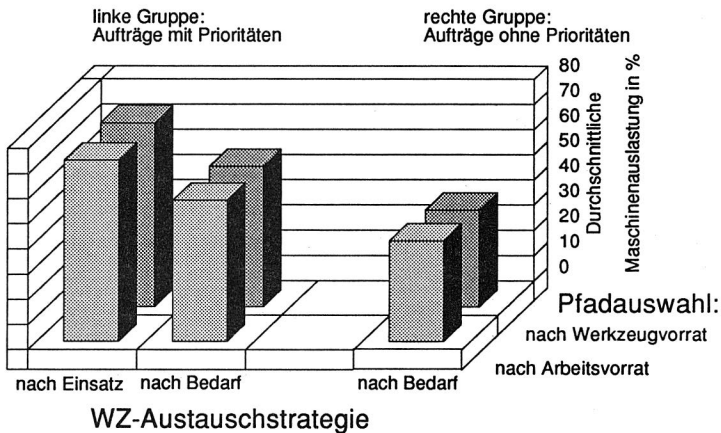


Bild 4.15: Auslastung der Maschinen bei Aufträgen mit und ohne Prioritätsvorgabe

Die Auslastung der Maschinen sinkt z.B. von 55,8% auf 38,3%, wenn allen Aufträgen die gleiche Priorität zugeordnet wird. Bei der Prioritätsvergabe erfolgte eine Auszeichnung der Aufträge jeder 3. Schicht (als Modell für eine Nachtschicht), wobei eben diese Aufträge über einen besonders geringen WZ-Bedarf verfügten. Durch die bevorzugte Bedienung dieser Arbeitsgänge wurde die Zahl der unterschiedlichen Werkstücke je Maschine in diesem Zeitabschnitt verringert, wodurch sich eine Entlastung des Werkzeugtransportsystems ergibt.

Bei der Arbeitsplanung muß also das Folgende berücksichtigt werden: Viele verschiedene Fertigungsaufträge im System mit gleicher Priorität erhöhen den Werkzeugbedarf der Maschinen je Zeitabschnitt. Die Zuordnung einer höheren Priorität an einen Teil der Fertigungsaufträge bewirkt eine Reduzierung der Anzahl aktiver Fertigungsaufträge im System und somit eine Entlastung des Transportsystems für WZ. Die Situation läßt sich weiter verbessern, wenn denjenigen Fertigungsaufträgen die höhere Priorität zugewiesen wird, die sich durch einen geringen Werkzeugbedarf auszeichnen.

4.6.2 Warteschlangenbildung durch die Ablaufsteuerung

Der Simulator GRAFSIM besitzt einen Nachteil, der die Ergebnisse etwas beeinflußt: im Gegensatz zu realen Steuerungssystemen ist keine vorausschauende Planung der Werkzeuge durchführbar. Bei GRAFSIM wird das zu bearbeitende WS auf den Anlieferplatz einer Maschine gebracht und erst dann erfolgt eine Überprüfung, welche WZ für die Bearbeitung benötigt werden. Dadurch kommt es zu einer Reduzierung der Auslastung der Maschinen, da das WS vom Anliefer- auf den Bearbeitungsplatz gelangen kann, obwohl noch nicht alle fehlenden Werkzeuge angeliefert wurden.

In Erweiterung des bisher beschriebenen Simulationsmodells wird nun ein Pufferplatz zwischen Anliefer- und Bearbeitungsplatz der Maschinen eingeführt. Die Festlegung der anderen Parameter aus Kapitel 4.5 besitzt auch bei dieser Simulationsreihe Gültigkeit. Diese Änderung steht als Modell für eine statische Warteschlange der Länge 1, die von der Ablaufsteuerung verwaltet wird.

Das System versucht, die WZ, die für die Bearbeitung der Werkstücke auf den Pufferplätzen benötigt werden, nicht aus den Maschinenmagazinen auszulagern, d. h. in den Maschinen-

magazinen befinden sich die WZ, die für die Bearbeitung des nächsten Werkstücks benötigt werden.

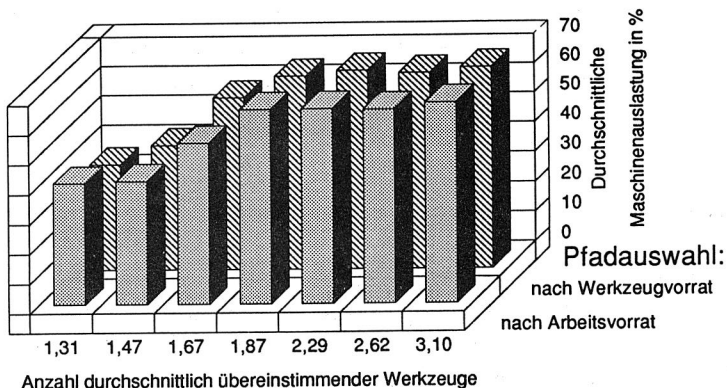


Bild 4.16: Mittlere Auslastung der Maschinen

(in Abhängigkeit von der Anzahl der übereinstimmenden WZ und der Bewertung des WZ-vorrats bei einem Pufferplatz)

Bild 4.16 gibt die mittlere Auslastung der Maschinen wieder. Mit Erhöhung der Anzahl übereinstimmender WZ steigt die Auslastung der Maschinen unabhängig von der Strategie 'Bewertung des WZ-vorrats' an.

Aus den Ergebnissen läßt sich folgern:

- » die Einführung eines Pufferplatzes zwischen Anliefer- und Bearbeitungsplatz bewirkt eine günstigere Auslastung der Fertigungszentren. Die Begründung liegt in der gesunkenen Anzahl an WZ-transporten und der sich daraus ergebenden niedrigeren Wartezeit der Maschinen auf WZ.
- » die bereits erklärte Angleichung der Strategien bei der Auswahl alternativer Maschinen tritt auch bei Verwendung

eines Pufferplatzes auf. Im Gegensatz zu den Maschinen ohne Pufferplatz ist dieser Effekt bereits bei einem Mittelwert von 1,87 übereinstimmenden WZ festzustellen.

» ab diesem Mittelwert bewirkt eine weitere Zunahme der Anzahl übereinstimmender WZ nur noch eine geringe Steigerung der Auslastung der Maschinen, die weitere Zunahme macht sich hauptsächlich in einer Entlastung des WZ-transportsystems bemerkbar.

» die Anforderungen an die Arbeitsvorbereitung lassen sich erweitern:

In einem ersten Schritt muß versucht werden, den Grenzwert der Anzahl übereinstimmender Werkzeuge, ab dem das Transportsystem für WZ die gestellten Anforderungen erfüllt, zu erreichen. Gelingt dies nicht, gibt es im zweiten Schritt zwei Möglichkeiten, um eine befriedigende Auslastung des Fertigungssystems zu erhalten:

- die Strategie 'Bewertung des WZ-vorrats' mit 100 % vorziehen.
- es können Warteschlangen vor den Maschinen aufgebaut werden. Dabei muß beachtet werden, daß die Werkzeuge aller Werkstücke in der Warteschlange in das Maschinenmagazin der zugehörigen Maschine eingelagert werden können.

4.6.3 Reduktion des Werkzeugbedarfs je Arbeitsgang

Eine Folge der technologischen Anpassung eines Auftragspektrums an die Gegebenheiten eines FFS kann in der Verminderung der Werkzeuganzahl je Arbeitsgang liegen. Dies ist beispielsweise durch den Einsatz von Kombinationswerkzeugen oder - fast gegensätzlich - durch Verzicht auf Sonderwerkzeuge möglich. Über die Auswirkungen eines solchen Vorgehens auf das betrachtete FFS wird im folgenden berichtet, wobei jedoch keine technologisch vollständige Arbeitsplanung

ausgeführt wurde. Der Schwerpunkt liegt also auf dem Systemverhalten unter der Voraussetzung, daß eine entsprechende Reduktion des Werkzeugbedarfs bei dem vorliegenden Teilespektrum überhaupt realisierbar ist.

» Verminderung der WZ-Anzahl pro NC-Programm

Die mittlere WZ-anzahl pro NC-Programm reduzierte (Bild 4.17) sich in drei Schritten durch den Verzicht auf WZ, die nur in einem Arbeitsgang eingesetzt wurden. Die Gesamtlaufzeit der NC- Programme bleibt konstant.

- mittlere Anzahl der WZ pro NC-Programm: 13,45
- mittlere Anzahl der WZ pro NC-Programm: 12,64
- mittlere Anzahl der WZ pro NC-Programm: 11,83
- mittlere Anzahl der WZ pro NC-Programm: 11,03

Für die Auslastung der Maschinen lassen sich die folgenden Sachverhalte erkennen:

- » durch die Verminderung der Werkzeugmenge steigt die Auslastung der Maschinen unabhängig von der Bewertung des WZ-vorrats und dem Mittelwert der Anzahl übereinstimmender WZ

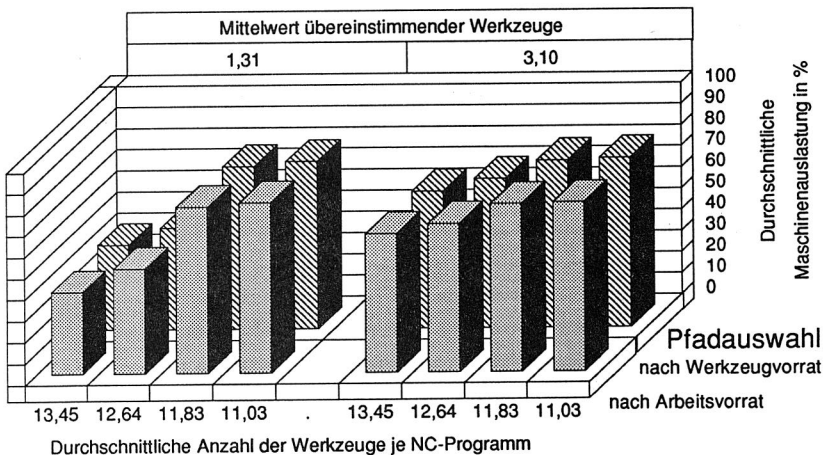


Bild 4.17: Vergleich der mittleren Auslastung der Maschinen (abhängig von der Anzahl übereinstimmender WZ)

- » ab einer bestimmten mittleren WZ-anzahl pro NC-Programm kann eine sprunghafte Erhöhung der Auslastung der Bearbeitungszentren festgestellt werden. Der Sprung liegt bei dem Mittelwert von 11,83 WZ pro NC-Programm. Ab diesem Wert lassen sich alle Werkzeuge in den Maschinenmagazinen speichern, d.h. den 733 Werkzeugeinsätzen der NC-Programme stehen 740 Lagerplätze zur Verfügung.
- » eine weitere Reduzierung der mittleren Anzahl der WZ pro NC-Programm bringt keine wesentliche Verbesserung der Auslastung der Maschinen.
- » liegt die durchschnittliche Anzahl der WZ pro NC-Programm oberhalb von 11,83, so ist mit mehr übereinstimmenden WZ eine deutlich größere Auslastung zu erzielen.

Der Grund für die sprunghafte Steigerung der Auslastung der Bearbeitungszentren ist in der starken Entlastung des Transportsystems für WZ zu sehen, wodurch sich die Wartezeit der Maschinen auf WZ verringert.

4.7 Anforderungen an ein Steuerungssystem

Die vorausgehenden Simulationsuntersuchungen waren auf die Auslastung eines flexiblen Fertigungssystems unter wechselnden Ablaufstrategien fokussiert. Es zeigten sich Abhängigkeiten von der Pfadauswahlstrategie, der Werkzeugaustauschstrategie und charakteristischen Merkmalen der Auftragslast.

Aus einer zusammenfassenden Betrachtung dieser Ergebnisse werden nun 3 Anforderungen an ein Steuerungssystem für ein derartiges FFS ermittelt.

4.7.1 Angepasste Pfadauswahl

Von seinem grundlegenden Design her besitzt ein FFS, das aus sich ersetzenden Stationen besteht, ein hohes Maß an Pfadauswahlflexibilität. Dadurch wird es möglich, der Vielfalt der Aufträge eine angepaßte Fertigungskapazität gegenüberzustellen, so daß die aktuellen Flexibilitätsforderungen des Umfelds erfüllt werden können.

Jedoch ist es nicht immer mit den Zielen einer kostenoptimalen und stillstandsfreien Fertigung vereinbar, die vorhandene Pfadauswahlflexibilität (Bild 4.18) auch völlig einzusetzen. So besteht ein gewisser Gegensatz zwischen ihrer Nutzung und dem Ziel, nur wenige Fertigungshilfsmittel zu belegen und organisatorische Stillstände zu vermeiden.

Eine hohe Anzahl ersetzend eingeplanter Maschinen erhöht den FHM-Bedarf und somit die Werkzeugkosten. Durch den größeren Transport- und Rüstaufwand steigt das Risiko organisatorischer Stillstände auf Grund nicht rechtzeitig gelieferter FHM. Aus den Daten des Auftragsspektrums können die Anforderungen und Grenzen für Pfadauswahlflexibilität durch eine intelligente Planungskomponente ermittelt werden.

In den Simulationen konnte gezeigt werden, daß es u.U. zu Überlastungssituationen in der Werkzeugversorgung kommen kann, wenn die Pfadauswahlflexibilität eines FFS vollständig (im untersuchten Beispiel: 5 ersetzende Maschinen) genutzt wird. Daher ergibt sich als Forderung an die Fertigungsplanung:

Anforderung 1:

Gezielte und dosierte Nutzung der Pfadauswahlflexibilität

Die Pfadauswahlflexibilität darf durch die Fertigungssteuerung nur insoweit eingesetzt werden, wie es den übergeordneten Zielen der Termintreue, Durchlaufzeitreduzierung und Kostenminimierung nicht zuwiderläuft.

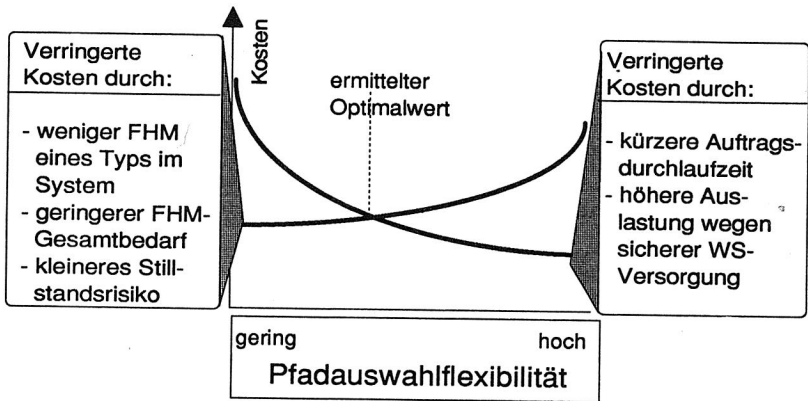


Bild 4.18: Optimierte Nutzung der Pfadauswahlflexibilität

4.7.2 Auswählbare Werkzeugaustauschstrategie

Es sind eine Reihe von Werkzeugaustauschstrategien für ein FFS denkbar. Jedoch sind die Anforderungen an die Werkzeugversorgung stark durch das aktuelle Auftragspektrum und weitere Planungsparameter beeinflusst. Eine Planungs- und Steuerungssoftware soll ermitteln, welche der implementierten Strategien am vorteilhaftesten ausgewählt wird, um einen optimierten Fertigungsablauf zu erreichen. So kann sich der Ansatz, die Menge bereitzustellender Werkzeuge durch den Zugriff auf Maschinenmagazine anderer Stationen zu verringern, teilweise negativ in der Auslastung des Systems niederschlagen, aber auch die Werkzeugvorbereitung entscheidend entlasten. Aus den Simulationsergebnissen wird geschlossen, daß die beste Austauschstrategie abhängig von den System-

kenngößen und dem Auftragsspektrum bestimmt werden kann. Deshalb wird verlangt:

Anforderung 2:

situationsabhängig auswählbare Werkzeugaustauschstrategie

in Planungs- und Steuerungssystemen für FFS vorzusehen.



Bild 4.19: Wirkungen verschiedener WZ-Austauschstrategien

4.7.3 Optimierende Belegungsplanung

Da die Teilevielfalt in der Fertigung zunimmt und gleichzeitig durch verstärkte Komplettbearbeitung auf hochgradig

teileflexiblen Maschinen sich die Anzahl eingesetzter Stationen verringert, besteht die Chance, optimierte Auftragszusammenstellungen für die Bearbeitungsstationen zu generieren. Die Simulationsuntersuchungen deuten darauf hin, daß flexible Systeme sehr sensibel auf die Werkzeugüberdeckung des Auftragsspektrums reagieren. Aus der Erfahrung oder direkten Betrachtung der Systeme können u.U. noch andere Parameter ermittelt werden. Die kurzfristige Reihenfolge- und Belegungsplanung soll deshalb nach der

Anforderung 3:

optimierende Planungsalgorithmen in Bezug auf Fertigungshilfsmittel

besitzen.

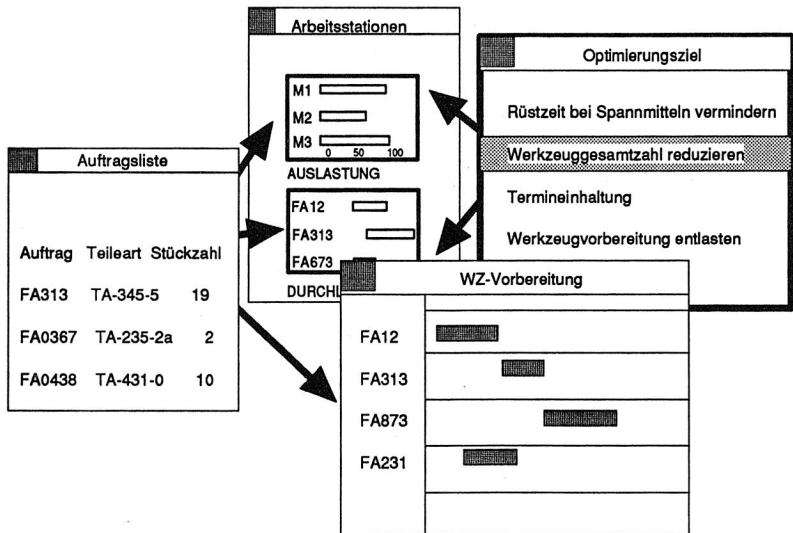


Bild 4.20: Interaktive Belegungsplanung mit wählbaren Optimierungszielen unter Einschluß der FHM-Bereiche

Eine optimierende Belegungsplanung wird die Aufträge aus den zur Fertigung anstehenden so auswählen, daß die relevanten Parameter in einer vorteilhaften Größenordnung liegen oder sogar diese Parameter als Optimierungskriterium einsetzen. Da nicht vorausgesetzt werden kann, daß ein automatisiertes Planungssystem in allen Fällen korrekte und verständliche Entscheidungen trifft, bestehen hier besondere Anforderungen an die Transparenz und Nachvollziehbarkeit der Algorithmen. Ein erster Ansatz ist die interaktive Gestaltung der Planungsabläufe, die den Bedienern auch Erklärungen bietet sowie Eingriffe zulässt.

4.7.4 Beispiel einer Anforderungshierarchie für das modellierte Fertigungssystem

Die Simulationen belegten die Bedeutung einer nach ausgewählten Kriterien auf die Auftragslast reagierenden Planungs- und Steuerungssoftware. Die Funktionen einer Belegungsplanung wurden im Modell durch die Variation der Auftragskenngrößen erreicht, während für die dynamische Steuerung mehrere Strategien einbezogen wurden. Daraus läßt sich eine Anforderungshierarchie schließen:

1. Es muß versucht werden, die Anzahl der Werkzeugeinsätze so zu wählen, daß alle verschiedenen WZ der NC-Programme in die Maschinenmagazine eingelagert werden können. In diesem Fall wird das Transportsystem für WZ stark entlastet, da es nur noch den Werkzeugverschleiß ersetzen braucht. Die Wartezeit der Maschinen reduziert sich und die Auslastung der Bearbeitungszentren steigt auf den bestmöglichen Wert an. Dieser Vorgang ist dann unabhängig von der Anzahl der übereinstimmenden WZ und der Strategie bei der Auswahl alternativer Maschinen.
2. Kann die erste Zielsetzung nicht erfüllt werden, müssen zwischen den einzelnen NC-Programmen mindestens so viele

übereinstimmende WZ existieren, daß das Transportsystem für WZ die Anforderungen erfüllen kann. Dadurch ist eine akzeptable Auslastung der Fertigungszentren möglich. Werkzeuge, die nur für einen Arbeitsgang eingesetzt werden, sollten vermieden werden, da sie die Werkzeugversorgung stark belasten.

3. Können die Anforderungen nach Punkt 1. oder 2. nicht erfüllt werden, so kann die dynamische Steuerung bei Pfadauswahl und Werkzeuganforderung verändert werden, um eine zufriedenstellende Auslastung des Fertigungssystems zu erhalten:
 - » Bewertung des WZ-vorrats mit 100 %
 - » Aufbau einer Warteschlange

Die Arbeitsvorbereitung hat also einen starken Einfluß auf die Auslastung des gesamten flexiblen Fertigungssystems. Bei sehr geringer Werkzeugüberdeckung in den NC-Programmen liegen ungünstige Eingangsdaten vor, die durch eine Werkzeugbereinigung verbessert werden können.

5 Grundlagen der operativen Planung- und Steuerung flexibler Fertigungsbereiche

5.1 Einordnung der operativen Planung und Steuerung

Die bekannten Ansätze zur Fertigungssteuerung innerhalb der PPS [11, 39] decken die Leitebene der Fertigungssteuerung ab. Die Umsetzung der Planungsergebnisse in die Realität erfolgt bisher meist durch personelle Feinsteuerung. Eine direkte Kopplung zu den manuellen oder automatisierten Abläufen der Prozeßebene geschieht allenfalls über periodische und entkoppelte Datensammlungen. Lediglich in hochautomatisierten FFS ist die direkte Steuerung der Arbeitsabläufe teilweise gelöst.

Hier wird ein Planungs- und Steuerungskonzept für die operative Ebene eines hierarchischen Fertigungssteuerungssystems entwickelt. Innerhalb dieses Konzepts wird dann die Anwendung verschiedener, angepasster Ablaufstrategien dargestellt.

Aus der Sicht der Leitebene stellt die operative Ebene gemeinsam mit der Prozeßebene eine "Black Box" (Bild 5.1) dar, die Aufträge über Lose zu fertigender Teile annimmt und über abgeschlossene Aufträge Rückmeldungen liefert. Unter bestimmten Voraussetzungen können auch weitere Informationen ausgetauscht werden. Die Stationen der Prozeßebene können aber nicht mit der Datenstruktur "Auftrag", wie sie vom PPS ausgegeben wird, angesteuert werden. In der Prozeßebene werden Anweisungen in Art "Starte NC-Programm" benötigt.

Ein operatives Planungs- und Steuerungssystem muß in Echtzeit auf die Vorgänge in der Fertigung reagieren und aufbauend auf die erfaßten Zustände den Ablauf steuern. So steht die operative Planung und Steuerung (Bild 5.1) zwischen der kurzfristigen PPS-Planungsstufe und den Arbeitsplätzen. Sie unterstützt die Aufgaben der konventionellen Auftrags-Fein-

steuerung durch Bereichsleiter / Meister oder ersetzt diese in automatisierten Fertigungsumgebungen. Die operative Ebene leistet eine Umsetzung von abstrakten Fertigungswünschen in bedeutend konkretere, technische Aktionsanweisungen, die an Arbeitsplätzen bzw. Maschinenstationen ausgeführt werden können. Der Grad der Detaillierung dieser Anweisungen ist von den tatsächlichen Fähigkeiten der Prozezebene abhängig. In der Gegenrichtung, vom Fertigungsprozeß zur Leitebene, erfolgt durch die operative Steuerung eine zeitliche und inhaltliche Zusammenfassung der Meldungen. Es gilt der Grundsatz, daß die Leitebene zunächst nur Rückmeldungen in der inhaltlichen und zeitlichen Auflösung erhält, in der sie auch Aufträge übergibt. Darüberhinaus ist eine Abstimmung zu treffen, inwieweit der Systemzustand für die Leitebene transparent dargestellt wird.

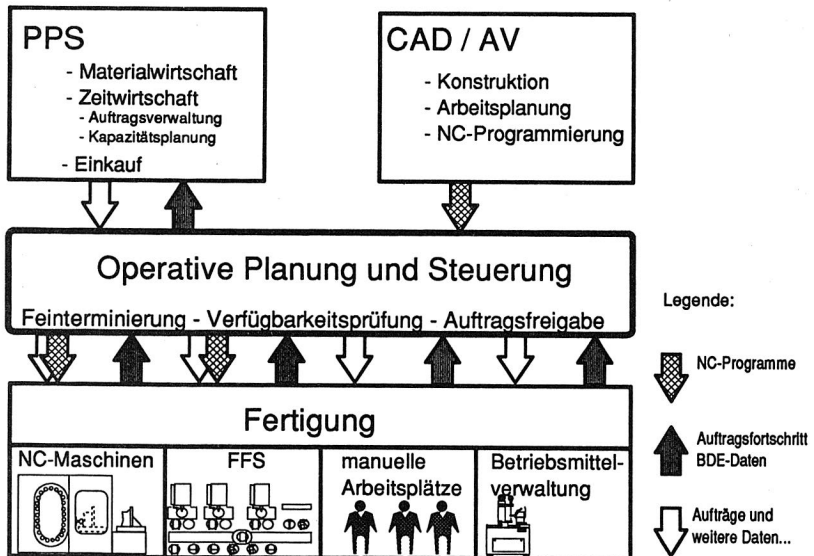


Bild 5.1: Operative Steuerungsebene verbindet PPS und Fertigung

5.2 Strukturierung der Software

Die Entwicklung einer Softwarelösung zur Steuerung von Arbeitsstationen oder Betriebsbereichen der operativen Ebene erfordert große Aufwendungen, die dabei entstehenden Kosten sind kaum durch eine einzige Anwendung zu rechtfertigen. Daher sind die beschriebenen Anforderungen der Fertigungssteuerung nicht wirtschaftlich erfüllbar, wenn ihre technische Lösung nicht portabel ist. Also besteht eine wirtschaftliche Forderung an ein Konzept zur Steuerung der operativen Ebene und seine Realisierung darin, in unterschiedlichsten Anwendungsfällen einsetzbar zu sein. Ein einziges, geschlossenes EDV-System kann dieser Forderung nicht gerecht werden. Die Aufteilung einzelner Funktionen auf austauschbare Module [14, 35, 59, 71] liegt daher nahe. Diese Module verfügen über einen definierten Leistungsumfang und Schnittstellen, so sind zur Anpassung an spezielle Einsatzfälle jeweils nur wenige Teile des Softwaresystems neu einzubinden.

Derartige Aufteilungen erfordern bereits ein umfassendes Anwendungskonzept und auch eine konsequente Realisierung, die nicht zu unerwünschten Einschränkungen führt. Jedoch werden solche Anforderungen auch an andere Softwaresysteme gestellt, so daß von Seiten des Softwareengineering Methoden und Hilfsmittel entwickelt wurden, die eine Programmentwicklung erleichtern [114]. Als Beispiel lassen sich die Tools des Computer Aided Software Engineering oder die Konzepte zur objektorientierten Programmierung [71] nennen.

Die Notwendigkeit zur Modularisierung und Schnittstellendefinition betrifft sowohl die anwendungsorientierte wie auch die softwaretechnische Struktur der operativen Ebene. Durch die anwendungsorientierten Module wird die Anpassbarkeit an unterschiedliche Einsatzfälle erreicht. Austauschbare softwaretechnische Module hingegen sollen ermöglichen, eine unveränderte anwendungsorientierte Ausprägung der operativen Ebene in einer anderen Rechnerumgebung zu implementieren.

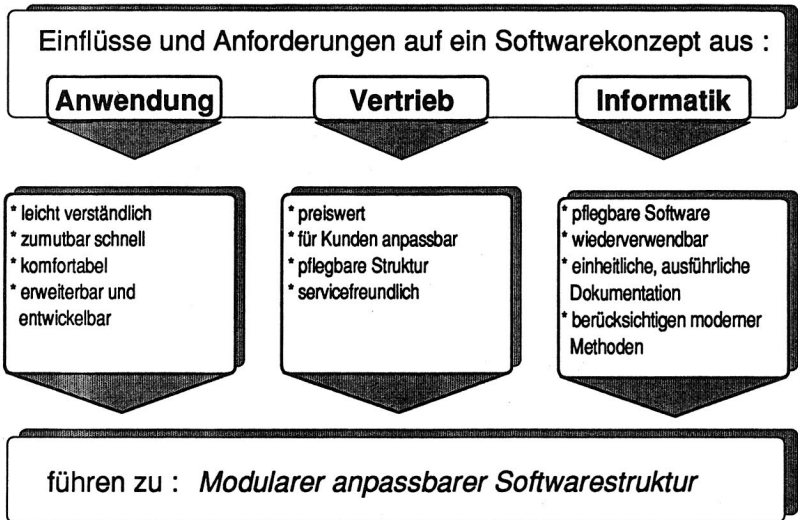


Bild 5.2: Einflüsse und Anforderungen auf das Softwarekonzept der Operativen Steuerungsebene

Für eine anwendungsorientierte Struktur einer EDV-Lösung der operativen Ebene werden folgende Komponenten vorgeschlagen:

Bedienoberfläche

Innerhalb der operativen Ebene arbeiten Menschen an der Steuerung des Betriebsablaufs mit. Diesen muß eine adäquate Möglichkeit angeboten werden, mit dem Rechner in Verbindung zu treten. Jegliche Kommunikation mit dem Anwender des Steuerungssystems soll über ähnliche, leicht verständliche Bedienabläufe erfolgen.

Planungskomponente

Zur Erfüllung der wirtschaftlichen Ziele benötigt die operative Planung und Steuerung die Freiheit, Reihenfolgen und Auftragsverteilungen an Hand eigener Kriterien festzulegen.

Steuerungskomponente

In einer automatisierten Fertigungsumgebung sind die Ergebnisse der Planung in Steuerungsaktionen umzusetzen. Dazu ist ein Modul erforderlich, das on-line situationsabhängige Entscheidungen trifft. In dieser Steuerungskomponente ist eine ereignisabhängige Ablauflogik hinterlegt.

Stationsinterface

Ein universell einsetzbares Softwaresystem sollte in seinen Planungs- und Steuerungskomponenten möglichst unabhängig von Varianten der Stationen in der Prozeßebene sein. Daher greift die Steuerungskomponente auf abstrakte Daten und Funktionen zu. Das Stationsinterface ist der Mittler zwischen den unveränderlichen Steuerungsfunktionen und der einsatzabhängigen Prozeßebene. So können ohne Veränderung der Schnittstelle der Steuerungskomponente automatisierte und manuelle Stationen mit ihr in Verbindung stehen.

Datenmodell und Datenverwaltung

Ein adaptierbares Softwaresystem benötigt als zentrales Anwendungsmodul ein eigenes Datenmodell. Dieses Modell stellt den anderen Anwendungsmodulen eine einheitliche und einfache Zugriffsmethode auf das Daten- bzw. Dateisystem zur Verfügung. Diese Zugriffsmethode wird von den Funktionen der Datenhaltung auf die spezifische Implementierung umgesetzt, die das am aktuellen Rechnersystem verfügbare, softwaretechnische Datenhaltungsmodul nutzt, z.B. eine Datenbank.

PPS-Interface - Integrationskomponente

Die Integration der operativen Ebene in das hierarchische Steuerungssystem erfordert die Kopplung zu der kurzfristigen Produktionsplanung des PPS, die Kopplung zur Leitebene. Dazu stellt die operative Ebene ein spezielles Interface bereit, das die Übernahme von Aufträgen aus der Leitebene erlaubt, sowie an die Leitebene Rückmeldungen

liefert. Die Schnittstellenfunktion setzt die Daten in das vom PPS benötigte Format bzw. wandelt die PPS-Aufträge in das Datenmodell der operativen Ebene um.

Neben der anwendungsorientierten Struktur existiert eine softwaretechnische Struktur der Steuerungssoftware. Ein Problem des wirtschaftlichen Einsatzes einer Softwareentwicklung ist die Anpassbarkeit an unterschiedliche Umgebungen, die sich durch ihre Systemsoftware und Rechnerhardware unterscheiden können. Um eine Portierung so einfach wie möglich zu halten, dürfen die anwendungsorientierten Module nur über festgelegte Programmierschnittstellen auf evtl. variable Elemente der Umgebung zugreifen. Zunächst wird man versuchen, eine genormte, verbreitete Programmiersprache (ANSI-C, ADA) zu nutzen. Jedoch sind sicher nicht alle benötigten Möglichkeiten im Umfang dieser Sprache enthalten. Für die anwendungsorientierte Struktur werden insbesondere folgende softwaretechnischen Strukturelemente (Bild 5.3) benötigt:

Programmkommunikation

Die anwendungsorientierte Modulstruktur und die asynchronen Anforderungen der Prozeßebene an die operative Ebene legen es nahe, die Module als unabhängige, meist asynchron arbeitende Programme zu realisieren. Jedoch ist auch ein Datenaustausch oder eine Synchronisation zeitweise erforderlich. Es werden die bekannten Prinzipien der Betriebssysteme, wie Queues, Semaphore oder Pipes genutzt, ohne jedoch den Anwendungsmodulen einen direkten Zugriff darauf zuzulassen. Vielmehr werden diese Möglichkeiten in Form von neutralen Schnittstellen angeboten.

Standards für Ausgabegeräte und Terminals

Die Erstellung einer komfortablen, verständlichen Bedienoberfläche der Steuerungssoftware erfordert hohen Programmieraufwand. Damit diese Funktionen portierbar bleiben, wird hier empfohlen, bekannte und verbreitete Programmentwicklungs-Interfaces zu nutzen. Hier wird z.B.

von diversen Rechnersystemen der X-Windows-Standard [70, 92] unterstützt.

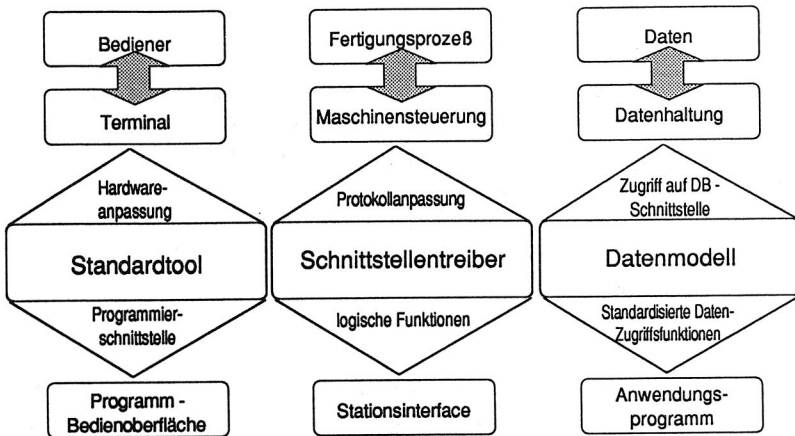


Bild 5.3: Softwaretechnische Strukturelemente

Treiberkonzept zur Verbindung mit der Prozeßebene

Ein Stationsinterface kann (anwendungsorientiertes Modul) mehrere Ausprägungen eines Stationstyps der Prozeßebene steuern. Beispielsweise besitzen Bearbeitungszentren auf logischer Ebene durchaus vergleichbare Ansteuerungsmöglichkeiten für einen Zellrechner. Jedoch ist die spezifische Schnittstelle abhängig von der CNC-Steuerung der Maschine. Das Protokoll dieser CNC-Schnittstelle muß von einem sog. Treiber auf das des Stationsinterfaces übersetzt werden.

Datenhaltung

Die Portierbarkeit der operativen Planung und Steuerung wird verbessert, wenn an Stelle einer fremdbezogenen Datenhaltung den anwendungsorientierten Modulen ein Set selbstdefinierter Funktionen zur Verfügung steht. Erst diese - bei einer Portierung veränderbaren - Funktionen greifen auf fremdbezogene Datenbankschnittstellen zu.

5.3 Aufgabenfelder innerhalb der operativen Planung und Steuerung

5.3.1 Trennung von Planungs- und Steuerungsaufgaben

In der operativen Ebene wird eine Planungskomponente benötigt, die Werkstattplanung, die eine Vielzahl verschiedener Funktionen zu beauftragen, zu überwachen und zu planen hat. Planungsaufgaben [98, 107, 133] sind hier:

- Auswahl eines Sets aktuell zu fertigender Aufträge
- Festlegung der Pfade durch die Fertigung
- Verteilung der Arbeitslast
- Planung der Fertigungshilfsmittel
- Reihenfolgeplanung

Ausgehend von den Ergebnissen der Planung, die u.a. den Stationsbelegungsplan umfassen, sind in der operativen Ebene durch die Ablaufsteuerung (Bild 5.4) folgende Steuerungsaufgaben bestmöglichst zu lösen:

- Versorgung der Fertigungseinrichtungen mit Material
- Entfernen von bearbeiteten Werkstücken
- Beauftragung der FHM-Vorbereitung
- Anstoß und Kontrolle des Umrüstens
- Anstoß des Fertigungsvorgangs
- Sicherstellen der technologischen Bearbeitungsfolge

Die Planungskomponente übernimmt vom PPS ausgegebene Fertigungsaufträge und führt, in dem ihr erlaubten Rahmen, eine Auswahl von Fertigungsalternativen, eine Maschinenbelegung und die Beauftragung nebengeordneter Bereiche, z.B. der FHM-Bereitstellung, durch. Dabei findet eine Detaillierung der Auftragsdaten bis auf das von der Ablaufsteuerung benötigte Niveau statt.

Die Aufgabe der Ablaufsteuerung ist, on-line mit dem Fertigungssystem, der Prozeßebene, in Verbindung zu stehen, die physikalischen Fertigungsaktionen anzustoßen und dynamisch die Werkstücke und FHM zu verwalten.

Die beiden Module Werkstattplanung und Ablaufsteuerung arbeiten zunächst zeitlich entkoppelt. Sie stehen miteinander über den Stationsbelegungsplan in Verbindung, der ein Ergebnis der Werkstattplanung und ein Eingangsdatum der Ablaufsteuerung darstellt.

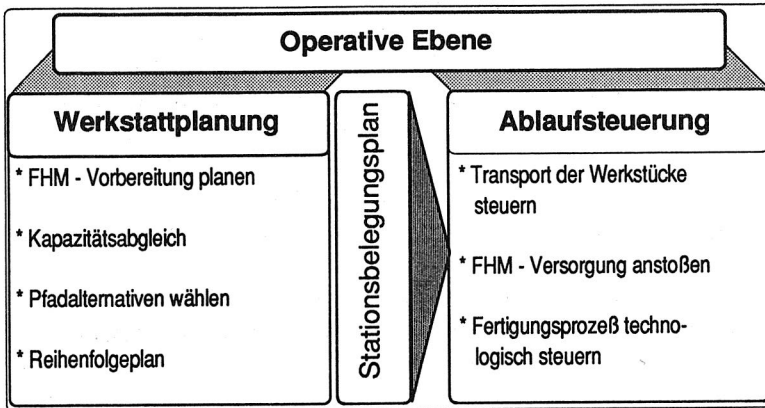


Bild 5.4: Aufteilung der Aufgaben in der operativen Ebene in Werkstattplanung und Ablaufsteuerung

5.3.2 Detaillierungsschritte

Zeitliche Detaillierung

Die vorgelagerten PPS-Bereiche betrachten einen größeren zeitlichen Horizont als die operative Planung und liefern einen Arbeitsvorrat, aus dem die operative Ebene auswählen kann. Weiterhin kann die zeitliche Detaillierung bedeuten, daß man die Einheit, in der die Zeit festgelegt wird, verfeinert. Während aber die Zeiteinheit der Planungsstufe invariant ist, kann die Periodenlänge interaktiv verändert werden.

Örtliche Detaillierung

Die PPS-Planung berücksichtigt aggregierte Kapazitäten. Daraus resultiert die Aufgabe der Werkstattplanung, die einzelnen FA auf nicht weiter teilbare Kapazitätsstellen zu verteilen. Dieser Vorgang wird als Maschinenauswahl bezeichnet.

Technologische Detaillierung

In der technologischen Detaillierung werden Arbeitsvorgänge und Reihenfolgen einbezogen, die auf der PPS-Ebene nicht betrachtet wurden. Derartige, mit dem primären Fertigungsverfahren in einer Reihenfolgebeziehung stehende Aufwendungen, fanden bisher Eingang in Verteil- und Rüstzeiten, die pauschal von der rechnerisch zur Verfügung stehenden Fertigungskapazität abgezogen wurden. Mit zunehmender Arbeitsteilung werden diese Tätigkeiten auf Arbeitsplätze verlegt, die nicht in die Fertigungsplanung einbezogen sind. Auf der Stufe der operativen Planung ist es jedoch unumgänglich, auch hier Kapazitätsangebot und Bedarf zu vergleichen. Während der Kapazitätsbedarf für die primären Fertigungsverfahren und damit unmittelbar verbundene Rüstvorgänge direkt aus dem Arbeitsplan zu entnehmen ist, finden sich Daten zur FHM-Vorbereitung, Vorrichtungsmontage und Transportvorgängen nicht explizit angegeben. In konventionellen Fertigungsumgebungen, bei Arbeitsplätzen, an denen ein Facharbeiter alle vorkommenden Nebentätigkeiten ausführt, ist eine pauschale Rüstzeit ausreichend. Bei einer stärkeren Arbeitsteilung und Automatisierung sind nun auch die ausgekoppelten Arbeitsplätze zu beauftragen und kapazitätsmäßig zu erfassen. Dabei muß aber trotzdem die strenge Reihenfolge von FHM-Vorbereitung, Rüsten und Fertigen für jeden Werkstück-Typ eingehalten werden, was nur durch eine Planung aller in dieser Kette vorkommenden Arbeiten gesichert werden kann.

Mengenmäßige Detaillierung

Die FA der Freigabeliste beziehen sich auf eine Losmenge. Wegen der Anforderungen aus dem Umfeld (Kap. 1) kann davon ausgegangen werden, daß selbst für die kurze Planungsperiode

der Werkstattplanung ein Los je Station nicht ausreicht, um die Fertigung auszulasten. Weiterhin bearbeitet eine Station i.A. nicht das gesamte Los in einem Arbeitsschritt, sondern in kleineren Einheiten. Daher löst die Werkstattplanung die Lose in solche Dispositionseinheiten auf, die im Fertigungsablauf auftreten und von der Ablaufsteuerung angesprochen werden. Die Einträge im Stationsbelegungsplan beziehen sich immer auf ablauftechnisch in der Werkstatt bzw. Zelle nicht weiter teilbare Dispositionseinheiten, z.B. einzelne Produkte oder Paletteninhalte. Die exakte Ausprägung dieser Dispositionseinheiten ist abhängig von der Teileart, der Fertigungsstrategie und der Systemkonfiguration.

Im folgenden werden die Begriffe verwendet:

Auftragsmenge oder Stückzahl

ist die Anzahl zu produzierender Endprodukte / Repräsentanten der Teileart

Arbeitsganglos

ist die Bezeichnung für den Kapazitätsbedarf eines Loses in einem Arbeitsgang

Transportlos

ist die Zusammenfassung mehrerer Repräsentanten einer oder mehrerer Teilearten zu einer im Zellen/Werkstattbereich dispositiv nicht trennbaren Transport- und Bearbeitungsgemeinschaft, der Dispositionseinheit.

5.4 Mathematische Hilfsmittel für das Planungssystem

5.4.1 Problemfelder

Die operative Planung hat eine Reihe von Aufgaben (siehe 5.3.1), deren Ausführung sich auf die wirtschaftlichen Ergebnisse und die Erfüllung der Ziele nach Kap. 1 durch einen Fertigungsbereich auswirken. Diese Aufgaben bieten also die Chance einer optimierenden Planung, die seit langem

Gegenstand (u.a. [9, 84, 133]) von Untersuchungen ist. Insbesondere treten als Problemfeld auf:

» Teileauswahl und Gruppierung

Vorausgesetzt, die überlagerte Produktionsplanung stellt der operativen Planung eine größere Menge von Aufträgen bereit, als im Planungszeitraum bearbeitet werden können, so hat diese die Aufgabe, aus dieser Auftragsmenge jene auszuwählen, die in der kommenden Periode zu fertigen sind. Die Teilearten können nach auszuwählenden Kriterien den Fertigungskapazitäten zur Bearbeitung zugeteilt werden [51, 62, 89, 116].

» Berechnung des Fertigungshilfsmittelbedarfs

Wie bereits ausgeführt, ist die Fertigungshilfsmittelvorbereitung ein kritischer Bereich für den störungsfreien Betrieb eines Fertigungssystems. Dabei treten Begrenzungen der Leistungsfähigkeit der FHM-Vorbereitung sowie der Anzahl möglicher FHM innerhalb des Systems auf (Maschinenmagazinkapazität etc.) Das tatsächliche Verhalten eines Fertigungsbereichs ist u.a. durch die Auftragsauswahl, die Werkzeugverteilung und die Bearbeitungsreihenfolge beeinflussbar. (s. u.a. [12, 58, 62, 107, 116])

» Reihenfolgeproblem

Eine Reihe von Kennzahlen der Auftragsabwicklung sind durch die Bearbeitungsfolge an den Maschinen bestimmt, z.B. die maximale Verspätung oder die durchschnittliche Durchlaufzeit. Weiterhin hat die Bearbeitungsfolge auch Auswirkungen auf den FHM-Bedarf [47, 107, 116].

» Fertigungsalternativen

In flexiblen Fertigungsbereichen bestehen Variationen der Arbeitspläne durch alternative Arbeitsgänge oder Maschinenbelegungen, besonders in FFS sind die Teile-, Pfadauswahl- und Reihenfolgeflexibilität technisch stark ausgeprägt. Dies stellt an Planungs- und Steuerungssysteme die Anforderung, eben diese Eigenschaften abzubilden und in ihren Abläufen zu berücksichtigen.

Die genannten Problemfelder könnten prinzipiell in einem

umfassenden Schritt gelöst oder als einzelne Teilprobleme behandelt werden: [89]

» Für eine integrierte Betrachtung spricht, daß die Kombination mehrerer lokal optimaler Lösungen der Teilproblemefelder nicht zu einem Gesamtoptimum führen muß. So kann z.B. die Auswahl von Fertigungsalternativen nach kürzester Durchlaufzeit zu einer Zusammenstellung führen, deren Werkzeugbedarf nicht in den Maschinenmagazinen speicherbar ist.

» Für eine Dekomposition in einzelne, ggf. rückgekoppelte Probleme spricht, daß die umfassende Betrachtung nicht algorithmisch formulierbar oder - wenn formulierbar [89] - nicht in vernünftiger Zeit lösbar ist. Daher wird meist eine Zerlegung in Teilprobleme vorgeschlagen, die jeweils mit speziellen Methoden gelöst werden [107, 133]. Diese Vorgehensweise wird auch hier angewendet.

5.4.2 Enumeration

Zunächst könnte man den Ansatz vertreten, die optimale Lösung einer Maschinenzuordnung oder einer Bearbeitungsreihenfolge durch vollständige Berechnung aller möglichen Varianten zu ermitteln, wobei jeweils eine Auswertung nach dem Optimalitätskriterium durchgeführt würde. Jedoch ist ein solches Vorgehen für realistisch dimensionierte Problemstellungen meist nicht durchführbar, da die Zahl der Möglichkeiten rapide, häufig nach $N!$, wächst. Als Beispiel sei angeführt, daß es für die Aufteilung von 10 Fertigungsaufträgen auf 5 Maschinen 42525 Möglichkeiten gibt. Eindrücklich sind diese Tatsachen z.B. durch Köhler [58] dargestellt.

Weiterhin gibt es im Bereich des Operation Research bekannte Problemstellungen, deren maximaler Lösungsaufwand sich nicht durch ein Polynom berechnen läßt, die sog. n-p-vollständigen Probleme.

Ein ganze Reihe der Optimierungsaufgaben in der operativen Planung fällt in diese Problemklasse [1, 84, 116]. Als Beispiele sind die Aufteilung von Fertigungsaufträgen in Gruppen oder die Minimierung der Gesamtbearbeitungszeit durch Reihenfolgeplanung zu nennen.

5.4.3 Lineare und Nicht-Lineare Programmierung

Das Optimalitätskriterium für ein Planungsproblem kann offensichtlich als mathematische Gleichung, als sog. Zielfunktion formuliert werden, wobei es das Ziel der Alternativenauswahl ist, das Ergebnis dieser Gleichung zu minimieren bzw. zu maximieren. Beispiele hierfür sind:

- geringste Terminabweichungen der Aufträge
- möglichst geringer FHM-Bedarf
- möglichst geringe Durchlaufzeit der Aufträge

Weiterhin sind aber nicht alle Lösungen dieser Gleichung auch zulässig, vielmehr treten noch sog. Restriktionen oder Nebenbedingungen auf, beispielsweise, daß die maximale Kapazität jeder Maschine nicht überschritten werden darf und jedes benötigte Werkzeug einplant wird.

Die Zielfunktion und die Nebenbedingungen bilden ein Gleichungssystem, das entweder nur aus linearen Gleichungen / Ungleichungen besteht oder eben nicht-lineare [107] Elemente enthält. Weiterhin können die Variablen ganzzahlig (oder auch nicht) sein. Für jede Kombination dieser Eigenschaften des Gleichungssystems hat die Mathematik Lösungsverfahren entwickelt, aus denen bereits Standard-EDV-Verfahren erstellt wurden. Die Ablaufplanung eines Fertigungssystems läßt sich ebenso in derartige Gleichungssysteme fassen [7, 58, 107, 108, 116].

Als problematisch erweist sich, daß wegen der n-p-Vollständigkeit vieler Aufgaben sehr große Rechenzeiten auftreten,

weshalb das Zeitverhalten für die praktische Anwendung in einem Steuerungssystem nicht annehmbar ist. Jedoch wird durch das Lösungsverfahren ein exaktes Optimum bestimmt.

5.4.4 Branch and Bound

Ein weiterer Ansatz zur exakten Bestimmung des Optimums für eine Planungsaufgabe ist das Branch and Bound Verfahren. Vom Grundgedanken her handelt es sich um eine Enumeration, wobei sukzessive die verschiedenen Möglichkeiten berechnet werden (branching). Jedoch wird durch zusätzliche Überlegungen der Bereich des Optimums eingegrenzt, indem zwei Formeln oder Werte festgelegt werden, die jeweils eine untere oder obere Schranke (bound) für den Optimalwert darstellen. Die untere Schranke ist ein Wert, der von keiner Permutation der Planungsobjekte unterschritten werden kann. Die obere Schranke wird jeweils mit dem bisher besten errechneten Wert angepasst. Bei jeder Entscheidungsmöglichkeit wird geprüft, ob aktuell das Optimum überhaupt noch erreicht werden kann (obere Schranke nicht verletzt) und nur dann weiter verzweigt, wenn dies möglich ist. Dadurch wird ein Teil der Möglichkeiten (und darauf folgende Zweige) sofort ausgeschlossen, was die Anzahl der Berechnungsschritte reduziert.

Wurde eine zulässige Lösung gefunden, wird geprüft, ob es noch weitere geben kann (es existieren noch nicht durchlaufene Zweige, die nicht die obere Schranke verletzen) und ggf. versucht, diese Lösungen zu finden (backtracking).

Das Verfahren wird regulär beendet, wenn alle Zweige durchlaufen sind, deren Werte die nicht die obere Schranke verletzen, unter den ermittelten Lösungen befindet sich das Optimum bzw. bei im Verfahren angepasster oberer Schranke ist das letzte Ergebnis das Optimum.

Offensichtlich ist der Berechnungsaufwand von der ersten Bestimmung der oberen und unteren Schranke abhängig, je näher diese am Optimum liegen, desto kürzer gestaltet sich das Verfahren, da mehr Alternativen ausgeschlossen werden. Die Festlegung genauer Grenzen ist die eigentliche Schwierigkeit des Verfahrens für die Praxis und stellt hohe Anforderungen an die Untersuchung des Anwendungsfalls.

Da insbesondere bei n-p-vollständigen Aufgaben auch im Branch and Bound Verfahren hohe Rechenzeiten auftreten können, werden verschiedene Abbruchkriterien verwendet, um die Rechnung zu beenden, ohne unbedingt die exakt optimale Lösung gefunden zu haben. Diese Abbruchkriterien sind u.a:

- » die Differenz zwischen oberer und unterer Schranke unterschreitet einen vorher festgelegten Wert (annehmbare Lösung)
- » es wurde eine zulässige Lösung gefunden (branch and bound ohne backtracking)
- » es wurde eine zulässige Lösung gefunden und eine bestimmte Zeit gerechnet

5.4.5 Heuristiken

Der offensichtlich hohe Berechnungsaufwand der bisher beschriebenen, analytischen Verfahren hat bisher deren praktische Anwendung stark behindert. Dagegen wurden vielfach heuristische Verfahren in der Maschinenbelegungsplanung [131] eingesetzt. Der wesentliche Teil dieser Methoden betrifft die Prioritätsregeln, die den Vorrang eines Arbeitsgangs vor einem anderen betreffen. Eine eindruckliche Übersicht findet sich bei Haupt [47]. Kennzeichnend ist, daß jeweils nur die Entscheidung über den nächsten, einzuplanenden bzw. auszuführenden Arbeitsgang getroffen wird, und zwar durch das Bewerten von Eigenschaften dieses Arbeitsgangs oder des gesamten Auftrags zu dem er gehört. Diese Regeln gewährleisten in den seltensten Fällen eine optimale Lösung,

		NAME	FORMEL KRITERIUM	BESCHREIBUNG
elementare	lokal	FIFO FCFS	Ankunftszeit t	das zuerst angekommene WS wird auch als erstes bearbeitet
		LOZ LPT	nächste Bearbeitungs- dauer $-p_{ij}$	das WS mit längster Bearbeitungs- dauer wird bearbeitet
		KOZ SPT	nächste Bearbeitungs- dauer p_{ij}	das WS mit kürzester Bearbeitungs- dauer wird bearbeitet
	global	DD	Fertigstellungs- termin d_i	der Auftrag mit nächstem Fertig- stellungstermin wird bearbeitet
		GOPNR	$-(m_i - j + 1)$	der Auftrag mit den meisten Restoperationen wird bearbeitet
		SLACK	$d_i - t - \sum_{q=1}^{m_i} p_{iq}$	Schlupfzeitregel : Auftrag mit geringster Differenz zwischen Endtermin und notwendiger Bearbeitungszeit
kombinierte		SL/OP S/OPN	$d_i - t - \frac{\sum_{q=1}^{m_i} p_{iq}}{m_i - j + 1}$	Schlupfzeit in Verhältnis zur Zahl der Restoperationen
		CR	$\frac{d_i - t}{\sum_{q=1}^{m_i} p_{iq}}$	Verhältnis von Zeit bis zum Fertigstellungstermin zur Restbearbeitungszeit
		OCR	$\frac{d_{ij} - t}{p_{ij}}$	kritisches Verhältnis der Operationszeit

p_{ij} : Bearbeitungszeit des Arbeitsganges j des Auftrags i

d_{ij} : Fertigstellungstermin des Auftrags i (des Arbeitsganges j)

m_i : Anzahl der Arbeitsgänge des Auftrags i

j : Nummer des aktuellen Arbeitsgangs

t : aktueller Zeitpunkt

Bild 5.5 : Übersicht zu den bekanntesten Prioritätsregeln
(nach [47, 61])

obwohl für einige Optimierungsziele unter bestimmten - teilweise vereinfachenden - Voraussetzungen Heuristiken bekannt sind, die zu einer Optimallösung führen [9, 100]. Weiterhin wurde in vielen Arbeiten die Wirksamkeit einzelner Regeln untersucht [12, 46, 47] u.a., wodurch gezeigt wurde, daß sie häufig nur für ein Optimierungsziel gute Ergebnisse liefern. Es sind besonders viele Prioritätsregeln bekannt, die Bearbeitungszeiten und Auftragstermine auswerten, außer einer Übersicht (Bild 5.5) wird auf Grund der verbreiteten Anwendung und Beschreibung von Prioritätsregeln hier auf eine weitere Darstellung verzichtet.

5.4.6 Verwendete Begriffe der Graphentheorie

Ein Arbeitsplan für flexible Fertigungsabläufe enthält fertigungstechnische und örtliche Bearbeitungsalternativen. Ein solcher Arbeitsplan kann als Graph oder Matrix dargestellt werden, wobei sich die Graphendarstellung für die Veranschaulichung und die Matrizendarstellung für die datentechnische Verarbeitung anbietet. Im folgenden werden die Arbeitsgänge als "Kanten" (grafisch: Linien) und die daraus entstehenden Bearbeitungszustände der Produkte als "Knoten" (grafisch: Kreise) dargestellt, für die daraus abgeleitete Form des Arbeitsplans wird die Bezeichnung "Netzarbeitsplan" verwendet.

Unter einem Netzarbeitsplan wird ein Arbeitsplan in Form eines Netzplans verstanden, in dem:

- für fertigungstechnisch identische Bearbeitungsvorgänge alternative Ausführungsstationen angegeben sind
- fertigungstechnisch ersetzende Bearbeitungsvorgänge enthalten sind
- fertigungstechnisch ersetzende Bearbeitungspfade enthalten sind

Ähnliche Strukturen wurden bereits mehrfach [27, 75, 102, 65, 120, 127] u.a. vorgeschlagen, deshalb soll in Anlehnung an die einschlägige Literatur [36, 72, 87] hier nur kurz auf die wesentlichen Begriffe und Eigenschaften für Netzarbeitspläne eingegangen werden.

Ein Netzarbeitsplan ist ein gerichteter Graph [87] mit bewerteten Kanten. Der Arbeitsfortschritt eines Werkstücks vollzieht sich entlang eines Pfades im Netzarbeitsplan, wobei an einigen Knoten ein Entscheidungsproblem besteht. Deshalb wird u.a. von der Pfadauswahlflexibilität gesprochen. Weiterhin ändert sich durch eine Bearbeitung definitionsgemäß der Zustand eines Werkstücks, mithin treten in Netzarbeitsplänen keine Kanten oder Pfade auf, bei denen Anfangs- und Endknoten zusammenfallen. Ein Netzarbeitsplan ist also **kreisfrei**. Es gibt genau einen definierten Anfangs- und einen definierten Endzustand. Daher ist ein **Netzarbeitsplan** ein gerichteter, kreisfreier Graph mit genau einer Senke und einer Quelle und gehört zu den Netzplänen [36].

Die bisherigen Definitionen lassen die Darstellung unterschiedlicher Arbeitsgänge, die jeweils den gleichen Anfangs- und Endzustand haben, zu. Für die weitere Verarbeitung von Netzarbeitsplänen in Matrizenform ist es hilfreich, wenn es sich um **einfache** Graphen handelt, bei denen kein Knotenpaar durch mehrere, gleich gerichtete Kanten verbunden ist. Für die Anwendung bei flexiblen Fertigungsmöglichkeiten bedeutet dies, daß entweder identische Arbeitsgänge mit ersetzenden Stationen und ersetzende Arbeitsgänge nicht unterschieden werden können, oder daß in Anlehnung an Ereignisgraphen [72] Scheinarbeitsgänge und Scheinzustände eingeführt werden.

6 Entwicklung eines Planungs- und Steuerungskonzeptes

6.1 Übersicht

Für das hier entwickelte Konzept des **Werkstatt-Planungs- und Steuerungssystems** WEPSSY der operativen Ebene wird vorausgesetzt, daß seine Planungskomponente die letzte des hierarchischen Fertigungssteuerungssystems ist, und sich daran eine ausführende Instanz anschließt. Die Planungskomponente wird als Werkstattplanung **WESPLA** bezeichnet, die steuernde Instanz als Ablaufsteuerung **ALSTE**. Das Zielsystem für WEPSSY ist eine flexible, teilweise oder ganz automatisierte Fertigung von einzelnen Werkstücken, z.B. mit den Bearbeitungsverfahren Fräsen, Bohren, Drehen, Schleifen usw.. Ein integrierter Bestandteil des Konzepts ist die Fertigungshilfsmittelorganisation, da sie bisher eine Schwachstelle bekannter Ansätze darstellt (Kap. 3) und dort eine Möglichkeit besteht, durch Planungs- und Steuerungsalgorithmen eine verbesserte Auslastung der Fertigungsbereiche zu bewirken (Kap. 4).

Aus der Literatur, speziell dem Fachgebiet des Operation Research, sind eine Vielzahl von Algorithmen und Regeln bekannt, die sich jeweils unter besonderen Einsatzbedingungen als vorteilhaft erwiesen haben. Es handelt sich fast ausschließlich um auf ein Zielsystem zugeschnittene Vorgehensweisen. Eine wichtige Forderung (Bild 6.1) an die operative Planung in WEPSSY ist aber, die Anpassbarkeit an verschiedene Einsatzfälle zu gewährleisten, woraus sich der Ansatz ableitet, WEPSSY als ein Rahmenwerk zu entwickeln, in das an festgelegten Stellen spezialisierte Algorithmen eingebunden werden können. Darüberhinaus wurde aus den Simulationsuntersuchungen geschlossen, daß für eine feststehende Fertigungsumgebung situationsabhängig angepasste Algorithmen eingesetzt werden sollten.

Einzelne Problemfelder der operativen Planung und Steuerung wurden bereits dargelegt, sie sind so komplex, daß eine

Zerlegung in Teilaufgaben als der richtige Weg erscheint, ein anwendbares Konzept zu erreichen. So besteht die Möglichkeit, jedes Teilproblem mit spezialisierten Methoden zu bearbeiten, andererseits ergibt sich ein modulares, anpassbares Softwarekonzept.

Anforderungen	Lösungsvorschlag: WEPSSY
<ul style="list-style-type: none">* Steuerung flexibler Fertigungseinrichtungen* Planung des Fertigungsablaufs* für spanende Teilefertigung geeignet* anpassbar an diverse Fertigungsstrukturen* adaptierbare Steuerungsalgorithmen* Steuern und Planen für Hilfsfunktionen	<ul style="list-style-type: none">* Werkstattplanung:<ul style="list-style-type: none">- flexible Arbeitspläne (Netzarbeitsplan)- integrierte FHM-Vorbereitung- modulare Stufenplanung* Ablaufsteuerung:<ul style="list-style-type: none">- Transportsteuerung- Rüstkontrolle- maschinenunabhängige Struktur

Bild 6.1: Anforderungen und einige Lösungsvorschläge für ein Werkstattplanungs- und Steuerungssystem

Für diese Spezifikation wird eine periodisch aktive Verbindung zur überlagerten Produktionssteuerung vorausgesetzt, so daß WEPSSY von dort in gewissen Abständen eine Freigabeliste demnächst auszuführender Fertigungsaufträge erhält. Die Werkstattplanung verarbeitet die vom PPS übergebenen Fertigungsaufträge und Arbeitspläne sowie Bedienereingaben, Zustands- und Stammdaten des Werkstattbereichs. Daraus erstellt sie Belegungspläne für die Arbeitsstationen und die Fertigungshilfsmittelbereiche.

Im Sinne der zeitlichen Detaillierung umfasst die Freigabeliste einen Kapazitätsbedarf, der im Regelfall größer ist, als das zur Verfügung stehende Kapazitätsangebot in der von WESPLA betrachteten Planungsdistanz. Deshalb wird in einem ersten Schritt (Bild 6.2) eine Auswahl der unmittelbar zu fertigenden Aufträge durchgeführt.

Den Fertigungsaufträgen stehen eine Reihe von Kapazitätsstellen (Maschinen) gegenüber. Wenn Fertigungsalternativen für Arbeitsgänge zugelassen sind, entsteht das Problem einer Auswahl aus verschiedenen Möglichkeiten. Für die korrekte Ermittlung des FHM-Bedarfs ist der Schritt einer Maschinenfestlegung unabdingbar, welcher mit einer Kapazitätsbetrachtung verbunden ist. Für diesen Kapazitätsabgleich sind zunächst jene Kapazitätsbedarfe relevant, die durch die primären Fertigungsverfahren an den Werkstücken ausgelöst werden.

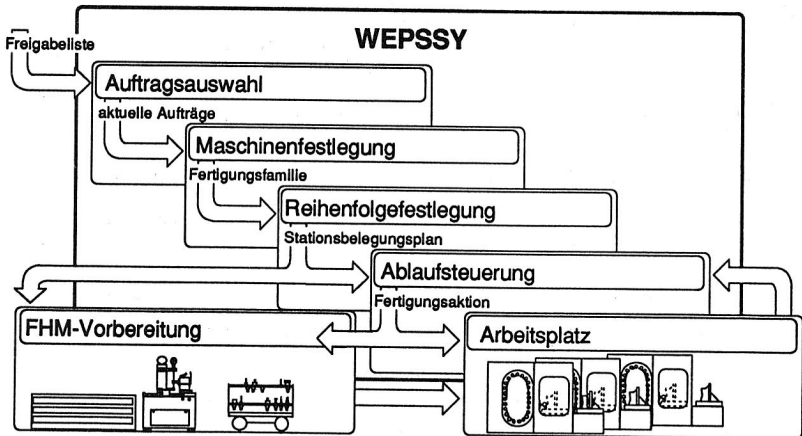


Bild 6.2: WEPSSY als modulares System mit aufeinander aufbauenden Stufen

Danach ist der Stand erreicht, daß für jede Maschine eine im Planungszeitraum ausführbare Auftragsmenge bereitsteht. Daraus kann ein maximaler Bedarf an FHM berechnet werden.

Jedoch lassen sich durch geschickte Reihenfolgefestlegung noch Rüstzeiteinsparungen erzielen. Dies wird erschwert, wenn als zusätzliche Restriktion die mehrstufige Bearbeitung auf verschiedenen Maschinen zu berücksichtigen ist.

6.2 Schnittstellen

Die technisch vorhandene Flexibilität moderner Fertigungssysteme kann nur genutzt werden, wenn von Seiten der Arbeitsvorbereitung die dazu geeigneten Netzarbeitspläne erstellt werden. Insbesondere die Pfadauswahlflexibilität stellt hohe Anforderungen an die Arbeitsplanung, aber es wurden bereits verschiedene Konzepte für geeignete Planungsmethoden [65, 102, 120] entwickelt. Die Kanten des Netzarbeitsplans sind mit einer Reihe von Daten bewertet, die als Arbeitgangdatensatz bezeichnet werden und alle zur Ausführung des Arbeitgangs notwendigen Informationen enthalten oder auf sie verweisen. Ein Fertigungsauftrag (FA) wird vom kurzfristigen PPS jeweils als Datensatz mit folgenden Elementen übertragen:

FA-Identifikation

ist die eindeutige Kennzeichnung des Fertigungsauftrags

TA-Identifikation

ist die eindeutige Kennzeichnung eines Endprodukttyps (TA: Teileart) und Zustandes. Es wird vorausgesetzt, daß durch einmalige Ausführung des im FA genannten Arbeitsplanabschnitts genau ein Repräsentant des durch die TA-Identifikation bezeichneten Endprodukts entsteht.

Stückzahl

gibt den Zähler an, wieviel Repräsentanten der TA produziert werden sollen, mithin wie oft der Arbeitsplanabschnitt zu durchlaufen ist.

Arbeitsplanabschnitt

zeigt auf den Anfangsknoten und den Endknoten des Arbeitsplans der Teileart an den Werkstattgrenzen, dadurch wird ein Teilnetz des zur Fertigung der Teileart gehörigen Arbeitsplans bestimmt.

Bei einem Lauf der Planung muß ein Bediener zumindest angeben, für welchen Zeitraum WESPLA einen Plan aufstellen soll. Weiterhin wird dem Bediener ein transparenter Zugriff auf alle Entscheidungen innerhalb des Planungslaufs gegeben. Von der Vielzahl möglicher Stammdaten werden insbesondere die Fertigungsfähigkeiten und Kapazitäten der Werkstatt und von den Zustandsdaten die Stationsbelegung, eingelastete Werkstücke und vorhandene FHM in der Planung verwendet.

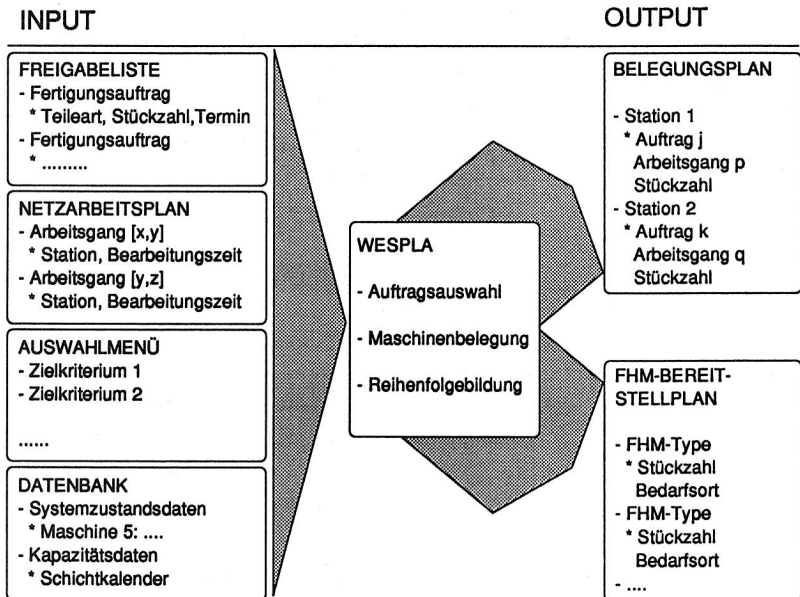


Bild 6.3: Schnittstellen des Planungssystems WESPLA

Das Ergebnis von WESPLA ist der Stationsbelegungsplan sowie der Belegungsplan für die FHM-Vorbereitung. Beide Belegungspläne geben eine zeitliche Reihenfolge der auszuführenden Arbeiten an. Die dort abgelegten Termine sind so berechnet, daß sie im störungsfreien Betrieb eingehalten werden können.

Der Stationsbelegungsplan gibt die Arbeitsfolgen an den zur Werkstatt gehörigen Arbeitsplätzen wieder, das sind neben den Fertigungsmaschinen auch Rüst- und Spannplätze. Insbesondere die Arbeitsfolgen am Systemeingang (Materialzufuhr) sind entscheidend für den gesamten folgenden Fertigungsablauf. Für die FHM-Vorbereitung sind Angaben über Art und Anzahl der bereitzustellenden FHM sowie über den Bereitstellort notwendig. Die Station der FHM-Vorbereitung muß nicht ein Teil des Werkstattsystems sein. Der Belegungsplan hat den Charakter einer Auftragsliste.

6.3 Konzeption einer Werkstattplanung

6.3.1 Start des Planungsprogramms

Das Planungsprogramm soll die Fähigkeit des Werkstattpersonals unterstützen, eine reibungslose und wirtschaftliche Fertigung zu gewährleisten. Deshalb handelt es sich um ein interaktives Softwaremodul, das nur auf Anforderung des Personals gestartet (Bild 6.4) wird. Dabei soll dem Planer die Möglichkeit gegeben werden, nach jedem Schritt Korrekturen an den Zwischenergebnissen vorzunehmen und so den Ablauf zu beeinflussen.

Vom Bediener wird zunächst die Eingabe der Planungsdistanz oder des Planungshorizontes gefordert, wobei der Beginn des zu verplanenden Zeitraums durchaus in der Zukunft liegen darf. Da nicht vorausgesetzt werden kann, daß die Zustandsänderung der Prozeßebene im Zeitraum zwischen dem aktuellen

Zeitpunkt und dem Beginn vernachlässigbar ist, wird es notwendig, den voraussichtlichen Fertigungsablauf zu erfassen.

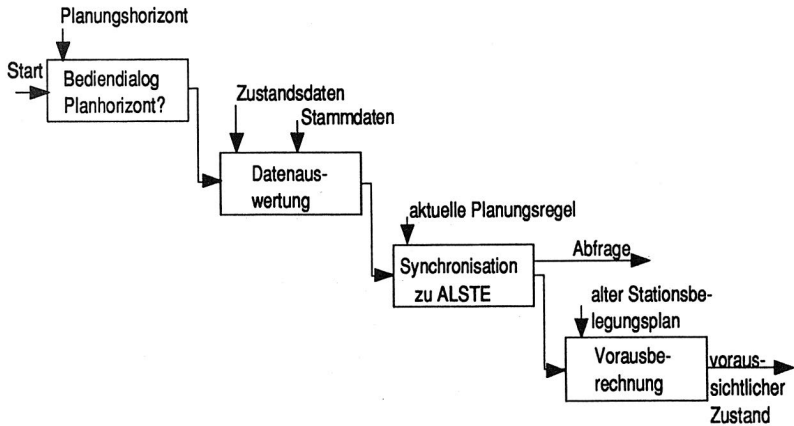


Bild 6.4: Startroutine von WESPLA mit Dialogkomponente, Datenauswertung, Synchronisation mit Alste und Vorausschau

Dazu übernimmt die Werkstattplanung zunächst den aktuellen Systemzustand und fragt bei der Ablaufsteuerung die momentan gültige Ablaufstrategie ab. Mit diesen Daten und dem aktuellen Stationsbelegungsplan wird der Systemzustand zum Beginn der Planungsdistanz vorausberechnet, wobei eine ungestörte Fertigung angenommen wird. Insbesondere ermittelt diese Simulation die Restaufträge der vorhergehenden Planungsperiode, also die nicht erledigten Eintragungen des vorhergehenden Stationsbelegungsplans.

6.3.2 Auswahl der einzuplanenden Aufträge

Die bei Planungsbeginn bestehende Situation kann folgendermaßen beschrieben werden:

- » die Auftragsmenge in der Freigabeliste ist für einen dem PPS-Planungshorizont entsprechenden Zeitraum (z.B. drei Tage) vorgesehen.
- » der WESPLA-Planungshorizont, der durch Bedienereingabe festgelegt wird, ist kürzer. (z.B. eine Schicht)
- » daher besteht die Notwendigkeit, die FA der Freigabeliste in zwei Klassen aufzuteilen; solche, die beim nächsten WESPLA-Planungslauf berücksichtigt werden und solche, die warten.
- » es liegen Arbeitspläne vor, die Alternativen enthalten.

Planungstechnisch entstehen durch die möglichen Pfadauswahlalternativen einige Probleme bei einem stufenweisen Planungsablauf. So können die FHM-Bedarfe u.U. nicht exakt vorherbestimmt werden, solange Alternativen zulässig sind. Deshalb wird hier vorausgesetzt, daß unter den möglichen Pfaden ein Vorzugsnetz ermittelt werden kann, das zunächst als Planungsgrundlage dient. Für dieses Vorzugsnetz wird angenommen, daß es neben einem Vorzugspfad nur noch Alternativen enthält, die durch sog. Scheinarbeitsgänge abgeschlossen werden, also identische Arbeitsgänge mit ersetzenden Stationen darstellen (s. Kap. 5.4.6). Durch die Reduktion der Auftragsmenge und der Arbeitsplankomplexität wird eine Datengrundlage geschaffen, die in folgenden Algorithmen ggf. leichter handhabbar ist.

Das Ergebnis des Auswahlverfahrens ist eine der Freigabeliste entsprechende Datei, die aktuelle FA mit eingeschränkter Pfadauswahlflexibilität enthält.

Die Auswahl kann mit einem Optimierungsziel ausgeführt werden, z. B.:

- » die Maschinenkapazität des Fertigungsbereichs ist möglichst hoch und gleichmäßig auszulasten
- » externe Termine (durch Kunden vorgegeben) sind möglichst einzuhalten
- » manche Teile sind in montagegerechten Stückzahlverhältnissen herzustellen
- » es soll eine gute Zusammenstellung für die Fertigungshilfsmittelorganisation erreicht werden

Der Ablauf der Auftragsauswahl ist in Bild 6.5 beschrieben, sie beginnt mit der Festlegung einer Auswahlstrategie, die abhängig vom Auftragsspektrum und dem Systemzustand bestimmt wird.

Dafür kommt zunächst keine der üblichen Prioritätsregeln in Frage, da es sich nicht um eine Reihenfolgeentscheidung über den unmittelbar nächsten Fertigungsvorgang handelt. Die Anwendung einer Prioritätsregel wie KOZ (Kürzeste Operationszeit) würde den später folgenden Planungsperioden u.U. schlechtere Ausgangsdaten hinterlassen.

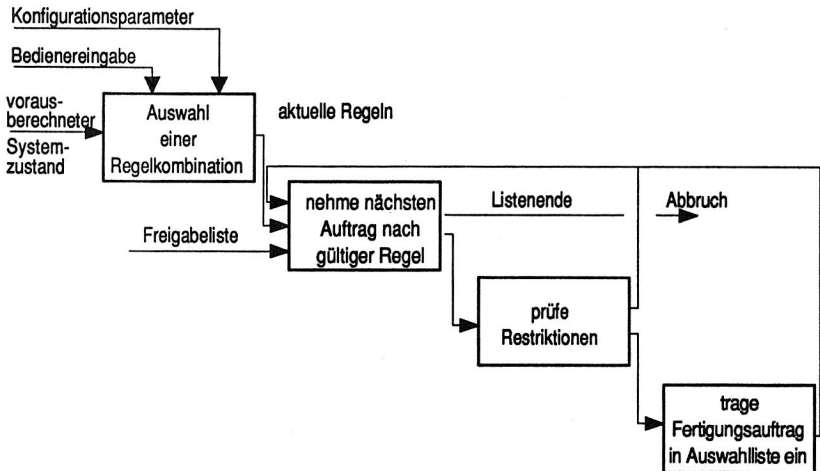


Bild 6.5: Ablauf der Auftragsauswahl

Die Auftragsauswahl bezieht sich auf alle AG eines Auftrags, mithin würden bei einer mehrstufigen Fertigung die auf FHM abzielenden Kriterien für jeden AG unterschiedliche Bewertungen liefern. Daneben besteht noch die Freiheit, je AG aus mehreren alternativen Maschinen auszuwählen. An dieser Stelle ist es daher bei mehrstufigen und mit Alternativen behafteten Arbeitsplänen nicht empfehlenswert, Optimierungsziele für FHM anzuwenden, da diese nur greifen, wenn gleichzeitig die Maschinenzuordnung der AG festgelegt wird.

Jedoch können bei einfachen Arbeitsplänen (nur ein relevanter Arbeitsgang im primären Fertigungsverfahren) bereits hier Teilearten mit ähnlichem FHM-Bedarf zusammengefasst werden. Obwohl es möglich ist, eine Zielfunktion und Restriktionen aufzustellen, kann hier die Lineare Programmierung nicht erfolgreich angewendet werden, da das Problem nach den Aussagen der Literatur [13, 58, 89, 116] eine zu hohe Rechenzeit erfordert.

Auf Grund dieser Tatsache wird an dieser Stelle nicht versucht, über einen mathematisch exakten Algorithmus ein Optimum zu erreichen, sondern eine agglomerative Heuristik eingesetzt, die jeweils einen Auftrag auswählt. Die im aktuellen Fall relevante heuristische Regel wird mit Berücksichtigung des Systemzustandes, der Konfigurationsparameter und der Bedienerangaben bestimmt.

Die Eingangsdaten können über fest codierte Programmabläufe, Entscheidungstabellen oder wissensbasierte Ansätze [109, 98] ausgewertet und zur Festlegung einer - vorher zu implementierenden - Auswahlheuristik herangezogen werden.

Beispiel:

» Konfigurationsparameter:

- hohe Priorität hat die gleichmäßige Maschinenauslastung

» Bedienereingabe

- es darf eine Maximalzahl an Werkzeugtypen innerhalb des Planungshorizonts nicht überschritten werden

» Systemzustand:

- durch bereits im System befindliche Roh- und Halbfertigteile besteht eine ungleiche Kapazitätsauslastung der Maschinen

Im Falle dieses Beispiels kann eine sinnvolle Heuristik folgendermaßen lauten:

» bestimme den Auftrag, dessen Einplanung die Auslastungsdifferenz zwischen der am meisten und am wenigsten belegten Maschine verringert oder am wenigsten vergrößert

und

» wähle diesen für die Auswahlliste aus, wenn die maximale Werkzeugzahl nicht überschritten wird
(sonst nimm den nach dem ersten Kriterium nächst schlechteren)

» beende die Auswahl, wenn

- das Kapazitätsangebot erschöpft ist

oder

- die Freigabeliste abgearbeitet ist

oder

- mit jedem weiteren Auftrag die WZ-Zahl überschritten wird

Nach der Auswahl eines Auftrags wird dessen Kapazitätsbedarf von der verfügbaren Kapazität abgezogen. Übersteigt der Kapazitätsbedarf eines aktuellen Auftrags die verfügbare Kapazität, so kann auch - durch den Planer - ein Lossplitting erfolgen. Bezüglich des Kapazitätsbedarfs ist anzumerken, daß die endgültige Maschinenzuordnung noch nicht getroffen ist, daher sind noch alle Alternativen innerhalb des Arbeitsplans möglich. Die Auswahl der Maschine wird aber erst nach der Feststellung aller einzuplanenden FA geschehen. Daher wird vorerst eine vereinfachte (gleichmäßige) Verteilung der Auftragsstückzahl auf die alternativen Bearbeitungspfade im Vorzugsnetz angenommen. Erweist sich diese Annahme als falsch, so kann es notwendig sein, noch-

mals die Auswahl durchzuführen, wodurch eine Rückkopplung der Teilprobleme innerhalb des Planungsvorgangs erreicht wird.

Dieses Auswahlverfahren berücksichtigt noch keine Terminvorgaben. Im Regelfall sollte für die Aufträge in der Freigabeliste gelten:

- » der früheste Beginnstermin liegt vor dem Beginn des Planungshorizontes
- » der späteste Beginn des Auftrags liegt nach dem Ende des Planungshorizontes

In der Praxis kann die Regelannahme für die Terminalsituation nicht immer gewährleistet sein. Daher wird eine Möglichkeit zur Lösung von Sonderfällen vorgeschlagen. Um festzustellen, ob Aufträge nicht der Regelbedingung genügen und mit höherer Priorität behandelt werden müssen, werden zunächst - ohne optimierende Auswahlstrategie - Fertigungsaufträge mit folgender Datenlage berücksichtigt:

- » der späteste Endtermin liegt innerhalb des gewählten Planungshorizontes. Diese FA erhalten die Priorität 3.
- » der späteste Beginn liegt innerhalb des Planungshorizontes oder durch Rückwärtsterminierung vom spätesten Ende des FA wird festgestellt, daß der FA innerhalb des Planungshorizontes begonnen werden muß. Diese FA erhalten die Priorität 2.
- » angearbeitete Restaufträge aus der vorhergehenden Planungsperiode. Diese FA erhalten die Priorität 1.

Innerhalb der Auftragsauswahl werden - falls Termine zwingend einzuhalten sind - zunächst Aufträge mit einer so ermittelten Priorität herangezogen, bevor jene mit einer der Regelsituation entsprechenden Datenlage berücksichtigt werden.

6.3.3 Simultane Arbeitsstationswahl und Fertigungsfamilienbildung

Anforderungen und Schnittstellen

Die Maschinenzuordnung nutzt die Pfadauswahlflexibilität und schränkt die verbleibenden Möglichkeiten für die Ablaufsteuerung weiter ein. Eingangsdaten sind die vorher ausgewählten Fertigungsaufträge (Auswahlliste) und die dazugehörigen Arbeitspläne, in denen noch eine beschränkte Pfadauswahlflexibilität im Vorzugsnetz zugelassen ist. Als Ergebnis dieser Stufe innerhalb von WESPLA wird eine Zuordnung von Arbeitsganglosen und Stationen sowie eine weitere Festlegung des Pfades erreicht, die folgenden Anforderungen genügen soll:

- » alternative Pfade sind nur insoweit zu nutzen, wie durch die Systemauslastung und die Termineinhaltung erfordert.
- » die Arbeitsgänge sind so auf Maschinen verteilt, daß ein möglichst geringer FHM-Bedarf entsteht.
- » technische Reihenfolgebedingungen, Belegungsbeschränkungen und Durchlaufzeiten für die Arbeitsganglose sind berücksichtigt.

Ziel dieser Planungsstufe ist die Zusammenstellung günstiger Fertigungsfamilien für jede Bearbeitungsstation. Die dafür erfolgversprechende Strategie ist abhängig von

- » vorausberechnetem Systemzustand
- » Kennzahlen der konkurrierenden Aufträge
- » Entscheidungen der Fertigungsleitung / Bedienperson

variabel zu gestalten.

Zusammenhang von Fertigungsablauf und Arbeitsstationsauswahl

Wie durch die Simulation (Kap. 4) gezeigt wurde, hängt die Belastung der FHM-Vorbereitung und der Elemente des FHM-Transports stark von der Maschinenfestlegung ab. Ein grundsätzliches Ziel ist die kostengünstige Fertigung. Da in

komplexen Werkstattbereichen die Versorgung mit FHM sehr kostenintensiv ist, folgt, daß eine möglichst geringe Anzahl bereitzustellender FHM die Fertigungskosten verringert. Allgemein wird angenommen, daß die Zuteilung eines AG zu nur einer Maschine die Anzahl der benötigten FHM gering hält. Eine geringe genutzte Pfadauswahlflexibilität kann aber zu einer Erhöhung der Auftragsdurchlaufzeit führen (Bild 6.6). Daraus kann für jeden Auftrag ein Zusammenhang zwischen den Optimierungszielen (Durchlaufzeit / FHM-Aufwand) und der einzusetzenden Pfadauswahlflexibilität abgeleitet werden.

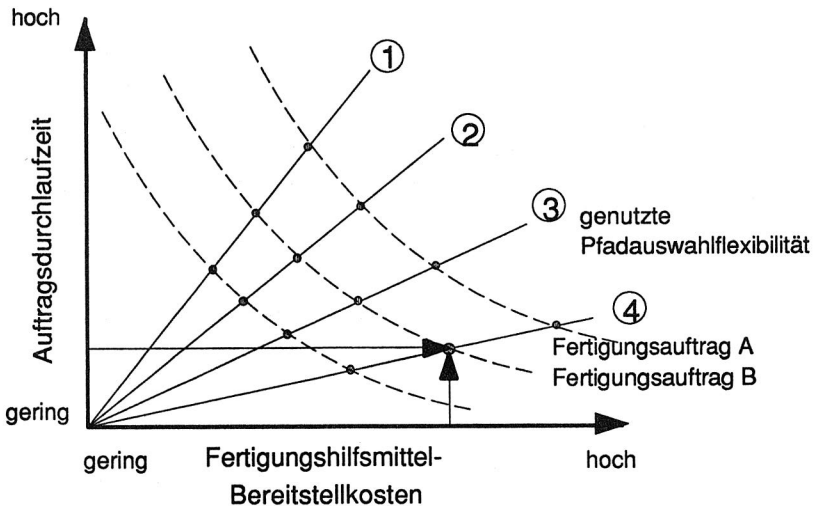


Bild 6.6: Qualitativer Zusammenhang zwischen genutzter Pfadauswahlflexibilität, FHM-Bereitstellkosten und der Durchlaufzeit

Die Kapazitätsbetrachtung bezieht sich zunächst nur auf das primäre Fertigungsverfahren, die Bereiche der FHM-Versorgung und FHM-Nutzung sowie die Stationen, die Nebenarbeiten ausführen, werden ausgeklammert. Dies wird damit begründet, daß im Durchschnitt alle Arbeitspläne so ausgeführt sind,

daß das primäre Fertigungsverfahren die Kapazitätsrestriktion darstellt. Wäre dies nicht der Fall, so müßte schon in höheren Stufen der Fertigungsplanung (z.B. kurzfristiges PPS) ein anderer als der Kapazitätsbedarf des primären Fertigungsverfahrens betrachtet werden. Unter den gegebenen Voraussetzungen kann es sich bei einer Überlastung der FHM-Bereiche und Nebenarbeiten nur um temporäre Phänomene handeln, die sich im längerfristigen Mittel ausgleichen - aber sehr wohl im aktuellen Zeitpunkt ihres Auftretens die Fertigung erheblich beeinflussen.

Berechnung wichtiger Kennzahlen zur Strategiebestimmung

Zur Klassifizierung jedes einzelnen Arbeitsgangs stehen die Daten des Arbeitsgangdatensatzes bereit, der aber zu umfangreich ist, um vollständige Vergleiche aller anstehenden AG in zumutbarer Zeit durchzuführen. An Stelle der Einordnung jedes einzelnen AG in eine bestimmte Klasse werden statistische Kennzahlen verwendet, die sich teilweise bereits in den Simulationsuntersuchungen bewährt haben.

An dieser Stelle können u.a. folgende Werte ermittelt werden:

- Anzahl ausgewählter Aufträge
- Anzahl der verschiedenen Arbeitsgänge
- Gesamtzahl benötigter, verschiedenartiger Werkzeuge
- Durchschnittliche Anzahl verschiedenartiger Werkzeuge je AG
- Durchschnittliche Anzahl übereinstimmender Werkzeuge bei Vergleich zweier AG
- aufsteigende Liste der AG-Hauptzeiten

Diese Daten bilden die Grundlage zur Festlegung von Maschinenzuordnung und Auftragsdurchlaufstrategien. Die aktuelle Auftragszusammenstellung kann so in einem mehrdimensionalen Zustandsraum eingeordnet werden (Bild 6.7). Innerhalb dieses Zustandsraums sind einzelnen Teilräumen ausgewählte Planungs- und Optimierungsregeln zuordenbar.

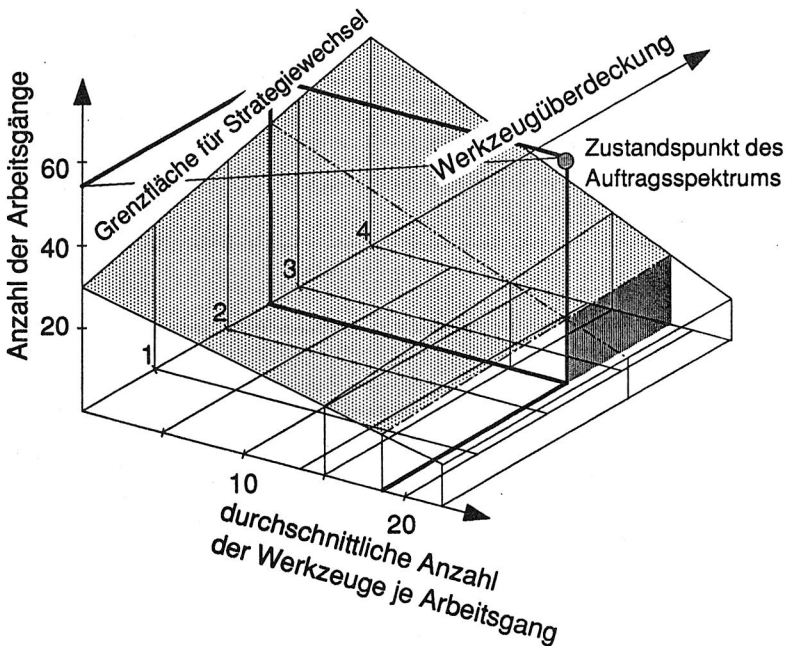


Bild 6.7: Beispielhafte Einordnung eines Auftragsspektrums in einen 3-dimensionalen FHM-Zustandsraum

In ähnlicher Weise wurden bereits Kennzahlen zur Bildung von Fertigungsfamilien vorgeschlagen. Köhler [58] verwendet z.B. die abgeleiteten Kennzahlen der Fertigungsverwandtschaft und Fertigungsvariation eines Auftragsspektrums. Schmitt [98] schlägt eine kanonische Diskriminanzanalyse zur Bewertung der Lose oder Auftragszusammenstellungen vor.

Planungsverfahren für Arbeitsstationsauswahl

Vom Ansatz des Rahmenwerks für einen adaptierbaren Planungsablauf sind zwei grundsätzlich verschiedene Betrachtungsweisen einsetzbar:

- eine integrierte Planung über die gesamte Auftragsmenge
- eine agglomerative Planungsweise

Durch den *integrierten* Planungsansatz wird hier versucht, mittels einer umfassenden mathematischen Formulierung eine optimale Lösung für die Maschinenauswahl nach der festgelegten Strategie zu bestimmen. Dazu wird die Methode der Linearen Programmierung eingesetzt.

Es wird eine Zielfunktion vorgeschlagen, welche die zeitliche Belastung der Werkzeugvorbereitung minimiert:

$$\sum_{j=1}^J \sum_{k=1}^K \sum_{z=1}^Z t_z c_{jkz} \rightarrow \min!$$

Verwendete Indizes:

$j = 1, \dots, J$ Arbeitsgangindex (Kantennummer)
 $k = 1, \dots, K$ Maschinennummer
 $z = 1, \dots, Z$ Werkzeugtypindex

Entscheidungsvariable:

$$c_{jkz} = \begin{cases} 1 & \text{wenn zur Durchführung von Arbeitsgang } j \text{ auf} \\ & \text{Maschine } k \text{ das Werkzeug } z \text{ gerüstet sein muß} \\ 0 & \text{sonst} \end{cases}$$

Koeffizient:

$$t_z = \text{Bereitstellungszeit für Werkzeug } z$$

Gemäß der Zielfunktion wählt der Algorithmus die Arbeitsgangfolgen aus, deren Werkzeuge in kürzester Zeit bereitgestellt werden können. Um die Werkstatt korrekt darzustellen, sind noch eine Reihe von Nebenbedingungen zu formulieren. Eine Nebenbedingung drückt die Kapazitätsrestriktion an den Bearbeitungsmaschinen aus und sie erzwingt immer dann einen Wechsel zu einer alternativen Arbeitsgangfolge, wenn der ursprünglich gewählte Pfad zu einer Kapazitätsüberlastung

führt. Die zweite Nebenbedingung erzwingt die Wahl eines Pfades an jedem Entscheidungsknoten. Eine dritte Bedingung sorgt für durchlaufende Pfade (mit Ausnahme der Anfangs- und Endknoten), sie erzwingt die Wahl einer wegführenden Kante, wenn eine zu einem Knoten führende benutzt wird. Eine weitere Nebenbedingung wird benötigt, um allen Werkzeugvariablen c_{jkz} eine '1' zuzuweisen, wenn für die Abarbeitung des Arbeitsgangs j das Werkzeug z an Maschine k benötigt wird. Eine fünfte Bedingung gewährleistet, daß jeder Werkzeugtyp nur einmal an jeder Maschine, aber durchaus mehrmals an unterschiedlichen Maschinen eingeplant wird.

Soll dieser Algorithmus zusätzlich erreichen, daß jedes Werkzeugmagazin nur einmal am Anfang des Planungszeitraums gerüstet wird, muß außerdem die Maschinenmagazins-Kapazitätsrestriktion eingeführt werden, sie erzwingt eine andere Maschinenzuordnung dann, wenn mehr Werkzeuge benötigt würden, als die Magazinkapazität an Maschine k zuläßt.

Ein schwerwiegendes Hindernis stellt die Berechnungszeit für diese Optimierung dar. Während bei einer Arbeitsvorbereitung, die nur wenige Maschinenalternativen zuläßt, hier nur einige Varianten der Bearbeitungspfade auftreten, bleiben bei einem flexiblen Fertigungssystem mit identischen, voll ersetzenden Maschinen noch alle Pfadauswahlalternativen zu berücksichtigen. Dabei handelt es sich um eine Variation des als n - p -vollständig bekannten "travelling salesman" Problems mit variabler Kantenlänge.

Bei der *agglomerativen* Vorgehensweise wird jeweils nach der ausgewählten Strategie eine Pfadauswahlalternative berücksichtigt. So wird zwar nicht das absolute Optimierungsziel, jedoch in endlicher (zumutbarer) Zeit ein zufriedenstellendes Planungsergebnis erreicht. Belegungsbeschränkungen bestehen insofern, daß für ein FFS z.B. eine gewisse Anzahl parallel aktiver Arbeitsganglose (oder Werkstückträger) je Maschine nicht unterschritten werden darf und andererseits sich nur eine, von der verfügbaren Vorrichtungsanzahl abhän-

gige, Zahl von Werkstückträgern je Arbeitsganglos im System befinden kann.

Dazu wird hier eine Hilfsgröße "maximaler Belegungsanteil" BAT für jeden Arbeitsgang (Bild 6.8) definiert:

Definition

$$BAT_{jk} = p_{jk} * N_{\text{spann}} / (\sum_{j \in L} p_j + (N_{\text{spann}} - 1) * \max(p_j)_{j \in L})$$

$$L = \{j \mid j \in P\}$$

Die Arbeitsgänge der Menge L sind Teil eines Pfades P im Netzarbeitsplan und benötigen ein einheitliches Spannmittel. Falls nur ein Spannmittel für diese Aufspannung ($N_{\text{spann}} = 1$) vorhanden ist, vereinfacht sich die Formel zu:

$$BAT_{jk} = p_{jk} / \sum_{j \in L} p_j$$

Als der (maximale) Belegungsanteil "BAT" je Arbeitsganglos und Aufspannung L an der Gesamtbelegung einer Station k durch eine Fertigungsfamilie wird der Quotient aus der Bearbeitungszeit p_{jk} des Arbeitsgangs j auf der Maschine k und der Summe der Bearbeitungszeiten in der Aufspannung L verstanden. Durch die Definition erklärt sich seine hauptsächlichste Anwendung bei flexiblen Systemen mit Bearbeitungszentren und Palettentransport der Werkstücke. Er gibt einen Orientierungswert, welcher Anteil der Kapazität einer Station mit den vorhandenen Transportmitteln (einer Vorrichtung auf Palette) belegt werden kann und hat nur bei Losgrößen deutlich über 1 Werkstück und bei einer Planungsperiodenlänge größer als (Bearbeitungszeit des AG / BAT) Aussagekraft. Mit BAT und der Stückzahl a_{jk} errechnet sich die Durchlaufzeit DLZ eines Arbeitsgangloses im Arbeitsgang j auf Maschine k folgendermaßen:

$$DLZ_j = a_{jk} * p_{jk} / BAT_{jk}$$

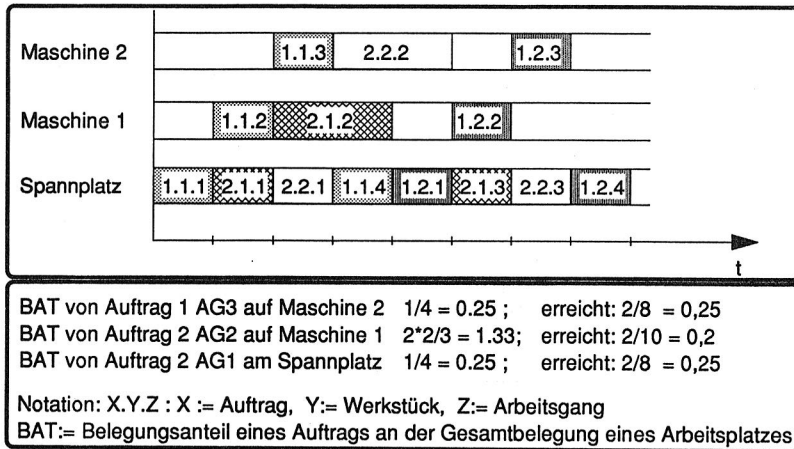


Bild 6.8: Herleitung des Belegungsanteils

Folgender Programmablauf der agglomerativen Maschinenfestlegung (Bild 6.9) wird vorgeschlagen:

Schritt (1):

Es wird die Maschine ermittelt, die als erste frei wird. Dies ist die aktuelle Maschine M.

Schritt (2)

Der aktuellen Maschine M wird ein verfügbares Arbeitsganglos zugeordnet. Die Auswahl erfolgt **optimierend** aus den zur Bearbeitung verfügbaren Arbeitsganglosen. Auf die Optimierungskriterien wird gesondert eingegangen, jedoch ist zu bemerken, daß das Ziel einer Entlastung der FHM-Bereiche die Bildung von Fertigungsfamilien nahelegt.

Arbeitsganglose werden als verfügbar betrachtet:

- » wenn sie nach den Reihenfolgebeziehungen auch gefertigt werden können, z.B. der vorhergehende Arbeitsgang wenigstens soweit ausgeführt bzw. eingeplant wurde, daß die Mindestweitergabemenge fertiggestellt ist.

» die für den Arbeitsgang zulässige Zahl an genutzten Pfadauswahlalternativen wird nicht überschritten.

Kann kein Arbeitsganglos gefunden werden, so ist mit Belegungslücken zu rechnen.

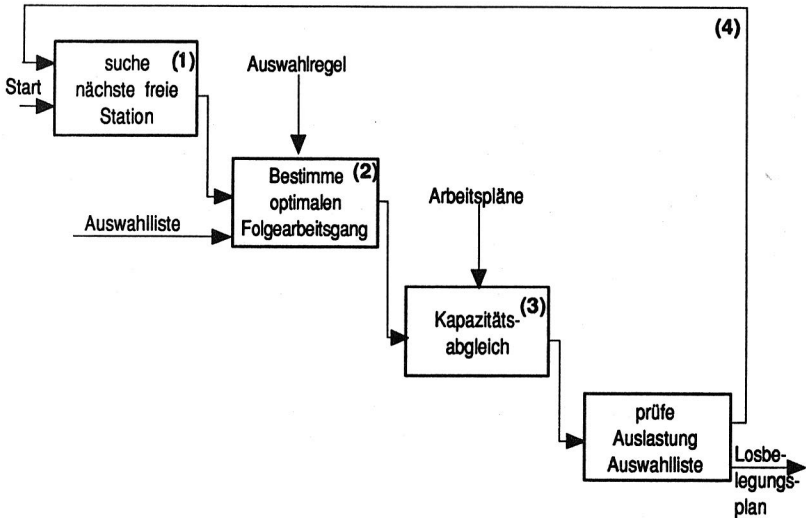


Bild 6.9: Agglomerative Maschinenauswahl und Fertigungsfamilienbildung

Schritt (3)

Nach der Zuordnung wird die verfügbare Restkapazität aktualisiert (siehe Bild 6.10, 6.11), wobei auch festgestellt wird, ob die Fertigungsfamilie als vollständig gelten kann. Dabei müssen 4 Fälle mit unterschiedlichen Formeln (Bild 6.10) behandelt werden. Für die belegte Kapazität werden zwei Werte mitgeführt:

- » die Belegungszeit, die angibt, bis zu welchem Zeitpunkt die Arbeitsstation mit der aktuellen Fertigungsfamilie belegt ist
- » der Belegungssatz, der angibt, zu welchem Prozentsatz die Arbeitsstation von der aktuellen Fertigungsfamilie belegt ist

Start			
I	ja $DLZ_AG > Belegungszeit$ nein		
II	$Belegungssatz := (Belegungssatz * \\ * Belegungszeit / DLZ_AG) + BAT_AG$		$Belegungssatz := \\ Belegungssatz + \\frac{DLZ_AG * BAT_AG}{Belegungszeit}$
III	Belegungssatz > Kapazitätsgrenze		Belegungssatz > Kapazitätsgrenze
	ja	nein	ja
IV	$Familie := TRUE$ $Belegungszeit := \\ DLZ_AG * \\ * Belegungssatz / \\ / Kapazitätsgrenze$ $Belegungssatz := \\ Kapazitätsgrenze$	$Belegungszeit := \\ DLZ_AG$	$Familie := TRUE$ $Belegungszeit := \\ Belegungszeit * \\ * Belegungssatz / \\ / Kapazitätsgrenze$ $Belegungssatz := \\ Kapazitätsgrenze$
	①	②	③
			④

Bild 6.10: Kapazitätsberechnung für Fertigungsfamilien

Es handelt sich hier um eine überschlägige Berechnung der belegten Kapazität.

Schritt (4)

Die Kapazitätsauslastung durch die ausgewählten Arbeitsganglose wird berechnet und so der aktuelle Stand des Losbelegungsplan festgelegt.

Nach der Schleife über alle Maschinen wird wieder mit Schritt (1) begonnen.

Diese Schleife wird solange wiederholt, bis jede Station innerhalb der Periode annähernd ausgelastet ist oder bis keine Arbeitsgänge mehr zuzuordnen sind.

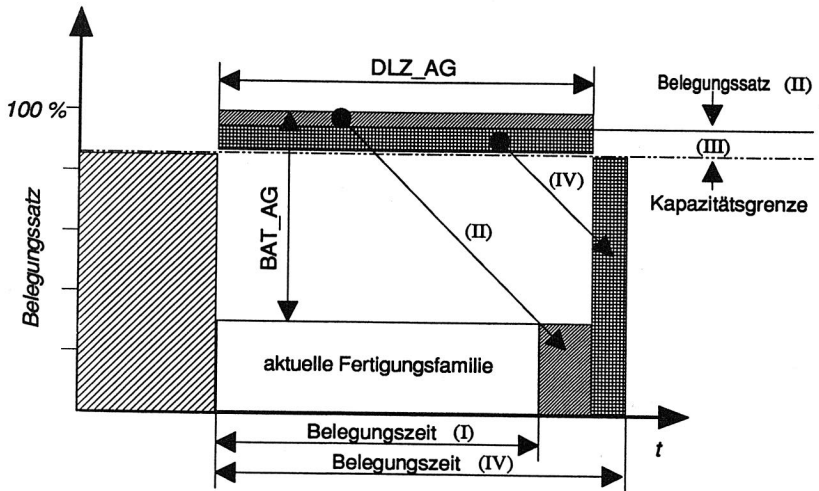


Bild 6.11: Erklärung der Kapazitätsberechnung für Fall 1
(I,II,III,IV sind Ablaufschritte nach Bild 6.10)

Der Algorithmus führt, unter Berücksichtigung maximaler Auslastung der Stationen, zu einer Reduktion der Anzahl genutzter Arbeitsplanalternativen.

Strategiebeispiel 1:

Eingangsdaten:

» Konfigurationsparameter:

- möglichst geringen FHM-Bedarf erzeugen
sowie
- die vorgegebenen Termine einhalten

» Bedienereingabe

- es darf die Maximalzahl eines bestimmten FHM-Types innerhalb des Planungshorizonts nicht überschritten werden

» Systemzustand und Kenndatenauswertung:

- es liegen eine Anzahl von Fertigungsaufträgen der Priorität 3 vor

Im Falle dieses Beispiels kann eine sinnvolle Strategie zur Verfolgung der Ziele folgendermaßen lauten:

- » führe an den Aufträgen mit Priorität eine exakte Durchlaufterminierung aus, um die Termine abzusichern (siehe später)
- » bestimme den Auftrag, der die geringste Schlupfzeit besitzt und ein verfügbares Arbeitsganglos anbietet aus den Aufträgen mit Prioritäten (höchstes Kriterium, weil durch zwei Eingangsdaten gefordert)

und

- » wähle diesen Arbeitsgang aus, wenn die maximale Zahl des begrenzten FHM nicht überschritten wird
- » beende die Auswahl nach dieser Strategie, wenn
 - das Kapazitätsangebot erschöpft ist

oder

- keine weiteren Arbeitsganglose mit Priorität verfügbar sind

oder

- mit jedem weiteren Auftrag die WZ-Zahl überschritten wird
- » bestimme dann die nächste Strategie
 - wähle nach dieser ein Arbeitsganglos
 - prüfe danach, ob nun wieder ein Arbeitsganglos mit Priorität verfügbar ist, dann wieder nach alter Strategie planen
- » beende die Auswahl nach dieser Methode, wenn
 - keine weiteren Aufträge mit Priorität verfügbar sind
 - das Kapazitätsangebot erschöpft ist

Durchlaufterminierung zur Sicherung der Endtermine:

Die kritische Größe für FA mit Priorität 3 (siehe Kap. 6.3.2) ist die Durchlaufzeit, da ihr Fertigstellungstermin innerhalb des Planungshorizontes liegt. Daher wird für alle diese Aufträge einmalig eine Durchlaufterminierung ausgeführt.

Dabei ist zunächst abzu prüfen, ob der Termin bei der Verwendung einer Alternative und Weitergabe der kompletten Auftragsmenge zwischen den AG bzw. Aufspannungen eingehalten werden kann. Ist dies nicht der Fall, so können die Mindestweitergabemengen reduziert oder mehrere alternative Stationen eingesetzt werden, die Entscheidung geht als Vorgabe in die agglomerative Fertigungsfamilienbildung ein. Dazu sind die Durchlaufzeiten der verschiedenen Varianten auszuwerten.

Die Durchlaufzeit bei sequentieller Fertigung der Arbeitsglose errechnet sich folgendermaßen:

$$DLZ_{FA} =$$

$$\sum_{k=1}^K \sum_{j=1}^J y_{jk} * (t_{rjk} + ((a_{jk} * p_{jk}) / BAT_{jk}) + t_{\ddot{u}jk,j+1})$$

wobei

t_{rjk} = Rüstzeit für Arbeitsgang j auf Maschine k

$t_{\ddot{u}jk,j+1}$ = Übergangszeit des Arbeitsgangsloses zwischen Arbeitsgang j auf Maschine k und dem folgenden Arbeitsgang j+1

y_{jk} = 1, wenn Arbeitsgang j auf Maschine k eingeplant ist, sonst 0

Alle anderen Symbole analog sind zum integrierten Planungsansatz (Seite 126) verwendet.

Ergibt die Berechnung der Durchlaufzeit, daß der Termin bei sequentieller Bearbeitung nicht haltbar ist, so stehen die bekannten Möglichkeiten [74] zum Kapazitätsabgleich durch Veränderung der Auftragszuordnung zur Verfügung:

» überlappende Fertigung aufeinanderfolgender AG

» gleichzeitige Zuordnung eines AG zu alternativen Stationen

Bezüglich der Fertigungshilfsmittel verhalten sich beide Möglichkeiten äußerst gegensätzlich: während die überlappende Fertigung i.A. keinen Zusatzbedarf bei FHM-Vorbereitung und FHM-Nutzung -verglichen mit der sequentiellen Fertigung- nach sich zieht, so erfordert jede zusätzlich

genutzte, alternative Maschine meist einen weiteren Satz an FHM. Der exakte Mehrbedarf ist von den Systemeigenschaften abhängig. Es wurde bereits vorgeschlagen, in einer kostenorientierten Optimierung [74] die finanziellen Effekte des größeren FHM-Bedarfs und der Durchlaufzeitverkürzung gegeneinander abzuwägen, aber dieser Weg wird hier nicht verfolgt. Die Nutzung der Alternativen widerspricht dem abgeleiteten Ziel, kostengünstig zu fertigen und bedeutet außerdem eine Verschärfung der Belastung für die FHM-Vorbereitung, ein Effekt, der bei knapper Terminalsituation nicht wünschenswert ist. Daher ist zunächst eine überlappende Fertigung zweier (oder mehrerer) AG vorzuziehen. Damit wird durch die Planungsstrategie die Größe der Mindestweitergabemenge soweit modifiziert, daß sie im Extremfall nur noch ein Transportlos umfasst. Nur wenn auch durch größtmögliche Überlappung aller AG der Termin nicht einhaltbar ist, werden gleichzeitig alternative Stationen eingesetzt.

M1	tr_{jk}	$a_{jk} p_{jk}$	
M2		$tr_{j+1 k+1}$	$a_{j+1 k+1} p_{j+1 k+1}$
	Weitergabe vollständiger Arbeitsganglose: Ein Satz FHM je Arbeitsgang		
M1	tr_{jk}	$(a_{jk} p_{jk}) / x$	
M2	tr_{jk}	$(a_{jk} p_{jk}) / (1-x)$	
M3		$tr_{j+1 k+1}$	$(a_{j+1 k+1} p_{j+1 k+1}) / x$
M4		$tr_{j+1 k+1}$	$(a_{j+1 k+1} p_{j+1 k+1}) / (1-x)$
	Splitten der Arbeitsganglose: mehrere Maschinen identisch Rüsten, daher erhöhter Bedarf an FHM und erhöhter Rüstzeitanteil		
M1	tr_{jk}	$p_{jk,1}$	
M2		$tr_{j+1 k+1}$	$p_{j+1 k+1,1}$
	Überlappende Fertigung zweier Arbeitsgänge eines Loses: Übergabe einzelner Transportlose zwischen den Arbeitsstationen, daher erhöhter Bedarf an Transportmitteln		

Bild 6.12: Möglichkeiten des Kapazitätsabgleichs [74]

Die Durchlaufzeit bei größtmöglicher Überlappung und hauptzeitparallelem Rüsten errechnet sich aus

$$DLZ_{FA} =$$

$$\sum_{k=1}^K \sum_{j=1}^J (y_{jk} * (p_{jk} + t_{ü_{jk,j+1}})) + \max(((a_{jk} - 1) * p_{jk}) / BAT_{jk})$$

Aus der Formel für die Durchlaufzeit ist zu erkennen, daß der Belegungsanteil eine große Bedeutung für die minimale Auftragsdurchlaufzeit besitzt. Es besteht u.U. auch die Chance, den Belegungsanteil eines AG zu erhöhen. Die genaue Bestimmung ist von den Systemdaten abhängig und kann nicht in einem allgemeinen Konzept untersucht werden.

Die Durchlaufzeit des FA wird wesentlich von dem AG mit der größten AG-Durchlaufzeit bzw. mit dem Maximum von Bearbeitungszeit*(Menge - 1)/Belegungsanteil bestimmt. Ist bereits die größte Überlappung erreicht, so ist zunächst zu untersuchen, ob für diesen AG Fertigungsalternativen bestehen, von denen so viele, wie notwendig heranzuziehen sind, um den Termin einzuhalten. Die Auftragsmenge wird auf die Alternativen gesplittet, die Berechnung der Durchlaufzeit erfolgt wie vorher.

Strategiebeispiel 2:

» Konfigurationsparameter:

- möglichst geringen Werkzeugbedarf erzeugen
sowie
- große Fertigungsfamilien bilden

» Systemzustand und Kenndatenauswertung:

- der WZ-Bedarf je Arbeitsganglos ist hoch, ein Grenzwert (Erfahrungswert) wird überschritten

Diese Ziele (Konfigurationsparameter) sind relevant, wenn die Anzahl durchschnittlich übereinstimmender Werkzeuge über das gesamte ausgewählte Auftragsspektrum gering ist oder die

WZ-Bedarfzahlen je Arbeitsganglos relativ hoch im Vergleich zu den Speichermöglichkeiten (Auswertung der Kennzahlen). Eine Planungsstrategie, die dienlich ist, die Ziele zu erreichen, stellt für Bearbeitungszentren mit eigenem FHM-Speicher (Maschinenmagazin) z.B. folgende Heuristik dar:

- » Suche zur aktuellen Maschine jenes Arbeitsganglos, das zu der vorhandenen Ausrüstung dieser Maschine mit FHM die größte Übereinstimmung besitzt.
- » Bestimme die neue Ausrüstung der Maschine mit FHM, indem die nicht übereinstimmenden FHM zur Maschinenausrüstung hinzugefügt werden.
 - Übersteigt die Summe der FHM dann die Speicherkapazität an der Maschine, so stelle dieses Arbeitsganglos zurück und suche das Arbeitsganglos mit der nächstbesten FHM-Übereinstimmung, dessen zusätzlicher Bedarf an der Maschine gespeichert werden kann.
 - Gibt es kein solches Los, so nehme das erste und setze die FHM-Ausrüstung gleich der dieses Arbeitsgangloses (alle überflüssigen FHM werden von der Maschine entfernt, Rüstvorgang).
- » beende die Auswahl nach dieser Methode, wenn
 - keine weiteren Aufträge verfügbar sind
 - das Kapazitätsangebot erschöpft ist

Ein weiteres Ergebnis dieser Heuristik ist ein möglichst fließender Übergang zwischen zwei Fertigungsfamilien, um unvermittelt hohe Rüstaufwände zu vermeiden.

Aus der Literatur sind zur Fertigungsfamilienbildung noch weitere Heuristiken [58, 89, 116] bekannt, die jedoch den Übergang zwischen zwei so gebildeten Gruppen nicht betrachten.

6.3.4 Kritische Betrachtung der Maschinenfestlegung

Bei dem beschriebenen Planungsablauf werden im Prinzip aufeinanderfolgende Fertigungsfamilien festgelegt, deren ein-

zelne Werkstücke bzw. Transportlose innerhalb der Gültigkeit dieser Zusammenstellung in wahlfreier Folge an der Station bearbeitet werden können, wenn die jeweilige Losgröße deutlich über 1 liegt.

Bei einer annähernden Einzelfertigung führt die Maschinenauswahl mit der Zusammenfassung zu Fertigungsfamilien und der technologischen Reihenfolge im Endeffekt zu einer Reihenfolgefestlegung für die Transporteinheiten, verbunden mit periodischen Rüstvorgängen. Die im weiteren vorgeschlagene, separate Reihenfolgeterminierung auf Basis von Transportlosen hat hauptsächlich bei einer Kleinserienfertigung eine sinnvolle Anwendung. Bei Einzelfertigung ist bereits nach der Maschinenfestlegung durch den beschriebenen Programmablauf ein Maschinenbelegungsplan auf Basis der Dispositionseinheiten entstanden, in dem lediglich der Fertigungszeitpunkt eines Werkstücks innerhalb der Gültigkeit einer Fertigungsfamilie nicht exakt festgelegt ist, bei einer Großserienproduktion sind die Termine einzelner Werkstücke hingegen nicht von Interesse.

Bei stark variierenden Losgrößen und Belegungsanteilen innerhalb einer Fertigungsfamilie muß aber auch eine geschickte Reihenfolgebildung vermeiden, daß es zu einem Auslastungsverlust durch Maschinenstillstände kommt, die durch Teilemangel hervorgerufen werden könnten.

Für einige Fertigungssysteme kann, unabhängig von der Losgröße, die Bildung von optimalen Fertigungsfamilien eine ausreichend detaillierte Planung darstellen, insbesondere wenn sie mit einem genügendem Vorlauf erfolgte und auf Grund der Systemdaten und des Auftragsspektrums die Umrüstung grundsätzlich zum Periodenbeginn ausgeführt wird. In diesen Fällen wird die aufbauende Funktion der AG-Reihenfolgeplanung nicht benötigt.

Bei anderen Werkstatsumgebungen, insbesondere bei einem gleitenden Umrüsten während der Planungsperiode, reicht die

Planung von Fertigungsmixen nicht aus. Zu einer Terminierung und einem Belastungsabgleich des Umfelds werden voraussichtliche Arbeitsgangtermine jedes Transportloses eingesetzt, aus denen sich jeweils ein Bedarf an FHM, Transport- und Einrichterkapazität ableiten läßt. Daher wird in dieser Arbeit die Planung detailliert auf Ebene der Dispositionseinheit spezifiziert.

Unabhängig davon, ob sich in einer speziellen Implementation oder Fertigungssituation eine Reihenfolgeplanung für Transportlose anschließt, bleibt die Schnittstelle zur Ablaufsteuerung ALSTE konstant:

» Wenn die Planung nach der Bildung der Fertigungsfamilien beendet wird, so werden die Arbeitsganglose zwar in eine entsprechende Zahl von Transportlosen aufgeteilt, jedoch erfolgt im Stationsbelegungsplan für alle Transportlose einer Fertigungsfamilie der Eintrag eines einheitlichen Starttermins. Die tatsächliche Reihenfolgebildung geschieht dann on-line durch ALSTE.

» Andernfalls wird die Terminplanung nach einem Kapazitätsabgleich für die Hilfs- und Bereitstellarbeiten mit einer Reihenfolgeplanung für Transportlose fortgesetzt.

6.3.5 Erster Kapazitätsabgleich für Rüst- und Nebenfunktionen

Im vorhergehenden Schritt wurden die einzelnen Arbeitsgänge der primären Fertigungsverfahren verteilt. Die Rüst-, Hilfs- und Nebenfunktionen, z.B. der FHM-Bereich, wurden noch nicht betrachtet. Jedoch stellt auch die FHM-Vorbereitung ein Arbeitssystem dar, für das eine Kapazitätsplanung durchgeführt werden sollte. Hier erfolgt die summarische Betrachtung dieser Arbeitssysteme für den gesamten Planungshorizont, und zwar im Hinblick auf:

- » Werkstücke ins System einzubringen und daraus zu entnehmen
(z.B. Spanntätigkeiten in Fräszellen)
- » FHM zu montieren und zu vermessen
(z.B. Werkzeug- und Spannvorrichtungsmontage)

Der Kapazitätsbedarf für diese Funktionen kann häufig nicht direkt aus den Arbeitsunterlagen entnommen werden. Er wird vielmehr auf Grund der benötigten FHM-Stückzahlen berechnet. An dieser Stelle kann noch keine Aussage über die exakten Fertigungstermine einzelner AG gemacht werden, daher kann auch keine Reihenfolgeplanung für die Hilfsbereiche ausgeführt werden. Jedoch stehen durch die Stationsfestlegung bereits die Netto-Bedarfe an FHM je Fertigungsfamilie für die Stationen fest, so daß mit diesen Zahlen ein vorläufiger Kapazitätsabgleich durchgeführt wird, der sich jedoch auf den Gesamtbedarf im Planungshorizont bezieht. Liegt bereits durch den Gesamtbedarf eine Überlast vor, so wird man den Bedarf durch geeignete Maßnahmen reduzieren. Ergibt die Überprüfung, daß die Rüst- und Nebenfunktionen in der Lage sind, ihre Aufgaben insgesamt zu erfüllen, so muß aber nach der Reihenfolgefestlegung für die primären Fertigungsverfahren in der FHM-Terminierung (Bild 6.13, Alternative 2) ermittelt werden, ob dies auch für die dann festgelegten Termine gilt.

Nach dem Kapazitätsabgleich findet sich die erste Schnittstelle zwischen FHM-Nutzung und Fertigungsplanung. (Bild 6.13, Alternative 1) Aus den bis zu diesem Schritt feststehenden Terminen für Fertigungsfamilien läßt sich - wenn man auf die Arbeitsgangterminierung (nach 6.3.6) verzichtet - die Terminierung der FHM-Vorbereitung (nach 6.3.7) anstoßen. Dabei werden als Bedarfszeitpunkte jeweils die Übergänge zwischen zwei Fertigungsfamilien betrachtet.

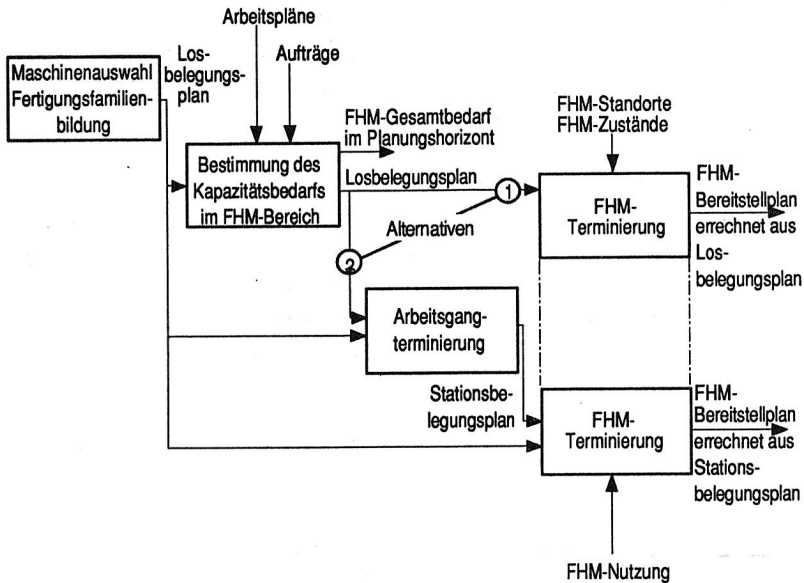


Bild 6.13: Alternative Abläufe zur FHM-Terminierung:
entweder auf Basis des Losbelegungsplans oder des
Stationsbelegungsplans

Ergibt der Vergleich von Kapazitätsbedarf und Kapazitätsangebot, daß die Nachfrage überwiegt, so wird eine Reaktion erfolgen:

» sind die Versorgungsfunktionen für Werkstücke überlastet, so wird man versuchen, die hauptsächlich dafür verantwortliche Teileart zu identifizieren und gegen eine andere auszutauschen, die z.B. über längere Bearbeitungszeiten je WS beim primären Fertigungsverfahren verfügt (bzw. bei der das Zeitverhältnis "primäres Fertigungsverfahren / Spanntätigkeit" größer ist).

» sind die Funktionen Werkzeugmontage und Voreinstellung überlastet, so wird man nochmals den Schritt der Auftragsauswahl durchführen und dort das Kriterium eines möglichst

geringen WZ- Bedarfs für die Planungsperiode einsetzen. Es wird angenommen, daß die zeitliche Verfügbarkeit der WZ-Voreinstellung nicht erhöht werden kann, da hierzu unbedingt das entsprechende Meßgerät verfügbar sein muß.

- » treten Überlastungen bei anderen Rüstfunktionen (Vorrichtungsmontage, Verfügbarkeit von speziellen Betriebsmitteln) auf, so hat der Bediener des Planungsprogramms bereits hier zu prüfen, ob die benötigte Arbeitskapazität durch organisatorische Maßnahmen, wie den Einsatz von mehr Personal, beschafft werden kann. Ist das nicht möglich, so ist mit dem Kriterium eines minimalen Rüstaufwandes nochmal die Auftragsauswahl auszuführen oder eine Reduktion der gesamten Auftragslast durch Bedienerentscheidung festzulegen.

6.3.6 Arbeitsgangterminierung auf Basis von Transportlosen

AG-Terminplanung und dynamischer Fertigungsablauf

Nach den bisher durchlaufenen Funktionen der Werkstattplanung WESPLA steht eine Auftragsauswahl und Maschinenzuordnung fest, für die gilt:

- » die Fertigungskapazität reicht für alle FA aus
- » die Gesamtkapazität der FHM-Bereiche ist ausreichend

Die Auftragsauswahl und der ausgeführte Kapazitätsabgleich beziehen sich aber auf die gesamte, ausgewählte Auftragsmenge und den gesamten Planungshorizont. Die Transportlose sind innerhalb der Fertigungsfamilien noch frei terminierbar und der Übergang zwischen diesen wurde planungstechnisch vereinfacht. In einer verfeinerten Betrachtung, einer Reihenfolgeplanung oder Arbeitsgangterminierung, wird nun die Auftragsmenge in Transportlose aufgeteilt und jeder Arbeitsgang dieser Teilmengen terminiert. Dabei stellt sich die Frage, wie exakt die einzelnen AG-Termine vorzugeben sind. Eine minutiöse Festlegung der AG-Folgen an den Stationen des

Systems raubt der Ablaufsteuerung die Möglichkeit, tatsächlich regelnd in den Fertigungsablauf einzugreifen. Die Ablaufsteuerung würde sich auf eine einfache Abarbeitung der Planungslisten reduzieren.

Jedoch sind alle realen Fertigungssysteme mit unvermeidlichen Störungen behaftet. Je exakter der vorgeplante Ablauf (AG-Reihenfolgen etc.) einzuhalten ist, desto geringfügigere Vorkommnisse sind als Störungen aufzufassen. Da durch eine Störung nicht der gesamte Plan ungültig werden darf, muß also die Ablaufsteuerung ALSTE über Regelalgorithmen verfügen, die den Fertigungsablauf nahe an den geplanten AG-Terminen führen. ALSTE soll in der Lage sein, ohne neu ausgeführte Werkstattplanung, einen möglichst optimalen Fertigungsablauf zu gewährleisten, auch wenn sich dabei Planabweichungen einstellen.

Ein analoges Verhalten ist von den physikalischen Regelkreisen bekannt: dort stellt sich ein Schleppabstand zu der Führungsgröße ein, dessen absoluter Betrag von der Güte der Regelung abhängig ist.

Es ist also nicht sinnvoll, einen auf die Sekunde den Planungsdaten folgenden Fertigungsablauf vorauszusetzen, da durch die Systemeigenschaften zu erwarten ist, daß solche Termine prinzipiell nicht einhaltbar sind. Die Präzision der Arbeitsgangterminierung steht also im Gegensatz zu den Notwendigkeiten einer mächtigen Ablaufsteuerung.

Wegen des dynamischen Ablaufs der Fertigung scheint zunächst die Einplanung von Fertigungsfamilien eine gute Lösung zu sein, weil die Ablaufsteuerung nicht durch feste Termine für jede Dispositionseinheit eingeengt ist. Jedoch sollte ein Teilemix aus annähernd gleichmäßig verteilten Stückzahlen der einbezogenen Arbeitsganglose bestehen, da sonst während des Fertigungsablaufs unerwartet ein Mangel an Rohteilen eintreten kann.

Ablauf der AG-Terminierung

Die Eingangsdaten der AG-Terminierung für Transportlose bilden die Fertigungsfamilien aus der Maschinenfestlegung sowie der voraussichtliche Anfangszustand bei Fertigungsbeginn. In der Maschinenauswahl wurden bereits kritische Fertigstellungstermine berücksichtigt, so daß eine Sonderbetrachtung von Eilaufträgen hier entfällt.

Die Datenmenge der Arbeitsgänge, welche für jeden Auswahlvorgang untersucht werden muß, wurde bereits durch die vorhergehenden Planungsschritte deutlich reduziert. Für jede Station der primären Fertigungsverfahren gibt es eine begrenzte Menge aktueller AG, die außerdem noch technologischen Reihenfolgen gehorchen.

Da bereits die Arbeitsgänge auf Maschinen verteilt wurden, ist das komplexe Planungsproblem flexibler Fertigungssysteme auf das bedeutend einfachere Ein-Maschinen-Reihenfolgeproblem reduziert worden. Für diese Planungsanforderung finden sich in der Literatur [9, 57, 68] eine Reihe von Untersuchungen über Planungsheuristiken und optimale Reihenfolgen, die aber häufig nur zutreffen, wenn die einzuplanenden Transportlose weiteren, einschränkenden Bedingungen genügen.

Vorgesehen ist hier, ebenso wie in den vorhergehenden Planungsalgorithmen, abhängig von Kenngrößen der anstehenden Bearbeitungen, der Systemkenndaten und Planungsvorgaben des Nutzers, eine angepasste Strategiewahl durchzuführen. So lassen sich die Voraussetzungen für einige der bekannten Heuristiken abprüfen und daraus die Entscheidungen für ihre Anwendung treffen.

Beispiel:

» Kenngrößen der Fertigungsfamilien:

- die Werkstücke für die Transportlose stehen einheitlich zum geplanten Start zur Verfügung
- technologische Reihenfolgen an einer Maschine sind nicht

zu beachten, genauso wenig wie Überlappungen der Arbeitsganglose einer Teileart

- die FHM-Bereitstellung ist in Summe unkritisch

» Bedienereingabe:

- Optimierungsziel: die Gesamtfertigungszeit soll minimiert werden

» Systemkenndatum:

- eine fließende Umrüstung ist möglich

Für diesen Fall ist aus der Literatur [9] bekannt:

- » Die heuristische Planungsregel KOZ liefert die Optimallösung für minimale Gesamtfertigungszeit. Dies gilt auch für die durchschnittliche Fertigungsdauer und die durchschnittliche Durchlaufzeit der Transportlose. Der Optimierungshorizont kann soweit (ggf. über mehrere Fertigungsfamilien) ausgedehnt werden, wie die Bedingungen gelten. (Bereitstellungstermin, technologische Reihenfolgen etc.) Unter Umständen kann nach einer kurzzeitigen Verletzung der Anfangsbedingungen wieder eine gewisse Distanz nach der Regel eingeplant werden.

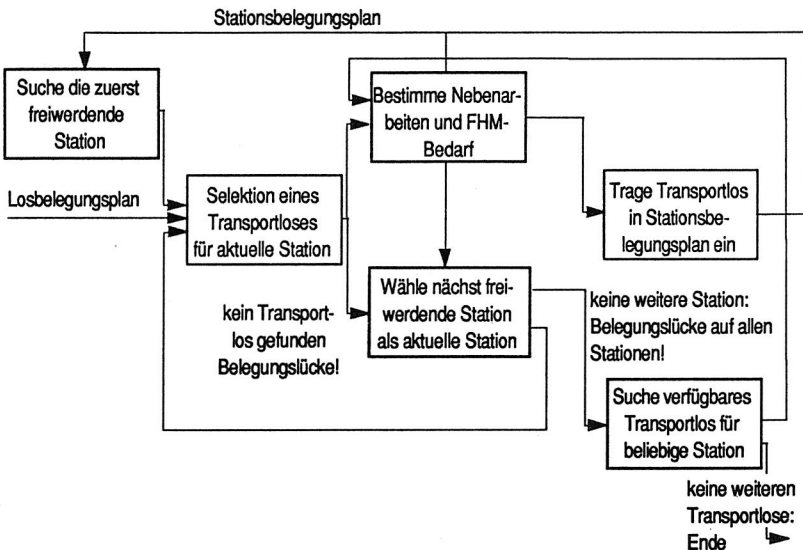


Bild 6.14: Arbeitsgangterminierung

Wegen der vorhandenen Einschränkungen für die bekannten Optimallösungen sind diese aber nur selten in einer realen Fertigungsumgebung einzusetzen. Deshalb wird in dem Konzeptrahmen vorgeschlagen, mit dem Auswahlalgorithmus jeweils aus einem der verfügbaren Arbeitsganglose ein Transportlos zu selektieren (Bild 6.14) und in den Stationsbelegungsplan einzutragen. Das Planungsprogramm rechnet so schrittweise den Fertigungsablauf voraus, indem es jeweils den geplanten Zeitpunkt eines relevanten Fertigungsereignisses als aktuellen Planungszeitpunkt annimmt und die verfügbaren Arbeitsganglose zu diesem Zeitpunkt betrachtet. Im Normalfall (stillstandsfreie Fertigung) handelt es sich bei den zu betrachtenden Ereignissen um das Freiwerden einer Station. Werden jedoch Stillstände festgestellt, so wird das nächste verfügbar werdende Transportlos ermittelt und der aktuelle Planungszeitpunkt auf dieses Ereignis gesetzt.

Bei der Einplanung eines Transportloses auf eine Station ist der Systemzustand vorauszuberechnen. Dabei werden die relevanten Restriktionen für bestimmte Typen gleichzeitig im System befindlicher FHM (Vorrichtungslimit, Vorbearbeitungen) berücksichtigt.

Aus den Bearbeitungen im primären Fertigungsverfahren leiten sich vorher auszuführende Nebenarbeitsgänge ab:

» Ausrüsten der Station mit den benötigten FHM

Bei der Terminierung des AG ist ggf. eine Rüstzeit mit einzubeziehen. Der Rüstaufwand wird in der Terminliste des Rüstpersonals bzw. der dazu benötigten Hilfsstation vermerkt. Weiterhin ergibt sich daraus ein Bedarfszeitpunkt für FHM.

» Einbringen der WS in das System

Insbesondere bei manuellen Stationen am Systemeingang, wie sie z.B. in Fräszellen für die Spanntätigkeit bestehen, wird ebenso ein Stationsbelegungsplan geführt. Derartige Stationen wurden in den PPS-Planungsstufen nicht betrachtet.

Im Gegensatz zu der Einplanung von Fertigungsfamilien, wie sie in der Maschinenzuordnung durchgeführt wurde, entsteht bei der Reihenfolge-Disposition eine dynamische, fließende Veränderung der aktiven Aufträge an einer Station. Ebenso ist der zeitliche Bedarf an FHM geglättet und nicht mehr auf die relativ scharfen Übergänge zwischen zwei Familien festgelegt. Ein weiterer wichtiger Vorteil der Arbeitsgangterminierung ist die realistische Berechnung der Kapazitätsauslastung, da in weiten Grenzen auch dynamische Effekte, wie Blockierungen, erkannt werden können.

Das Ergebnis der AG-Terminierung für Transportlose ist:

- » der Stationsbelegungsplan für die Arbeitsplätze des primären Fertigungsverfahrens und für die Hilfsarbeitsplätze. Der Stationsbelegungsplan wird von der Ablaufsteuerung weiterverarbeitet.
- » terminierte FHM-Bedarfe, aus denen sich die Belegung und die Arbeitstermine der FHM-Vorbereitung ableiten lassen.

6.3.7 Planung der FHM-Vorbereitung

Die terminierten FHM-Bedarfe stellen Aufträge für die FHM-Vorbereitung dar, in denen späteste Bereitstellungstermine genannt sind. Daher werden sie in einer Rückwärtsterminierung so auf die verfügbare Arbeitskapazität der FHM-Vorbereitung verteilt, damit eine realistische Arbeitsbelastung entsteht. Die Gesamtkapazität innerhalb des Planungshorizontes wird ausreichen, da sie vorher berücksichtigt wurde.

In dieser Stufe können verschiedene Rüststrategien anvisiert werden. Die FHM-Vorbereitung stellt die notwendigen FHM zur Ausrüstung der Maschinen bereit, wobei die Rüsttätigkeiten in verschiedener Weise organisiert werden können, z.B. gleitend während der gesamten Fertigungsperiode oder nur zu bestimmten Zeitpunkten. Auch hier soll der Nutzer des Planungsprogramms aus mehreren Optimierungszielen auswählen

können, über die dann ein entsprechender Algorithmus festgelegt wird. Für eine flexible Fertigung werden im folgenden drei Planungsregeln vorgestellt. Die entstehenden, mit Terminen versehenen FHM-Bedarfe können durch manuelle oder automatisierte Arbeitsstationen [6] befriedigt werden.

Planungsziel: Minimierung der WZ-Austauschvorgänge bei gleitender Umrüstung

Bei einer gleitenden Umrüstung haben die geplanten spätesten Termine für die Bereitstellung neuer Werkzeuge Gültigkeit. Jedoch klärt dies noch nicht, welche der bereits im System befindlichen Werkzeuge / FHM bei knappen Lagerplatz entnommen werden, so daß die Ablaufsteuerung hier einen Entscheidungsspielraum besitzt.

Die Klärung kann durch eine Magazinierungsplanung geschehen. Falls es das Ziel ist, für einen vorliegenden Stationbelegungsplan die Anzahl der Werkzeugaustauschvorgänge zu minimieren, sollten jene Werkzeuge im Maschinenmagazin gehalten werden, die am frühesten für eine folgende Bearbeitung benötigt werden. Diese Heuristik wird eingehend in [116] dargelegt und als optimal bewiesen.

Planungsziel: Bildung von umrüstfreien Fertigungsperioden

Für eine automatisierte, mannarme Fertigung über gewisse Zeiträume (mannarme Schicht) ist es notwendig, daß keine Umrüstung der Werkzeugmagazine erforderlich ist. Daher sind diese Tätigkeiten vor bzw. nach dieser Fertigungsspanne vorzusehen.

Bei einer Zusammenfassung der Werkzeugmagazinierung auf diskrete Zeitpunkte werden die Bedarfe aus mehreren Fertigungsfamilien oder Transportlosen zusammengezogen, wobei sich die Planung nicht an den Grenzen der planungstechnisch gebildeten Familien orientieren muß.

Eine wesentliche Voraussetzung, um dieses Ziel zu erreichen, ist eine darauf abgestimmte Maschinenauswahl und Fertigungsfamilienbildung im vorhergehenden Planungsschritt. Darauf aufbauend kann die Umrüstung vor der mannarmen Periode geplant werden, indem die Bedarfe vorgezogen befriedigt werden. Bei ungünstiger Zusammenstellung und Terminierung der Fertigungsfamilien kann aber das Ziel u.U. nicht erreichbar sein.

Planungsziel: Bestimmen der Mindest-Gesamt-Werkzeuganzahl

Weiterhin können - wie in den Simulationen berücksichtigt - noch andere Werkzeugaustauschstrategien angewendet und vorausgeplant werden. Diese Strategien haben insbesondere bei einer Betrachtung der maschinenübergreifenden Werkzeugversorgung oft eine sinnvolle Anwendung. So kann das Ziel bestehen, bei einem extrem schnellen Werkzeugaustausch zwischen den Maschinen, die Gesamtwerkzeuganzahl im Fertigungssystem zu minimieren, ohne eine Blockierung der Maschinen zu riskieren. Dabei ist an Hand der Stationsbelegungspläne und Werkzeugbedarfslisten festzustellen, wie oft jedes Werkzeug gleichzeitig durch Arbeitsgänge benötigt wird, woraus sich die Mindestzahl gleichzeitig bereitzustellender Schwesterwerkzeuge je Werkzeugtyp ergibt. Diese Größe kann auch mit einer maximal erlaubten Zahl verglichen werden und bei einer Überschreitung eine Meldung an den Planer abgesetzt werden. Dieser kann darauf z.B. durch eine manuelle Änderung des Stationsbelegungsplans reagieren.

Die Werkzeugaustauschstrategie ist eng mit der Ablaufsteuerung des Fertigungssystems verbunden. Wenn sie bereits in der Planung festgelegt wurde, verringern sich die Freiheiten der Ablaufsteuerung.

6.4 Konzept einer Ablaufsteuerung

6.4.1 Aufgaben und Umfeld der Ablaufsteuerung

Die Hauptaufgaben der Ablaufsteuerung ALSTE sind:

- » Ausgabe von Aktionsanweisungen an Stationen
- » Reihenfolgeentscheidungen für anstehende Bearbeitungen
- » Sicherstellung der FHM-Versorgung des Systems:
 - bei vollautomatisierten Systemen die organisatorische Koordination von Bearbeitungsfolge und Rüstvorgängen
 - bei manuellen Systemen die Ausgabe von Transport-, Montage- und Rüstanweisungen an Arbeitspersonen

Jedoch behandelt ALSTE keine internen Abläufe der Stationen, sondern verwendet nur definierte Funktionen auf bestimmten Stationsklassen. Insbesondere ist ALSTE nicht für die interne Verwaltung irgendwelcher Transportsysteme zuständig, in deren Bereich u.a. die Suche von Pufferplätzen, Transportüberwachung oder spezielle MDE/BDE- Funktionen fallen.

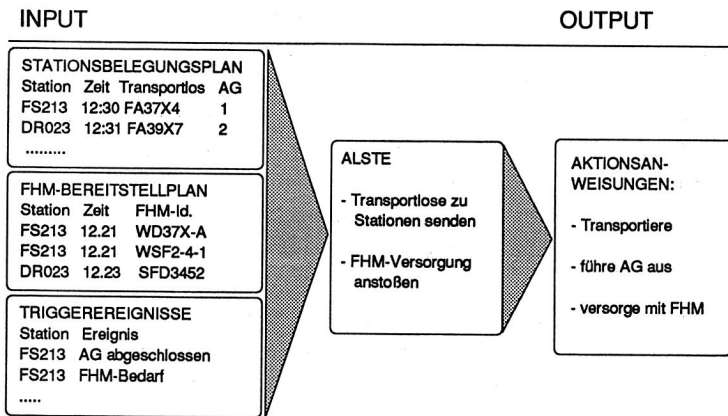


Bild 6.15: Schnittstellen von ALSTE

Die Ablaufsteuerung setzt den Stationsbelegungsplan unter Berücksichtigung des Systemzustandes in Aktionsanweisungen

an die Stationsinterfaces um (Bild 6.15). Die Verbindung zu anderen Prozessen des Steuerungssystems geschieht durch Dateien (z.B. den Stationsbelegungsplan) und die Inter-Programm-Kommunikation, die das Rechnersystem zur Verfügung stellt. Dabei interpretiert die ALSTE den Stationsbelegungsplan nicht als unumstößlichen Zwangsablauf, sondern als Führungsgröße eines Regelvorgangs (Bild 6.16). Da der reale Fertigungsablauf nahe dem -optimal berechneten- Stationsbelegungsplan geführt werden soll, werden die Zeitpunkte des Einbringens neuer Werkstücke in das System besonders genau beachtet. Wegen der direkten Kopplung von ALSTE zu den Vorgängen im Fertigungssystem besteht die Anforderung, eine äußerst effiziente und schnell abarbeitbare Logik zu verwenden, was der Komplexität der Regelalgorithmen eine natürliche Grenze setzt.

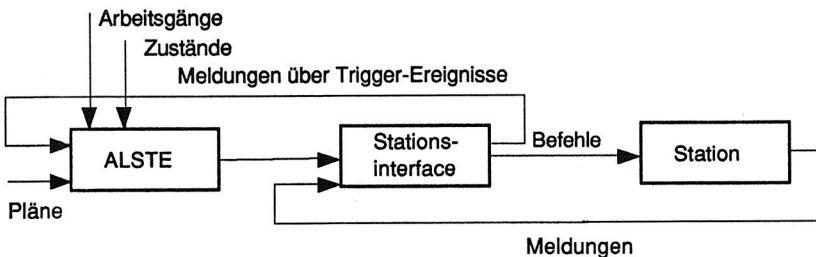


Bild 6.16: Regelkreis zwischen ALSTE und Stationsinterfaces

Im Gegensatz zum interaktiven Planungsteil WESPLA handelt es sich bei ALSTE um ein vom Fertigungssystem ereignisgesteuertes Modul, das andauernd reaktionsbereit auf definierte Triggerereignisse wartet. Solche Trigger sind u.a.:

- » Zustandsänderungen der Stationen
- » Zustandsänderungen von Materialien und FHM
- » Materialfluvorgänge in Zusammenhang mit externen Instanzen

Da ALSTE nur locker mit WESPLA über den Stationsbelegungsplan verbunden ist, kann sie in speziellen Implementierungen

auch ohne WESPLA betrieben werden. Die Ablaufsteuerung verkehrt laufend über normierte Schnittstellen mit den Stationsinterfaces, welche die standardisierten Telegramme in die Sprache der speziellen Station übersetzt.

6.4.2 Interner Aufbau des Steuerungsmoduls

Ereignissteuerung

Für das Modul wird eine Anpassbarkeit an verschiedene Einsatzfälle gefordert, die sich in den Triggerereignissen selbst und den Reaktionen darauf unterscheiden. Daher bietet sich die Aufteilung des Gesamtproblems unterhalb einer zentralen Kontrollinstanz in gleichwertige, ggf. austauschbare Teillösungen an.

ALSTE unterscheidet folgende Arten von Triggerereignissen:

- » Zustandsänderungen der Stationen
 - Station beginnt mit Aktion (nach Anweisung)
 - Station hat letzte Aktion beendet
 - Station ist betriebsbereit
 - Station ist nicht betriebsbereit:
 - durch temporären Ausfall
 - durch permanenten Ausfall
- » Änderungen der Verfügbarkeit von FHM
 - FHM verfügbar
 - FHM nicht verfügbar
- » Zustandsänderungen von Dispositionseinheiten
 - Arbeitsfortschritt erfolgt, Transportlos verfügbar
 - Fehler bei Arbeitsfortschritt, Transportlos (nicht) verfügbar
- » Materialflußvorgänge in Zusammenhang mit externen Instanzen
 - Lieferung von Dispositionseinheiten, Transportlos verfügbar
 - Entfernen von Dispositionseinheiten

- » Koordinationsanforderungen von WESPLA und Systemmanager
 - Übergabe eines neuen Stationsbelegungsplans
 - Planungsbeginn, Abfrage der Warteschlangen durch WESPLA
 - definierter Systemstop

Diese Ereignisse lösen jeweils Entscheidungsabläufe aus, von denen die für den Systemablauf wichtigsten im folgenden kurz konzipiert werden. Dabei sind zwei Typen der Entscheidungsabläufe relevant:

- » Zuordnung von Arbeitsvorgängen zu Stationen
- » Reaktion auf Verfügbarkeitsänderungen der Systemelemente

Tabellen möglicher Arbeitsvorgänge und Warteschlangen

Ein zentrales Problem ist es, den Stationsbelegungsplan mit dem sich dynamisch veränderndem Systemzustand korrekt zu verzeigern. Im Falle eines völlig plangemäßen Fertigungsfortschritts würde ein Zeiger auf einen Satz des Stationsbelegungsplans die nächste Aktion einer Station markieren, woraus sich eindeutig die weiteren Abläufe ableiten ließen. Die Auswertung irgendwelcher Systemzustandsdaten könnte (bis auf Bearbeitungsbeginn und -ende) entfallen.

Jedoch werden sich in der Realität Abweichungen von den Vorgaben des Stationsbelegungsplans einstellen, die sich in Form von Bearbeitungsverzögerungen, ausfallenden oder gestörten Stationen, Bearbeitungsfehlern und Ausschuß äußern und

- » Reihenfolgeänderungen geplanter Vorgänge
- » Stornierung geplanter Vorgänge
- » Nutzung zugelassener Alternativen

zur Folge haben.

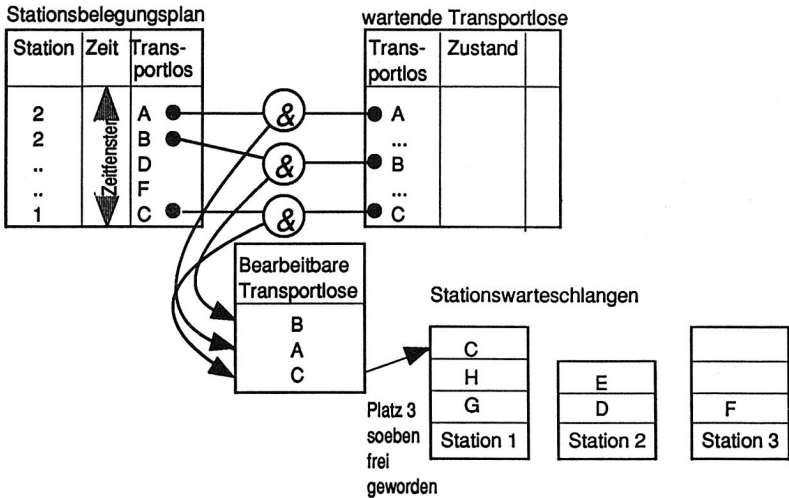


Bild 6.17: Ein wartendes Transportlos ist bearbeitbar, wenn es im Stationsbelegungsplan eingetragen ist. Aus der Menge der bearbeitbaren Transportlose werden die Stationswarteschlangen gefüllt.

Daraus leitet sich für ALSTE die Aufgabe ab, sowohl den Stationsbelegungsplan als auch den Systemzustand als Eingangsgrößen eines Entscheidungsprozesses (Bild 6.17) zu verwenden. In diesen werden zunächst jene Elemente des Stationsbelegungsplans einbezogen, die in ein definierbares Zeitfenster nach dem letzten, noch nicht ausgeführten, Vorgang fallen. Weiterhin werden alle auf Bearbeitung wartenden Transportlose in einer Liste geführt.

Das Ziel der Fertigungssteuerung ist die stillstandsfreie Belegung der primären Fertigungskapazitäten. Eine der wichtigsten Voraussetzungen dafür ist, daß die zur Bearbeitung notwendigen FHM zeitgerecht an der Station vorhandenen sind. Um dieses Ziel zu erreichen, wird die FHM-Vorbereitung in der operativen Planung berücksichtigt. Als nächster Schritt erfolgt der Anstoß der FHM-Steuerung, die ein Teil der FHM-Nutzung ist, durch die Ablaufsteuerung.

Damit auch hier mit einem Vorlauf gehandelt werden kann, wird vor jeder Station eine Warteschlange mit parametrisierbarer Länge geführt. Wenn ein weiterer Vorgang in die Warteschlange eingeordnet wird, erhält die FHM-Nutzung darüber eine Mitteilung (Bild 6.18). Aus der Warteschlange erfolgt die unmittelbare Belegung der Stationen, sie wird jeweils sofort nachgefüllt.

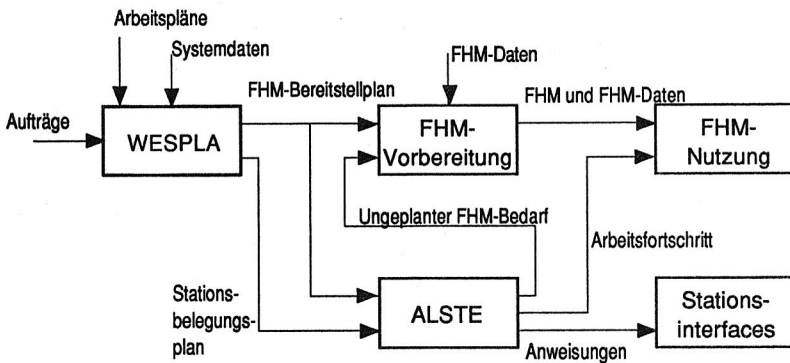


Bild 6.18: Datenübergaben zwischen WESPLA, ALSTE und FHM-Nutzung und FHM-Vorbereitung

6.4.3 Reaktionen auf die Verfügbarkeitsänderungen der Systemelemente

Zustandsänderungen der Stationen

ALSTE verfolgt die vier oben angegebenen Zustandsänderungen der Stationen, wobei im Regelfall nur die ersten zwei (Aktion beginnt, Aktion beendet) im eingeschwungenen Systemzustand auftreten. Das dritte Ereignis wird bei Systemanlauf oder nach einer Störung gesondert verarbeitet. Im Falle von Störungen, bei denen eine Station unerwartet in den Zustand

"nicht betriebsbereit" wechselt, sind spezifische Störstrategien möglich, die aber in dieser Konzeption zu weit führen würden. Es wird lediglich angenommen, daß bei einem temporären Ausfall der Station bis zu erneuter Betriebsbereitschaft keine Aktionsaufträge mehr gegeben werden. Hingegen werden bei einem permanenten Ausfall die Bewertungskriterien für die Zuordnung von Transportlosen ggf. verändert, mit dem Ziel, die für die ausgefallene Station geplanten Arbeitsgänge auf andere zu verteilen.

Verfügbarkeit von FHM

Die Fertigungshilfsmittel werden von der FHM-Steuerung verwaltet und verteilt, jedoch ist ihre Verfügbarkeit eine Startvoraussetzung für Aktionen der Arbeitsstationen. Daher erwartet ALSTE, nachdem sie ein Transportlos in die Warteschlange eingetragen hat, daß die FHM-Steuerung die Verfügbarkeit der benötigten Fertigungshilfsmittel quittiert.

Zustandsänderungen von Dispositionseinheiten

An Transportlosen können -neben Ortsveränderungen- zwei Zustandsänderungen auftreten, die als Trigger für die Ablaufsteuerung verwendet werden:

- » Arbeitsfortschritt erfolgt, Transportlos verfügbar
- » Fehler bei Arbeitsfortschritt, Transportlos (nicht) verfügbar

Wenn der Arbeitsfortschritt erfolgt ist, so muß ALSTE die nächste Arbeitsstation für das Transportlos bestimmen. Bei einem Fehler wird für diese Spezifikation vorausgesetzt, daß alle folgenden, das Transportlos betreffenden Einträge im Stationsbelegungsplan storniert werden und versucht wird, das Transportlos umgehend aus dem System auszuschleußen.

Materialflußvorgänge im Zusammenhang mit externen Instanzen

Eine Fertigungszelle kann mit anderen Systemen der operativen Ebene in Verbindung stehen, die übergreifenden Transporte werden von einem übergeordneten Leitrechner kontrolliert. Deshalb müssen folgende Trigger verarbeitet werden:

- » Lieferung von Dispositionseinheiten, Transportlos verfügbar
- » Entfernen von Dispositionseinheiten

Bei der Lieferung neuer Transportlose wird genauso verfahren, wie nach einem Arbeitsfortschritt an einem Transportlos. Transportlose können den Bereich (z.B. Zelle) verlassen, wenn die geplanten Arbeiten an ihnen ausgeführt wurden.

Koordinationsanforderungen seitens WESPLA und des Systemmanagers

Diese besonderen Trigger dienen der Koordination der Ablaufsteuerung mit den übergeordneten Instanzen. Beim Beginn der Werkstattplanung WESPLA muß diese von ALSTE die aktuellen Warteschlangen vor den Stationen abfragen (Bild 6.19) und darüberhinaus mitteilen, wie weit der momentane Stationsbelegungsplan abgearbeitet werden darf. Weiterhin wird eine Ablaufregel zwischen ALSTE und WESPLA vereinbart. Damit kann die Planung alle noch nicht in Warteschlangen eingeordneten Transportlose so einplanen, wie sie auch von ALSTE behandelt werden. Die Ablaufregel bleibt unverändert, bis ein neuer Stationsbelegungsplan den alten ablöst.

Durch den dynamischen Ablauf kann sich aber der Systemzustand, trotz der vereinbarten Ablaufregel, anders entwickeln, als durch WESPLA vorausberechnet. Es wird vorausgesetzt, daß die Regelalgorithmen der Ablaufsteuerung ausreichen, um diese Abweichungen aufzufangen. Im Extremfall wird, genauso wie bei zu großen Störungen im laufenden Betrieb, ein Eingriff durch das Bedienpersonal notwendig.

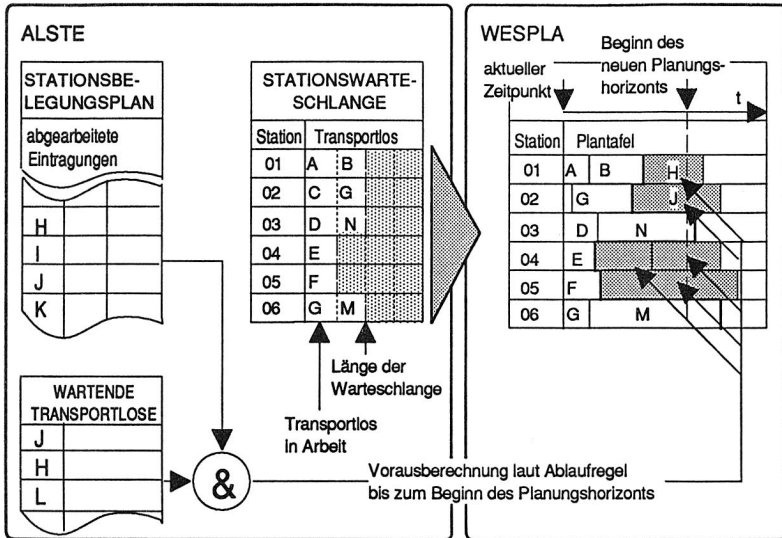


Bild 6.19: Koordination von WESPLA und ALSTE bei Planungsbeginn

Einen solchen Eingriff stellt auch der definierte Systemstop durch den Systemmanager dar. Dieser Sonderablauf muß sicherstellen, das Fertigungssystem und die Datenstrukturen in einem konsistenten Zustand zu hinterlassen, auf dem bei einem Wiederanlauf ohne Störungen aufgesetzt werden kann. Dazu gehört z.B: die Beendigung aller laufenden Aktionen der Arbeitsstationen und die koordinierte Stillsetzung von Materialfluß und FHM-Versorgung.

6.4.4 Eintrag eines Transportloses in eine Stationswarteschlange

Standpunkt bei der Auswahl-situation

Die Zuordnung der Bearbeitung eines Transportloses zu einer Station (Bild 6.20) ist eine zentrale Aufgabe der Ablaufsteuerung. Sie wird ausgeführt, wenn ein freier Platz in einer Warteschlange oder ein neu verfügbares Transportlos

festgestellt wurde. Es handelt sich im allgemeinen Fall um die Selektion aus der Menge vorhandener Bearbeitungsmöglichkeiten, bei der theoretisch ein Optimum bestimmt werden kann. Der Ausgangspunkt ist die Fragestellung "welches ist das optimale, n-nächste Transportlos für die Station X ?", wobei n die freie Position der Warteschlange ist. Es wird die Menge der vorhandenen Transportlose untersucht, um das optimale, bezogen auf eine Station, zu finden. Der Standpunkt der Funktion ist also der einer Station, welche Arbeit sucht. Dies ist ein anderer Ansatz als jener, der in Planungsoptimierungen [27] eingenommen wird und folgendermaßen formuliert werden kann: "welches ist die optimale Bearbeitungsfolge?" bezogen auf ein Werkstück.

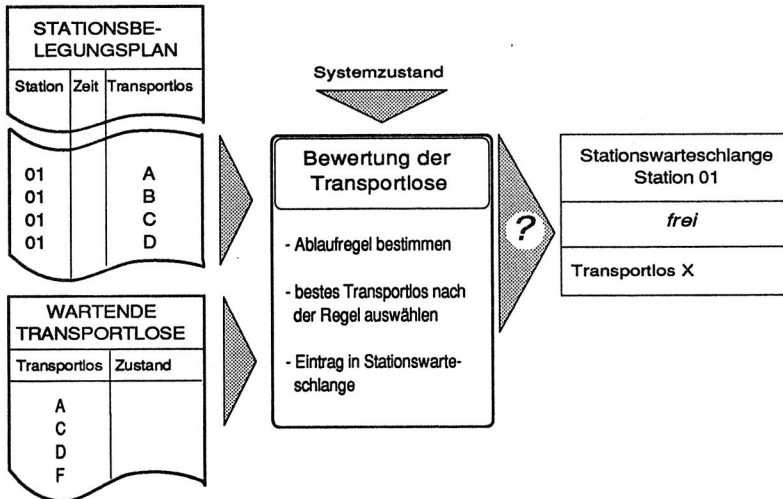


Bild 6.20: Auswahl und Eintrag eines Transportloses in eine Stationswarteschlange

Ablauf der Funktion

Die Funktion verläuft (Bild 6.21) in aufeinander aufbauenden Teilschritten:

Schritt (1): Ermittlung möglicher Arbeitsgänge

Es werden zunächst alle Transportlose und die an ihnen auszuführenden Arbeitsgänge ermittelt, die an der untersuchten Station bearbeitet werden könnten. Obwohl von WESPLA ein Stationsbelegungsplan errechnet wurde, wird hier erneut eine Reihenfolgeentscheidung vorbereitet. Die Gründe dafür sind:

- » Es können zum aktuellen Zeitpunkt mehrere der eingeplanten Transportlose bereits in die Liste der ausführbaren AG eingetragen sein, aber das unmittelbar als nächstes geplante Transportlos noch nicht.
- » In der Planung wurde u.U. die Bearbeitungsstation einzelner Transportlose noch offen gelassen, da die Flexibilität des Bearbeitungssystems genutzt werden soll.
- » Der Fertigungsfortschritt kann sich in einer ungeplanten Weise entwickelt haben.
- » Durch Ausfall einer anderen Station oder durch in der Planung nicht erkannte Konstellationen kann ein Stationswechsel für ein Transportlos den Ablauf verbessern.
- » WESPLA wurde ohne eine Reihenfolgeplanung auf Basis von Transportlosen beendet, womit vom Stationsbelegungsplan her die Bearbeitungsreihenfolgen an den Stationen innerhalb einer Fertigungsfamilie durch ALSTE festzulegen sind.

So besteht hier für ALSTE die Anforderung, die Reihenfolgevorgabe der Planung zu überprüfen und ggf. zu verändern. Dabei werden alle zulässigen Alternativen der momentan wartenden AG berücksichtigt.

Schritt (2): Festlegen der Zuordnungsvorschrift

Auswertung von:

- Systemzustand
- Stationsbelegungsplan
- bearbeitbarer Arbeitsgänge

um daraus die aktuell gültige Zuordnungsvorschrift zu ermitteln.

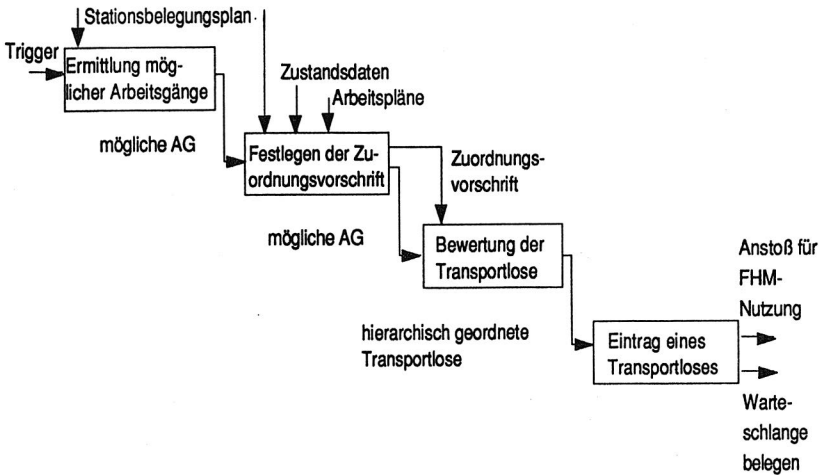


Bild 6.21: Abläufe bis zum Eintrag in Stationswarteschlange

Die Zustandsanalyse und die zur Auswahl möglichen Zuordnungsvorschriften stehen in einem engen Zusammenhang, da hier erkannt werden soll, welches Ziel in der aktuellen Fertigungssituation verfolgt werden muß und welche Regel dafür dienlich ist. Die möglichen Ziele könnten in der Planung für die Fertigungsperiode oder durch die Systemkonfiguration festgelegt werden. Für die Zuordnungsvorschriften kommen als erstes die bekannten Prioritätsregeln in Frage, wobei, insbesondere wenn ALSTE große Freiheiten durch den Stationsbelegungsplan gelassen werden, auch komplexere Algorithmen über Fertigungshilfsmittel anwendbar erscheinen.

Zunächst wird der Systemzustand analysiert und in Relation zur Auftragsbelastung gesetzt, sowie der Grad der Abweichung vom Stationsbelegungsplan ermittelt. Die Auswertung kann nur nach definierten Größen erfolgen, so daß in einer Feinspezifikation aussagekräftige Kriterien festgelegt werden müssen. In den Simulationsuntersuchungen haben sich insbesondere die Kenngrößen für Maschinenmagazingröße, -füllung und der Werkzeugbedarf eines oder mehrerer AG und davon abgeleitete Größen als einsetzbar erwiesen. In einem weiteren Umfeld

kann der gesamte Rüstzustand der Stationen, z.B. im Hinblick auf Greifer von Robotern oder von Werkstückaufnahmen und Vorrichtungen in die Analyse einbezogen werden.

Die Analyse liefert einen noch unbewerteten Satz von Maßzahlen, die z.B. abhängig von vorgewählten Methoden zu gewichten sind, um so die Datenmenge zu reduzieren. Danach werden sie als Eingangsparameter für ein Regelsystem verwendet. Dieses Regelsystem verzweigt bei gewissen Grenzwerten jeweils innerhalb eines Entscheidungsbaums zu einer Zuordnungsvorschrift.

Schritt (3): Bewertung der bearbeitbaren Transportlose mit der Zuordnungsvorschrift

Die Vorschrift wird dann auf die möglichen Arbeitsgänge angewendet, sie kann zunächst eine Aussage darüber geben, ob überhaupt ein Arbeitsgang in die Warteschlange eingetragen werden kann. Weiterhin liefert sie für jeden möglichen Arbeitsgang eine Bewertung, wobei derjenige mit der höchsten Bewertung in die Warteschlange eingetragen wird.

Schritt (4): Eintrag in die Warteschlange und Anstoß der FHM-Nutzung

Die Ablaufsteuerung hat mit Schritt 3 die Versorgung der Station gelöst. Das Transportlos wird in die Stationswarteschlange eingetragen und das Transportziel an das Materialflußmodul übergeben. Weiterhin kann, falls für die Warteschlange auch reale Orte im System reserviert sind, die Transportsteuerung einen Auftrag erhalten. Wenn die Warteschlange noch nicht gefüllt ist, wird - solange noch nicht ein erfolgloser Durchlauf geschehen ist - nochmals die Funktion gestartet, damit die Warteschlange gefüllt werden kann.

Zur erfolgreichen Bearbeitung müssen aber außer der Auftragsinformation auch die Werkstücke und die benötigten FHM

an der Station eintreffen. Während der Materialfluß der Werkstücke, da sich diese i.a. im System befinden, unkritisch ist und ereignisgesteuert abläuft, muß für die FHM-Nutzung je nach Systemkonfiguration ein Vorlauf erreicht werden, damit Stillstandszeiten wegen fehlender FHM vermieden werden. Da jedoch die FHM-Nutzung anlagenspezifisch gelöst wird und starke Ähnlichkeit mit einem Stationsinterface besitzt, wird sie nicht in ALSTE ausgeführt. Vielmehr wird die FHM-Nutzung über eine normierte Kommunikationsschnittstelle jeweils von einem Neueintrag in die Warteschlange informiert. Die Reaktion der FHM-Nutzung kann dadurch unabhängig von ALSTE implementiert werden.

Beispiel:

» Kenngrößen der Fertigungsfamilien:

- geringe Übereinstimmung der anstehenden Arbeitsgänge bezüglich ihrer Werkzeuge (Kriterium: durchschnittliche Anzahl übereinstimmender Werkzeuge, verglichen mit Grenzwert)

» Systemzustand:

- der nächste Arbeitsgang laut Stationsbelegungsplan ist noch nicht verfügbar (nicht storniert)
- die bisherigen Abweichungen vom Stationsbelegungsplan sind gering (Kriterium: Zeitverzug)
- die Maschinenmagazine sind zu 98% mit Werkzeugen gefüllt
- in der Warteschlange vor der Station sind zwei Plätze vorhanden, einer davon ist belegt

Für diesen Fall ergibt die Bewertung:

- » wegen geringer WZ-Übereinstimmung und hoher Maschinenmagazinfüllung darf eine Abweichung vom Stationsbelegungsplan keine vorzeitige WZ-Entnahme aus MM fordern
- » wegen geringer Terminabweichung und teilweise belegter Warteschlange ist ein Warten auf noch nicht verfügbares Transportlos zulässig

Es folgt als Zuordnungsvorschrift:

- » suche aus den anstehenden Transportlosen eines, das an der Station bearbeitbar ist und keine WZ-Entnahme erfordert
- » gibt es kein solches Transportlos, so warte auf das nächste Triggerereignis

6.4.5 Verbindung der Ablaufsteuerung zum Materialfluß

Die Materialflußstation ist für die internen Transportvorgänge zuständig. Sie wird von einem Stationsmodul kontrolliert, welches seine Aufträge von ALSTE erhält. Die Aktionen der Materialflußstation sind nicht im Stationsbelegungsplan enthalten, sondern werden situationsabhängig von ALSTE generiert. Da ALSTE unabhängig von der technischen Realisierung des Transportsystems sein soll, obliegen spezielle Transportstrategien und die Verwaltung von Pufferplätzen und Fahrzeugen dem Materialflußmodul.

In jeder Stations-Warteschlange führt ALSTE zwei Zeiger, einer markiert das als nächstes durch die Station zu bearbeitende Transportlos, der andere das im nächsten Transport an die Materialflußstation zu übergebende Transportlos. Mit diesen Zeigern wird die WS-Verwaltung (Bild 6.22) innerhalb von ALSTE unabhängig von tatsächlich vorhandenen Vorpuffern an den Stationen.

Die Ablaufsteuerung übergibt aus einer Warteschlange den nächsten Arbeitsauftrag an eine Station, wenn diese das Arbeitsende des vorherigen Auftrags gemeldet hat (Triggerereignis) und ein weiteres Transportlos sich an der Station befindet. Dadurch rückt der Inhalt der Warteschlange einen Platz vor, der Zeiger auf den nächsten Transport markiert ein anderes Transportlos und ein Platz in der Warteschlange wird frei. Der neue nächste Transport wird als Transportauftrag zu der Station an die Steuerung des Materialflusses übergeben.

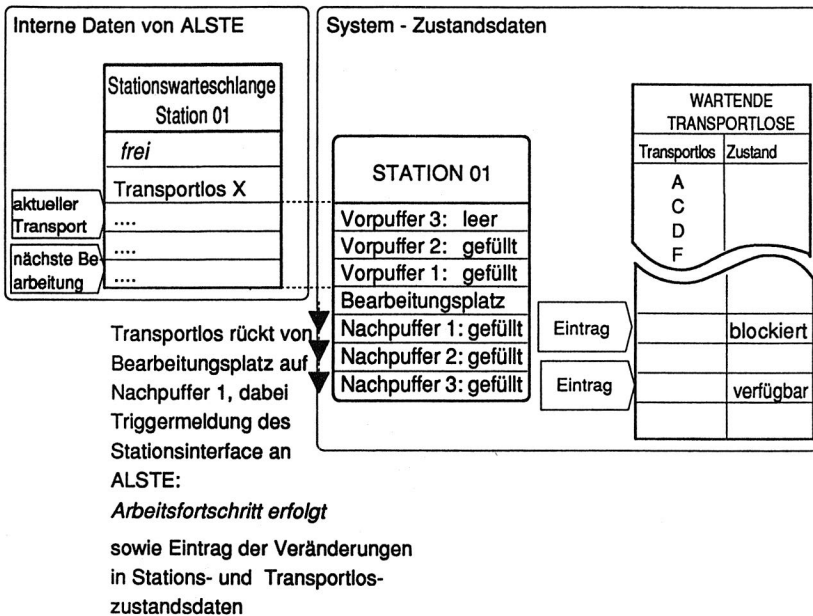


Bild 6.22: Organisation des Materialflusses

Die Ablaufsteuerung erhält die Meldung, daß ein Transportlos nun verfügbar ist, was wiederum ein Triggerereignis für sie darstellt. Das Transportlos wird in die Liste möglicher AG eingetragen. ALSTE wird daraufhin überprüfen, ob dieses Transportlos einer Warteschlange zugeordnet werden kann. Dies ist der Fall, wenn bei einer nachfolgenden Station ein freier Platz in der Warteschlange vorhanden ist, worauf die oben beschriebene Funktion aufgerufen wird.

7 Zusammenfassung

Die bekannten organisatorischen Probleme der Fertigungshilfsmittelbereitstellung wurden als Anlaß genommen, in intensiven Simulationsexperimenten insbesondere das Verhalten der Werkzeugversorgung zu untersuchen. Da die organisatorischen Probleme u.a. von den Schwächen der bekannten Produktionsplanung herrühren, wurden in der Simulation Parameter variiert, die von Planungsprogrammen beeinflussbar sind.

Dabei wurden die Auswirkungen unterschiedlicher Planungs- und Steuerungsstrategien auf ein flexibles Fertigungssystem betrachtet. Als Hilfsmittel für die Untersuchungen diente das grafische Simulationssystem GRAFSIM. Auf der Basis der vorgegebenen Fertigungsaufträge werden damit die Abarbeitung der Aufträge im Fertigungssystem simuliert und der Auslastungsgrad der einzelnen Bearbeitungszentren ermittelt. Anhand der simulierten Systemleistung konnte der Einfluß verschiedener Parameterkonstellationen aufgezeigt und Anforderungen an ein Werkstattplanungs- und Steuerungssystem aufgestellt werden. Die Anforderungen nach einer gezielten Nutzung der Pfadauswahlflexibilität, nach einer situationsabhängig auswählbaren Werkzeugaustauschstrategie und nach Planungsalgorithmen für die kurzfristige Planung, die den Werkzeugbedarf optimieren, bilden die zentralen Erkenntnisse aus den Simulationsläufen.

Aufbauend auf den erkannten Anforderungen werden die Grundlagen für eine kurzfristige, operative Planung und Steuerung in flexiblen Fertigungsbereichen untersucht und ihre softwaretechnische sowie anwendungsorientierte Struktur entwickelt. Die Aufgaben in der operativen Ebene erhalten eine klare Gliederung und innerhalb der Planung werden drei zentrale Planungsprobleme, die Auftragsauswahl, die Arbeitsstationswahl und die Arbeitsgangterminierung bestimmt. Die Planungsergebnisse sind jeweils mit der zur Verfügung stehenden Kapazität abgeglichen und umfassen einen Stationsbelegungsplan und einen mit Terminen versehenen Fertigungshilfs-

mittel-Bereitstellplan. Auf diesen Plänen baut dann die Ablaufsteuerung auf, die versucht, die Pläne in das reale Fertigungsgeschehen umzusetzen.

Mit dieser Struktur erfolgt die Konzeption des Planungs- und Steuerungssystems WEPSSY, das den gestellten Anforderungen genügt. Es besteht aus den beiden Teilen WESPLA und ALSTE und wurde als ein Rahmen spezifiziert, in den unterschiedliche Optimierungs- und Steuerungsstrategien für die Fertigungshilfsmittelversorgung eingebracht werden können, wobei die Möglichkeiten der Optimierung mit Methoden des Operation Research einbezogen werden. Insbesondere wird in der Arbeit Wert auf situationsabhängige und konfigurierbare Algorithmen gelegt, die sich automatisch und im Dialog mit dem Benutzer an aktuelle Auftragszusammenstellungen anpassen lassen. Die Möglichkeiten zur Strategiewahl für Planung und Steuerung werden in mehreren Beispielen erläutert.

Die Planungsstufen berücksichtigen dabei nicht nur die primären Fertigungsverfahren, sondern beziehen auch die Arbeitsplätze der Fertigungshilfsmittelvorbereitung und die dynamisch auftretenden Rüstvorgänge mit ein. So kann bereits bei der Vorausplanung eine u.U. auftretende Überlastsituation an diesen Arbeitsplätzen erkannt und entsprechend gegengesteuert werden. Es wird angenommen, daß sich durch diese Vorgehensweise die organisatorischen Probleme bei der Fertigungshilfsmittelbereitstellung und -Nutzung auf ein Minimum verringern lassen.

8 Literaturverzeichnis

- [1] Acree, E. S.
Part and tool scheduling rules for a flexible manufacturing system
Houston (USA): Texas Tech University, Dissertation
1984

- [2] Altfelder, K. ; u.a.
So beurteilen Sie Investitionen in rechnergestützte
Fertigungssysteme
Frankfurt: Maschinenbauverlag, 1987

- [3] Ausschuss für wirtschaftliche Fertigung e.V. (AWF)
Begriffserklärungen:
Fertigungsplanung - Fertigungssteuerung
ZwF 35 (1960), H. 9, S. 44 - 49

- [4] Balbach, J.
Rechnergestützte Rationalisierung des Werkzeugwesens
in Betrieben mit spanender Fertigung kleiner Serien
Düsseldorf: VDI-Verlag, Dissertation IFW Hannover 1983

- [5] Balzer, H.
Synchronisation der Fertigungsabläufe mit kurzfristiger
Fertigungssteuerung
VDI-Z 131 (1989), H. 8, S. 93 - 96

- [6] Bellmann, B.; Becker, F.
Werkzeuge automatisch vermessen
Werkstatt und Betrieb 122 (1989), H.10, S. 865 - 871

- [7] Berreda, M.; Steckel, K. E.
A branch and bound approach for Machine Load Balancing
in FMS
Management Science Vol.52 (1986) S.1316-1336

- [8] Beschorner, D.
Allgemeine Betriebswirtschaftslehre
München: VVF, 1978

- [9] Brucker, P.
Scheduling
Wiesbaden: Akademische Verlagsgesellschaft, 1981

- [10] Bruins; Träger
Werkzeuge und Werkzeugmaschinen
München: Hanser Verlag, 1984

- [11] Busch, U.
Entwicklung eines PPS-Systems
Berlin: E. Schmidt Verlag, 1987

- [12] Carrie, A. S.; Perera, D. T. S.
Work sceduling in FMS under Tool Availability Con-
straints
Glasgow (UK): Proceedings of the 1. National Congress
on Advances in Manufacturing Technology, 1986

- [13] Czerwinski, J.; Köhler, R.
Magazinierungsplanung für flexible Fertigungszellen
wt-Werkstattstechnik 79 (1989) S. 436 - 438

- [14] Dal Cin, M.
Was ist modulare Programmierung?
Elektronische Rechenanlagen, 27 (1985) H.4, S. 236

- [15] Dangelmaier, W.; Aldinger, S.
Kurzfristige Fertigungssteuerung mit Leitständen
wt-Z 76 (1986), H. 2, S. 101 - 104

- [16] Döttling, W.
Flexible Fertigungssysteme - Steuerung und Überwachung
des Fertigungsablaufs
Berlin: Springer Verlag, 1981

- [17] Dolezalek, C. M.; Ropohl, R.
Flexible Fertigungssysteme - die Zukunft der Fertigungstechnik
Werkstattstechnik 60 (1970), H. 8, S.446 - 451
- [18] Erdlenbruch, B.
Grundlagen neuer Auftragssteuerungsverfahren für die Werkstattfertigung
Düsseldorf: VDI-Verlag, 1984
- [19] Eversheim, W.
Organisation in der Produktionstechnik
Band 3: Arbeitsvorbereitung
Düsseldorf: VDI-Verlag, 1980
- [20] Eversheim, W.; Wiegerhaus, U.
Organisatorische Integration flexibler Fertigungssysteme in konventionelle Werkstattstrukturen
VDI-Z 131 (1989), H. 8, S.74 - 78
- [21] Feldmann, K.
Beitrag zur Konstruktionsoptimierung von automatischen Drehmaschinen
Berlin: Technische Universität, Dissertation, 1974
- [22] Feldmann, K.
Entwicklung und Einsatz rechnerintegrierter Produktionssysteme
ZwF 83 (1988), H. 6, S. 290 - 295
- [23] Feldmann, K.
Systeme zur automatischen Werkstück- und Werkzeughandhabung an NC-Drehmaschinen
ZwF 69 (1974), H. 9, S. 436 - 441
- [24] Feldmann, K.; Schmidt B. (Hrsg.)
Simulation in der Fertigungstechnik
Berlin: Springer Verlag, 1988

- [25] Feldmann, K.; Schlüter, K.
Simulation - Flexible Fertigungssysteme
in: ASIM (Hrsg.) "Simulation und Fabrikbetrieb",
München: Tagungsband, gfmt, 1988
- [26] Firnau, J.
Flexible Fertigungssysteme - Entwicklung und Erprobung
eines zentralen Steuerungssystems
Berlin: Springer Verlag, 1982
- [27] Fischer, H.
Verteilte Planungssysteme zur Flexibilitätssteigerung
der rechnerintegrierten Teilefertigung
München: Hanser Verlag, 1990
- [28] Fix-Sterz, J.; Lay, G.
Flexible Fertigungssysteme und Fertigungszellen
VDI-Z 128 (1986), H. 11, S. 369 - 374
- [29] Friedl, A.; Dittrich, V.
Automatisierter Werkzeugfluß in flexiblen Fertigungs-
systemen
ZwF 85 (1990), H. 2, S. 107 - 112
- [30] Frühwald, C.
Rüstzeiten in der spanabhebenden Fertigung
wt-Z 78 (1988), H. 2, S. 499 - 503
- [31] Frühwald, C.
Planung von Rüstabläufen
in: Tagungsband "Rüstzeitverkürzung"
Eschborn: AWF, 1988
- [32] Ganiyusufoglu, Ö. S.
Wirtschaftliche Nutzung flexibler Fertigungszellen am
Beispiel der Drehbearbeitung
München: Hanser Verlag, 1985

- [33] Ganiyusufoglu, Ö.S.; Goedeke, G.
CIM-Sonderschau - rechnerintegrierte Fertigung mit
heutigen Mitteln
ZwF 81 (1986), H. 6

- [34] Ganiyusufoglu, Ö.S.; Spur, G.
Wirtschaftliche Nutzung von flexiblen Fertigungs-
zellen am Beispiel der Drehbearbeitung
ZwF 78 (1983), H.4, S. 176 - 179

- [35] Groha, A.
Universelles Zellrechnerkonzept für flexible Ferti-
gungssysteme
Berlin: Springer Verlag, 1988

- [36] Grosche, G.; u.a.
Ergänzende Kapitel zu Bronstein-Semendjajew
Taschenbuch der Mathematik
Leipzig: BSB B.G. Teubner Verlag, 1979

- [37] Großeschallau, W.
Materialflußrechnung
Berlin: Springer Verlag, 1984

- [38] Grossmann, B.; Klaiber, F.
Werkzeugverwaltung
VDI-Z 131 (1989), H. 8, S. 82 - 87

- [39] Hackstein, R.
Produktionsplanung und Steuerung - Ein Handbuch für
die Betriebspraxis
Düsseldorf: VDI-Verlag, 1984

- [40] Hänsel, W.; Scheller, T.
Flexibles Fertigungssystem oder besser Einzelma-
schinen?
VDI-Z 131 (1989), H. 8, S. 67 - 73

- [41] Hammer, H.
Flexible Fertigungssysteme und CIM-Lösungen
Zwf 81 (1986), H.11, S. 637 - 641
- [42] Hammer, H.; Viehweger, B.
Neuartiges Verfahren für den schnellen und gezielten
Werkzeugaustausch bei Bearbeitungszentren
ZwF 83 (1988), H. 2, S. 101 - 107
- [43] Hammer, H.; Viehweger, B.
Neuartiges Werkzeugschnellwechselverfahren für Bear-
beitungszentren
ZwF 83 (1988), H. 4, S. 191 - 195
- [44] Happersberger, G.
Tool Management im CIM-System
in: Tagungsband "Tool Management"
Landsberg: Moderne Industrie, 1987
- [45] Happersberger, G.
Aufbau einer Werkzeugdatenbank für die NC-Programmie-
rung im DNC-Verbund
VDI-Z Special Nr. 4, September 1989
- [46] Hauk, W.
Einplanung von Produktionsaufträgen nach Prioritäts-
regeln
Darmstadt: Beuth Vertrieb GmbH / REFA, 1973
- [47] Haupt, R.
A Survey of Priority Rule-Based Scheduling
OR Spektrum 11 (1989), S. 3 - 16
- [48] Hedrich, P.; Brunner, B. F.
Einfluß der Werkzeugkosten auf das Wirtschaftlich-
keitsergebnis bei der Umstellung auf NC-Fertigung
Zwf 81 (1986), S. 307 - 313

- [49] Helberg
PPS als CIM - Baustein
Berlin: E. Schmidt Verlag, 1987
- [50] Hopp, P.
Beitrag zur Optimierung des Werkzeugeinsatzes in flexiblen Fertigungssystemen zur Bearbeitung prismatischer Werkstücke
Stuttgart: G. Grossmann, 1982
- [51] Hwang, S.
A constraint-directed method to solve the part selection problem in FMS planning stage
Proceedings of the 2. ORSA/TIMS Conference on FMS
Amsterdam (NL): Elseviers Publishers, 1986
- [52] Jänike, W.
Simulation der Belegungsplanung bei flexiblen Fertigungssystemen
VDI-Z 131 (1989), H. 8, S. 79 - 81
- [53] Junike, W.
Hierarchische Steuerungssysteme für die Automatisierung von Fertigungsanlagen
wt-Z 75 (1985), S. 469 - 473
- [54] Kapoun, J.
Operations Research und Simulation in der Logistik
Lausanne: 1987
- [55] Kief, H.
NC-Handbuch 1985
Michelstadt: NC-Handbuch-Verlag, 1985
- [56] Kief, H.
Flexible Fertigungssysteme '89/90
Michelstadt: NC-Handbuch-Verlag, 1989

- [57] Kise, H.; Ibraki, T.; Mine, H.
A Solvable Case of the One Machine Scheduling Problem
with Ready and Due Times
Operations Research 26 (1978), H. 1, S. 121 - 128
- [58] Köhler, R.
Produktionsplanung für flexible Fertigungszellen
Betriebswirtschaftliche Schriftenreihe Bd. 40
Münster: Lit Verlag, 1988
- [59] Kohen, E.
Adaptierbare Steuerungssoftware für flexible Fertigungssysteme
Düsseldorf: VDI-Verlag, 1986
- [60] Kohler, P.
Flexible Fertigungssysteme für die Einzel- und Kleinserienfertigung großer Rotationsteile
wt-Werkstattstechnik 79 (1989), S. 415 - 418
- [61] Kreimeier, D.
Konfigurierbares mikrorechnergestütztes Planungshilfsmittel zur Feinsteuerung autonomer Fertigungsstrukturen
Bochum: Universität Bochum, Dissertation, 1987
- [62] Kumar, K. R.; Kusiak, A.
Grouping of parts and components in flexible manufacturing systems
European Journal of Operations Research 24 (1986)
S. 387 - 397
- [63] Lampkemeyer, U.; Dittmer, H.
Werkzeugwesen als Teil des Ressourcenmanagements
ZwF 84 (1989) H. 7, S. 388 - 391

- [64] Lang, C. M.; Thiel, W.
Automatisch aufbaubare, flexible Spannvorrichtung für
prismatische Werkstücke
tz für Metallbearbeitung 82 (1988), H.1-2, S. 12 - 18

- [65] Maier, U.
Arbeitsgangterminierung mit variabel strukturierten
Arbeitsplänen
Berlin: Springer Verlag, 1980

- [66] Maschke, H.
Werkzeugorganisation und Werkzeughandhabung müssen
strategisch erarbeitet werden
Maschinen & Methoden H. 5 (1986) Scharmann GmbH & Co

- [67] Mayer, J.
Werkzeugorganisation für flexible Fertigungszellen
und -systeme
Berlin: Springer Verlag, 1988

- [68] McMahon, G.; Florian, H.
On Scheduling with Ready Times and Due Dates to Mini-
mize Maximum Lateness
Operations Research 23 (1975), H. 3, S. 475 - 482

- [69] Mertins, K.
Steuerung rechnergeführter Fertigungssysteme
München: Carl Hanser Verlag, 1985

- [70] Meßerer, P.
Fenster zum Betriebssystem
Computer Persönlich 1990, H. 2, S. 124 - 128

- [71] Meyer, B.
Object-oriented Software Construction
New York (USA): Prentice Hall, 1988

- [72] Meyer, M.; Hansen, K.
Planungsverfahren des Operation Research
Essen: Girardet Verlag, 1979
- [73] Milberg, H. J.; Groha, A.
Der Zellengedanke als Strukturierungsprinzip
ZwF 81 (1986) H. 12, S. 682 - 688
- [74] Moll, P.
Maschinenbelegung mit EDV
Würzburg: Vogel Verlag, 1975
- [75] Mußbach-Winter, U.
Entwicklung eines Verfahrens zur Arbeitsgangterminie-
rung in flexiblen Fertigungssystemen
in: Flexibles Fertigungssystem
Weinheim: VCH, 1988
- [76] Neupert, H.
Handbuch zum Simulationssystem Grafsim (Version 3.7)
Erlangen: Siemens AG , 1989
- [77] Neupert, H.
Flexible Fertigungssysteme flexibel simulieren
Sicomp Informationen (Siemens AG) H. 8, Okt. 1986
- [78] N.N.
Ordnen statt Suchen
Flexible Automation (1986), H. 3, S. 35 - 40
- [79] N.N.
Bosch Tool Management System TOMS
Kurzbeschreibung
Robert Bosch GmbH, PNr. 5775 D1 8/88, 1988
- [80] N.N.
Bosch Tool Management System - Präsentation
Robert Bosch GmbH, PNr. 5773 D1 8/88, 1988

- [81] N.N.
Rationalisierung
Mangelhafte Werkzeugdisposition wird zum Engpaß
fertigung (1989), H.8, S. 62 - 66
- [82] N.N.
BEMI - Betriebsmittelverwaltungs- und Informations-
system. Sonderdruck zur EMO 89
Mönchengladbach: S.C.O. Automation GmbH, 1989
- [83] N.N.
VDI Richtlinie 2815:
Begriffe für die Produktionsplanung- und Steuerung
Düsseldorf: VDI-Verlag, 1978
- [84] Osman, M.
Untersuchung von Verfahren der Reihenfolgeplanung und
ihre Anwendung bei Fertigungszellen
Stuttgart: Dissertation Universität Stuttgart 1982
- [85] O'Grady, P. J.
Controlling Automated Manufacturing Systems
London (UK): Kogan Page, 1986
- [86] PDV-Arbeitskreis:
Software für flexible Fertigungssysteme
"Software für flexible Fertigungssysteme"
- Forschungsbericht des PDV-AK-
Karlsruhe: Kernforschungszentrum 1980
- [87] Perl, J.
Graphentheorie, Grundlagen und Anwendungen
Wiesbaden: Akademische Verlagsgesellschaft, 1981
- [88] Pritschow, G.
Die flexible Fertigungszelle
in: Tagungsband FTK 1985
Stuttgart: Universität Stuttgart 1985

- [89] Rajagopalan, S.
Formulation of Heuristik Solutions for Parts Grouping
and Tools Loading in FMS
in: Proceedings of 2. ORSA/TIMS Conference on FMS
Amsterdam (NL): Elsevier Publishers, 1986
- [90] Reichel, H.
Nutzung der Flexibilität eines FFS und ihre Auswirkungen auf die Werkzeugversorgung
dima 44 (1990), H. 3, S. 30 - 34
- [91] Rembold, U. (Hrsg.)
CAM-Handbuch
Berlin: Springer Verlag, 1990
- [92] Rieg, F.
Unix - Betriebssystem der Zukunft für CAD, CAM und CAE
Werkstatt und Betrieb, 123 (1990), H. 2, S. 127 - 131
- [93] Scheer, A. W.; Mattheis; Steinmann, P. D.
PPS - Konzeptionen in:
CIM-Handbuch, Hrsg. U. W. Geitner
Braunschweig: Vieweg, 1987
- [94] Scherer, J.
Werkzeug- und Werkstückwechsler für spanende Werkzeugmaschinen
wt-Z 118 (1985), H. 10, S. 715 - 721
- [95] Schlüter, K.
Nutzungsgradsteigerung von Montagesystemen durch den Einsatz der Simulationstechnik
München: Carl Hanser Verlag, 1989
- [96] Schmidt, B.
Die Simulation zeitdiskreter Systeme
Informatik Spektrum 2 (1979), H. 2, S. 78 - 83

- [97] Schmidt B.
Informatik und allgemeine Modelltheorie -
eine Einführung
Angewandte Informatik (1982), H. 1, S. 35 - 42
- [98] Schmitt, E.
Werkstattsteuerung bei wechselnder Auftragsstruktur
Karlsruhe: Dissertation Universität Karlsruhe 1989
- [99] Schmitz-Mertens, H. J.
Entwicklung eines Steuerungskonzepts für Systeme mit
heterogener Fertigungsstruktur
Düsseldorf: VDI-Verlag, 1989 - Reihe 20, Band 13
- [100] Schrage, L.
A proof of the optimality of the shortest remaining
processing time discipline
Operations Research Vol.16 (1986), H. 3
- [101] Schrüfer, N.
Schneller Datenzugriff
fertigung (1989), H. 8, S. 68 - 79
- [102] Schulz, J.
Auslegung computerintegrierter Arbeitsplanung für
flexible Fertigungssysteme
Aachen: Dissertation, RWTH Aachen 1988
- [103] Seliger, G.
Wirtschaftliche Planung automatisierter Fertigungs-
systeme
München: Carl Hanser Verlag, 1983
- [104] Siemens AG
Technische Beschreibung Projekt flexible Fertigungs-
zelle
Erlangen: Siemens AG, 1987

- [105] Soliman, M.
Rechnergestützte Optimierung des Betriebsmittel-
flusses in flexibel automatisierten Fertigungen
Düsseldorf: VDI-Verlag, 1987 - Reihe 2, Band 133
- [106] Spur, G.
Optimierung des Fertigungssystems Werkzeugmaschine
München: Carl Hanser Verlag, 1972
- [107] Stecké, K. E.
Formulation an Solution of nonlinear Integer Produc-
tion Planning Problems for FMS
Management Science 29 (1983), H. 3, S. 273 - 288
- [108] Stecké, K. E.; Kim, I.
A flexible approach to implementing the short-term
FMS Planning Function
in: Proceedings of the 2. ORSA/TIMS Conference on FMS
Amsterdam (NL): Elsevier Publishers, 1986
- [109] Stecké, K. E.; Kim, I.
A Knowledge-based approach to part type selection
considering due dates in FMS
Paris: 12. World Congress on Scientific Computation, 1988
- [110] Steger, W.
Simulation der Werkzeugversorgung flexibler Ferti-
gungssysteme (Diplomarbeit)
Erlangen: Universität Erlangen-Nürnberg, FAPS 1989
- [111] Steinhilper, R.
FFS im In- und Ausland
tz für Metallbearbeitung 77 (1983), H. 1, H. 8
- [112] Steinhilber, H.
Planung und Realisierung von Werkzeugversorgungs-
systemen für die NC-Bearbeitung
Stuttgart: Universität Stuttgart, Diss. ISW 1985

- [113] Steinmann, D.
Entscheidungsunterstützungssysteme in CIM
in: CIM - der computergesteuerte Industriebetrieb
Hrsg.: Scheer
Berlin: Springer Verlag, 1987
- [114] Storr, A.; Frank, H.
Software als Produktkomponente für flexible Fertigungseinrichtungen
wt-Z 76 (1986), H. 6, S. 313 - 318
- [115] Storr, A.; Mayer, J., Walker, M.
Werkzeugorganisation mit Schnittstelle zu Fertigungsleitsystemen
wt-Z 76 (1986), H. 5, S. 287 - 291
- [116] Tang, C. S.; Denardo, E. V.
Models arising from a flexible manufacturing machine:
Part I: minimization of the number of tool switches
Part II: minimization of the number of tool switching instants
Operations Research 36 (1988), H. 5, Sept./Oct.1988
- [117] Tellbach, D.-A.
Konzeption eines modularen Programmsystems zur Steuerung und Überwachung des zellinternen Werkzeugflusses einer flexiblen Fertigungszelle (Studienarbeit)
Erlangen: Universität Erlangen-Nürnberg, FAPS 1986
- [118] Trajkovski, S.;
Automatic Tool Changers for NC-Machine Centres
in: Toward the Factory of the Future
Bullinger, H.J.; Warnecke, H.J. (Hrsg.)
Berlin, New York: Springer Verlag, 1985
- [119] Tuffentsammer, K.
Flexible Fertigungssysteme in: Tagungsband FTK 1985
Stuttgart: Universität Stuttgart, 1985

- [120] Turowski, W.
Gestaltung von Funktionsbausteinen für geometrie-
orientierte Arbeitsplanungssysteme
München: Carl Hanser Verlag, 1986
- [121] Viehweger, B.
Planung von Fertigungssystemen mit automatisiertem
Werkzeugfluß
München: Carl Hanser Verlag, 1986
- [122] Vits, R.
Externes Werkzeughandling: Die Abhängigkeiten vom in-
ternen Werkzeugwechsel und Produktmix müssen erkannt
werden
Maschinen & Methoden (1987), H. 6, Scharmann GmbH & Co
- [123] Vits, R.
Untersuchungen zur Austausch-Strategie ihrer Werkzeuge
Maschinen & Methoden (1987), H. 7, Scharmann GmbH & Co
- [124] Warnecke H.J.; Steinhilper, R.
Flexible Manufacturing Systems and Cells
Proceedings of the 3rd International Conference
Böblingen: 1985
- [125] Werner & Kolb GmbH (Hrsg.)
Ausführungsbeispiele von rechnergesteuerten flexiblen
Fertigungssystemen
Berlin: Werner & Kolb, 1986
- [126] Werz, M.
Zeitgemäße Werkzeugorganisation in der Fertigungs-
technik
Werkstatt und Betrieb 119 (1986), H. 3, S. 213 - 217
- [127] Weule, H.; Schmitt, E.
Ein hierarchischer Lösungsansatz zur Auftragsreihen-
folgeplanung bei mehrstufiger Werkstattfertigung
Wt-Werkstattstechnik 79 (1989), S. 333 - 336

- [128] Wiendahl, H. P.
Belastungsorientierte Fertigungssteuerung
München: Carl Hanser Verlag, 1987
- [129] Wiendahl, H. P.; Ullmann, W
Anforderungen an die Bereitstellungsplanung von Werkzeugen in einer Fertigungssteuerung
Werkstatt und Betrieb 121 (1988), H. 2, S. 133 - 136
- [130] Wildemann, H.
Investitionsplanung und Wirtschaftlichkeitsrechnung für flexible Fertigungssysteme (Forschungsbericht)
Passau: Universität Passau 1987
- [131] Witte, T.
Fallstudie zur Fertigungssteuerung mit Prioritätsregeln
in: Schriften zur Unternehmensleitung, Band 39
Wiesbaden: Gabler Verlag, 1988
- [132] Zeppelin, W. v.
Automatischer Werkzeugwechsel nach Verschleiß an NC-Drehmaschinen
tz für Metallbearbeitung 78 (1986), H. 3, S. 20 - 26
- [133] Zijm, W. H. M.
FMS: background, examples and models
in: Operations Research Proceedings 1987
16. Jahrestagung des DGOR/NSOR, Hrsg.: Schellhaas, H.
Würzburg: Physica Verlag, 1987
- [134] Zipse, T.
Rechnergeführte flexible Fertigungsinseln
VDI-Z 128 (1986), H. 8, S. 249 - 253

Lebenslauf

Persönliches:

Name: Herbert Reichel
geboren: am 21. September 1958 in Helmbrechts
Eltern: Willy Reichel, Marta Reichel, geb. Döhla
Familienstand: verheiratet mit Karin Reichel

Schulbildung:

1964 - 1969: Volksschule Helmbrechts
1969 - 1978: Gymnasium Münchberg
Juni 1978: Abitur

Wehrdienst:

Juli 1978 - September 1979

Studium:

1979 - 1985 Studium des Maschinenbaus an der Technischen
Universität München
Fachrichtung Theorie und Forschung
Diplom 1985

Berufstätigkeit

1985 - 1990 Wissenschaftlicher Mitarbeiter am Lehrstuhl
für Fertigungsautomatisierung und Produktions-
systematik der Universität Erlangen - Nürnberg

Reihe

Fertigungstechnik

Erlangen

Band 1

Andreas Hemberger

Innovationspotentiale in der rechnerintegrierten Produktion durch wissensbasierte Systeme

208 Seiten, 107 Bilder, 1988. Kartoniert.

Band 2

Detlef Classe

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

194 Seiten, 70 Bilder, 1988. Kartoniert.

Band 3

Friedrich-Wilhelm Nolting

Projektlertung 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 Kleindam

CAD/CAP : Rechnergestützte Montagefeinplanung

203 Seiten, 107 Bilder. 1990. Kartoniert.

Band 13

Frank Vollertsen

Pulvermetallurgische Verarbeitung eines übereutektoiden verschleißfesten Stahls

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

Band 14

Stephan Biermann

Untersuchungen zur Anlagen- und Prozeßdiagnostik für das Schneiden mit CO₂ - Hochleistungslasern

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

Band 15

Uwe Geißler

Material- und Datenfluß in einer flexiblen Blechbearbeitungszelle

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

Band 16

Frank Oswald Hake

Entwicklung eines rechnergestützten Diagnosesystems für automatisierte Montagezellen

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

Band 17

Herbert Reichel

Optimierung der Werkzeugbereitstellung durch rechnergestützte Arbeitsfolgenbestimmung

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

Band 18

Josef Scheller

Modellierung und Einsatz von Softwaresystemen für rechnergeführte Montagezellen

198 Seiten, 65 Bilder. 1991. Kartoniert.