

FAPS

Walter

Glombho

27.8.86





Herbert Fischer

*Verteilte Planungssysteme  
zur Flexibilitätssteigerung  
der rechnerintegrierten  
Teilefertigung*



Herbert Fischer

*Verteilte Planungssysteme  
zur Flexibilitätssteigerung  
der rechnerintegrierten  
Teilefertigung*

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:	05. 02. 1990
Tag der Promotion:	17. 04. 1990
Vorsitzender:	Prof. Dr.-Ing. G. W. Ehrenstein
Berichterstatter:	Prof. Dr.-Ing. K. Feldmann
	Priv.-Doz. Dr.-Ing. habil. S. Keramidis

CIP-Titelaufnahme der Deutschen Bibliothek

**Fischer, Herbert:**

Verteilte Planungssysteme zur Flexibilitätssteigerung der  
rechnerintegrierten Teilefertigung / Herbert Fischer. Hrsg. von  
Klaus Feldmann. – München ; Wien : Hanser, 1990

(Fertigungstechnik – Erlangen ; 11)

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

ISBN 3-446-16105-8

NE: GT

Dieses Werk ist urheberrechtlich geschützt.

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

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

© Carl Hanser Verlag München, Wien 1990

Herstellung: Copy Center 2000, Erlangen-Eltersdorf

Printed in Germany

## Vorwort

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

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

Mein besonderer Dank gilt ebenfalls Herrn Priv.-Doz. Dr.-Ing. habil. S. Keramidis für seine Bereitschaft, das Zweitgutachten zu übernehmen. Durch seine ständige Diskussionsbereitschaft hat er die Arbeit von Beginn an gefördert.

Außerdem bedanke ich mich bei allen Kolleginnen und Kollegen am Lehrstuhl, insbesondere bei der Forschungsgruppe "Steuerungstechnik und Sensorik" (SuS-Gruppe) für die ständige Gesprächs- und Hilfsbereitschaft.

Herrn Dipl.-Ing. H. Reichel und Herrn Dipl.-Inf. J. Scheller gilt mein besonderer Dank für die kritischen und konstruktiven Beiträge bei der Durchsicht der Grobfassung.

Ferner gilt mein Dank allen Studentinnen und Studenten, die das Entstehen dieser Arbeit begleitet haben. Dies gilt insbesondere für Herrn Dipl.-Inf. W. Müller, Herrn Dipl.-Inf. K. Grampp, Herrn Dipl.-Inf. K. Kemmer, Herrn Dipl.-Ing. T. Fischer und Herrn Alois Kiener, weiterhin Frau H. Schubert, Herrn B. Bauer und Herrn Ch. Reh für die Unterstützung bei der Textverarbeitung.

Ein besonders herzlicher Dank gebührt Regine, für die moralische Unterstützung und das dauerhafte Verständnis.

Herbert Fischer



**Verteilte Planungssysteme zur Flexibilitätssteigerung  
der rechnerintegrierten Teilefertigung**

-Inhaltsverzeichnis-

<b>1</b>	<b>Einleitung und Zielsetzung</b>	<b>1</b>
<b>2</b>	<b>Grundlagen und begriffliche Abgrenzung</b>	<b>2</b>
2.1	Gesamtstruktur der rechnerintegrierten Produktion	2
2.2	Hierarchische Flexible Fertigungssysteme (HFFS)	3
2.2.1	Komponenten Flexibler Fertigungssysteme (FFS)	3
2.2.2	Steuerungsstrukturen für FFS	5
2.2.3	Strukturkonzept für hierarchische Flexible Fertigungssysteme (HFFS)	9
2.2.4	Das Informationssystem im HFFS	10
2.3	Eigenschaften verteilter Systeme	16
<b>3</b>	<b>Verteilte Planungssysteme im rechnerintegrierten Produktionsbereich</b>	<b>19</b>
3.1	Abgrenzung zu bisherigen Arbeiten	19
3.2	Anforderungen an verteilte Planungssysteme	21
3.2.1	Flexibilität	21
3.2.2	Bereichsautonomie	23
3.2.3	Entscheidungsvorbereitung und -unterstützung	24
3.2.4	Fertigungsrelevante Optimierungskriterien	25
3.2.5	Simulation	27
3.2.6	Durchgängigkeit des Informationsflusses	29
3.3	Werkstattsteuerung (CAM)	30
3.3.1	Aufgaben der Werkstattsteuerung	30
3.3.2	Konzeptionelle Anforderungen an neuartige Werkstattplanungssysteme	31
3.4	Arbeitsplanung (CAP)	47
3.4.1	Aufgaben der Arbeitsplanung	47

3.4.2	Konzeptionelle Anforderungen an neuartige Arbeitsplangenerierungssysteme	48
3.5	Produktionsplanung und -steuerung (PPS)	59
3.5.1	Aufgaben der Produktionsplanung und -steuerung	59
3.5.2	Konzeptionelle Anforderungen an neuartige Belegungsplanungssysteme	60
<b>4</b>	<b>Das verteilte Planungssystem HIPS</b>	<b>66</b>
4.1	Struktur des verteilten Planungssystems HIPS	66
4.2	Das Arbeitsplangenerierungssystem EGOPLA	69
4.2.1	Erläuterung der verwendeten graphentheoretischen Grundbegriffe	69
4.2.2	Generierungsschritte von EGOPLA	73
4.2.3	Offline-Planung in EGOPLA	82
4.3	Das Belegungsplanungssystem KOLPLA	92
4.3.1	Statische Offline-Planung in KOLPLA	92
4.3.2	Dynamische Offline-Planung in KOLPLA	101
4.4	Das Werkstattplanungssystem OLPLA	104
4.4.1	Voraussetzungen für eine hierarchische Online-Planung	104
4.4.2	Online-Planung in OLPLA	108
4.4.3	Nutzung des Belegungsplanungs- systems KOLPLA	133
4.4.4	Nutzung des Arbeitsplangenerierungs- systems EGOPLA	135
<b>5</b>	<b>Ein Software-System zur Erprobung von HIPS</b>	<b>136</b>
5.1	Realisierungsumgebung für das verteilte Planungssystem HIPS	136
5.2	Softwareinfrastruktur des verteilten Planungssystems	138
5.2.1	Systemgenerierung und -konfigurierung	138
5.2.2	Dialog- und Monitoring-System	139
5.2.3	Interprozeßkommunikation im Online-Bereich	142
5.2.4	Datenverwaltungssystem	146
5.3	Modellierung der verteilten Planungskomponenten	147



<b>6</b>	<b>Anwendungsbeispiele für das verteilte Planungssystem HIPS</b>	<b>148</b>
6.1	Modellierung der Testumgebung	148
6.1.1	Modellierung der Fertigungsanlage	148
6.1.2	Modellierung der Werkstücke	151
6.1.3	Modellierung der Fertigungsstrukturgraphen	154
6.2	Das verteilte Planungssystem HIPS im experimentellen Einsatz	157
6.2.1	Konfiguration des verteilten Prozeß-Systems	157
6.2.2	Aufgaben und Ergebnisse des Arbeitsplangenerierungssystems EGOPLA	158
6.2.3	Aufgaben und Ergebnisse des Belegungsplanungssystems KOLPLA	168
6.2.4	Aufgaben und Ergebnisse des Werkstattplanungssystems OLPLA	174
6.3	Abschließende Bewertung des verteilten Planungssystems HIPS	181
6.4	Ansätze für weitere Arbeiten	182
<b>7</b>	<b>Zusammenfassung</b>	<b>184</b>
<b>8</b>	<b>Literaturverzeichnis</b>	<b>186</b>



## 1 Einleitung und Zielsetzung

In den letzten Jahren hat ein starker Wandel vom Verkäufer- zum Käufermarkt stattgefunden. Diese Entwicklung bewirkt eine deutliche Tendenz zur variantenreichen Fertigung bei kleinen Losgrößen. Trotz rasch wechselnder Anforderungen an die Produktion müssen die Fertigstellungstermine der Aufträge bei kurzen Durchlaufzeiten und niedrigen Herstellungskosten jedoch eingehalten werden [41,104].

Der Aufbau und die Integration automatisierter Lager-, Bearbeitungs-, Transporteinrichtungen, Flexibler Fertigungszeilen (FFZ) und Flexibler Fertigungssysteme (FFS) in den Produktionsbereich [37,49,57] tragen zur technischen Flexibilitätssteigerung [75] bei. Zur wirkungsvollen Nutzung dieses technischen Flexibilitätsspielraumes sind adäquate Organisations-, Planungs- und Dispositionskonzepte [57] bereitzustellen.

Bestehende Produktionsplanungs- und -steuerungssysteme, Werkstattsteuerungs- und Arbeitsplanungssysteme nutzen die technischen Möglichkeiten automatisierter Fertigungssysteme nur teilweise. Insbesondere fehlen Planungsmethoden und Planungswerkzeuge zur wirkungsvollen Kompensation von Störungen während der laufenden Fertigungsperiode (Online-Planung).

Ziele der vorliegenden Arbeit sind die Konzeption, Realisierung und Erprobung neuer Planungsmethoden, die zur Flexibilitätssteigerung im Produktionsbereich beitragen. Das Ergebnis dieser Arbeit stellt ein verteiltes Planungssystem dar, welches sowohl Offline- als auch Online-Planungsaufgaben umfaßt und die Bereiche Arbeitsplanung (CAP), Produktionsplanung und -steuerung (PPS) und Werkstattsteuerung (CAM) überdeckt.

## 2 Grundlagen und begriffliche Abgrenzung

### 2.1 Gesamtstruktur der rechnerintegrierten Produktion

Die Konzeption, Realisierung und Erprobung eines verteilten Planungssystems für den Produktionsbereich [100] sind Themenschwerpunkte der vorliegenden Arbeit. Dabei werden Aspekte der Arbeitsplanung, Produktionsplanung und -steuerung und der Fertigung behandelt. Die Einordnung der benutzten Begriffe in das betriebliche Gesamtumfeld ist in Bild 1 dargestellt.

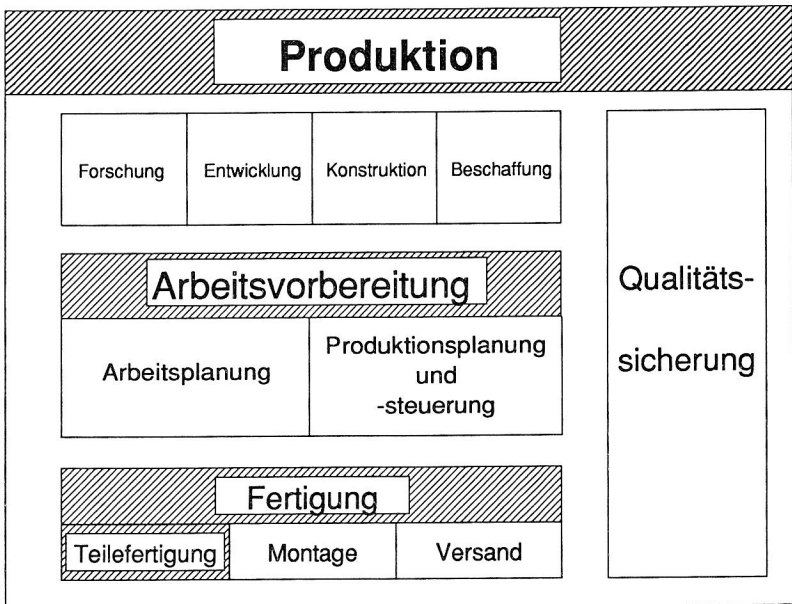


Bild 1: Arbeitsvorbereitung und Fertigung in der Produktion

Die Betrachtungen zu hierarchisch organisierten flexiblen Fertigungssystemen beschränken sich auf den Anwendungsbereich der Teilefertigung. Die zentrale Aufgabe der Teilefer-

tigung wird durch die möglichen Bearbeitungsfunktionen charakterisiert. Lagerung, Transport, Handhabung und Kontrolle sind für die Bearbeitung notwendige Hilfsfunktionen [13,30]. In dieser Arbeit stehen trennende Bearbeitungsverfahren als beispielhafte Fertigungsumgebung im Vordergrund. Für weitere konzeptionelle und beispielhafte Erläuterungen werden für das fertigungstechnische Anwendungsumfeld die Referenztechnologien Drehen, Fräsen und Bohren verwendet.

## **2.2 Hierarchische Flexible Fertigungssysteme (HFFS)**

Die angestrebte Flexibilitätssteigerung im Fertigungsbereich läßt sich nur durch eine konsequente Dezentralisierung der Organisationsstruktur erreichen [106]. Dies hat Auswirkungen auf die Gestaltung Flexibler Fertigungssysteme, aber auch auf andere Bereiche der Produktion.

Die Dezentralisierung von Planungsaufgaben ergibt sich als eine Konsequenz beim Aufbau einer hierarchischen Organisationsstruktur im Produktionsbereich [28].

### **2.2.1 Komponenten Flexibler Fertigungssysteme (FFS)**

Ein Flexibles Fertigungssystem enthält laut Steinhilper [94] mehrere automatisierte Werkzeugmaschinen in Universal- oder Sonderbauart, sowie gegebenenfalls weitere manuelle oder automatisierte Arbeitsstationen, die durch ein automatisiertes Werkstück- und Werkzeugflußsystem so flexibel verknüpft sind, daß ein gleichzeitiges Bearbeiten verschiedener Werkstücke, die das Fertigungssystem auf verschiedenen Pfaden durchlaufen, möglich ist.

Eine Klassifizierung der Systemkomponenten eines FFS soll es ermöglichen, von unterschiedlichen Systemausprägungen abstrahieren zu können.

#### a) Statische Systemkomponenten

Als statische Systemkomponenten werden solche Objekte bezeichnet, die sich unabhängig vom Fertigungsspektrum dauerhaft im Fertigungssystem befinden. Statische Systemkomponenten sind beispielsweise Arbeitsstationen, Verkettungsstationen, Transporteinrichtungen, Rechner und Steuerungen. Diese Komponenten beschreiben das Systemlayout einer Fertigungsanlage und werden durch die Anlagenplanung und -projektierung festgelegt.

#### b) Dynamische Systemkomponenten

Als dynamische Systemkomponenten werden solche Objekte bezeichnet, welche in das Fertigungssystem zum Zwecke der Fertigungsausführung eingebracht werden und nach Verwendung wieder entfernt werden. Beispiele für dynamische Systemelemente sind Werkstücke, Betriebsmittel und Informationen.

Die dynamischen Systemkomponenten Werkstücke und Betriebsmittel werden durch den **Materialfluß**, die Informationen durch den **Informationsfluß** im Fertigungssystem bereitgestellt.

#### c) Der Mensch im Fertigungssystem

Der Mensch stellt die zentrale Komponente in einem Fertigungssystem dar. Auch wenn alle Bearbeitungs-, Handhabungs- und Transportvorgänge in einem Flexiblen Fertigungssystem automatisiert sind, bleiben noch viele Tätigkeiten, die vom Menschen ausgeführt werden können. Dabei handelt es sich beispielsweise um Aufgaben der Planung, Überwachung, Prüfung, Instandhaltung, Wartung und Fehlerbeseitigung.

#### d) Integration der Systemkomponenten

In einem Flexiblen Fertigungssystem müssen statische und dynamische Systemkomponenten sowie die Mitarbeiter funktional integriert werden, wie in Bild 2 schematisch dargestellt ist.

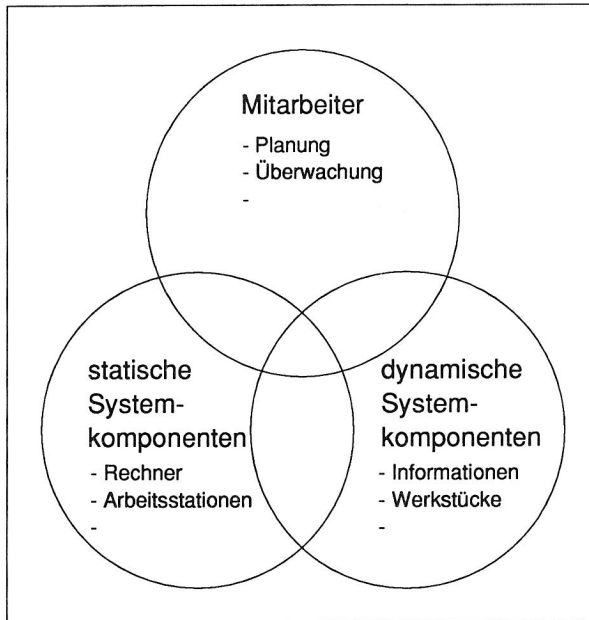


Bild 2: Integration der Systemkomponenten im FFS

#### 2.2.2 Steuerungsstrukturen für FFS

Schwerpunkt der weiteren Konzeptansätze ist die in Abschnitt 2.2.1 definierte dynamische Systemkomponente Informationsfluß.

Für die Organisation der Informationsflüsse in einem Flexiblen Fertigungssystem werden zwei unterschiedliche Ansätze vorgestellt.

a) Zentrale Steuerungsstruktur für FFS

Bild 3 zeigt den Aufbau eines zentral strukturierten Steuerungssystems für ein Flexibles Fertigungssystem. Der zur Steuerung eines FFS notwendige Informationsfluß ist sternorientiert organisiert. Die statischen Systemkomponenten (Prozeßsteuerungen wie SPS, CNC, RC) sind direkt an einen übergeordneten Fertigungsleitrechner gekoppelt.

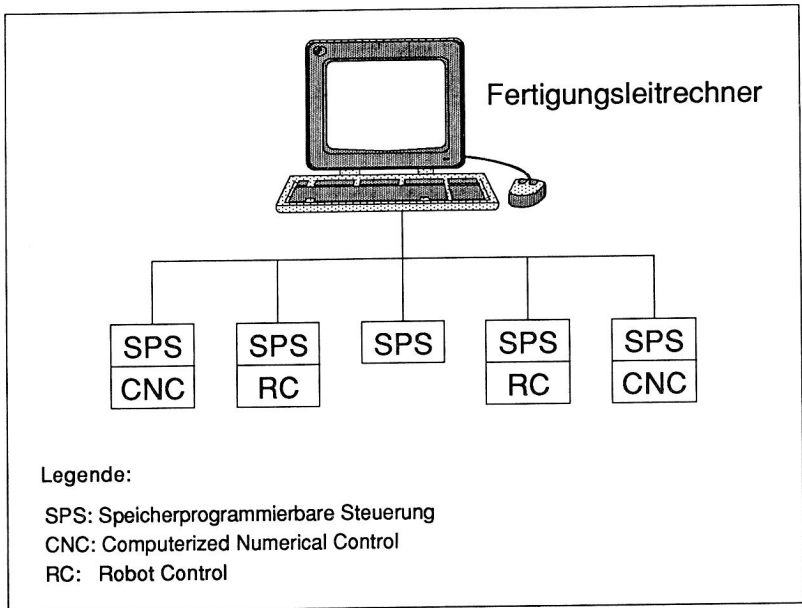


Bild 3: Zentrale Steuerungsstruktur für FFS

**Vorteile der zentralen Steuerungsstruktur für FFS:**

- Die Pflege der Betriebssystem- und Anwendersoftware kann zentral auf dem Fertigungsleitrechner erfolgen.
- Zwischen Fertigungsleitrechner und Prozeßsteuerungen existiert eine einfache Kommunikationsstruktur.
- Datenhaltung, Datenzugriffe und Datenkonsistenz sind relativ einfach lösbar.



**Nachteile der zentralen Steuerungsstruktur für FFS:**

- Die Erweiterung der bestehenden Steuerungsstruktur ist oft sehr schwierig.
- Der übergeordnete Fertigungsleitreehner stellt eine Engpaßstation im Informationsverbund zwischen Fertigungssystem und betrieblichem Umfeld dar.
- Die Flexibilität des gesamten Fertigungssystems ist stark eingeschränkt. In Hinblick auf die Behandlung ungeplanter Ereignisse wie Maschinenausfälle, kurzfristige Umdispositionen und Eilaufträge treten Probleme auf.
- Die Bildung autonomer Fertigungseinheiten scheint bei diesem Steuerungskonzept nicht praktikabel.
- Die Bildung einer modularen Hard- und Softwarestruktur im Sinne der Integrationsbestrebungen von Informations- und Materialfluß wird behindert.

**b) Hierarchische Steuerungsstruktur für FFS**

Im Falle eines hierarchisch organisierten, zellenstrukturierten Steuerungssystems [44,76] für FFS ergibt sich eine dreistufige Ebenenhierarchie. Die Zusammenfassung mehrerer statischer Systemkomponenten (Arbeits-, Verkettungsstationen und Transporteinrichtungen) incl. der notwendigen Prozeßsteuerungen (SPS, CNC, RC) zu einer funktionalen Einheit führt zu einer Flexibel Fertigungszelle (FFZ). Die Steuerung einer FFZ wird von einem Zellenrechner (ZR) entsprechender Funktionalität übernommen [37]. Die Zusammenfassung mehrerer Fertigungszellen incl. der dazu zusätzlich notwendigen statischen Systemkomponenten führt zu einem hierarchisch organisierten Flexiblen Fertigungssystem [26]. Die Steuerung dieser Konfiguration wird einem Fertigungsleitreehner (FLR) übertragen.

Die hierarchische Steuerungsstruktur für FFS soll die Nachteile der zentralen Steuerungsstruktur reduzieren. Die Steuerungshierarchie bewirkt jedoch einen erhöhten Kommunikationsaufwand im Gesamtsystem und höhere Anforderungen an

die Datenhaltung, Datenverteilung und Datenzugriffen in verteilten Systemen. Bild 4 zeigt exemplarisch die Steuerungsstruktur eines HFFS.

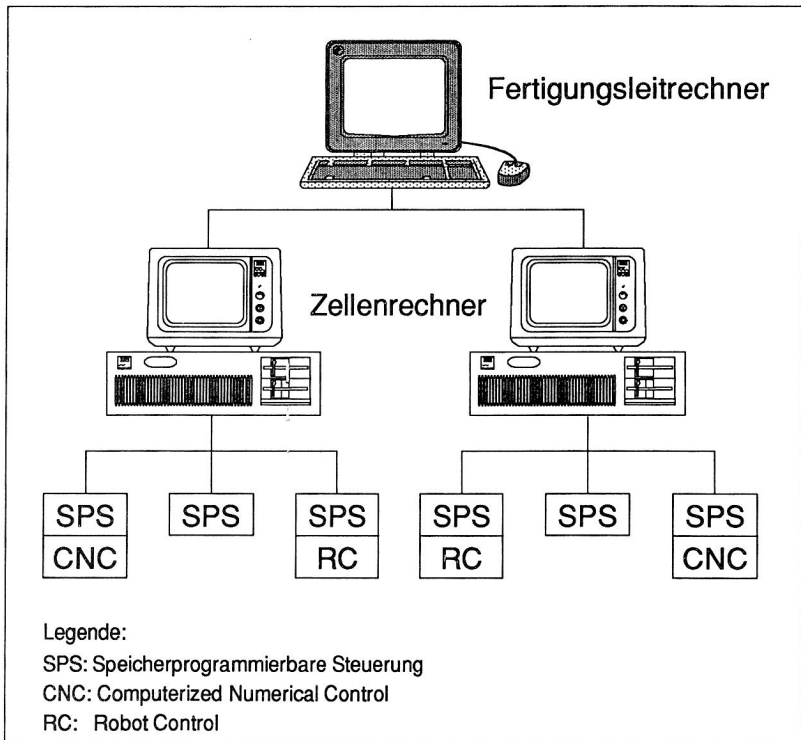


Bild 4: Hierarchische Steuerungsstruktur und Ebenenmodell für FFS

Folgende Forderungen werden an hierarchisch organisierte, zellenstrukturierte Flexible Fertigungssysteme gestellt:

- Bearbeitung unterschiedlicher Werkstücke in beliebiger, jedoch technologisch sinnvoller Reihenfolge.
- Teil- oder vollautomatische Fertigung unterschiedlicher Werkstücke.
- Teile des Fertigungssystems (z.B. statische Systemkompo-

nenten) müssen sich herauslösen bzw. einfügen lassen, ohne daß die Fertigungsanlage allzu lange stillsteht.

- Möglichkeit der lokalen und globalen Störungskompensation während des Fertigungsablaufes.
- Einfache und transparente Integration des Fertigungssystems in das betriebliche Umfeld.

Die vorliegende Arbeit beschäftigt sich ausschließlich mit hierarchisch organisierten Steuerungsstrukturen für FFS im Fertigungsbereich. Sie bilden den Ausgangspunkt für ein verteiltes Planungskonzept im Produktionsbereich.

### **2.2.3 Strukturkonzept für hierarchische Flexible Fertigungssysteme (HFFS)**

Ein hierarchisches Ebenenmodell (siehe auch Bild 4) stellt ein Strukturkonzept für hierarchische FFS (HFFS) dar. Es dient als Grundlage zur Integration der statischen und dynamischen Systemkomponenten eines FFS.

**Statische Systemkomponenten** sind auf jeder Hierarchieebene eines HFFS zu finden. Die für den Fertigungsprozeß unmittelbar notwendigen Einrichtungen werden der operativen Ebene des Strukturkonzeptes zugeordnet. Rechner und Steuerungen werden als statische Systemkomponenten auf jeder Ebene eingesetzt. Die **dynamischen Systemkomponenten** wie Werkstücke und Werkzeuge sind Elemente der operativen Ebene und stehen bei der Betrachtung der Materialflußintegration im Vordergrund. Die zentrale Systemkomponente im HFFS stellen Informationsflüsse dar. Der Austausch von Informationen ist zwischen allen Rechnern und Steuerungen der modellierten Hierarchieebenen möglich. Die durchgängige Gestaltung und Integration der Informationsflüsse stehen im Mittelpunkt der weiteren Betrachtungen und Diskussionen in dieser Arbeit.

Im hierarchischen Ebenenmodell (siehe auch Bild 4) sind zwei Informationsflußrichtungen erkennbar.

a) Informationsfluß von übergeordneten Ebenen zu untergeordneten Ebenen

Abhängig vom jeweiligen ebenenbezogenen Funktionsspektrum werden auf einer übergeordneten Ebene Vorgaben für die untergeordnete Funktionsebene generiert. Der daraus resultierende Informationstransfer wird durch die Solldaten beschrieben.

b) Informationsfluß von untergeordneten Ebenen zu übergeordneten Ebenen

Besondere Wichtigkeit kommt dem Informationsrückfluß zu. Daten, welche während und nach Ausführung einer Aktion auf der operativen Ebene entstehen, müssen nach entsprechender Aufbereitung und Verdichtung der übergeordneten Ebene zur Verfügung gestellt werden. Der daraus resultierende Informationstransfer wird durch die Istdaten beschrieben.

#### 2.2.4 Das Informationssystem im HFFS

Das Informationssystem als zentrale Komponente des hierarchischen Ebenenmodells wird im folgenden Abschnitt genauer vorgestellt. Bild 5 gibt einen Überblick über die Funktionsmodule des Informationssystems. Bei der Konzeption der Funktionsmodule ist auf einen standardisierten Funktionsumfang zu achten.

Das Informationssystem ist so auszulegen, daß es weitgehend ebenenunabhängig implementiert werden kann. Es beinhaltet die Hauptfunktionen Betriebsdatenerfassung und -verarbeitung, Überwachung, Planung, Steuerung und Dialog.

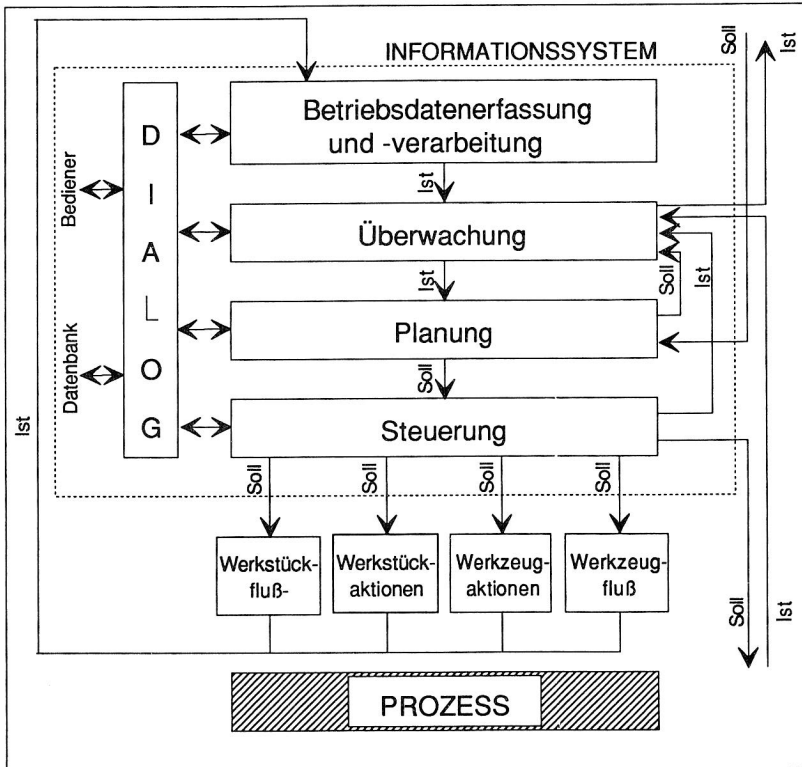


Bild 5: Blockstruktur des Informationssystems (Zellenebene)

Im Informationssystem werden zwei Datenklassen verarbeitet.

Daten, welche bereitgestellt werden müssen, damit ein bestimmtes Fertigungsergebnis erreicht werden kann, bezeichnet man als Solldaten. Beispiele dafür sind NC-Programme, geplante Bearbeitungszeiten und Transportzeiten.

Daten, welche vor, während oder nach dem Ablauf von Fertigungsaktionen erfasst und weiterverarbeitet werden können, bezeichnet man als Istdaten. Beispiele dafür sind Maschinendaten, tatsächliche Bearbeitungszeiten und Transportzeiten.

**a) Betriebsdatenerfassung und -verarbeitung**

Im laufenden Betrieb fallen eine Vielzahl von Daten [99] an, welche zur Führung eines rechnerunterstützten Produktionssystems gesammelt, verarbeitet und aufbereitet werden müssen.

Die Betriebsdatenerfassung ist ein unverzichtbarer Baustein des Informationssystems [6,38]. Die Funktionsbausteine Werkstückaktions- und Werkstückflußsteuerung, sowie Werkzeugaktions- und Werkzeugflußsteuerung liefern die notwendigen **Istdaten**, welche von der Betriebsdatenerfassung des Informationssystems verwaltet werden müssen.

Die Anforderungen an die Betriebsdatenverarbeitung sind in engem Zusammenhang mit den anderen Hauptfunktionen des Informationssystems zu sehen. Die Hauptaufgabe der BDV ist es, aus der Vielzahl der erfaßten Einzelinformation eine für das Informationssystem geeignete Informationsverdichtung, -aufbereitung und -darstellung zu gewährleisten. Je nach Aufgabenstellung werden an die Betriebsdatenverarbeitung sehr hohe Anforderungen an Verarbeitungszeit und/oder Verarbeitungsmenge gestellt. Die BDV verarbeitet ausschließlich **Istdaten**, welche verdichtet und aufbereitet werden.

## **b) Überwachung**

Die zentrale Aufgabe der Überwachung [40,50,86] ist die Koordination von Soll- und Istdaten innerhalb des Informationssystems.

Fertigungs-Istdaten werden dem Überwachungsmodul vom Informationssystemen der untergeordneten Hierarchieebene geliefert. Der Steuerungsmodul liefert ebenfalls Istdaten an die Überwachung. Weiterhin werden die von der BDV vorverarbeiteten Istdaten der Überwachung zugeführt. Der Integrationsaspekt im HFFS erfordert von der Überwachung die Generierung und Übermittlung von Rückmeldedaten (Istdaten) an das Informationssystem der übergeordneten Hierarchieebene.

Die Planungsfunktionen des Informationssystems liefern der Überwachung Fertigungs-Solldaten. Das Vorliegen von Soll- und Istdaten ist Voraussetzung für die Funktionsfähigkeit der Überwachungsfunktionen.

Die Überwachung registriert Abweichungen zwischen Sollvorgaben und Rückmeldedaten und löst entsprechende Reaktionsmechanismen aus. Dabei werden Vergleichsergebnisse ermittelt und der Planung des Informationssystems übergeben. An den Überwachungsmodul lassen sich auch Diagnosesysteme zur genaueren Soll-/Istanalyse des Fertigungsprozesses ankoppeln.

### c) Planung

Die Planung als Teil des Informationssystems verarbeitet **Sollvorgaben** (Planungsvorgaben) aus der übergeordneten Hierarchieebene und **Istdaten**, welche von der ebeneninternen Überwachung aufbereitet und zur Verfügung gestellt werden.

Planungsvorgaben aus einer übergeordneten Hierarchieebene werden unter der Prämisse eines störungsfreien Fertigungsablaufes mit Termin- und Kapazitätsrahmenbedingungen versehen und der untergeordneten Hierarchieebene übergeben. Das Planungssystem kann jedoch nur flexibel und effektiv arbeiten, wenn Maschinenstörungen und kurzfristige Umdispositionen im Fertigungsprogramm, welche zu Abweichungen von den Planvorgaben führen, in der ebenenbezogenen Planungsfunktion berücksichtigt werden.

Das ebenenbezogene Planungssystem generiert Vorgaben für die Steuerung des betrachteten Informationssystems. Diese Planungsvorgaben beschreiben unter der Prämisse vorgegebener Kriterien (z. B. Minimierung der Durchlaufzeit, Minimierung der Fertigungskosten) einen optimierten Fertigungsplan für den untergeordneten Fertigungsbereich (z. B. einer Fertigungszelle). An die ebenenspezifische Planungsfunktion werden daher hohe Anforderungen gestellt.

### Generieren und Verarbeiten von Offline-Informationen

Unter dem Begriff der Offline-Information versteht man Daten, welche ohne Berücksichtigung der momentan stattfindenden Fertigungsabläufe und der dabei auftretenden ungeplanten Ereignisse generiert und weitergegeben werden.

In diesem Zusammenhang ist der Begriff der Offline-Planung zu nennen. Dieser wird in Kapitel 4 dieser Arbeit eingehend erläutert.



## Generieren und Verarbeiten von Online-Informationen

Unter dem Begriff der Online-Information versteht man Daten, welche die realen Ereignisse während des Fertigungsablaufes berücksichtigen. Online-Informationen werden permanent während des Fertigungsablaufes mit Hilfe der Betriebs- und Maschinendatenerfassung (BDE/MDE) extrahiert und in der Betriebsdatenverarbeitung (BDV) sinnvoll aufbereitet und verdichtet. Die Überwachung analysiert Online-Informationen und Planungsvorgaben. Beim Auftreten signifikanter Abweichungen sorgt die Planung für die Generierung neuer Online-Informationen, welche als Planungsvorgaben dienen. Damit soll erreicht werden, daß auftretende Störungen weitgehend kompensiert werden können und Fertigungsstillstände möglichst vermieden werden.

In diesem Zusammenhang wird der Begriff der Online-Planung erwähnt, der bei verteilten Planungssystemen eine zentrale Rolle spielt und in Kapitel 4 dieser Arbeit eingehend erläutert wird.

Die Planungskomponente des Informationssystems im HFFS bildet den Schwerpunkt dieser Arbeit. Unter diesem Gesichtspunkt wird in dieser Arbeit der Begriff **Werkstattplanung** geprägt. Die Verteilung von Planungsaufgaben in einem hierarchischen Fertigungssystem zum Zwecke der Flexibilitätssteigerung hat Auswirkungen im Fertigungsbereich und darüber hinaus. Eine kurze Einführung in den Bereich der verteilten Systeme wird in Abschnitt 2.3 gegeben.

### d) Steuerung

Die Umsetzung der Planungsvorgaben (Sollinformationen) ist Aufgabe der Steuerung [49].

Die verschiedenen Systemkomponenten (siehe auch Abschnitt 2.2.1) mit den dafür konfigurierten Funktionsbausteinen

(Werkstückfluß- und Werkstückaktionssteuerung bzw. Werkzeugfluß- und Werkzeugaktionssteuerung) werden von der Steuerung des Informationssystems mit Daten versorgt. Die wichtigste Aufgabe der Steuerung ist dabei die Koordination der ebenen-internen Informationsweitergabe an die untergeordneten Funktionsbausteine. Kurzfristig auftretende Ereignisse (Ist-daten) werden von der Steuerung an die Überwachung übermittelt. Dieser Informationspfad ist Voraussetzung für eine sehr schnelle Aktivierung von Reaktionsmechanismen, die sich häufig bei auftretenden Störungen als notwendig erweisen. Der Begriff **Werkstattsteuerung** soll für diesen Aufgabenbereich übernommen werden.

Die informationstechnische Verknüpfung mit der untergeordneten Ebene im hierarchischen Funktionsblockmodell wird über die Steuerungsfunktion des Informationssystems aufgebaut. Dabei werden der untergeordneten Planung Vorgaben in Form von Sollinformationen übermittelt, welche als Rahmenbedingung zur Umsetzung auf dieser Hierarchieebene dienen sollen.

### 2.3 Eigenschaften verteilter Systeme

Die Beschäftigung mit verteilten Planungsaufgaben im rechnerintegrierten Produktionsbereich dient dem gemeinsamen Ziel der Flexibilitätssteigerung bei der Produktionsausführung. Verteilte Systeme bieten dazu einen konzeptionellen Ansatz.

Verteilte Systeme bzw. verteilte Rechnersysteme haben die Vorteile einer besseren Zuverlässigkeit, leichteren Erweiterbarkeit, schnellerer Antwortzeiten und verbesserter Leistung gegenüber zentralisierten Systemen.

**Definition: Verteiltes System [91]**

Ein **verteiltes System** ist die Integration autonomer verteilter Rechnersysteme zu einer kooperierenden Sammlung von Einzelkomponenten, die zusammen in der Lage sind, ein gemeinsames Ziel zu erreichen. Nach Enslow [17] können verteilte Systeme nach dem Verteilungsgrad von Hardware, Kontrolle und Daten klassifiziert werden.

**a) Hardware**

Ein verteiltes System besteht aus zwei oder mehreren Rechnern, welche eine gemeinsame Aufgabe zu lösen haben. Dazu ist es erforderlich, daß die verschiedenen Rechner miteinander kommunizieren. Bei der Verteilung der Rechner kann eine physikalische Verteilung der Anwendung oder die Zuordnung verschiedener Funktionen auf verschiedene Rechner zugrunde liegen.

**b) Kontrolle**

In einem System müssen physikalische Ressourcen (Rechner, Bildschirme, usw.) und logische Ressourcen (Programme, Dateien, usw.) von einer Kontrollinstanz verwaltet werden. Weiterhin müssen alle Aktivitäten, welche im System ablaufen, koordiniert werden. Die Verwaltung der Systemressourcen kann zentralistisch oder hierarchisch organisiert werden; dies ist ein Maß für den Grad der Verteilung.

**c) Daten**

Die Verteilung von Daten im Gesamtsystem ist ein weiterer Aspekt in verteilten Systemen. Dabei geht es um die Frage der Datenkopien oder Datenverteilung. Die Daten sollten dort gehalten werden, wo sie erzeugt bzw. benötigt werden.

Ein **verteiltes System** wird charakterisiert durch

- Verteilung der Hardware und/oder,
- Verteilung der Kontrolle und/oder,
- Verteilung der Daten.

Das verteilte Planungssystem HIPS, wie es in Kapitel 4 dieser Arbeit konzipiert wird, besitzt die Eigenschaften eines verteilten Systems.

Das verteilte Planungssystem HIPS wurde jedoch als verteiltes Prozeß-System realisiert. Die Verifikation dieses neuartigen Planungskonzeptes kann somit auf einem Rechner durchgeführt werden. Dies hat praktische und experimentelle Gründe. Dabei wird vom Kriterium der Hardwareverteilung eines verteilten Systems abgewichen. Ein verteiltes Rechnersystem wird auf ein verteiltes Prozeß-System abgebildet. Die daraus ableitbaren Ergebnisse sind jedoch auf ein verteiltes Rechnersystem übertragbar.

Der in dieser Arbeit verwendete Begriff des verteilten Planungssystems (als Experimentiersystem) wird deshalb abweichend vom System folgendermaßen definiert:

Ein **verteiltes Planungssystem** als Experimentiersystem wird beschrieben durch:

- Verteilung rechnerinterner Prozesse und /oder
- Verteilung der Kontrolle und/oder
- Verteilung der Daten.

Die folgenden Vorteile eines verteilten Systems [91] sind somit auf ein verteiltes Planungssystem übertragbar:

- Modularität und einfachere Planungssoftware.
- Flexibilität und Erweiterbarkeit des verteilten Planungssystems.
- Verfügbarkeit des verteilten Planungssystems.
- Kürzere Antwortzeiten und höherer Durchsatz bei Planungsaufgaben.
- Lokale Kontrolle von Planungsdaten.

### **3 Verteilte Planungssysteme im rechnerintegrierten Produktionsbereich**

#### **3.1 Abgrenzung zu bisherigen Arbeiten**

Die vorliegende Arbeit befaßt sich mit unterschiedlichen Planungsaspekten zur Flexibilitätssteigerung der rechnerintegrierten Teilefertigung. Diese Aufgabenstellung macht die Betrachtung der arbeitsvorbereitenden Produktionsbereiche (Arbeitsplanung, Produktionsplanung und -steuerung) erforderlich. Das verteilte Planungskonzept findet beispielhaft in einer hierarchisch organisierten Fertigungsumgebung Anwendung. Bisherige Arbeiten beschäftigen sich weitgehend nur mit Teilbereichen verteilter Planungssysteme im Produktionsbereich.

##### **a) Arbeitsvorbereitung**

Turowski [97] gibt in seiner Arbeit grundlegende Hinweise zur Konzeption eines rechnerunterstützten Arbeitsplanungssystems aus geometrieorientierten Funktionsbausteinen. Pistorius [71] beschreibt das rechnerunterstützte Arbeitsplanungssystem CAPSY und stellt dabei wichtige Strukturierungs- und Modellierungsaspekte für diesen Tätigkeitsbereich vor.

Maier [55] greift das Konzept der variabel strukturierten Arbeitspläne auf und weist flexibilitätssteigernde Effekte bei der arbeitsgangbezogenen Einplanung von Fertigungsaufträgen nach. Mußbach-Winter [62] erläutert erstmals die Vorteile von Arbeitsgangalternativen bei auftretenden Störungen während des Fertigungsablaufes. Schulz [88] beschreibt speziell für Flexible Fertigungssysteme die Auslegung einer computerintegrierten Arbeitsplanung.

Die Nutzung alternativer Arbeitspläne im Bereich der Produktionsplanung und -steuerung spricht Busch [8] in seinem Buch an und gibt dabei wertvolle Hinweise zur Neugestaltung und Flexibilisierung der fertigungsvorbereitenden Belegungsplanung.

## **b) Fertigung**

Konzepte zur Flexibilitätssteigerung der rechnerintegrierten Fertigung finden sich in zahlreichen Arbeiten.

Mertins [57] beschreibt wichtige Voraussetzungen zur Strukturierung und Modularisierung rechnergeführter Fertigungssysteme. Anhand der Werkstattsteuerung werden die Vorteile hierarchischer Organisationsstrukturen beschrieben. Groha [37] beschäftigt sich mit Fertigungszellen und nutzt das Modularitätsprinzip für die Konzeption einer funktionsorientierten Ablaufsteuerung im Zellenbereich.

Gentner [33], Scheiber [78] und Aldinger [3] konzipieren und untersuchen rechnergestützte Systeme zur kurzfristigen Fertigungssteuerung. Dabei werden auch veränderte Anforderungen an die Arbeitsvorbereitung angedeutet. Alternative Arbeitspläne zur kurzfristigen Fertigungssteuerung werden jedoch nicht genutzt.

Kreimeier [52] konzipiert ein Hilfsmittel zur Feinsteuerung autonomer Fertigungsstrukturen und berücksichtigt dabei auch Aufgaben, welche der Arbeitsvorbereitung zufallen. Die Tauglichkeit des Planungssystems in hierarchisch organisierten Fertigungssystemen konnte jedoch nicht nachgewiesen werden.

Schmitt [82] beschreibt ein integriertes Werkstattsteuerungssystem, welches statt sequentieller Arbeitspläne, Ablaufgraphen nutzt. Besonders bei wechselnden Auftragsstrukturen konnten die Vorteile dieses Konzeptes nachgewiesen werden.

### **c) Fazit**

Arbeiten auf dem Gebiet der verteilten Planungssysteme im Produktionsbereich und deren Anwendung in hierarchisch strukturierten Fertigungssystemen existieren nur für Teilaspekte.

Die Möglichkeit, Störungen während des Fertigungsablaufes lokal (z. B. in einer Fertigungszelle) und online (d. h. fertigungsbegleitend) kompensieren zu können, wird in dieser Arbeit erstmals untersucht. Dies gelingt nur mit einem integrierten Gesamtansatz. Insbesondere ist dazu die durchgängige Konzeption, Realisierung und exemplarische Erprobung des verteilten Planungssystems zum Nachweis der Flexibilitätssteigerung in der rechnerintegrierten Teilefertigung notwendig.

Diese Zielsetzungen grenzen die vorliegende Arbeit von bisherigen ab, nutzen jedoch teilweise deren Ergebnisse im Sinne der Gesamtbetrachtung verteilter Planungssysteme.

## **3.2 Anforderungen an verteilte Planungssysteme**

Die wichtigsten Anforderungen an verteilte Planungssysteme, welche auf hierarchisch organisierten Fertigungsstrukturen basieren, werden im folgenden erläutert. Daraus werden Postulate formuliert, die Grundlage bei der Konzeption eines verteilten Planungssystems im Produktionsbereich sind.

### **3.2.1 Flexibilität**

Die zentrale Forderung, welche ein verteiltes Planungssystem erfüllen soll, betrifft die Flexibilität.

Mertins [57] beschreibt die fünf Flexibilitätsarten Integrations-, Anpaß-/Änderungs-, Mengen-/Stückzahl-, Produkt-/Einsatzflexibilität und Fertigungsredundanz für rechnerintegrierte Produktionssysteme. Schmitz-Mertens [83] klassifi-

ziert die erwähnten Flexibilitätsarten nach kurz-, mittel- und langfristigen Aspekten. Verteilte Planungssysteme, welche sich auf den gesamten Produktionsbereich beziehen, sollten die in der Literatur [57,83] beschriebenen Flexibilitätsarten unterstützen.

Der Zwang zur Flexibilitätssteigerung in der rechnerintegrierten Teilefertigung ist im realen Betriebsverhalten automatisierter Fertigungssysteme begründet. Technische und organisatorische Stillstände reduzieren den Nutzungsgrad flexibler Fertigungssysteme auf 76,5% bis 84,3% [83,98,104]. Ursachen technischer Störungen sind beispielsweise Maschinen-, Steuerungs-, Transportsystem- und Handhabungssystemausfälle. Organisatorische Störungen ergeben sich durch Bearbeitungsunterbrechungen bei Wartung, Instandhaltung, Reinigung und beim Rüsten, weiterhin durch fehlende Werkstücke, Betriebsmittel und Informationen.

#### POSTULAT 1:

Verteilte Planungssysteme müssen so flexibel ausgelegt sein, daß beim Eintreten ungeplanter Ereignisse im Fertigungsbereich nicht zwangsläufig eine Neuplanung des gesamten Auftragspektrums der aktuellen Fertigungsperiode (z. B. einer Schicht) durchgeführt werden muß. Weiterhin müssen verteilte Planungssysteme an Konfigurationsänderungen des Fertigungssystems anpaßbar sein.

Verteilte Planungssysteme sollen die Flexibilität rechnerintegrierter Fertigungssysteme erhöhen:

- Beim ungeplanten Auftreten von technischen und organisatorischen Störungen im Fertigungsbereich sind schnelle Reaktionsmechanismen durch verteilte Planungssysteme zur Verfügung zu stellen.
- Planungsfehler müssen kompensierbar sein.
- Eilaufträge und sogenannte "Schnellschüsse" müssen in den laufenden Fertigungsbetrieb eingebracht werden können.



- Die gleichzeitige Herstellung unterschiedlicher Werkstückvarianten erfordert ein leistungsfähiges Planungssystem (Fertigung in Losgröße 1).
- Konfigurationsveränderungen im Fertigungssystem (Erweiterung, Umgestaltung, Verkleinerung) müssen im verteilten Planungssystem einfach nachvollzogen werden können.

### 3.2.2 Bereichsautonomie

In Kapitel 2 der vorliegenden Arbeit wurden speziell für den Bereich der Teilefertigung Steuerungs- und Funktionskonzepte für hierarchisch organisierte Flexible Fertigungssysteme (HFFS) vorgestellt und diskutiert. Die Vorteile einer Funktionsverteilung wurden besprochen. Verteilte Planungssysteme greifen diesen Konzeptgedanken auf.

Kreimeier [52] definiert den Autonomiebegriff:

Die Autonomie bestimmt den Grad der Entscheidungs- und Handlungsfreiheit eines abgegrenzten Bereiches innerhalb einer hierarchisch gegliederten Gesamtstruktur.

Das Ebenenkonzept von HFFS (operative Ebene, Zellenebene, Leitebene) unterstützt die lokale Autonomie der verteilten Planungsaufgaben. In den vorgelagerten Bereichen der Fertigung (Arbeitsplanung, Produktionsplanung und -steuerung) soll das Konzept der lokalen Planungsautonomie weitergeführt werden. Jeder Planungsbereich in einem integrierten Produktionssystem ist für bestimmte Planungsaufgaben mit differenziert ausgelegten Planungskompetenzen (Planungsautonomie) verantwortlich.

Bereichsautonomie im Sinne verteilter Planungssysteme bedeutet, daß die verschiedenen Planungsbereiche des angesprochenen Produktionssystems einen differenzierten Entscheidungsfreiraum bei der Optimierung bereichsinterner Fertigungskriterien erhalten. Genau definierte Schnittstellen zwischen den autonomen Planungsbereichen ermöglichen eine Optimierung globaler Fertigungskriterien.

## POSTULAT 2:

Verteilte Planungssysteme für den Produktionsbereich stellen die konsequente Fortführung des Hierarchiegedankens im Fertigungsbereich dar. Das Konzept der verteilten Systeme ermöglicht den Aufbau und die effektive Nutzung lokaler Entscheidungskompetenz und -intelligenz in den Planungsbereichen. Bereichsautonomie gewährleistet die Optimierung bereichsinterner und globaler Fertigungskriterien.

### 3.2.3 Entscheidungsvorbereitung und -unterstützung

Planungsaufgaben, die für den Menschen zu komplex oder zu langwierig sind, sollen von rechnerunterstützten Planungssystemen durchgeführt werden. Die Aufbereitung, Verdichtung und Präsentation von Planungsinformationen dient dem am Planungsablauf beteiligten Menschen zur Entscheidungsunterstützung.

Reuter [75] spricht in diesem Zusammenhang von der durchgängigen Dialogisierung von Planungssystemen und nennt Vorteile für den Benutzer.

Durch den Einsatz verteilter, rechnerunterstützter Planungssysteme im Produktionsbereich soll die Transparenz des Fertigungsablaufes gesteigert werden. Der zunehmend verstärkte Einsatz von Automatisierungsgeräten (CNC, SPS, RC) und Rechnern macht das Verstehen und Durchschauen der komplexen Fertigungsabläufe für den Menschen zunehmend schwieriger. Besonders beim Auftreten ungeplanter Ereignisse ergeben sich für den Bediener oft erhebliche Probleme, da er dann komplexe Entscheidungen in kurzer Zeit fällen muß, deren Auswirkungen er oft nicht überblicken kann. Durch den Einsatz von rechnerunterstützten Systemen können diese Probleme vermieden werden.

Der Einsatz von Rechnersystemen für die Planung der Fertigungsabläufe ermöglicht eine Verbesserung der System- und

Ablauftransparenz in komplexen Produktionssystemen. Verteilte Planungssysteme müssen leistungsfähige Entscheidungsvorbereitungs- und -unterstützungsmechanismen zur Verfügung stellen, um den am Produktionsablauf beteiligten Menschen optimale und wirkungsvolle Handlungshinweise, besonders nach dem Auftreten ungeplanter Ereignisse geben zu können.

#### **POSTULAT 3:**

Verteilte Planungssysteme sollen dem Menschen helfen, durch Steigerung der Transparenz der Fertigungsabläufe, bessere Entscheidungen vor, während und nach dem Fertigungsablauf fällen zu können. Die vom Rechner ermittelten Planungsvorschläge müssen vom Bediener nachvollzogen werden können (Erklärungskomponente des verteilten Planungssystems).

#### **3.2.4 Fertigungsrelevante Optimierungskriterien**

In vielen Produktionsbetrieben hat der Wandel vom Verkäufermarkt zum Käufermarkt zu tiefgreifenden Änderungen und zu erhöhten Anforderungen im Produktionsablauf geführt. Der Zwang zur Fertigungslosgröße 1 (hohe Variantenvielfalt), bei reduzierten Durchlaufzeiten und Herstellkosten, unter Beachtung hoher Kapazitätsauslastung der Maschinen und hoher Termintreue, führt zu neuen Anforderungen an Planungssysteme. Funktionsverteilung und Rechnerunterstützung sind Maßnahmen, um innerbetriebliche Planungssysteme einzuführen, welche den neuartigen Anforderungen gerecht werden.

Verteilte, rechnerunterstützte Planungssysteme sollten unter besonderer Berücksichtigung der Postulate 1 und 3 folgende betriebsrelevanten Optimierungskriterien beeinflussen können:

#### **a) Werkstückbezogene Optimierungskriterien**

Besonders interessant ist eine bewertete Kombination verschiedener Optimierungskriterien, wie beispielsweise Minimierung der Bearbeitungskosten, Bearbeitungszeiten, Rüstzeiten und Transportzeiten.

Werkstückbezogene Optimierungskriterien beeinflussen in besonderer Weise die Fertigung einzelner Werkstücke oder Lose. Dabei werden keine Abhängigkeiten zu anderen Fertigungsaufträgen berücksichtigt, welche zur selben Zeit um die Ressourcen des Fertigungssystems konkurrieren.

#### **b) Auftragsbezogene Optimierungskriterien**

Auftragsbezogene Optimierungskriterien (z. B. Minimierung der mittleren Durchlaufzeit, mittleren Bearbeitungskosten und mittleren Leerlaufzeiten) beeinflussen das gesamte Fertigungspektrum bzw. die Fertigungsaufträge einer Fertigungsperiode. In verteilten Planungssystemen müssen beliebig gewichtete Kombinationen verschiedener Optimierungskriterien anwendbar sein. Dadurch findet die individuelle, firmenspezifische Fertigungsphilosophie im Planungssystem Berücksichtigung.

Kreimeier [52] erläutert verschiedene fertigungsrelevante Optimierungskriterien und beschreibt in diesem Zusammenhang konkurrierende und komplementäre Zielsetzungen.

#### **POSTULAT 4:**

Verteilte Planungssysteme müssen Optimierungskriterien verarbeiten können, welche sowohl vor der Fertigung (Offline-Planung), als auch während des Fertigungsablaufes (prozeßbegleitende Online-Planung) wirkungsvolle Steuermechanismen darstellen. Dadurch werden firmenspezifische Charakteristika in besonderer Weise beeinflussbar.

### 3.2.5 Simulation

Die Simulation [23,24] stellt Verfahren für die Untersuchung komplexer Systeme zur Verfügung und eignet sich in besonderer Weise als Werkzeug in verteilten Planungssystemen der rechnerintegrierten Produktion. Vorteile bietet die Simulation bei der Projektierung verteilter Planungssysteme, wo Voraussagen über das künftige Realverhalten solcher Systeme gemacht werden sollen (Systemsynthese). Weiterhin erlaubt die Simulation Untersuchungen an bestehenden Planungssystemen und die Auswirkung von Systemveränderungen auf die Planungsergebnisse (Systemanalyse).

Aufgaben der Simulation in verteilten Planungssystemen sind die qualitative Simulation, quantitative Simulation und die Visualisierung der verteilten Planungsabläufe.

#### a) Qualitative Simulation

Der Benutzer erhält einen besseren Einblick in die komplexen Systemzusammenhänge bei der verteilten Planung. Dabei sind besonders die Auswirkungen von Veränderungen des Produktionssystems auf das Verhalten des verteilten Planungssystems von großem Interesse.

#### Beispiele:

- Konfigurationsänderungen im Produktionssystem  
(Ausfall von statischen oder dynamischen Systemkomponenten, Verkleinerung oder Vergrößerung des Produktionssystems, Umstrukturierung des Produktionssystems)
- Veränderungen des Anforderungsprofils im Produktionssystem  
(Erhöhung der Fertigungsstückzahlen, Veränderung der Optimierungskriterien, Einbringen spezieller Fertigungsaufträge)

#### **b) Quantitative Ergebnisse einer Simulation**

Quantitative Simulationsuntersuchungen geben Hinweise auf die erreichbaren Fertigungskennzahlen (z. B. Kosten, Durchlaufzeiten), unter besonderer Berücksichtigung vorgegebener Rahmenbedingungen (z. B. Maschinenstörungen). Daraus können Hinweise abgeleitet werden, welche Ereignisse zu Qualitätsverschlechterungen, Kostenerhöhungen und Terminverzögerungen führen können. Andererseits können aus den Simulationsergebnissen Gesichtspunkte zur optimalen Gestaltung des realen Fertigungsablaufes abgeleitet werden.

#### **c) Visualisierung der verteilten Planungsabläufe**

Neben der Präsentation der Simulationsergebnisse ist die Darstellung der Planungsdynamik während des Planungsablaufes von besonderer Bedeutung. In verteilten Systemen, insbesondere in verteilten Planungssystemen, ist es notwendig, die dezentral ablaufenden Planungsalgorithmen nachvollziehen zu können. Auch die Kommunikation zwischen verschiedenen Planungsbereichen kann durch Simulation ermittelt und visualisiert werden. Durch Analyse der Simulationsergebnisse können die Konfigurationsdaten für die Auslegung eines Rechnerkommunikationssystems abgeleitet werden. Zum Thema der Simulation im rechnerunterstützten Produktionsbereich findet man weitere Hinweise, beispielsweise in [9,80,101].

#### **POSTULAT 5:**

Für die Projektierung und den realen Betrieb eines verteilten Planungssystems im Produktionsbereich ist ein Simulationssystem von grundsätzlicher Wichtigkeit. Die Steigerung der Transparenz bei der Ermittlung verschiedenen Planungsalternativen (Offline-/Online-Planung) setzt eine leistungsfähige Simulationskomponente voraus.

### 3.2.6 Durchgängigkeit des Informationsflusses

Alle Produktionsbereiche, die Planungsaufgaben durchführen, müssen über ein gemeinsames Informationssystem miteinander verbunden sein. Sollen die betreffenden Planungsaufgaben rechnerunterstützt durchgeführt werden, so ist für eine entsprechende Hard- und Softwareinfrastruktur zu sorgen. Dies betrifft gleichermaßen die organisatorischen und technischen Komponenten eines verteilten Planungssystems.

Die Integration der Informationsflüsse in rechnerunterstützten Planungssystemen erfordert eine aufeinander abgestimmte Funktionsstruktur, nichtredundante Datenstrukturen, durch den Menschen nachvollziehbare Planungsabläufe und die Möglichkeit der Interaktion während oder nach Planungsläufen durch berechnete Mitarbeiter. In rechnerunterstützten Planungssystemen sind dem Aufgabengebiet angepaßte Planungsrechner und schnelle Kommunikationsmedien erforderlich. Ein einheitlicher Aufbau der Betriebssystem- und Anwendersoftware und konsistente Mechanismen zur Datenhaltung und -verteilung sind Voraussetzung. Allgemeine Anforderungen an die Integrationsfähigkeit verteilter Systeme sind in [17,91] eingehend beschrieben.

Verteilte Planungssysteme, die sich auf den gesamten Produktionsbereich beziehen, sind eine spezialisierte Ausprägung verteilter Systeme (siehe auch Abschnitt 2.3). Reuter [75] gibt einen sehr guten Überblick über Integrationsvoraussetzungen, -ziele, -grenzen, und -schritte. Die daraus abgeleiteten Anforderungen gehen in das folgende Postulat 6 ein.

#### POSTULAT 6:

Verteilte Planungssysteme müssen informationsflußintegrierend konzipiert und realisiert werden. Dazu ist eine geeignete Infrastruktur zur Erfüllung der organisatorischen und technischen Voraussetzungen im Produktionsbetrieb notwendig.

### 3.3 Werkstattsteuerung (CAM)

#### 3.3.1 Aufgaben der Werkstattsteuerung

##### Definition: Werkstattsteuerung

Nach [12] führt die Werkstattsteuerung planende, steuernde und überwachende Aufgaben im Fertigungsbereich durch. Die Werkstattsteuerung ist für die übergeordnete Koordinierung der operativen Ebene (Instandhalten, Transportieren, Lagern, Bearbeiten, Montieren, Prüfen und Vor-/Nachbereiten) zuständig und steht in unmittelbarem Zusammenhang mit Arbeitsplanung, Produktionsplanung und Qualitätssicherung [4].

Nach [45] können in der Werkstattsteuerung **dispositive bzw. planerische** und **operative** Aufgaben (siehe Bild 6) unterschieden werden. In dieser Arbeit stehen planerische Aspekte der Werkstattsteuerung im Vordergrund. Für die Aufgaben der Termin- und Kapazitätsplanung, Verfügbarkeitsprüfung, Werkstattauftragsfreigabe und Werkstattauftragsveranlassung wird in dieser Arbeit der Begriff **Werkstattplanung** geprägt.

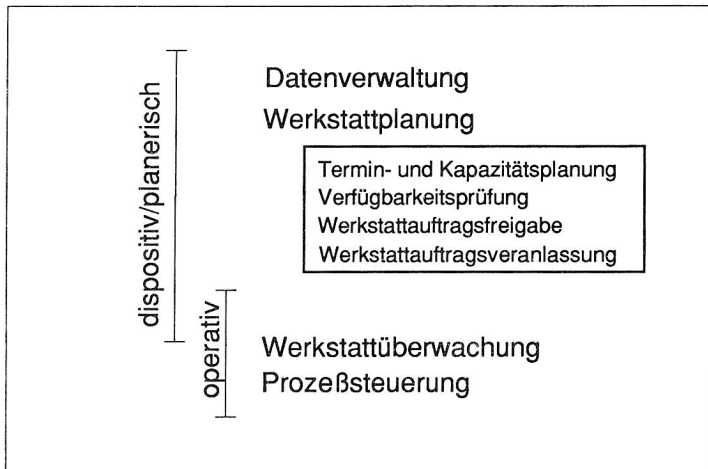


Bild 6: Aufgaben der Werkstattsteuerung



### **3.3.2 Konzeptionelle Anforderungen an neuartige Werkstattplanungssysteme**

Die in 3.2 formulierten sechs Postulate stellen die Grundlage für das Anforderungsprofil neuartiger Werkstattplanungssysteme dar.

In diesem Abschnitt werden besondere Anforderungen an Termin-, Kapazitätsplanung, Verfügbarkeitsprüfung, Werkstattauftragsfreigabe und die Werkstattauftragsveranlassung definiert. Schwerpunkt der Betrachtungen zur Konzeption neuartiger Werkstattplanungssysteme ist die Maschinen- bzw. Stationsbelegung. Dabei werden hohe Anforderungen an eine prozeßbegleitende Online-Disposition [14,33] gestellt.

#### **a) Flexibilität**

Ein Flexibles Fertigungssystem sollte folgende Forderungen erfüllen:

- Unterschiedliche Werkstücke sollen in einem FFS in kleinen Losgrößen (im Extremfall Losgröße 1) und in beliebiger, jedoch technologisch sinnvoller, Reihenfolge gefertigt werden können.
- Es sollte in einem FFS eine automatische Fertigung (zumindest in einer oder zwei Schichten) unterschiedlicher Werkstücke bei begrenzten Fertigungsmitteln möglich sein.
- Auftretende Störungen, Eilaufträge oder andere ungeplante Ereignisse in einem FFS sollten durch möglichst schnell reagierende Online-Planungsalgorithmen kompensierbar sein.

Daraus ergeben sich spezielle Anforderungen an die Werkstattplanung (Teilefertigung). Scheiber [78] bezeichnet die Aufgaben der Werkstattplanung als kurzfristige Fertigungssteuerung und beschreibt Algorithmen zu ihrer Flexibilisierung.

## Flexibilität bei der Termin- und Kapazitätsplanung

Die besonderen Flexibilitätsanforderungen an die Termin- und Kapazitätsplanung der Werkstatt entstehen aus dem Zwang, kurzfristig auf veränderte Fertigungsbedingungen reagieren zu müssen. Die von der Produktionsplanung und -steuerung (PPS) ermittelten Termin- und Kapazitätsvorgaben müssen auch bei sich kurzfristig verändernden Fertigungsbedingungen eingehalten werden. Zusätzlich sind die vorgegebenen Fertigungskriterien (z. B. Gesamtfertigungskosten) zu optimieren. Voraussetzung für die Erfüllung dieser Flexibilitätsanforderungen ist die Vorgabe entsprechender Alternativstrukturen aus Arbeitsplanung und PPS. Die daraus resultierenden Anforderungen an neuartige Arbeitsplangenerierungssysteme und Belegungsplanungssysteme werden unter diesen Gesichtspunkten in den Abschnitten 3.4 und 3.5 eingehend beschrieben.

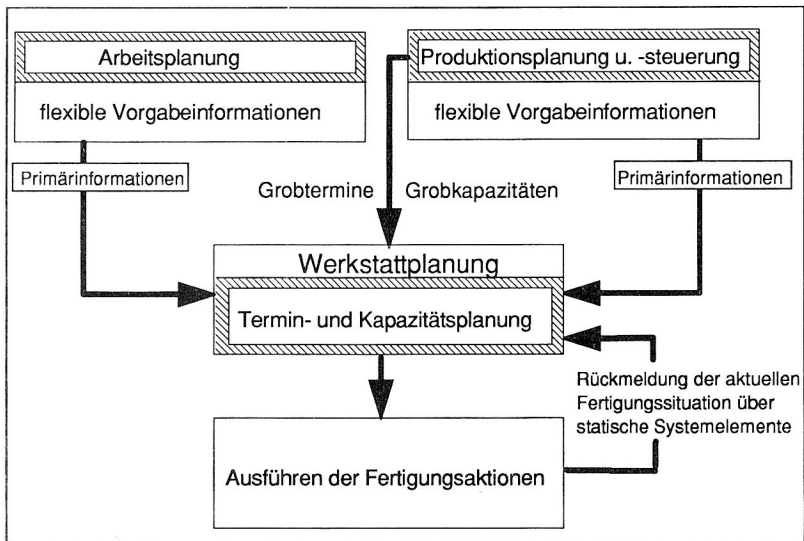


Bild 7: Termin und Kapazitätsplanung neuartiger Werkstattplanungssysteme

Die Termin- und Kapazitätsplanung neuartiger Werkstattplanungssysteme (siehe Bild 7) muß kurzfristig auf veränderte Fertigungsbedingungen unter Nutzung flexibler Vorgabeinformationen (Primärinformationen; diese betreffen statische Systemkomponenten) reagieren können. Dabei sind solche Bearbeitungsalternativen zu ermitteln, welche die vorgegebenen terminlichen und kapazitiven Rahmenbedingungen erfüllen. Sind diese nicht einzuhalten, dann werden die Konsequenzen einer Termin- und/oder Kapazitätsüberschreitung aufgezeigt. Gegebenenfalls ist darüber die PPS zu informieren.

#### **Flexibilität bei Verfügbarkeitsprüfung und Werkstattauftragsfreigabe**

Die Flexibilitätsanforderungen betreffen im wesentlichen die Verfügbarkeitsprüfung der dynamischen Betriebsmittel und der notwendigen Informationen (Sekundärinformationen). Die entsprechenden Alternativstrukturen müssen von Arbeitsplanung und PPS (siehe Bild 8) generiert und der Werkstattplanung zur Nutzung übergeben werden.

Die flexible Gestaltung der Termin- und Kapazitätsplanung stellt neue Anforderungen an die Verfügbarkeitsprüfung. Eine Flexibilitätssteigerung der Werkstattplanung gelingt nur durch die Flexibilisierung ihrer Einzelkomponenten. Die in der Termin- und Kapazitätsplanung der Werkstattplanung ermittelten **Fertigungsalternativen** sind prinzipiell im Rahmen der PPS-Vorgaben (Grobtermine, Grobkapazitäten) durchführbar und ergeben sich aus den in Arbeitsplanung und PPS generierten Primärinformationen. Das Ergebnis bildet die Grundlage für die Verfügbarkeitsprüfung der dynamischen Systemkomponenten (siehe Bild 9).

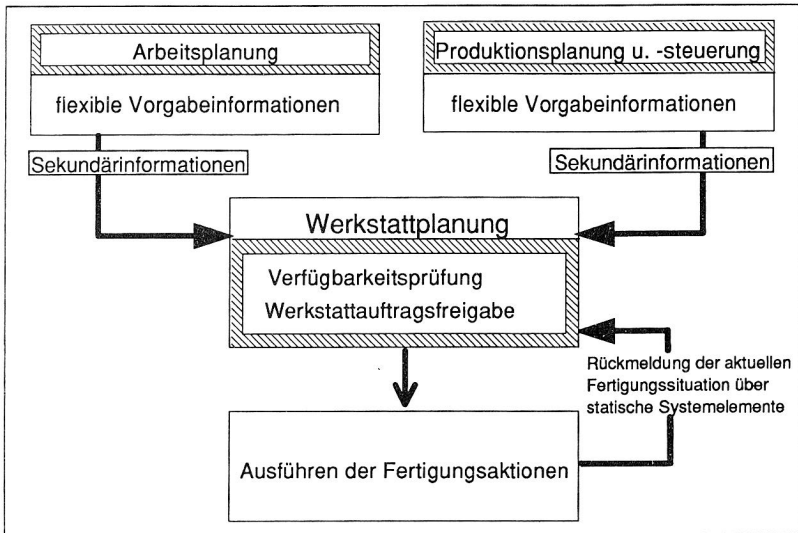


Bild 8: Verfügbarkeitsprüfung und Werkstattsauftragsfreigabe  
neuartiger Werkstattplanungssysteme

Unter Nutzung der in der Arbeitsplanung und PPS generierten flexiblen Sekundärinformationen (z. B. alternativ einsetzbare Werkzeuge) lassen sich alle sinnvollen und möglichen Fertigungsalternativen ableiten, für die die Verfügbarkeit der dynamischen Systemkomponenten gesichert ist.

### Flexibilität bei der Werkstattauftragsveranlassung

Die wichtigsten Aufgaben der Werkstattauftragsveranlassung sind die Maschinenbelegungsplanung und die Bereitstellungsplanung. In Bild 10 sind die Konsequenzen einer Flexibilitätssteigerung von Termin-, Kapazitätsplanung und Verfügbarkeitsprüfung auf die Maschinenbelegungsplanung und Bereitstellungsplanung im Rahmen der Werkstattauftragsveranlassung dargestellt.

Eine flexiblere **Maschinenbelegungsplanung** muß unter Berücksichtigung der aktuellen Fertigungssituation, der durch die Termin- und Kapazitätsplanung vorgegebenen möglichen Fertigungsalternativen und vorgegebener Optimierungskriterien eine kurzfristig disponierbare Bearbeitungsreihenfolge an den Kapazitätsstellen gewährleisten (Online-Planung).

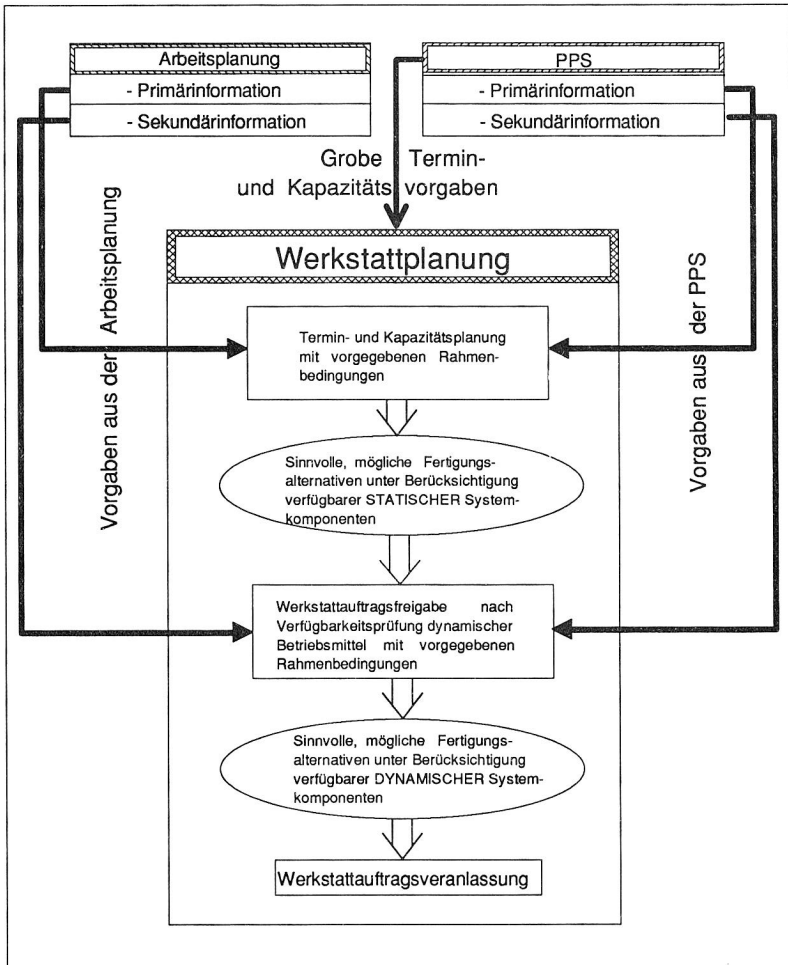


Bild 9: Flexibilitätssteigerung der Werkstattplanung

Eine flexiblere **Bereitstellungsplanung** muß unter Berücksichtigung der aktuellen Fertigungssituation, der durch die Verfügbarkeitsprüfung vorgegebenen möglichen Fertigungsalternativen und vorgegebener Optimierungskriterien eine kurzfristig disponierbare Bereitstellung der benötigten dynamischen Systemkomponenten gewährleisten (Online-Planung).

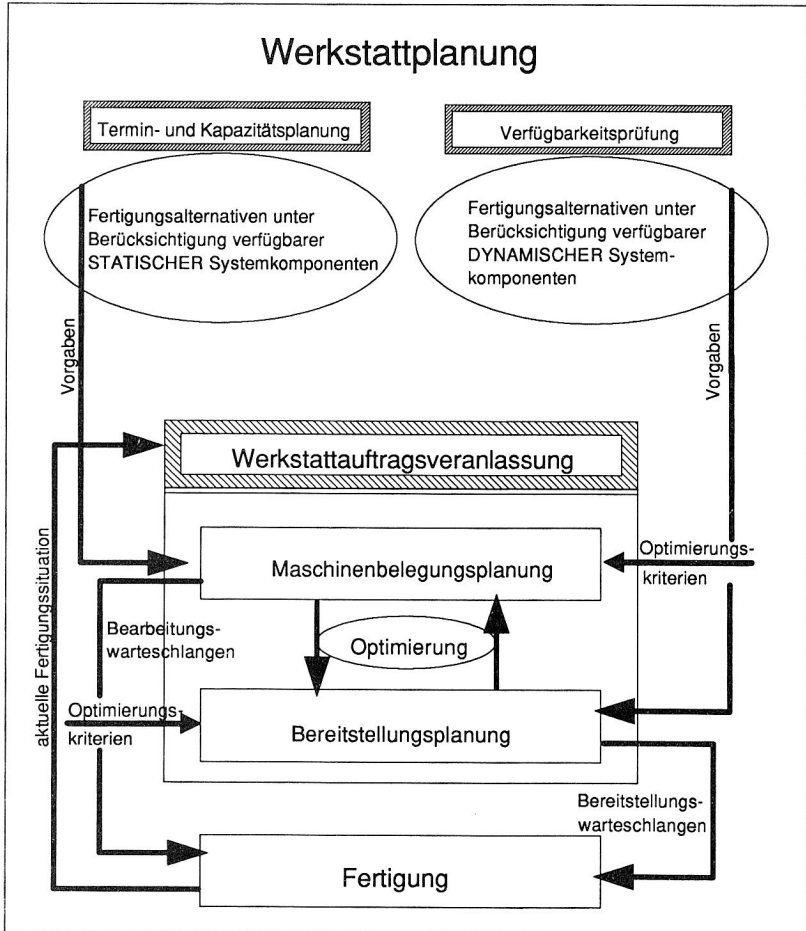


Bild 10: Werkstattauftragsveranlassung neuartiger Werkstattplanungssysteme

Die Maschinenbelegungsplanung übernimmt somit die Festlegung der für die Werkstückbearbeitung einzusetzenden statischen Systemkomponenten. Die Bereitstellungsplanung legt die für die Werkstückbearbeitung benötigten dynamischen Systemkomponenten fest. Die kurzfristige Festlegung der einsetzbaren Systemkomponenten macht eine starke Wechselwirkung bei der Optimierung von Maschinenbelegungsplanung und Bereitstellungsplanung erforderlich. Ein störungsfreier Fertigungsablauf ist durch eine sequentielle Abarbeitung der Planungsvorgaben gekennzeichnet.

Kurzfristig auftretende Störungen müssen jedoch durch die erneute Aktivierung der Werkstattplanungskomponenten (Termin- und Kapazitätsplanung, Verfügbarkeitsprüfung, Werkstattauftragsfreigabe, Werkstattauftragsveranlassung) kompensiert werden. Dabei sind hohe Anforderungen an die Online-Komponenten neuartiger Werkstattplanungssysteme zu stellen. Ist die Werkstattplanung mit diesen Aufgaben überfordert, so bleibt die Möglichkeit der Meldung an die PPS.

#### **b) Bereichsautonomie (Hierarchie)**

In Kapitel 2 dieser Arbeit wurden die Vorteile einer hierarchischen Steuerungsstruktur für Flexible Fertigungssysteme erläutert. Neuartigen Werkstattplanungssystemen wird in dieser Arbeit eine hierarchische Steuerungsstruktur zugrunde gelegt. Dies ist Ausgangspunkt für ein verteiltes Planungskonzept im Fertigungsbereich. Die Bildung von Fertigungseinheiten (z. B. Fertigungszellen) steigert die Bereichsautonomie und ermöglicht den Aufbau dezentraler Planungsfunktionen [37,57,83].

Dem Konzept der Bereichsautonomie wird durch die redundante Gestaltung der autonomen Fertigungseinheiten Rechnung getragen. Jede Strukturkomponente eines hierarchisch organisierten Fertigungssystems (Zellenrechner, Leitrechner) enthält die gleichen Basisplanungsfunktionen und ist bereichsorientiert konfiguriert.

Jeder Zellenrechner führt die notwendigen Planungsaufgaben für den Arbeitsbereich der entsprechenden Fertigungszelle aus. Der Leitrechner übernimmt die entsprechenden Planungsaufgaben auf der Leitebene, also der zellenübergreifende Bereich eines Fertigungssystems. Dabei interpretiert der Leitrechner die ihm unterstellten Zellenrechner als statische Systemkomponenten (black-box). Fertigungszellen werden dabei als komplexe Bearbeitungsstationen betrachtet.

### c) Entscheidungsvorbereitung und -unterstützung

Der zunehmend komplexer werdende Fertigungsbereich verlangt nach Mechanismen zur Steigerung der Fertigungstransparenz und Entscheidungskompetenz. Diese Anforderungen werden an eine ergonomische Mensch-Maschine-Interaktion in Fertigungssystemen [32] gestellt. Die durchzuführenden Planungsaufgaben sind davon besonders betroffen. In einem HFFS werden diese Anforderungen durch die transparente Systemstruktur (Bereichsautonomie) erfüllt.

Nur eine adäquate Betrachtung von Technik (z. B. Automatisierungsgeräte), Organisation (z. B. hierarchische Systemstruktur) und Mensch (z. B. Zellenbediener) führt über die Integrationsbestrebungen zu einem Gesamtvorteil. Die Einzelbetrachtung bzw. -überbewertung eines Faktors führt zu nicht optimal konfigurierten Fertigungssystemen.

Eine Möglichkeit, den Mensch stärker in die Gesamtstruktur zu integrieren, besteht in der Bereitstellung und Nutzung geeigneter Werkzeuge, die einer optimalen Entscheidungsvorbereitung und -unterstützung dienen.



## **Werkzeuge zur Termin- und Kapazitätsplanung**

In einem verteilten Planungssystem sind in jeder Fertigungseinheit (z. B. Zellenrechner, Leitrechner) Termin- und Kapazitätsplanungen durchzuführen. Die für einen Fertigungsbereich verantwortlichen Mitarbeiter müssen bei der Durchführung dieser Aufgaben unterstützt werden. Für die Termin- und Kapazitätsplanung liegen Primärinformationen aus Arbeitsplanung und PPS mit vielen Fertigungsalternativen vor. Unter Berücksichtigung der realen Fertigungssituation, vorgegebener Grobtermine, -kapazitäten und gewünschter Optimierungskriterien werden die weiteren Fertigungsschritte rechnerunterstützt vom Planer festgelegt.

Die Vielfalt der zu berücksichtigenden Parameter, insbesondere bei kurzfristigen Termin- und Kapazitätsplanungen ist vom Menschen ohne Informationsunterstützung schwer überschaubar. Der Bediener benötigt bei der Planung die Visualisierung einzelner Einflußparameter unter Berücksichtigung entsprechender Zielkonsequenzen und -konflikte. Dazu sind leistungsfähige Erklärungskomponenten Voraussetzung für ein rechnerunterstütztes Planungssystem.

## **Werkzeuge zur Verfügbarkeitsprüfung und Werkstattauftragsfreigabe**

Die kurzfristige Termin- und Kapazitätsplanung liefert Fertigungsalternativen, deren Durchführbarkeit von der Verfügbarkeit der dynamischen Betriebsmittel abhängig ist. Der Systembediener benötigt Informationen darüber, welche Fertigungsalternativen momentan nicht durchführbar sind, weil die Verfügbarkeit dynamischer Systemelemente nicht gewährleistet ist. Die verbleibenden Fertigungsalternativen sind zu bewerten und dienen dem Systembediener zur Entscheidungsvorbereitung bei der Werkstattplanung. Die Werkstattauftragsfreigabe kann erfolgen, wenn nach der kurzfristigen Termin-, Kapazitätsplanung und Verfügbarkeitsprüfung mindestens eine Fertigungsalternative durchführbar ist.

### Werkzeuge zur Werkstattauftragsveranlassung

In der Werkstattauftragsveranlassung ist aus einer Anzahl von möglichen Fertigungsalternativen ein optimaler Bearbeitungspfad zu selektieren. Sowohl im störungsfreien Fall, als auch bei der störungsbedingten Umplanung braucht der Systembediener dazu Informationsunterstützung. In Bild 11 werden dazu einige Parameter genannt.

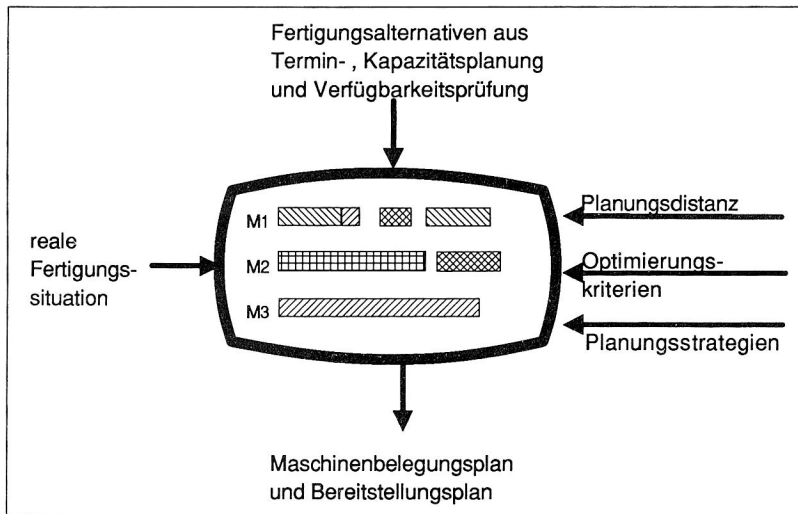


Bild 11: Informationsunterstützung bei der Werkstattauftragsveranlassung

Nach der Durchführung mehrerer Planungsschritte im Bereich der Werkstattplanung (siehe Bild 12) liegen ein optimierter Maschinenbelegungsplan und Bereitstellungsplan unter Vorgabe eines definierten Bearbeitungspfades je Werkstück (bzw. Fertigungslos) und unter Berücksichtigung der aktuellen Fertigungssituation vor.

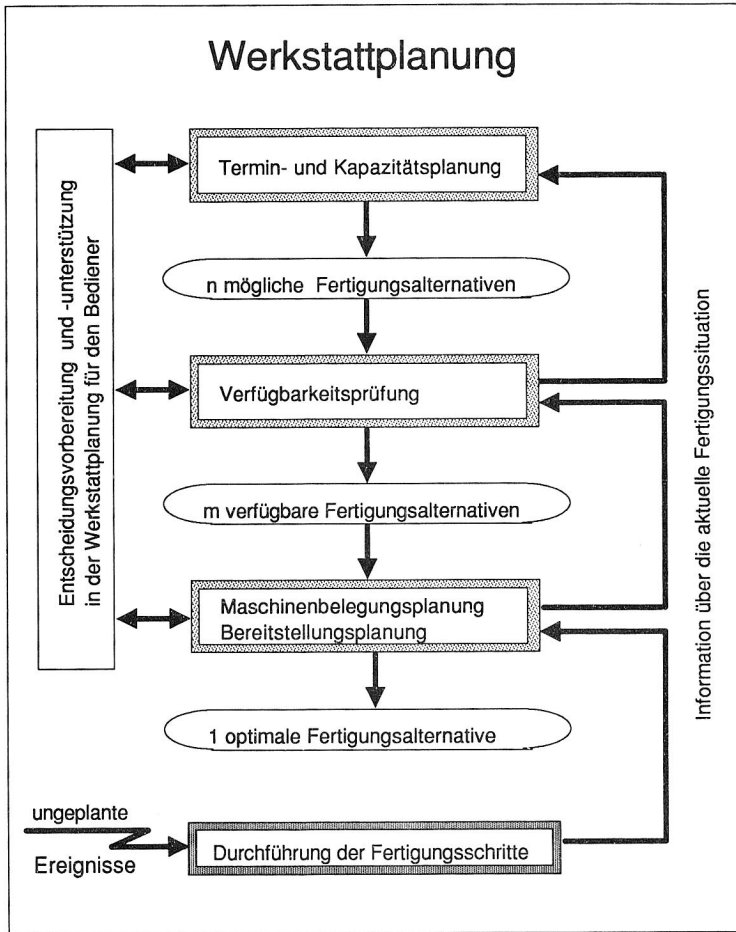


Bild 12: Kompensation ungeplanter Ereignisse  
im Bereich der Werkstattplanung

Verändern sich die Fertigungsvoraussetzungen aufgrund ungeplanter Ereignisse (Störungen) so, daß die vorgegebenen Maschinenbelegungs- und Bereitstellungspläne nicht mehr durchführbar sind, dann muß kurzfristig im betroffenen Fertig-

ungsbereich (z. B. in der Fertigungszelle) umdisponiert werden. Je nach Auswirkung der Störung muß eine neue Termin- und Kapazitätsplanung und/oder Verfügbarkeitsplanung und/oder Maschinenbelegungsplanung und Bereitstellungsplanung durchgeführt werden. Damit dies in möglichst kurzer Zeit geschehen kann, benötigt der Bediener effiziente Werkzeuge zur Entscheidungsunterstützung (siehe Bild 12).

#### **d) Optimierung**

Zur Steigerung der Flexibilität werden im Bereich der Werkstattplanung viele durchführbare Fertigungsalternativen betrachtet und unter Berücksichtigung unterschiedlicher Parameter optimiert und bewertet.

Die Vorgabe vieler Fertigungsalternativen aus Arbeitsplanung und PPS ermöglicht eine effektive und flexible Optimierung im Bereich der Werkstattplanung. Neuartige Werkstattplanungssysteme müssen diese Anforderungen erfüllen.

#### **e) Simulation**

In hierarchisch organisierten Fertigungssystemen sind auf jeder Hierarchiestufe Entscheidungen zu fällen. Besondere Anforderungen entstehen beim Auftreten ungeplanter Ereignisse.

#### **Untersuchung verschiedener Optimierungskriterien**

Optimierungskriterien wirken sich unterschiedlich auf die Werkstattplanungsfunktionen Termin- und Kapazitätsplanung, Werkstattauftragsfreigabe nach Verfügbarkeitsprüfung und Werkstattauftragsveranlassung aus.

Unter Berücksichtigung der in der Arbeitsplanung vorgegebenen Planwerte können verschiedene fertigungsrelevante Opti-

mierungskriterien und Kombinationen davon simulativ untersucht werden. Die Auswirkungen auf die zu ermittelnden Maschinenarbeitspläne und Bereitstellungspläne lassen sich dabei bestimmen und Hinweise auf denkbare Planungsschwächen können abgeleitet werden. Erste Erfahrungswerte hinsichtlich erzielbarer Optimierungswerte wie Gesamtdurchlaufzeiten bzw. Gesamtkosten können festgestellt werden. Natürlich unterstellen diese Simulationsuntersuchungen einen störungsfreien Fertigungsablauf. Somit sind die dabei ableitbaren Aussagen und Ergebnisse Interpretationen für den störungsfreien (jedoch nicht realistischen) Idealfall.

#### **Untersuchung der Auswirkungen ungeplanter Ereignisse auf Maschinenbelegungspläne und Bereitstellungspläne**

Ein komplexes, rechnerunterstütztes Fertigungssystem kann in seiner Ablaufdynamik vom Menschen nur schwer überblickt werden. Aus diesem Grunde ist die Bereitstellung von Simulationswerkzeugen äußerst wichtig, um die Entscheidungsspielräume und Ablaufdynamik zu untersuchen. Sowohl als Projektierungshilfsmittel beim Auf- und Ausbau von FFS als auch als Entscheidungsvorbereitungs- und Lernsystem für die verantwortlichen Mitarbeiter sind Simulationssysteme unabdingbar.

#### **Beispiel:**

Werden während eines simulierten Fertigungsablaufes Störungen berücksichtigt, dann sind Untersuchungen und Aussagen darüber, unter welchen Umständen eine möglichst effektive Weiterarbeit trotzdem noch möglich ist, machbar. Entsprechende Sicherheitsmaßnahmen können dann schon vor Fertigungsbeginn ergriffen werden.

Wünschenswert ist, daß für Simulation und Online-Planung die gleichen Planungsalgorithmen genutzt werden.

## **Simulationssystem als Schulungssystem**

Simulationssysteme zur Werkstattplanung sind für den Einsatz als Schulungs- und Trainingssysteme denkbar.

### **Beispiel:**

Neue Mitarbeiter sollen in das verteilte Werkstattplanungssystem eingearbeitet werden, um später ein rechnerunterstütztes Fertigungssystem im Realbetrieb betreuen zu können.

### **f) Durchgängigkeit**

Neuartige Werkstattplanungssysteme müssen, um auf veränderte Fertigungssituationen (Störungen) schnell reagieren zu können, eine durchgängige und online-orientierte Informationsstruktur aufweisen. Die Forderung nach Durchgängigkeit der Informationsflüsse richtet sich nicht nur an die interne Ablaufstruktur einer Planungseinheit (z. B. Zellenrechner), sondern betrifft besonders auch die Durchgängigkeit der Informationsflüsse zwischen den Ebenen eines verteilten Planungssystems.

In Bild 13 wird in stark idealisierter Weise (ohne Berücksichtigung der Datenrückflüsse) die Forderung nach Durchgängigkeit der Informationsflüsse im hierarchisch organisierten Fertigungsbereich dargestellt. Im Mittelpunkt der Diskussion stehen die Funktionen der verteilten Werkstattplanung. Die wichtigsten Funktionen einer neu konzipierten Werkstattplanung wurden bereits vorgestellt und die durchgängige Informationsstruktur im Sinne einer schnellen und flexiblen Reaktionsfähigkeit diskutiert.

Weitere Anforderungen bezüglich der Durchgängigkeit sind in der hierarchischen Struktur der Werkstattplanung zu erkennen. So existieren beispielsweise unterschiedliche konzeptionelle Sichtweisen auf System- bzw. Zellenebene eines hierarchischen Fertigungssystems.

### Systemebene

Bei der Termin- und Kapazitätsplanung auf der Systemebene werden die untergeordneten Fertigungszellen als abgeschlossene Terminierungs- und Kapazitätsinstanzen betrachtet. Die dabei generierten Fertigungsalternativen haben Zellenbezug. Entsprechendes gilt für das Ergebnis der Verfügbarkeitsprüfung. Die Werkstattauftragsveranlassung führt eine Zellenbelegungsplanung und eine zellenbezogene Bereitstellungsplanung durch. Die jeweiligen Ergebnisse (Zellenbelegungsplan, Zellenbereitstellungsplan) beziehen sich auf selektierte Fertigungszellen.

### Zellenebene

Der Termin- und Kapazitätsplanung auf Zellenebene liegen die Vorgaben aus der entsprechenden Zellenwarteschlange und Bereitstellungswarteschlange zugrunde. Dadurch ist die Durchgängigkeit der notwendigen Planungsinformationsflüsse zwischen System- und Zellenebene gewährleistet. Die auf Zellenebene ermittelten Fertigungsalternativen haben zelleninterne Relevanz. Entsprechend finden im Zellenbereich Maschinenbelegungs- und Bereitstellungsplanungen statt. Das Ergebnis wird in Form von Maschinenwarteschlangen und Bereitstellungswarteschlangen dargestellt.

### g) Integrationsfähigkeit

Die Generierung und Vorgabe flexibler Alternativstrukturen aus Arbeitsplanung (siehe Abschnitt 3.4) und PPS (siehe Abschnitt 3.5) sollen die Einbettung neuartiger Werkstattplanungssysteme in ein verteiltes Planungssystem für den Produktionsbereich ermöglichen. Durch die Integration der Planungsabläufe wird eine Flexibilitätssteigerung im Werkstattbereich (Teilefertigung) erreicht.

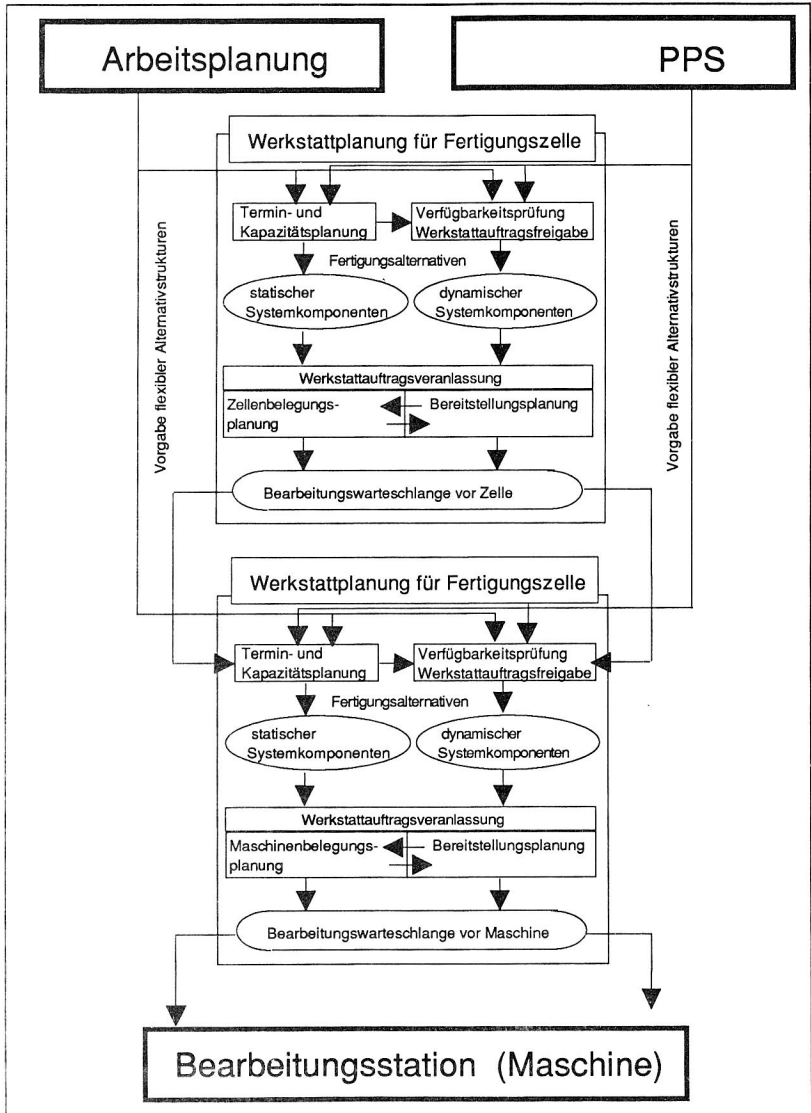


Bild 13: Durchgängigkeit neuartiger Werkstattplanungssysteme



### 3.4 Arbeitsplanung (CAP)

#### 3.4.1 Aufgaben der Arbeitsplanung

Die **Arbeitsplanung** wird vom Ausschuß für wirtschaftliche Fertigung e. V. (AWF) als Zusammenfassung aller einmalig auftretenden Planungsmaßnahmen definiert, welche unter ständiger Berücksichtigung der Wirtschaftlichkeit die Fertigung eines Erzeugnisses sicherstellen [1]. Es werden in der Arbeitsplanung kurzfristige, mittelfristige und langfristige Planungsaufgaben durchgeführt.



Bild 14: Aufgaben in der Arbeitsplanung (nach [19])

Bei der Arbeitsplangenerierung [1,71,85] müssen folgende Tätigkeiten durchgeführt werden :

- Festlegung des Rohteils.
- Festlegen der Bearbeitungsfolge (Arbeitsgänge).
- Auswählen und Festlegen der Fertigungsmittel.
- Bestimmen und Festlegen von Planwerten.

### **3.4.2 Konzeptionelle Anforderungen an neuartige Arbeitsplangenerierungssysteme**

Die in Abschnitt 3.3 vorgestellten Flexibilisierungsaspekte stellen neue Anforderungen an bestehende Arbeitsplangenerierungssysteme [89,90,103]. Im Abschnitt 3.2 wurden allgemeine Anforderungen an verteilte Planungssysteme im Produktionsbereich postuliert, die als Grundlage für die Konzeption neuartiger Arbeitsplangenerierungssysteme dienen.

#### **a) Flexibilität**

Die Flexibilitätsanforderungen im Fertigungsbereich haben starke Auswirkungen auf die Arbeitsplangenerierung. Die Forderung nach kurzfristigen Reaktionsmechanismen im Fertigungsbereich macht die Bereitstellung flexibler Primär- und Sekundärinformationen (siehe Bild 9) aus der Arbeitsplanung erforderlich.

#### **Festlegen und Beschreiben von Rohteilen, Halbfertigteilen und Fertigteilen**

Die Bestimmungsfaktoren für Rohteile werden im wesentlichen schon während der Konstruktion des Teils festgelegt. Die Beschreibung des zu fertigenden Werkstückes wird üblicherweise über die in der Konstruktion erstellten **Zeichnungen** [93,97] vorgenommen. Andere Werkstückbeschreibungsformen werden in [43,72,95,97] erläutert. Eine weitere Beschreibungsform,

welche gleichermaßen für das Rohteil, Halbfertigteile und Fertigteil eines zu fertigenden Werkstückes geeignet ist, sind **Zustandsparametervektoren**. Alle geometrischen, qualitativen, kostenmäßigen und zeitlichen Bestimmungsfaktoren eines Rohteiles, Halbfertigteiles und Fertigteiltes lassen sich in Zustandsparametervektoren (ZPV) darstellen und beschreiben. In Bild 15 sind beide Beschreibungsmethoden einander gegenübergestellt.

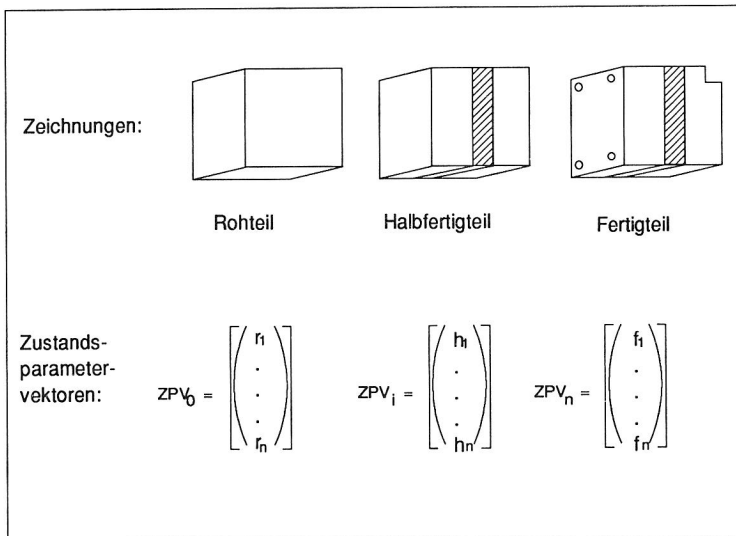


Bild 15: Beschreibungsmethoden für Rohteil, Halbfertigteil und Fertigteil

Zustandsparametervektoren (ZPV) ermöglichen es, den Ferti-gungsverlauf und die Veränderungen am Werkstück analytisch darzustellen und zu beschreiben. Für die Algorithmisierbarkeit der Arbeitsplangenerierung ist diese Beschreibungsmethode besonders geeignet. Die Festlegung verschiedener Rohteile ist dann sinnvoll, wenn unterschiedliche Geometrievarianten verwendbar sind. Beispielsweise wird durch eine differenzierte Preispolitik die Aufnahme unterschiedlicher Rohteilgeometrien wirtschaftlich sinnvoll.

In bestehenden Arbeitsplangenerierungssystemen gibt es keine durchgängigen Beschreibungsmethoden für Rohteile, Halbfer-tigteile und Fertigteile.

### **Festlegen alternativer Bearbeitungsfolgen**

Die Bearbeitungsfolge eines Werkstückes hängt stark von den technologischen Bearbeitungsmöglichkeiten ab. Alle technolo-gisch sinnvollen Fertigungsalternativen sollten in dieser Phase der Arbeitsplangenerierung Berücksichtigung finden. In der Regel unterstützen bestehende Arbeitsplangenerierungs-methoden alternative Bearbeitungstechnologien nicht konse-quent [55,56,83]. Die Bearbeitungsfolge eines Werkstückes wird häufig streng sequentiell festgelegt. Dabei wird auf-grund der Erfahrung des Arbeitsplaners oft die technolo-gisch beste Folge von Bearbeitungsschritten ausgewählt und festgelegt.

Die Generierung streng sequentieller technologischer Bear-beitungsfolgen schränkt das Flexibilitätspotential im gesamen Produktionsbereich stark ein. Die Angabe und Bereitstel-lung technologischer Alternativen wird in dieser Arbeit als Grundvoraussetzung für die Flexibilitätssteigerung im Ferti-gungsbereich postuliert. Durch die Verwendung von ZPV als Beschreibungsmethodik für alternative Bearbeitungsfolgen eines zu fertigenden Werkstückes, sind auch die strukturel-len Voraussetzungen, die zu einer Flexibilitätserhöhung

führen, erfüllt. Ähnliche Konzepte sind in [16,55,83,88] beschrieben.

Technologische Bearbeitungsschritte können durch die Angabe der Veränderungen im ZPV vor und nach einem Bearbeitungsschritt beschrieben werden. Parameteränderungen im ZPV sind mit der Durchführung technologischer Bearbeitungsschritte gleichzusetzen. Bild 16 zeigt die beispielhafte Verwendung von ZPV bei der Beschreibung alternativer Bearbeitungsfolgen.

Kurzfristig auftretende Störungen oder andere ungeplante Ereignisse in der Fertigung bergen bei sequentiellen Bearbeitungsstrukturen die Gefahr in sich, daß der Bearbeitungsfortschritt unterbrochen oder blockiert wird. Alternative Bearbeitungsfolgen vergrößern den Entscheidungsfreiraum bei kurzfristigen Umplanungsmaßnahmen im Fertigungsbereich.

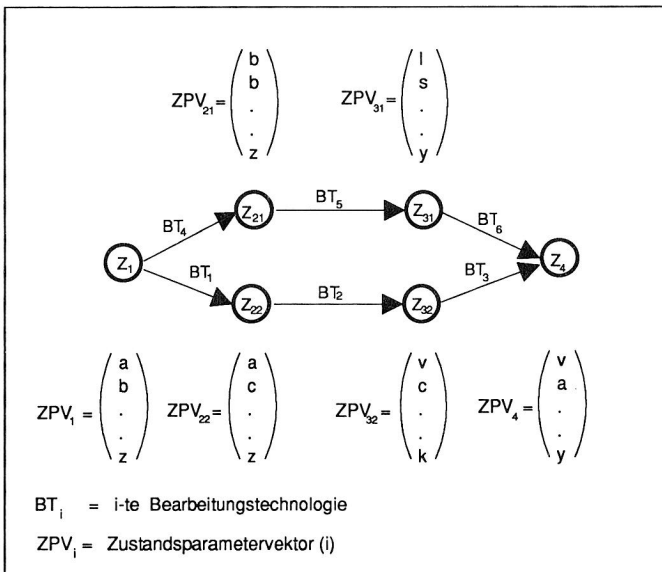


Bild 16: Festlegen alternativer Bearbeitungsfolgen für ein Werkstück

### Auswählen und Festlegen alternativer Fertigungsmittel

In modernen Arbeitsplangenerierungssystemen existiert die Möglichkeit, für jeden technologischen Bearbeitungsschritt einen Bearbeitungsort oder eine Bearbeitungsgruppe (z. B. Maschine oder eine Maschinengruppe) anzugeben. Zumindest die Angabe einer Maschinengruppe kann als Beitrag zur Flexibilitätssteigerung im Planungs- und Fertigungsbereich interpretiert werden. Ein wichtiger Schritt zur Flexibilitätssteigerung ist in der Möglichkeit zu sehen, beliebige Maschinenalternativen für einen Bearbeitungsschritt angeben zu können.

Die Zustandsübergänge  $BT_i$  in Bild 16 werden dazu als Vektoren interpretiert, deren Komponenten alternative statische und dynamische Systemkomponenten beschreiben. Als **Beispiel** wird der Zustandsübergang  $BT_4$  in Bild 16 näher erläutert.

$BT_4$  realisiert den Zustandsübergang von  $Z_1$  nach  $Z_{21}$ , was durch die entsprechenden ZPV beschrieben wird. Der Bearbeitungsschritt kann an unterschiedlichen (alternativen) Maschinen ( $M_1, \dots, M_n$ ) mit alternativen Werkzeugsätzen ( $WZS_1, \dots, WZS_n$ ) und NC-Programmen ( $NC-Prog_1, \dots, NC-Prog_n$ ) durchgeführt werden.

Die Verfügbarkeit solcher Alternativstrukturen ist Voraussetzung für das Konzept verteilter Planungssysteme.

### Bestimmen und Festlegen von Planwerten

Für jeden vorgegebenen Bearbeitungsschritt ist die Angabe von Planwerten wie Bearbeitungszeit, Bearbeitungskosten, usw. erforderlich. Diese beziehen sich auf die vorgegebenen Alternativen der statischen und dynamischen Systemkomponenten. Die Verfügbarkeit der erforderlichen Planwerte wird vorausgesetzt.

## b) Bereichsautonomie (Hierarchie)

Hierarchisch strukturierte Fertigungsbereiche, wie sie dieser Arbeit zugrunde gelegt wurden, nutzen die Vorteile der Bereichsautonomie. Daraus ergeben sich neue Anforderungen an die Arbeitsplangenerierung. Bestehende Arbeitsplangenerierungssysteme unterstützen den Aspekt der Bereichsautonomie nicht [51].

In Bild 17 wird der Zusammenhang zwischen einem hierarchisch organisierten Fertigungssystem und hierarchisch strukturierten Arbeitsplänen dargestellt. Sowohl bei der Festlegung der Bearbeitungsfolge, als auch bei der Auswahl der Fertigungsmittel wird die Organisationsstruktur des Fertigungsbereiches berücksichtigt. In hierarchischen Systemen erscheint es sinnvoll, die Arbeitsplanstruktur entsprechend anzupassen.

Die Beschreibung von Zellenarbeitsplänen, Maschinenarbeitsplänen und Arbeitsgängen (Bearbeitungsschritte) ist die Konsequenz der Hierarchisierung.

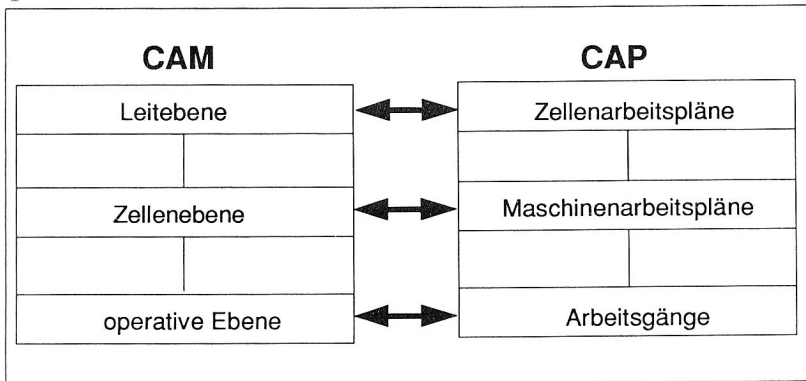


Bild 17: Hierarchisierung von Fertigungsorganisation und Arbeitsplangenerierung

Der **Zellenarbeitsplan** abstrahiert von den vorhandenen Maschinen und beschreibt als mögliche Bearbeitungsorte die Fertigungszellen. Der **Maschinenarbeitsplan** beschreibt alle möglichen Bearbeitungsorte einer Fertigungszelle für einen Bearbeitungsschritt. Die **Arbeitsgänge** bzw. Arbeitsschritte legen ausführbare Bearbeitungsschritte eines Werkstückes an den Maschinen fest.

### c) Entscheidungsvorbereitung und -unterstützung

Automatisierte Produktionsabläufe müssen dem Menschen durch Werkzeuge zur wirkungsvollen Informations- und Entscheidungsunterstützung transparent gemacht werden [54].

Dazu ist

- a) ein durchgängiger, bidirektionaler Informationsfluß im verteilten Planungssystem zu gewährleisten (Bereitstellung von Daten) und
- b) die Möglichkeit der Bedienerinteraktion (Dialogsystem) erforderlich.

Wie in Bild 18 dargestellt, werden zur Entscheidungsvorbereitung und -unterstützung bei der Arbeitsplangenerierung Informationen aus der Fertigung (BDE/MDE), der Konstruktion und der PPS benötigt. Das Dialogsystem unterstützt den Bediener bei der Arbeitsplangenerierung.

Voraussetzung für eine effektive Arbeitsplangenerierung ist ein dialogorientiertes Datenbereitstellungssystem. Um die Flexibilitäts- und Hierarchisierungsanforderungen erfüllen zu können, ist der Aufbau und die Pflege von Informationsbibliotheken notwendig. Der Einsatz technischer Datenbanken [15,22,84] scheint dafür sehr sinnvoll. Für die flexible Arbeitsplangenerierung bietet sich eine Klassifizierung der Informationsbibliotheken in Stamm-, Funktions- und Strukturbibliotheken an.



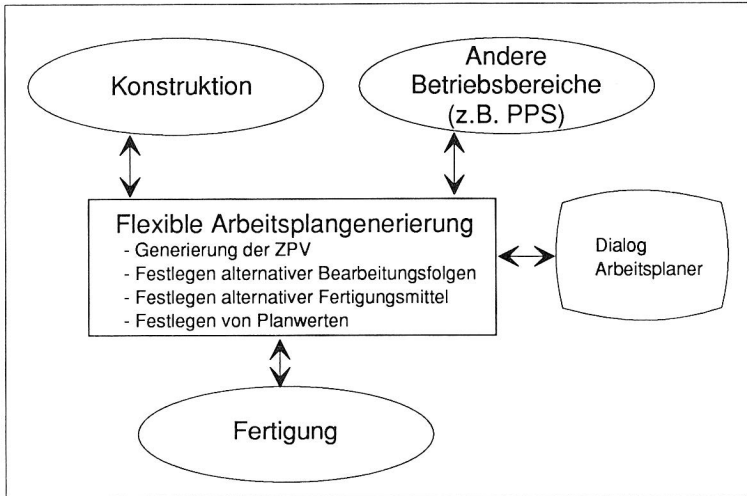


Bild 18: Bereitstellung von Daten und Dialog bei der flexiblen Arbeitsplangenerierung

Beispiele für Informationsbibliotheken zur Arbeitsplangenerierung und typische Anfragen eines Arbeitsplaners:

#### Funktionsbibliotheken

- Maschinenfähigkeitsbibliothek (MFB)  
Welche technologischen Bearbeitungsschritte können an einer Bearbeitungsstation ausgeführt werden ?
- Zellenfähigkeitsbibliothek (ZFB)  
Welche Bearbeitungstechnologien können in einer Fertigungszelle durchgeführt werden ?
- Systemfähigkeitsbibliothek (SFB)  
An welchen Arbeitsstationen kann ein bestimmter technologischer Bearbeitungsschritt durchgeführt werden ?

### **Strukturbibliotheken**

- Fertigungsstrukturbibliothek (FSB)  
Beschreibung der technologischen Bearbeitungsschritte eines Werkstücktyps in Graphstruktur !
- Maschinenarbeitsplanbibliothek (MAB)  
Beschreibung der arbeitsplatzbezogenen Bearbeitungsschritte eines Werkstücktyps in Graphstruktur !
- Zellenarbeitsplanbibliothek (ZAB)  
Beschreibung der fertigungszellenbezogenen Bearbeitungsschritte eines Werkstücktyps in Graphstruktur !

### **Stammbibliotheken**

- Rohteilgeometriebibliothek (RGB)  
Welche Rohteile sind zur Herstellung eines Fertigteils verwendbar ?
- Technologiebibliothek (TB)  
Welche Fertigungstechnologien sind für einen Bearbeitungsschritt anwendbar ?
- Werkzeugbibliothek (WZB)  
Welches Werkzeug ist für die Durchführung eines Bearbeitungsschrittes einsetzbar ?
- Betriebsmittelbibliothek (BMB)  
Welche Betriebsmittel sind zur Werkstückbearbeitung notwendig ?
- Informationsbibliothek (NC-/RC-Programme) (IB)  
Welche NC-/RC-Programme sind für bestimmte Bearbeitungsschritte notwendig ?
- Systeminformationsbibliothek (SIB)  
Welche dynamischen Systemkomponenten werden für die Durchführung eines technologischen Bearbeitungsschrittes an einer Bearbeitungsstation benötigt ?
- Systemstrukturbibliothek (SSB)  
Welche Arbeitsstation ist welcher Fertigungszelle zugeordnet ?

Stamm- und Funktionsbibliotheken werden bei der Generierung der Strukturbibliotheken benötigt.

#### d) Optimierung

Bei der Generierung von arbeitsplanrelevanten Informationsstrukturen (Strukturbibliotheken) wird besonders großer Wert auf Flexibilitätsaspekte gelegt. Die darin enthaltenen flexiblen Datenstrukturen werden als **Fertigungsstruktur-, Maschinenarbeitsplan- und Zellenarbeitsplangraphen** bezeichnet. Die Strukturgraphen beschreiben eine große Menge an verschiedenen, jedoch noch nicht bewerteten, Bearbeitungsalternativen.

Es wird die Aufgabe an die Arbeitsplanung gestellt, Möglichkeiten bereitzustellen, die flexibel ausgelegten Vorgabestrukturen unter Anwendung unterschiedlicher Kriterien bewerten zu können. Der Arbeitsplaner soll Kriterien anwenden können, welche sich auf statische und dynamische Systemkomponenten optimierend auswirken (werkstückbezogene, egoistische Optimierungskriterien). Natürlich ist auch die Kombination verschiedener Optimierungskriterien denkbar und führt zu unterschiedlichen Bewertungen der flexiblen Vorgabestrukturen. Bild 19 zeigt ein Beispiel für die Bewertung eines Maschinenarbeitsplanes.

Die zunächst unbewerteten Arbeitsplanstrukturen eignen sich besonders dazu, wechselnde Fertigungseinflüssen bzw. Optimierungswünsche berücksichtigen zu können. Diese Flexibilitätsforderungen müssen von neuartigen Arbeitsplangenerierungssystemen erfüllt werden.

#### Ergebnis der Optimierung bei der Arbeitsplangenerierung

Unter Verwendung wählbarer Optimierungskriterien werden aus Fertigungsstrukturgraphen (FSG), Maschinenarbeitsplangraphen (MAPLG) und Zellenarbeitsplangraphen (ZAPLG) bewertete Arbeitsplangraphen generiert (siehe Bild 19).

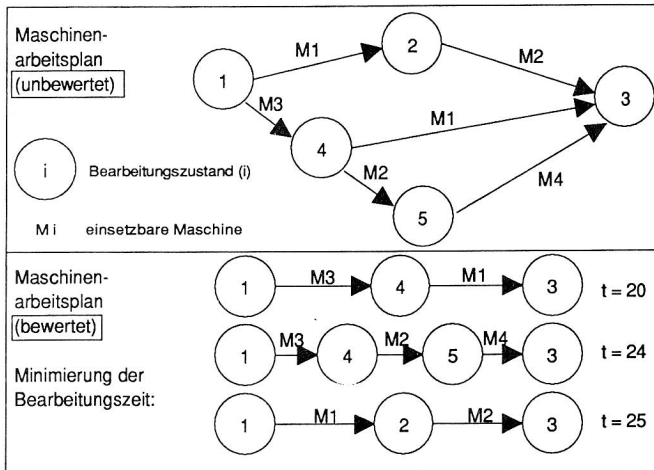


Bild 19: Bewertung eines Maschinenarbeitsplanes

e) Simulation

Anforderungen an ein Simulationssystem bei der Arbeitsplangenerierung

Die Untersuchung von Auswirkungen einzelner oder kombinierter Optimierungskriterien auf Maschinen- und Zellenarbeitspläne dient dem Arbeitsplaner zur Entscheidungsunterstützung. Unerwartete Ereignisse können während der Arbeitsplangenerierung noch nicht berücksichtigt werden. Sie treten erst im laufenden Betrieb, meist spontan und unerwartet auf. Dann ist es jedoch sehr vorteilhaft, wenn Handlungsalternativen vorliegen und der Fertigungsablauf weitergeführt werden kann. Bei der Optimierung und Bewertung der generierten Maschinen- und Zellenarbeitspläne, sind Simulationsuntersuchungen unabdingbar. Dabei können "risikoreiche" Bearbeitungsschritte eines Maschinen- oder Zellenarbeitsplanes simulativ ermittelt werden. Die Berücksichtigung von Zusatzalternativen ist dann anzuraten.

### 3.5 Produktionsplanung und -steuerung (PPS)

#### 3.5.1 Aufgaben der Produktionsplanung und -steuerung

Die Arbeitssteuerung wird vom Ausschuß für wirtschaftliche Fertigung e.V. (AWF) als Zusammenfassung aller Maßnahmen definiert, die für eine der Arbeitsplanung entsprechende Auftragsabwicklung erforderlich sind [68].

Übereinstimmend sind in [8,39,41] folgende Planungsaufgaben im Rahmen der PPS (siehe Bild 20) durchzuführen.

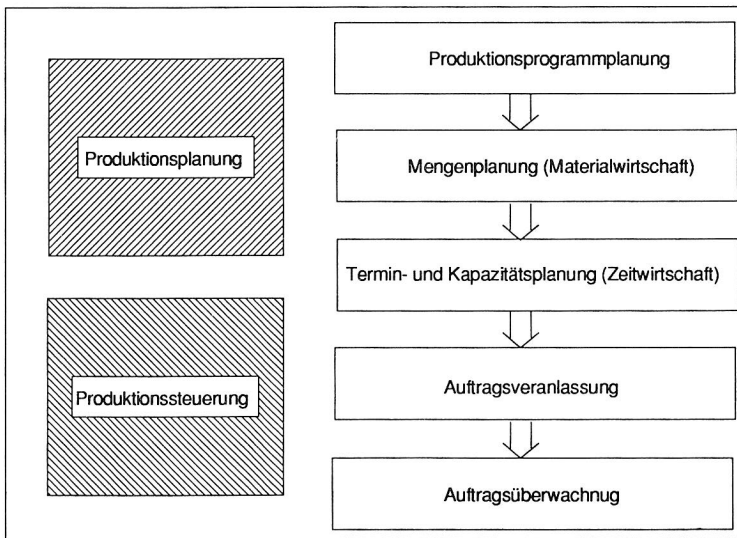


Bild 20: Aufgaben der Produktionsplanung und -steuerung

### 3.5.2 Konzeptionelle Anforderungen an neuartige Belegungsplanungssysteme

Eine zentrale Forderung bei der Gestaltung und Konzeption neuartiger PPS-Systeme [29,65] ist die Generierung flexibler Vorgabeinformationen für den Fertigungsbereich.

Für den Aufgabenbereich der **Belegungsplanung** im Rahmen der Auftragsveranlassung werden im Rahmen dieser Arbeit neue Anforderungen abgeleitet und ein Konzept beschrieben, dem die in Abschnitt 3.2 formulierten sechs Postulate zugrunde gelegt werden. Die Belegungsplanung stellt eine spezielle Komponente neuartiger PPS-Systeme dar. Die in den Abschnitten 3.3 (Werkstattsteuerung) und 3.4 (Arbeitsplanung) diskutierten Konzeptanforderungen wirken sich in besonderer Weise auf den hier zu betrachtenden Aufgabenbereich der Belegungsplanung aus. Detaillierte Untersuchungen zur Flexibilitätssteigerung der Bereitstellungsplanung werden in dieser Arbeit nicht durchgeführt.

#### a) Flexibilität

Die Forderung nach Flexibilitätssteigerung bei der Maschinen-, Zellen- und Systembelegungsplanung im Fertigungsbereich wurde bereits beschrieben. Es ist sicherzustellen, daß bei kurzfristig auftretenden Störungen im Fertigungsbereich Bearbeitungsalternativen verfügbar sind, welche eine schnelle Umdisposition ermöglichen und damit einen möglichst unterbrechungsfreien Fertigungsbetrieb, auch beim Auftreten ungeplanter Ereignisse, gewährleisten (Online-Planung).

Für die Planungsaufgaben im PPS-Bereich wird ein störungsfreier Fertigungsbetrieb unterstellt. Dies führt zum Konzept der Offline-Planung im Sinne der Belegungsplanung. In Bild 21 ist der Zusammenhang zwischen der Offline-Belegungsplanung und der Online-Werkstattplanung schematisch dargestellt. Darin wird auch der Zusammenhang zwischen Belegungsplanung und Bereitstellungsplanung (Online- und Offline-Bereich) erläutert.

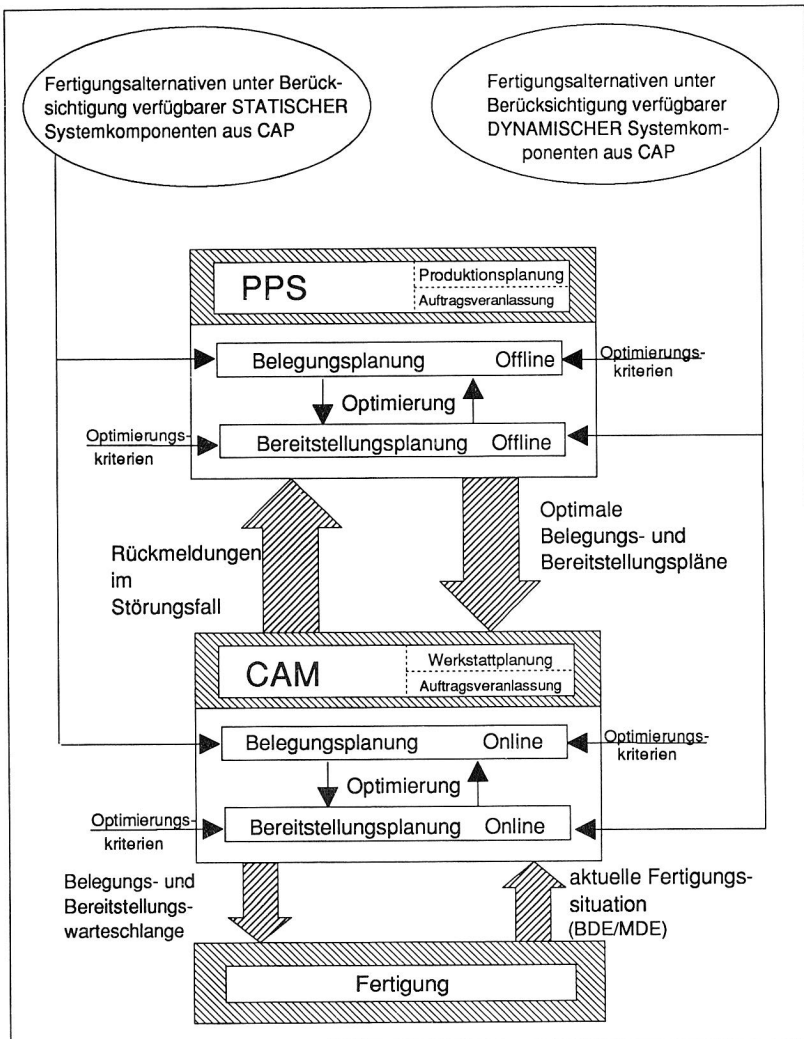


Bild 21: Zusammenhang zwischen Offline-Planung (PPS) und Online-Planung (CAM) bei der Belegungs- und Bereitstellungsplanung

Das Konzept zur flexiblen Online-Planung im Fertigungsbereich wurde schon in Abschnitt 3.3.2 vorgestellt.

Das **Offline-Planungskonzept** für die Belegungs- und Bereitstellungsplanung als Komponente der Auftragsveranlassung weicht von den Online-Anforderungen im Fertigungsbereich ab. Unter der Annahme eines störungsfreien Fertigungsbetriebes sollen die Ergebnisse der Belegungsplanung in optimaler Weise im Fertigungsbereich umgesetzt werden.

Treten jedoch während der Fertigung ungeplante Ereignisse auf, dann wird eine **Online-Planung** im Werkstattbereich durchgeführt, so daß Abweichungen von der ursprünglichen Planung (Belegungs- und Bereitstellungsplanung) und den entsprechenden Optimierungskriterien zu erwarten sind. Können die von PPS vorgegebenen Termine nicht eingehalten werden, so ist davon die PPS zu unterrichten. Diese kann im Bedarfsfalle entsprechende Maßnahmen ergreifen.

Die angesprochene Flexibilitätssteigerung bei der Belegungsplanung (PPS) kann durch Offline-Vorgabe verschiedener Maschinen-, Zellen- und Systembelegungsalternativen erreicht werden und während der Online-Planung im CAM-Bereich genutzt werden.

#### **b) Bereichsautonomie (Hierarchie)**

Während in der Arbeitsplanung die Einzelwerkstückbetrachtung im Vordergrund steht (egoistische Planung), müssen in der PPS Aufträge oder Lose (Zusammenfassung mehrerer Werkstücke) berücksichtigt werden (kollegiale Planung). Die im Fertigungsbereich zugrunde gelegte hierarchische Organisationsstruktur (siehe auch Abschnitt 2.2.3) muß bei Planungsaufgaben im PPS-Bereich berücksichtigt werden [87]. Diese Forderung wird am Beispiel der Belegungsplanung weiter untersucht. Der Gestaltungsgrundsatz der Hierarchisierung bietet die Möglichkeit, differenzierte Handlungsspielräume aufzubauen und zu nutzen.



Durch die Entkopplung von Offline- und Online-Planungsaufgaben wird dem Hierarchisierungsprinzip Rechnung getragen. Die Ergebnisse einer offline-durchgeführten Belegungsplanung liefern gute Startbedingungen (mit Alternativen) für ein einzuplanendes Auftragspektrum. Diese Anforderungen haben zur Konsequenz, daß der Offline-Belegungsplanung ein angemessener Entscheidungsfreiraum (Planungsfreiraum) eingeräumt werden muß. Die daraus abgeleitete Entscheidungs- und Bereichsautonomie trägt zur Flexibilitätssteigerung im Fertigungsbereich bei.

#### **c) Entscheidungsvorbereitung und -unterstützung**

Für die Belegungsplanung im PPS-Bereich werden Informationen aus den angrenzenden Betriebsbereichen (Arbeitsplanung und Werkstattplanung) benötigt (siehe Bild 22).

**Beispiele** für den Informationsbedarf bei der Belegungsplanung:

- Informationen von anderen PPS-Funktionen über Fertigungsaufträge, Lose, Werkstücke, Optimierungskriterien, Planungsstrategien, Planungszeitraum und Planungsalgorithmen.
- Informationen von der Arbeitsplanung über bewertete Arbeitsplanalternativen.
- Informationen von der Werkstattplanung über langfristige Störungen, Nichtdurchführbarkeit der Planungsvorgaben, Planabweichungen und Istdaten.

Das Ergebnis der Belegungsplanung ist ein mit anderen PPS-Funktionen, der Arbeitsplanung und der Werkstattplanung abgestimmter, offline-generierter Maschinen-, Zellen- bzw. Systembelegungsplan.

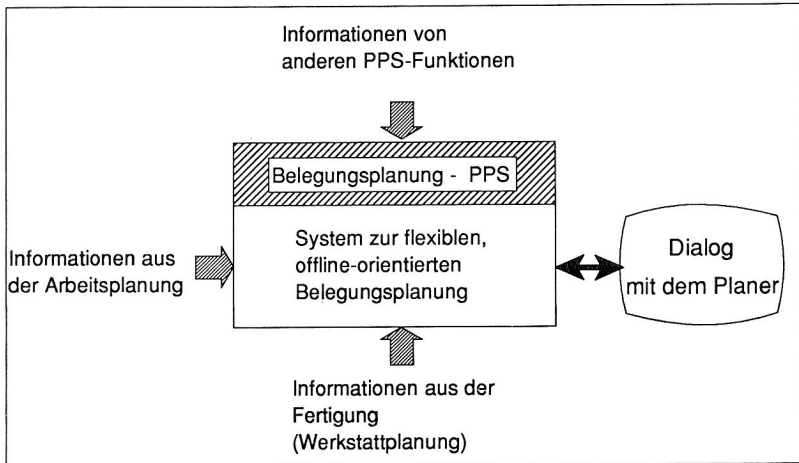


Bild 22: Bereitstellung von Informationen und Dialog  
bei der Belegungsplanung

#### d) Optimierung und Simulation

Die offline-orientierte Belegungsplanung bringt den Vorteil mit sich, daß der Planer ein optimales Einplanungsergebnis als Vorgabe für die Werkstattplanung simulativ [20,77] ermitteln kann. Dazu werden planerische Freiheitsgrade benötigt, welche sich durch die Parametrierung verschiedener Optimierungskriterien nutzen lassen [11,92].

**Beispiele** für Optimierungskriterien bei der Belegungsplanung sind die Minimierung der mittleren Durchlaufzeit, maximalen Durchlaufzeit, mittleren Bearbeitungskosten, mittleren Leerlaufzeiten und Terminabweichungen des einzuplanenden Fertigungsspektrums.

#### **e) Durchgängigkeit und Integrationsfähigkeit**

Die funktionale Grenze zwischen den Bereichen der Produktionsplanung, -steuerung und Fertigung ist konfigurationsbedingt häufig nicht eindeutig festgelegt.

Im Rahmen dieser Arbeit werden offline-spezifische Planungsaufgaben (Belegungsplanung) und online-spezifische Planungsaufgaben (Werkstattplanung) in einem durchgängigen Konzept (siehe auch Bild 21) dargestellt. Dadurch wird eine klare funktionale Trennung zwischen den Planungsaufgaben der PPS und des Fertigungsbereiches vollzogen, was eine erhebliche Flexibilitätssteigerung in beiden Betriebsbereichen erwarten läßt. Neuartige Offline-Belegungsplanungssysteme müssen in die rechnerunterstützte Produktionsumgebung integrierbar sein [2,42].

In dieser Arbeit besteht der konzeptionelle Schwerpunkt in der durchgängigen Integration von Arbeitsplangenerierung (CAP), Belegungsplanung (PPS) und Werkstattplanung (CAM).

## 4 Das verteilte Planungssystem HIPS

### 4.1 Struktur des verteilten Planungssystems HIPS

Die Komponenten Arbeitsplangenerierung (CAP), Belegungsplanung (PPS) und Werkstattplanung (CAM) bilden die Grundlage für ein verteiltes Planungssystem, dessen Entwurf und Realisierung den Nachweis einer Flexibilitätssteigerung im Fertigungsbereich ermöglichen soll. In diesem Kapitel wird auf der Grundlage des in Kapitel 3 beschriebenen Konzeptes ein "Hierarchisches Integriertes PlanungsSystem" für die Produktion, kurz HIPS genannt entworfen und spezifiziert.

HIPS setzt sich aus den folgenden drei Planungskomponenten zusammen (siehe Bild 23):

- EGOPLA, Arbeitsplangenerierungssystem (CAP).
- KOLPLA, Belegungsplanungssystem (PPS).
- OLPLA, Werkstattplanungssystem (CAM).

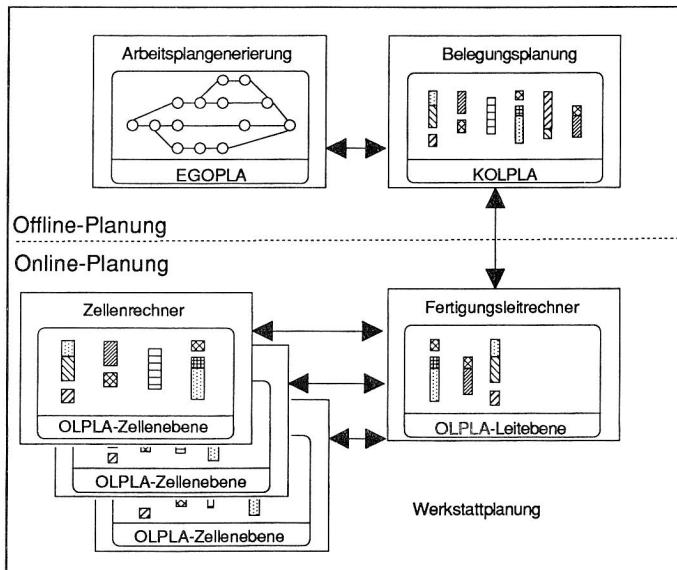


Bild 23: Das verteilte Planungssystem HIPS

Einführend und zur Motivation werden einige Merkmale von HIPS den Postulaten aus Abschnitt 3.2 zugeordnet.

**a) Flexibilität**

Die Verwendung von Arbeitsplangraphen, unterschiedlichen Planungsstrategien und flexibel ausgelegten Planungsalgorithmen bilden Grundlagen für die Effizienz des verteilten Planungssystems. Im Rahmen der Beschreibung der HIPS-Komponenten werden weitere Flexibilisierungsaspekte vorgestellt.

**b) Bereichsautonomie**

Die Planungskomponenten von HIPS sind als autonome Planungsmodule entworfen. Dabei wurde als Strukturierungsprinzip die funktionelle Hierarchisierung verwendet. Dies wird durch die Ebenenstruktur des verteilten Planungssystems evident. Die Offline-Planungsebene betrifft die Arbeitsplangenerierung und Belegungsplanung, die Online-Planungsebenen beinhalten die Werkstattplanung auf Leitebene, Zellenebene und operativer Ebene.

**c) Entscheidungsvorbereitung und -unterstützung**

Jede Planungsebene ist so konfiguriert, daß der unterlager-ten Planungsebene ein nutzbarer Flexibilitätsspielraum bereitgestellt werden kann. Der Planungsverantwortliche kann unter Verwendung verschiedener Vorgabeparameter den Entscheidungsfreiraum nützen. Durch die Bereitstellung von Erklärungsfunktionen wird der Bediener in seinen Planungsentscheidungen unterstützt. Dies ist immer dann notwendig, wenn mehrere Handlungsalternativen vorgegeben sind. Der Benutzer erhält vom Planungssystem Informationen über Planungsalternativen, Handlungsvorschläge, Konsequenzen und Ergebnisse.

#### d) Optimierung

Die Ermittlung optimaler Planungsentscheidungen ist sowohl von der Verwendung geeigneter Planungsalgorithmen als auch von der Vorgabe verschiedener Optimierungskriterien abhängig. Auf jeder Ebene des verteilten Planungssystems müssen fertigungsvorbereitend (offline) und fertigungsbegleitend (online) Entscheidungen gefällt werden. Besonders auftretende Störungen während der laufenden Fertigungsperiode müssen planerisch kurzfristig bewältigt werden. Ziel auf jeder Planungsebene ist die Optimierung des produktionsbestimmenden Gesamtergebnisses.

#### e) Simulation

Grundsätzlich kann in der Teilefertigung aus einer Vielzahl von Fertigungsalternativen immer nur eine Möglichkeit real durchgeführt werden. Wie gut eine Entscheidung vor oder während des Fertigungsablaufs war, läßt sich mit Gewißheit erst nach dem Fertigungsende bestimmen. Üblicherweise gelingt dies durch die Auswertung vorliegender BDE-/MDE-Daten bzw. durch die Nachkalkulation. Die Simulation bietet jedoch die Möglichkeit, im Entscheidungsfall verschiedene Alternativen zu berücksichtigen und die Ergebnisse als Entscheidungsgrundlage zu nutzen. Im Online-Bereich des verteilten Planungssystems werden an die Simulation hohe Zeitanforderungen gestellt. Auch die Offline-Planungskomponenten können durch Simulationswerkzeuge besonders effektiv unterstützt werden. Die Vorteile der Simulation werden im verteilten Planungssystem HIPS genutzt.

#### f) Integrationsfähigkeit

Die Ergebnisse einer HIPS-Komponente fließen in andere Komponenten ein. Planungsvorgaben und Rückmeldungen bilden die Integrationsbasis im Planungssystem.

## 4.2 Die Arbeitsplangenerierungskomponente EGOPLA

### 4.2.1 Erläuterung der verwendeten graphentheoretischen Grundbegriffe

Die im folgenden definierten Begriffe orientieren sich im wesentlichen an den Ausführungen in [70].

#### a) Graph

**Definition:** Ein Graph  $G=(Z,A)$  ist festgelegt durch

- eine (endliche) Menge  $Z$  von Knoten und
- eine Menge  $A$  von Kanten,

wobei  $(X,Y)$  eine Kante zwischen den Knoten  $X$  und  $Y$  beschreibt.

**Beispiel:**  $G=(Z,A)$  mit

$$Z=\{1,2,3,4,5\}$$
$$A=\{(1,2), (2,3), (2,4), (3,5), (4,5)\}$$

In Bild 24 wird dieser Graph dargestellt.

#### b) Untergraph

**Definition:**  $G=(Z,A)$  und  $G'=(Z',A')$  seien Graphen

$G'$  ist Untergraph von  $G$ , wenn

- $Z'$  eine Teilmenge von  $Z$  ist und
- $A'$  eine Teilmenge von  $A$  ist.

**Beispiel:**  $G = (Z,A)$  aus Beispiel a)

$$G' = (Z',A') \text{ mit}$$
$$Z' = \{2,3,4\}$$
$$A' = \{(2,3), (2,4)\}$$

In Bild 24 ist dieser Untergraph dargestellt.

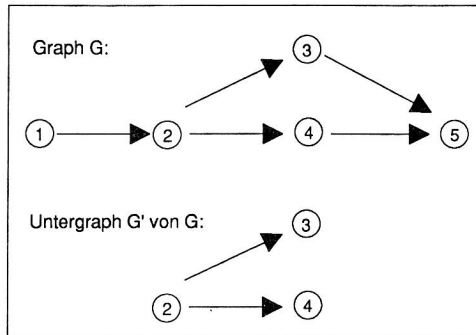


Bild 24: Beispiel für einen Graph G und einen Untergraph G'

#### c) Adjazenz und Inzidenz von Knoten

**Definition:**  $G=(Z,A)$  sei ein Graph

$X,Y$  seien Knoten dieses Graphen

$X,Y$  sind **adjazent** (d.h. die Knoten  $X$  und  $Y$  sind durch eine Kante verbunden), wenn  $(X,Y)$  oder  $(Y,X)$  eine Kante beschreibt.

$X$  ist **inzident** (d.h. der Knoten  $X$  ist Anfangs- oder Endknoten des Graphen), wenn es eine Kante  $a$  und einen Zustand  $Y$  gibt, so daß gilt  $a = (X,Y)$  oder  $a = (Y,X)$ .

#### d) Vorgänger und Nachfolger von Knoten

**Definition:**  $G=(Z,A)$  sei ein Graph

$X,Y$  seien Knoten dieses Graphen

$X$  ist **Vorgänger** bzw. **Nachfolger** von  $Y$ , wenn es eine Kante  $(X,Y)$  bzw. eine Kante  $(Y,X)$  gibt.



e) **Bildung aller Nachfolger bzw. Vorgänger eines Knotens**

**Definition:**  $G=(Z,A)$  sei ein Graph

$N: Z \rightarrow 2^Z$  Nachfolger eines Knotens

$V: Z \rightarrow 2^Z$  Vorgänger eines Knotens

**Beispiel:**  $G=(Z,A)$  aus Beispiel a)

$Z=\{1,2,3,4,5\}$

$N(2) = \{3,4\}$ ; Die Knoten 3 und 4 sind Nachfolger  
des Knotens 2.

$V(5) = \{3,4\}$ ; Die Knoten 3 und 4 sind Vorgänger  
des Knotens 5.

f) **Eingangsgrad bzw. Ausgangsgrad eines Knotens**

**Definition:**  $G=(Z,A)$  sei ein Graph

$X$  sei ein Knoten dieses Graphen

$AUS(X) = |N(X)|$ ; Anzahl der Knoten-Nachfolger.

$EIN(X) = |V(X)|$ ; Anzahl der Knoten-Vorgänger.

**Beispiel:**  $G=(Z,A)$  aus Beispiel a)

$AUS(2) = 2$ ; Knoten 2 hat zwei Nachfolger.

$EIN(2) = 1$ ; Knoten 2 hat einen Vorgänger.

g) **Charakteristische Knoten eines Graphen**

**Definition:**  $G=(Z,A)$  sei ein Graph

$X$  sei ein Knoten dieses Graphen

$X$  ist **isolierter Knoten**, wenn

$EIN(x) = 0$  und  $AUS(x) = 0$ .

$X$  ist **Anfangsknoten** eines Graphen, wenn

$EIN(x) = 0$  und  $AUS(x) > 0$ .

X ist **Endknoten** eines Graphen, wenn

$\text{EIN}(x) > 0$  und  $\text{AUS}(x) = 0$ .

X ist **Zwischenknoten** eines Graphen, wenn

$\text{EIN}(x) > 0$  und  $\text{AUS}(x) > 0$ .

**Beispiel:**  $G=(Z,A)$  aus Beispiel a)

Es existiert kein isolierter Knoten,

Knoten 1 ist Anfangsknoten,

Knoten 5 ist Endknoten und

Knoten 4 ist ein Zwischenknoten des Graphen.

#### h) Charakteristische Kanten eines Graphen

**Definitionen:**  $G=(Z,A)$  sei ein Graph

$X_i, X_t, X_j$  seien Knoten dieses Graphen

$Z^*$ : Menge aller endlichen Folgen über Z.

$w = (X_1, \dots, X_t)$  aus  $Z^*$  heißt **Knotenfolge**.

$w = (X_1, \dots, X_t)$  aus  $Z^*$  heißt **Kantenfolge**, wenn  
alle Knotenpaare  $(X_i, X_{i+1})$  adjazent sind.

$w = (X_1, \dots, X_t)$  aus  $Z^*$  heißt **geschlossene  
Kantenfolge**, wenn gilt:  $X_1 = X_t$ .

$w = (X_1, \dots, X_t)$  aus  $Z^*$  heißt **einfache  
Kantenfolge**, wenn gilt:  
alle  $X_i, X_j$  sind paarweise verschieden.

$(X_i, X_j)$  aus A heißt **Kantenzug**, wenn dies für  
je zwei aufeinanderfolgende  $(X_i, X_j)$  gilt.

Ein **Pfad p** ist ein einfacher Kantenzug.

Die **Pfadmenge P** ist die Menge aller Pfade p

mit  $P = \{p = (X_1, \dots, X_t) \mid \text{für alle Pfade } p\}$ .

#### 4.2.2 Generierungsschritte von EGOPLA

##### Werkstückbeschreibung mit Zustandsparametervektoren

Wichtigste Grundvoraussetzung für ein flexibles Online-Planungssystem im Fertigungsbereich ist die Generierung graphenorientierter Arbeitspläne im CAP-Bereich. Im Abschnitt 3.4.2 wurden Zustandsparametervektoren (ZPV) als geeignete Beschreibungsform für Werkstücke in der Teilefertigung vorgestellt. Jeder mögliche Fertigungszustand eines Werkstückes kann eindeutig durch einen ZPV beschrieben werden und als Knoten in einem Graphen dargestellt werden. Der Fertigungszustand eines Werkstückes kann nur vor und nach vollständiger Bearbeitung als ZPV beschrieben werden. Alle anderen Werkstückzustände werden als undefiniert bezeichnet und deuten einen Fehlerfall an.

##### Generierung und Darstellung von Fertigungsstrukturgraphen (FSG)

In Abschnitt 3.4.2 wurde als zentrale Forderung zur **Flexibilitätssteigerung** im Fertigungsbereich die konsequente Berücksichtigung von Bearbeitungsalternativen bei der Arbeitsplangenerierung beschrieben. In EGOPLA werden sowohl technologische Bearbeitungsalternativen als auch Reihenfolgealternativen berücksichtigt.

##### a) Definition: Fertigungsstrukturgraph (FSG)

Ein Fertigungsstrukturgraph  $FSG = (Z, A)$  ist ein Graph mit folgenden Merkmalen:

- Es gibt genau einen Anfangsknoten (Rohteil) und genau einen Endknoten (Fertigteil).
- Es gibt keine isolierten Knoten.
- Es gibt keine geschlossenen Kantenfolgen.

## b) Generierung von Fertigungsstrukturgraphen (FSG)

Dabei bleibt es dem Arbeitsplaner unbenommen, Zustandsübergänge in den FSG zu integrieren, welche keinen Fertigungsfortschritt im Sinne einer Geometrieveränderung am Werkstück bewirken. Denkbar sind beispielsweise Hinweise für Prüf- oder Reinigungsvorgänge, welche sich aus bearbeitungstechnologischer Sicht als günstig oder notwendig erweisen. Bei der Generierung von FSG (siehe Bild 25) muß der Arbeitsplaner wissen, welche fertigungstechnologischen Alternativen anwendbar sind.

### Beispiel: Fertigungsstrukturgraph

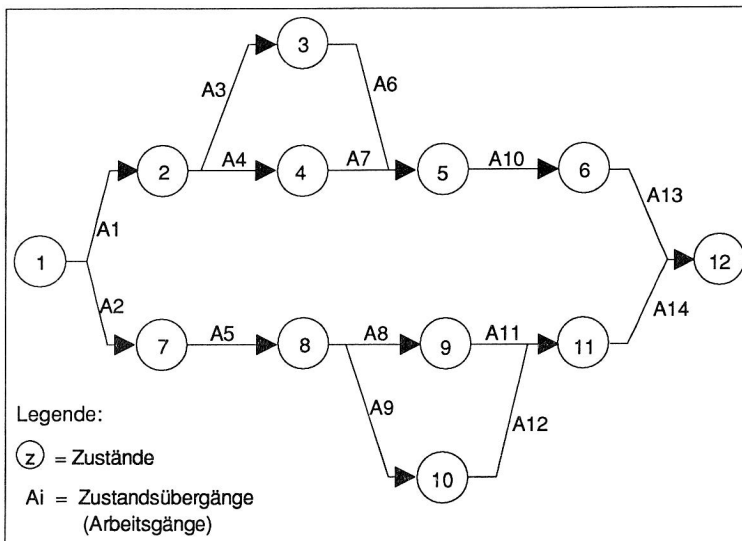


Bild 25: Fertigungsstrukturgraph mit  
12 Bearbeitungszuständen

### c) Darstellung von Fertigungsstrukturgraphen

Die in Bild 25 verwendete graphenorientierte Darstellungsform ist für rechnerunterstützte Arbeitsplangenerierungssysteme im Sinne der Visualisierung ungünstig. Die Dekomposition des FSG in alle möglichen Pfade, welche vom Rohteil zum Fertigteil führen, resultiert in einer pfadorientierten Darstellungsform (siehe Bild 26). Die fertigungsfortschrittsorientierte Methode ist eine sehr transparente und kompakte Möglichkeit Fertigungsstrukturgraphen darzustellen (siehe Bild 27).

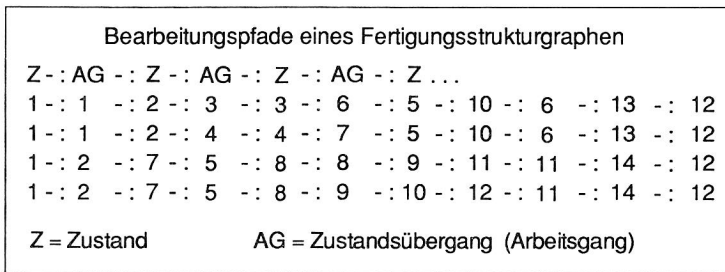


Bild 26: Pfadorientierte Darstellungsform von FSG

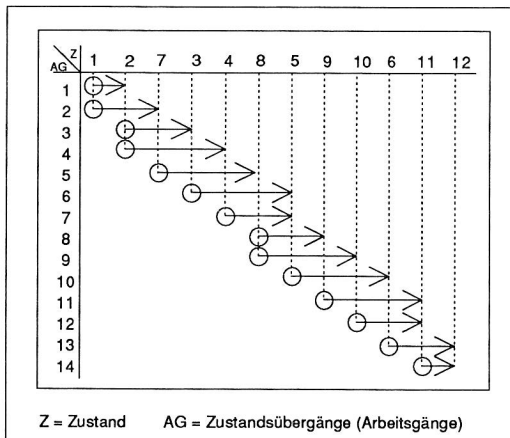


Bild 27: Fertigungsfortschrittsorientierte FSG-Darstellung

## Generierung und Darstellung von Maschinenarbeitsplangraphen (MAPLG)

Neben den bei der Arbeitsplangenerierung zu berücksichtigenden Bearbeitungstechnologiealternativen tragen alternative Bearbeitungsplätze (Maschinen, Handarbeitsplätze), an welchen die Bearbeitungsschritte ausgeführt werden können, wesentlich zur Steigerung der Fertigungsflexibilität bei.

### a) Definition: Maschinenarbeitsplangraph (MAPLG)

Gegeben sei ein Fertigungsstrukturgraph  $FSG = (Z, A)$ , weiterhin eine nichtleere Menge  $M$  von Maschinen bzw. Arbeitsplätzen.

Eine Arbeitgangfunktion  $AG: A \rightarrow 2^M \setminus \{\emptyset\}$  attribuiert jede Kante des FSG mit einer Menge alternativ einsetzbarer Maschinen bzw. Arbeitsplätze aus  $M$ .

Ein Maschinenarbeitsplangraph  $MAPLG = (FSG, AG)$  ist ein FSG mit attributierenden Kanten.

Die Kantenattributierung kann eine komplexe Datenstruktur sein.

### b) Generierung von Maschinenarbeitsplangraphen (MAPLG)

Auf Grundlage der generierten Fertigungsstrukturgraphen kann der Arbeitsplaner den Bearbeitungsfortschritt eines Werkstückes konkretisieren. Zu jeder Kante im FSG werden die für den technologischen Zustandsübergang einsetzbaren bzw. langfristig verfügbaren Maschinen angegeben. Die dabei generierten Kanteninformationen werden als Arbeitsgänge im konventionellen Sinne interpretiert. Durch die Angabe mehrerer Maschinen je Arbeitgang entsteht für die Online-Planungsphase im Fertigungsbereich ein zusätzlich nutzbares Flexibilitätspotential.

Für den Generierungsprozeß des MAPL (siehe Bild 28) werden dabei Informationsbibliotheken, wie in Abschnitt 3.4.2 beschrieben, genutzt.

### Beispiel: Maschinenarbeitsplangraph

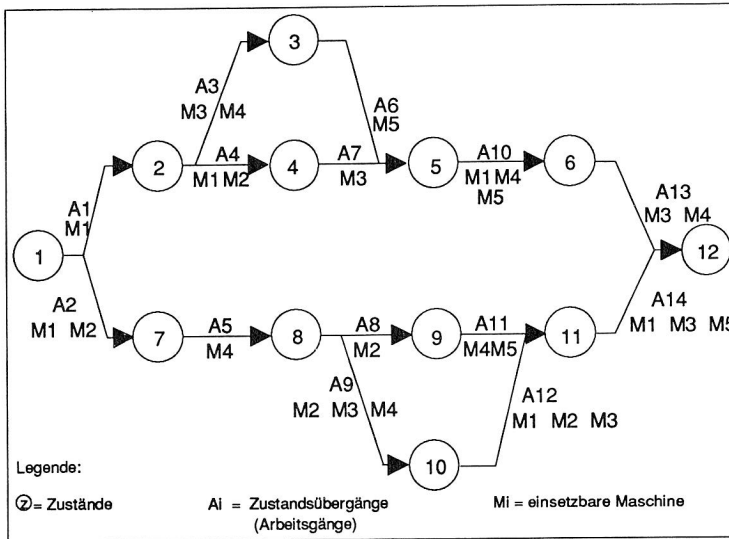


Bild 28: Maschinenarbeitsplangraph  
mit 5 einsetzbaren Maschinen

#### c) Bestimmung und Festlegen von Planwerten im MAPLG

Nach der Erzeugung eines werkstückspezifischen MAPLG werden alle zur Planung notwendigen arbeitgangbezogenen Attribute bestimmt und festgelegt. Dabei handelt es sich beispielsweise um arbeitgangbezogene Planwerte, wie Bearbeitungskosten, Bearbeitungszeiten und Rüstzeiten, die den MAPLG für spätere Planungsentscheidungen quantifizierbar machen. Durch die Attributierung der Kanten im MAPLG mit arbeitgangspezifischen Planwerten entsteht ein erweiterter MAPLG. Ein Beispiel dazu ist in Bild 29 dargestellt.

Arbeitsgang	Maschine	Bearbeitungs-kosten	Bearbeitungs-zeit	Rüstzeit
1	1	4	4	1
2	1	3	3	2
2	2	4	5	1
3	3	1	1	1
3	4	2	1	1
4	1	5	6	1
4	2	4	6	2
5	4	6	6	1
6	5	4	2	2
7	3	5	7	1
8	2	4	6	1
9	2	8	8	1
9	7	7	9	

Bild 29: Arbeitsgangbezogene Planwerte im MAPLG

#### d) Darstellung von Maschinenarbeitsplangraphen

Maschinenarbeitsplangraphen (MAPLG) können graphenorientiert, pfadorientiert und fertigungsfortschrittsorientiert (siehe Bild 30) dargestellt werden.

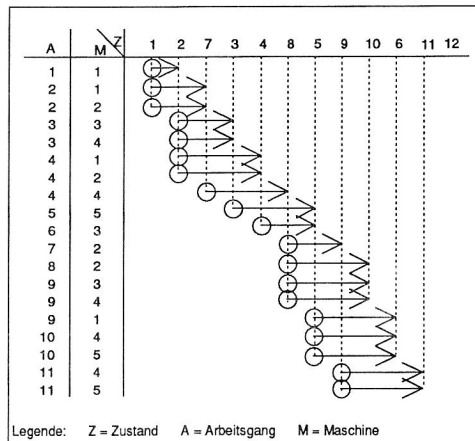


Bild 30: Fertigungsfortschrittsorientierte Darstellungsform



## Generierung und Darstellung von Zellenarbeitsplangraphen (ZAPLG)

Das Generieren von Zellenarbeitsplangraphen (ZAPLG) berücksichtigt eine dezentralisierte Fertigungsstruktur, welche sich aus autonomen Subeinheiten (Fertigungszellen) zusammensetzt. Die Struktur des MAPLG wird dabei entsprechend differenziert dargestellt. Der ZAPLG beschreibt eine abstrahierte und informationsreduzierte Ausprägung des MAPLG und verdeckt dabei arbeitsgangbezogene Zellendetails. Auf diese Weise beantwortet der ZAPLG die Frage, in welcher Fertigungszelle ein Bearbeitungsfortschritt für ein Werkstück erwirkt werden kann (siehe auch Bild 31). Diese Informationen sind für eine den Fertigungszellen übergeordnete Planungsinstanz (z. B. Leitrechner) als Entscheidungsgrundlage enorm wichtig.

Planungsebene	Informationsgehalt	Datenstruktur
Leitebene	In welchen Zellen kann weitergearbeitet werden ?	Zellenarbeitsplangraph ZAPLG
Zellenebene	An welchen Maschinen der Zelle kann weitergearbeitet werden ?	Maschinenarbeitsplangraph MAPLG

Bild 31: Planungsabstraktion

### a) Definition: Zellenarbeitsplangraph (ZAPLG)

Gegeben sei ein Maschinenarbeitsplangraph  $MAPLG = (FSG, AG)$  und eine nichtleere Menge  $FZ$  an Fertigungszellen.

Eine Fertigungszellenfunktion  $ZEL: M \rightarrow FZ$  attribuiert jede Kante des MAPLG mit Fertigungszellen aus  $FZ$ .

Ein Zellenarbeitsplangraph  $ZAPLG = (FSG, AG, ZEL)$  ist ein MAPLG mit attributierten Kanten (siehe Bild 32). Durch geschickte Kantenverschmelzung wird der ZAPLG in eine informationsreduzierte Form transformiert.

### Beispiel: Zellenarbeitsplangraph

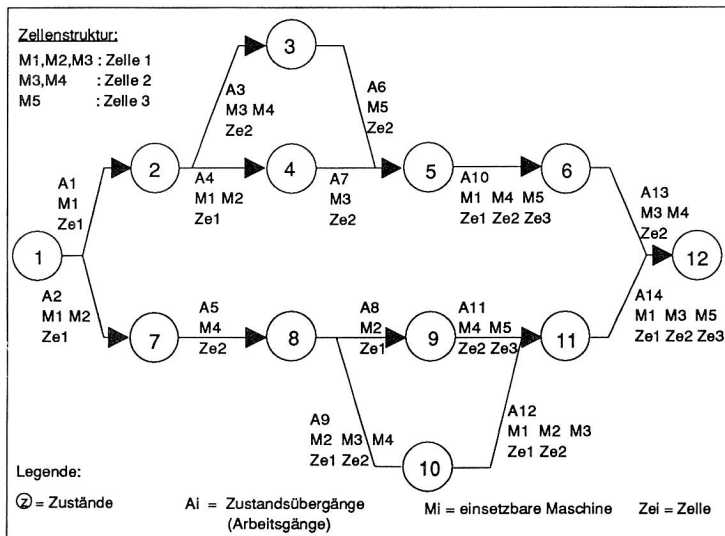


Bild 32: Zellenarbeitsplangraph mit 3 organisierten Fertigungszellen

### b) Generierung von Zellenarbeitsplangraphen (ZAPLG)

Voraussetzung für den dritten Arbeitsplangenerierungsschritt ist die Zuordnung der bereits im MAPLG eingeplanten statischen Systemkomponenten (z. B. Maschinen) zu organisatorischen Einheiten. In dieser Arbeit wird eine zellenstrukturierte Organisationsform zugrunde gelegt. Jede Maschine wird einer bestimmten Fertigungszelle zugeordnet. Im ZAPLG wird dargestellt, welchen Beitrag eine bestimmte Fertigungs-

zelle zum Bearbeitungsfortschritt eines ausgewählten Werkstückes potentiell leisten kann.

### c) Darstellung von Zellenarbeitsplangraphen

Zellenarbeitsplangraphen können graphenorientiert, pfadorientiert und fertigungsfortschrittsorientiert dargestellt werden (siehe Bild 33).

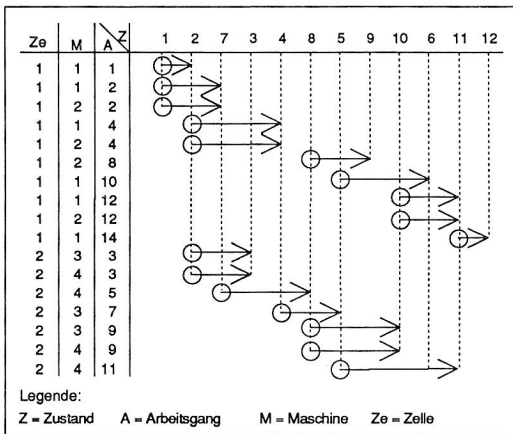


Bild 33: Fertigungsfortschrittsorientierte Darstellungsform für ZAPLG

### Durchgängigkeit der Arbeitsplangenerierungsphase in EGOPLA

Das Arbeitsplangenerierungssystem EGOPLA erfüllt die Kriterien **Flexibilität** und **Bereichsautonomie** in besonderer Weise. Der phasenorientierte Aufbau des Planungssystems gewährleistet eine leistungsfähige Planungshilfe für den Arbeitsplaner. Ergebnisse einer Generierungsphase werden im nächsten Planungsschritt weiterverwendet und -verarbeitet.

Der gesamte Arbeitsplangenerierungsprozeß ist in Bild 34 im Überblick dargestellt.

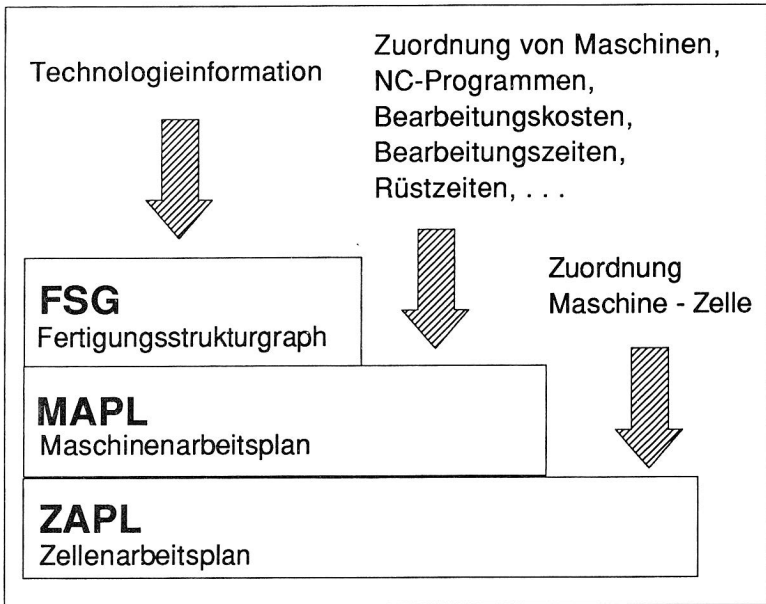


Bild 34: Generierungsstufen in EGOPLA

Im weiteren werden Fertigungsstrukturgraphen, Maschinenarbeitsplangraphen und Zellenarbeitsplangraphen auch als **Arbeitsplangraphen (APLG)** bezeichnet.

#### 4.2.3 Offline-Planung in EGOPLA

Die aus der Arbeitsplangenerierung resultierende, häufig große Anzahl an verschiedenen Fertigungsalternativen, ein spezifisches Werkstück herzustellen, macht die Anwendung von Bewertungskriterien notwendig. In der fertigungsvorbereitenden Planungsphase (Offline-Phase) werden **Bewertungsalgorithmen** zur Optimierung der vorgegebenen Arbeitsplangraphen

verwendet. Die **Optimierung** findet dabei durch differenzierte Bewertung der Einzelpfade eines Arbeitsplangraphen statt. Die Bewertung von Arbeitsplangraphen kann beliebig oft durchgeführt werden, wobei unterschiedliche Optimierungskriterien bzw. Kombinationen davon berücksichtigt werden können.

Die Auswirkungen von potentiell auftretenden **Störungen** in der Fertigungsphase können abhängig von der **Planungsdistanz** in der fertigungsvorbereitenden Planungsphase simulativ untersucht werden. Dazu werden Simulationswerkzeuge eingesetzt. Die Ergebnisse werden aufbereitet dargestellt und können vom Planer interpretiert werden. Aufgrund der Störungssimulation können schon in der Arbeitsplanungsphase Hinweise auf fertigungstechnisch kritische Pfade eines Arbeitsplangraphen gegeben werden. In EGOPLA werden alle Generierungs-, Bewertungs- und Optimierungsfunktionen in Einzelwerkstückbetrachtung durchgeführt. Die Optimierungen sind auch für Lose oder Aufträge denkbar. Diese Vorgehensweise wird in dieser Arbeit als egoistische Planung bezeichnet.

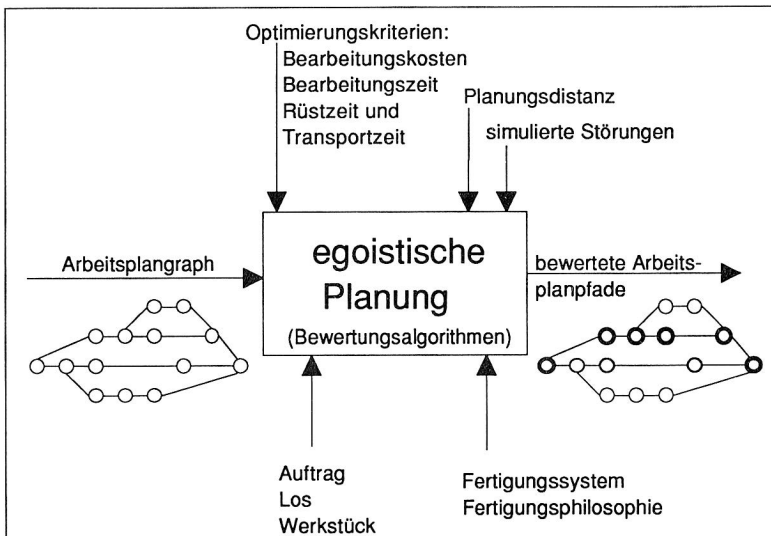


Bild 35: Egoistische Planung in der Arbeitsplanung

Wie Bild 35 zeigt wird für jedes Werkstück, welches durch den bereits generierten oder vorhandenen Arbeitsplangraphen repräsentiert wird, eine egoistische Bewertung durchgeführt. EGOPLA erzeugt aus dem vorgegebenen Arbeitsplangraphen und der Gewichtung verschiedener Optimierungsgrößen eine bewertete Menge von Arbeitsplanpfaden. Veränderungen im zugrundegelegten Fertigungssystem (z. B. langfristige Maschinenstörungen oder Erweiterungen des Fertigungssystems) beeinflussen die Ergebnisse der egoistischen Planungsstrategie ebenso wie die Vorgabe unterschiedlicher Gewichtungen der Optimierungsgrößen.

Die Berechnungen in EGOPLA werden für jedes zu fertigende Werkstück nur einmal durchgeführt, vorausgesetzt die Rahmenbedingungen für die Planung bleiben bestehen. Wurden mehrere Werkstücke zu einem Fertigungslos oder -auftrag zusammengefaßt, dann kann auf die in EGOPLA erzeugten Ergebnisse (Alternativpfade) zurückgegriffen bzw. ähnlich verfahren werden.

### Optimierungskriterien

Die Generierung alternativer Arbeitplanstrukturen trägt zur Flexibilitätssteigerung im Produktionsbereich bei. Die effektive Nutzung der flexiblen Arbeitsplanvorgaben macht eine Bewertung der alternativen Arbeitsplanpfade nötig. Die Bewertung geschieht anhand fertigungsrelevanter Optimierungskriterien. Beispiele dafür sind die Minimierung der werkstückbezogenen Bearbeitungskosten, Bearbeitungszeiten, Transportzeiten und der Durchlaufzeit.

Die Bewertungsalgorithmen in EGOPLA berücksichtigen nur solche Optimierungskriterien, welche den Fertigungsfortschritt der Werkstücke beeinflussen. **Bearbeitungskosten** sowie **Bearbeitungszeiten** und **Rüstzeiten** sind arbeitgangbezogen für jedes Werkstück fest vorgegeben. In der Generierungsphase der Maschinenarbeitsplangraphen werden diese Attribute über entsprechende Informationsbibliotheken den

Arbeitsplangraphen fest zugeordnet. Die Transportzeiten für Werkstücke sind durch die zugrundegelegte Maschinenkonfiguration und die entsprechenden Transportsysteme in einer Transportmatrix fest vorgegeben. Die **Durchlaufzeit**, d. h. die Zeitspanne, in der sich ein Werkstück im System befindet, ergibt sich aus der Summe aller werkstückbezogenen Bearbeitungszeiten, Rüstzeiten und Transportzeiten. Werkstückbezogene Warte- bzw. Lagerzeiten finden bei der Bewertung in EGOPLA keine Berücksichtigung. Bei der Betrachtung von Einzelwerkstücken im ungestörten Fertigungsbetrieb können solche Kriterien unberücksichtigt bleiben.

Die unterschiedliche Gewichtung verschiedener Optimierungskriterien ist planungstheoretisch besonders interessant. Auf diese Weise können unterschiedliche Fertigungsphilosophien schon in der Phase der Arbeitsplangenerierung untersucht und berücksichtigt werden.

### **Bewertungsalgorithmen**

In jeder Entscheidungssituation des verteilten Planungssystems sollte aus einer Vielzahl von Pfadalternativen eines Arbeitsplangraphen die jeweils beste Möglichkeit selektiert werden können. Die dabei vorgegebenen Optimierungskriterien sollen durch Nutzung der entsprechenden Pfadalternativen erfüllt werden. Zur Bewertung unterschiedlicher Pfadalternativen sind optimierende bzw. suboptimierende Algorithmen notwendig.

#### **a) Optimierende Bewertungsalgorithmen**

Der zu bewertende Arbeitsplangraph wird in alle möglichen Arbeitsplanpfade, welche das betrachtete Werkstück vom momentanen Zustand (das ist in der Regel der Rohteilzustand) in den geplanten Fertigzustand überführen, zerlegt. Natürlich kann ein Arbeitsplanpfad auch von jedem Zwischenzustand aus bewertet werden. Jeder Zustandsübergang eines Arbeits-

plangraphen bzw. -pfades kann unter Angabe verschiedener Fertigungskriterien einzeln bewertet werden.

Ein Zustandsübergang (Kante) in einem Arbeitsplangraphen ist bei egoistischer Betrachtung umso geeigneter, je geringer beispielsweise die dafür notwendigen Bearbeitungskosten, Bearbeitungszeiten, Rüstzeiten und Transportzeiten sind. Die Bewertung eines Arbeitsplanpfades ergibt sich aus der Anzahl der einzelnen Kanten. Die berücksichtigten Bewertungskriterien können, je nach Relevanz, unterschiedlich gewichtet werden. Auch eine zunehmende Planungsdistanz kann die Bewertung der Arbeitspfade beeinflussen. Für jeden Pfad des betrachteten Arbeitsplangraphen wird eine Gesamtbewertung ermittelt. Beim daran anschließenden Ergebnisvergleich kann unter Berücksichtigung bestimmter Fertigungskriterien garantiert der Arbeitsplanpfad mit optimaler Bewertung ermittelt werden. Die Verwendung optimaler Bewertungsalgorithmen findet dann ihre Grenzen, wenn die Arbeitsplangraphen aus fertigungstechnischen Gründen sehr komplexe Strukturen ergeben. Rechen- und Verwaltungsaufwand sind dann immens hoch und das Bewertungsverfahren ineffektiv.

#### b) Suboptimierende Bewertungsalgorithmen

Bei der Anwendung suboptimaler Bewertungsalgorithmen werden nicht alle möglichen Arbeitsplanpfade bewertet, sondern es sollen nur die  $n$  besten ( $n$ -best) Pfade gefunden werden. Dabei werden Suchalgorithmen verwendet, welche in effizienter Weise relativ gut bewertete Arbeitsplanpfade aus dem Arbeitsplangraphen ermitteln (z. B.  $A^*$ -Algorithmus).

Der  $A^*$ -Algorithmus ist in der Literatur [63,64] als heuristisches Suchverfahren bekannt und mit Erfolg problemorientiert eingesetzt worden.

Unter Beachtung der Komplexität flexibler Arbeitsplangraphen werden nur solche Bewertungsalgorithmen eingesetzt, deren Rechenaufwand, ( $n$ -best) Pfade zu ermitteln, linear mit der Anzahl der vorhandenen Kanten zunimmt.



**b1) Ermitteln der (n-best)-Pfade durch Vorwärtsstrategie**

**Grundidee des Bewertungsalgorithmus EGOALG1**

Festlegen der Komplexitätsvariable: (n-best)

Beginn der Suche: Startknoten des Arbeitsplangraphen,  
Anfangsbewertung = 0

Suchvorgang: Ermittle für jeden Nachfolgeknoten die  
(n-best)-Pfade, welche vom Startknoten  
zum betrachteten Zustandsknoten führen.

Restriktionen: Die (n-best)-Pfade, welche zu einem  
betrachteten Zustandsknoten führen,  
stehen dann fest, wenn alle Knoten die  
zu diesem Knoten führen betrachtet  
worden sind.

Ende der Suche: Zielknoten des Arbeitsplangraphen

Rechenaufwand : Für jeden Zustandsknoten werden die  
(n-best)-Pfade ermittelt, welche vom  
Startknoten aus zu ihm führen. Der  
Rechenaufwand steigt linear mit der Zahl  
der Kanten im Arbeitsplangraphen.

**b2) Ermitteln der (n-best)-Pfade durch Rückwärtsstrategie**

**Grundidee des Bewertungsalgorithmus EGOALG2**

Festlegen der Komplexitätsvariable: (n-best)

Beginn der Suche: Zielknoten des Arbeitsplangraphen,  
Anfangsbewertung = 0

Suchvorgang: Ermittle für jeden Vorgängerknoten die  
(n-best)-Pfade, welche vom betrachteten  
Zustandsknoten zum Zielknoten führen.

Restriktionen: Die (n-best)-Pfade, welche von einem  
betrachteten Zustandsknoten zum Ziel-  
knoten führen, stehen dann fest, wenn  
alle Kanten, die zu Nachfolgeknoten

führen, betrachtet worden sind.

Ende der Suche: Startknoten des Arbeitsplangraphen

Rechenaufwand: Für jeden Zustandsknoten werden die  
(n-best)-Pfade nur einmal ermittelt.  
Der Suchalgorithmus eignet sich besonders  
bei großen Arbeitsplangraphen, da der  
Rechenaufwand linear mit der Anzahl der  
Kanten zunimmt.

Der in b2) beschriebene Bewertungsalgorithmus (Bewertung durch Rückwärtsstrategie) wurde realisiert und realitätsnah erprobt.

### **Darstellung bewerteter Arbeitsplangraphen**

In EGOPLA werden Bewertungsalgorithmen zur Optimierung von Arbeitsplangraphen eingesetzt. Dabei ist es notwendig, das Ergebnis der Bewertung für den Arbeitsplaner aufzubereiten und darzustellen.

In Bild 36 sind neben der Werkstückbezeichnung (a) und den gewählten Optimierungskriterien (b) auch der zugrundeliegende Fertigungsstrukturgraph (c) angezeigt. Die Ausgabe der 10 besten Pfade (d) beinhaltet eine eindeutige Pfadidentifikation, deren Gesamtbewertung in sortierter Folge sowie die Angabe des entsprechenden Arbeitsplanpfades.

Bild 37 beschreibt speziell für den in Bild 36 angegebenen Pfad 5 mit der Gesamtbewertung 66 eine arbeitgangbezogene Bewertungsanalyse. Dabei werden für jeden Zustandsübergang des betreffenden Pfades sowohl die arbeitgangbezogenen Werte (z. B. Bearbeitungskosten) als auch der entsprechende Bewertungsfaktor angegeben. Der Interessierte kann im Detail nachvollziehen, wie die berechnete Gesamtbewertung zustande kommt.

a) Werkstück W1	- Bearbeitungskosten	2
	- Bearbeitungszeiten	1
b) Optimierungskriterien :	- Rüstzeiten	1
	- Transportzeiten	1
c) Pfade des Fertigungsstrukturgraphen :		
Z-: A -: Z-: A -: Z-: A -: Z...		
1-: 1 -: 2-: 3 -: 3 -: 6 -: 5-: 10 -: 6 -: 13 -: 12		
1-: 1 -: 2-: 4 -: 4 -: 7 -: 5-: 10 -: 6 -: 13 -: 12		
1-: 2 -: 7-: 5 -: 8 -: 8 -: 9 -: 11 -: 11 -: 14 -: 12		
1-: 2 -: 7-: 5 -: 8 -: 9 -: 10 -: 12 -: 11 -: 14 -: 12		
d) beste Pfade		
Pfad: Bew : A : M -- A : M --...		
5 : 66 : 1 : 1 -- 3 : 3 -- 6 : 5--10 : 5--13: 3		
11 : 67 : 1 : 1 -- 3 : 4 -- 6 : 5--10 : 5--13: 3		
6 : 67 : 1 : 1 -- 3 : 3 -- 6 : 5--10 : 5--13: 4		
12 : 68 : 1 : 1 -- 3 : 4 -- 6 : 5--10 : 5--13: 4		
1 : 68 : 1 : 1 -- 3 : 3 -- 6 : 5--10 : 1--13: 3		
7 : 69 : 1 : 1 -- 3 : 4 -- 6 : 5--10 : 1--13: 3		
2 : 73 : 1 : 1 -- 3 : 3 -- 6 : 5--10 : 1--13: 4		
8 : 74 : 1 : 1 -- 3 : 4 -- 6 : 5--10 : 1--13: 4		
4 : 76 : 1 : 1 -- 3 : 3 -- 6 : 5--10 : 4--13: 4		
10 : 77 : 1 : 1 -- 3 : 4 -- 6 : 5--10 : 4--13: 4		
Legende:		
Z = Zustand	A = Arbeitsgang	Bew = Bewertung M = Maschine

Bild 36: Ergebnis einer Arbeitsplanbewertung

<b>Analyse:</b>	
Bewertung Pfad 5:	<u>Werkstück W1</u>
A : M : Z : BK : Bew BK: BZ : Bew BZ : RZ : Bew RZ : TZ : Bew TZ : Bew	
1 : 1 : 2 : 4 : 4 : 4 : 4 : 1 : 1 : 2 : 2 : 15	
3 : 3 : 3 : 1 : 1 : 1 : 1 : 1 : 1 : 6 : 6 : 10	
6 : 5 : 5 : 4 : 4 : 2 : 2 : 2 : 2 : 2 : 2 : 14	
10 : 5 : 6 : 3 : 3 : 5 : 5 : 2 : 2 : 4 : 4 : 17	
13 : 3 : 12 : 3 : 3 : 3 : 3 : 1 : 1 : : : 10	
Gesamtbewertung:	66
Legende:	
A = Arbeitsgang	M = Maschine
BK = Bearbeitungskosten	Bew BK = Bewertung der Bearbeitungskosten
BZ = Bearbeitungszeit	Bew BZ = Bewertung der Bearbeitungszeit
RZ = Rüstzeit	Bew RZ = Bewertung der Rüstzeit
TZ = Transportzeit	Bew TZ = Bewertung der Transportzeit

Bild 37: Detailanalyse des besten Arbeitsplanpfades

### Planungsdistanzen in der Offline-Planung

In der konventionellen Arbeitsplanung beschränken sich die durchzuführenden Planungstätigkeiten auf die Generierung der in der Fertigung notwendigen Arbeitsunterlagen. Die Notwendigkeit einer flexiblen Online-Planung im Fertigungsbereich stellt neue Anforderungen an eine FFS-orientierte Arbeitsplanung. Die Eigenschaften der generierten Arbeitsplangraphen als Planungsunterlage im Fertigungsbereich können bereits in der Arbeitsplanung untersucht und festgestellt werden.

**Definition:** Planungsdistanz  $d$

Die Planungsdistanz  $d$  eines Arbeitsplangraphen gibt an, wieviele Arbeitsgänge (= Anzahl der Zustandsübergänge im Fertigungsstrukturgraphen) bei der Einplanung eines Werkstückes vorausschauend betrachtet werden.

Die maximale Planungsdistanz  $d_{\max}$  eines Arbeitsplangraphen ergibt sich aus der Anzahl von Zustandsübergängen im FSG, die höchstens notwendig sind, um vom Anfangszustand (Rohteil) zum Endzustand (Fertigteil) zu gelangen.

Der Parameter Planungsdistanz ist ein zentrales Optimierungskriterium für Offline- und Online-Planungsalgorithmen. Bereits in der Offline-Planungsphase ist es sinnvoll, die Eigenschaften der generierten Arbeitsplangraphen unter Berücksichtigung in der Fertigungsphase auftretender ungeplanter Ereignisse, mit verschiedenen Planungsdistanzen zu untersuchen. Daraus können wichtige Hinweise für die Online-Planung bezüglich individuell adaptierbarer Planungsdistanzen  $d_{\text{ad}}$  ermittelt werden. Beispielsweise kann in der Arbeitsplanung unter Berücksichtigung von Optimierungskriterien die günstigste Planungsdistanz ermittelt werden. Solche Hinweise können sowohl für den störungsfreien, als auch störungsbehafteten Fertigungsablauf gegeben werden.

## Simulation von Störungen

Das Hilfsmittel der Simulation wurde als eine Prämisse neuartiger Planungssysteme postuliert und findet auch im Bereich der Arbeitsplanung Anwendung [102].

Unter dem Begriff der Störung werden alle potentiell auftretenden ungeplanten Ereignisse subsumiert, welche notwendigerweise zu veränderten Planungsbedingungen führen. Beispiele für ungeplante Ereignisse sind Maschinenstörungen, Werkzeugmangel und Eilaufträge. Die Konsequenzen, welche eine häufig überlastete bzw. störungsanfällige Maschine auf einen spezifischen Arbeitsplangraphen hat, können systematisch untersucht und formuliert werden. Bild 38 zeigt die Auswirkungen von Maschinenstörungen auf einen werkstückbezogenen Maschinenarbeitsplangraphen. Dabei wurde die Planungsdistanz  $d_{\max}$  gewählt und die Untersuchung vom Ausgangszustand aus, also vor dem erstmaligen Bearbeitungsbeginn, durchgeführt.

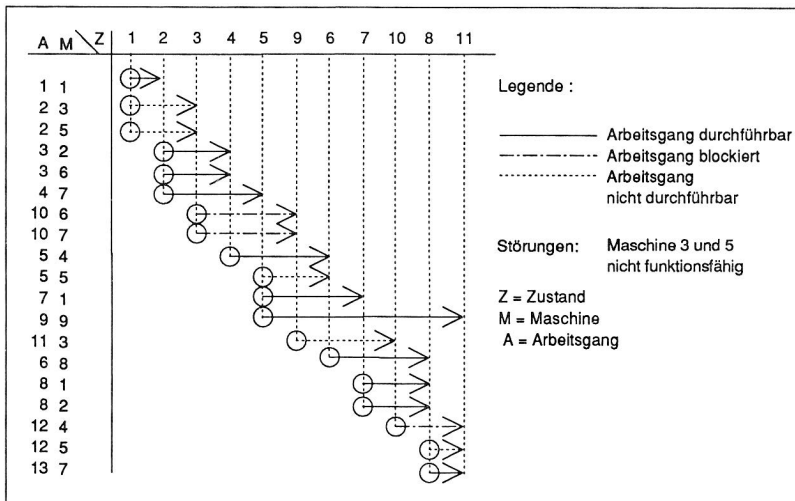


Bild 38: Maschinenarbeitsplangraph in ereignisorientierter Darstellung mit Berücksichtigung von Maschinenstörungen

### 4.3 Das Belegungsplanungssystem KOLPLA

#### 4.3.1 Statische Offline-Planung in KOLPLA

Die Funktionalität von KOLPLA umfaßt die Neugestaltung der arbeitsgangbezogenen **Maschinenbelegungsplanung** und **Reihenfolgeplanung** im Rahmen der Auftragsveranlassung eines PPS-Systems.

KOLPLA hat die Aufgabe, für eine bestimmte Planungseinheit eine vorgegebene Menge von Einzelwerkstücken, Fertigungslosen und Fertigungsaufträgen auf die vorhandenen Fertigungsressourcen optimal einzuplanen. Dabei soll KOLPLA vor allem die in EGOPLA generierten und bewerteten Arbeitsplanalternativen zur optimalen Stationsbelegung nutzen [36].

Von der **kollegialen Planung** (KOLPLA) werden für ein vorgegebenes **Fertigungsspektrum** (Werkstücke, Lose, Aufträge) **bewertete Belegungspläne** bestimmt (siehe Bild 39). Die verwendeten Planungsalgorithmen greifen auf die in EGOPLA erzeugten **bewerteten Arbeitsplanpfade** zurück und ermöglichen damit die Berücksichtigung verschiedener **Optimierungskriterien** [55,61,62] und **Planungsstrategien** [7,59,73]. Unterschiedliche **Fertigungsphilosophien** und **Fertigungssysteme** können ebenso untersucht werden wie die Auswirkungen verschiedener **Planungsdistanzen** bei der Generierung von Belegungsplänen. Die simulative Untersuchung der Auswirkungen von **Störungen**, welche während des Fertigungsablaufes auftreten, ist möglich.

Die **statische Offline-Planungskomponente** von KOLPLA ermittelt optimale Stationsbelegungspläne für eine Planungsperiode. Dabei wird ein störungsfreier Fertigungsablauf unterstellt. Jedes einzuplanende Werkstück bzw. Los wird vom Anfangszustand aus betrachtet und über die maximale Planungsdistanz eingeplant. Die auf diese Weise ermittelten Stationsbelegungspläne dienen als optimale Startbedingung zu Beginn der Fertigungsperiode. Es ist auch denkbar, die optimale Startbelegung bezüglich einer vorgegebenen, jedoch kürzeren Planungsdistanz durch KOLPLA ermitteln zu lassen.

Treten nach Fertigungsbeginn ungeplante Ereignisse auf, so müssen online-orientierte Planungsalgorithmen zum Einsatz gelangen (siehe auch Abschnitt 4.4, Werkstattplanung).

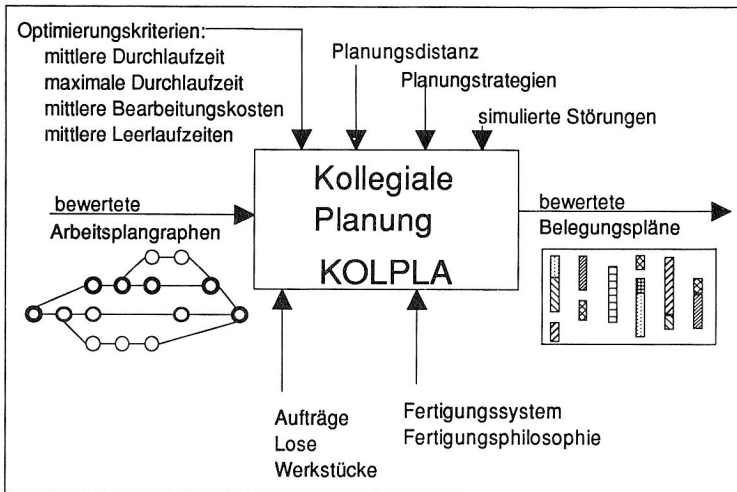


Bild 39: Kollegiale Planung

### Optimierungskriterien

Eine wichtige Voraussetzung für kollegiale Planungsalgorithmen ist die gezielte Anwendung wählbarer Optimierungskriterien. Das für eine Planungsperiode anstehende Fertigungsspektrum soll unter Berücksichtigung vorgegebener organisatorischer und technischer Optimierungskriterien eingeplant und abgearbeitet werden. Ein völlig neuer Ansatz liegt dabei in der Berücksichtigung der aus EGOPLA vorliegenden, unterschiedlichen Handlungsalternativen, die als bewertete Arbeitsplanpfade vorgegeben sind.

In [55,61,62] finden sich detaillierte Untersuchungen zum Einsatz von Optimierungskriterien bei der Belegungs- und Reihenfolgeplanung.

## Planungsalgorithmen

Der statischen Offline-Planungskomponente KOLPLA unterliegen folgende Prämissen:

- Die statische Offline-Planung geht von einem störungsfreien Fertigungsablauf aus. Langfristig bekannte Maschinenausfälle (Wartungsintervalle) können berücksichtigt werden, während der Fertigung auftretende ungeplante Ereignisse jedoch nicht.
- Alle einzuplanenden Fertigungsobjekte sind vor Durchführung der Belegungsplanung bekannt. Eilaufträge werden in der statischen Offline-Planungsphase nicht berücksichtigt.
- Alle einplanbaren Maschinen bzw. Fertigungszellen sind vor Planungsbeginn unbelastet oder verfügen über genügend verfügbare Fertigungskapazitäten.
- Die Verfügbarkeit benötigter dynamischer Betriebsmittel, wie beispielsweise Werkzeuge oder Transportmittel, wird nicht berücksichtigt.

Statische Offline-Planungsalgorithmen des Belegungsplanungssystems KOLPLA sind in der Lage, die in EGOPLA generierten und bewerteten Arbeitsplanpfade unter Berücksichtigung frei wählbarer Optimierungskriterien und entsprechender Planungsstrategien zu nutzen. Ergebnis der statischen Offline-Planung ist eine bewertete Menge optimierter Maschinen- bzw. Zellenbelegungspläne. Für die Lösung des Maschinen- bzw. Zellenbelegungsproblems unter Berücksichtigung der vorgestellten Prämissen und Rahmenbedingungen sind in der Literatur zwei Klassen von Planungsverfahren bekannt, analytische und heuristische Planungsalgorithmen [10,53,61,105].

### a) Analytische Planungsalgorithmen

Bei den analytischen Verfahren zur Lösung des Maschinen- bzw. Zellenbelegungsproblems unterscheidet man kombinatorische Verfahren und Methoden aus der linearen Programmierung. Spezielle Ausprägungen der kombinatorischen Verfahren sind



Entscheidungsbaumverfahren (z. B. begrenzte Enumeration, branch-and-bound-Verfahren) und die kombinatorische Analyse. Analytische Verfahren erfordern bei der Lösung von Maschinen- und Zellenbelegungsproblemen zu hohe Rechenzeiten. Sie werden aus diesem Grunde im Rahmen dieser Arbeit nicht weiter betrachtet.

#### **b) Heuristische Verfahren**

Heuristische Verfahren führen zwar nicht sicher zu optimalen Planungsergebnissen, liefern jedoch bei komplexen Reihenfolgeproblemen häufig sehr gute Lösungen, welche dem erreichbaren Optimum sehr nahe kommen. Man unterscheidet kombinatorische Verfahren, Gewichtungsfunktionen, Simulation und Prioritätsregeln. Für das Auftragsplanungssystem KOLPLA wurden statische Offline-Planungsalgorithmen entwickelt, die zur Klasse der heuristischen Verfahren hinzugerechnet werden können.

#### **c) Heuristische Planungsalgorithmen in KOLPLA**

Die Verwendung alternativer Arbeitsplangraphen bei der Lösung von Maschinen- bzw. Zellenbelegungsproblemen unterscheidet die statischen Offline-Planungsalgorithmen in KOLPLA von anderen, bekannten heuristischen Planungsverfahren. Ziel ist es dabei, eine Menge bewerteter, suboptimaler Maschinen- bzw. Zellenbelegungspläne zu ermitteln. Im Rahmen dieser Arbeit werden zwei Planungsalgorithmen (KOLALG1 und KOLALG2) vorgestellt und diskutiert. Die beiden Planungsalgorithmen wurden in KOLPLA realisiert und erprobt.

### c1) Der Planungsalgorithmus KOLALG1

#### Grundidee des Planungsalgorithmus

##### Vorgaben:

- m Werkstücke, Lose, Aufträge mit je (n-best)-Arbeitsplanpfaden
- Festlegen der Komplexitätsvariable: PK (Anzahl der gewünschten Belegungspläne)
- Optimierungskriterien für die Ermittlung der Belegungspläne
- Planungsstrategie für Maschinen- bzw. Zellenbelegungsplanung

##### Beginn der Suche:

Unter Verwendung des jeweils bestbewerteten Arbeitsplanpfades der m Werkstücke, Lose bzw. Aufträge werden die Belegungsplanung durchgeführt und die Optimierungskriterien errechnet.

##### Suchvorgang:

Abhängig von der gewählten Planungsstrategie werden die nächstbesten Arbeitsplanpfade zur Belegungsplanung berücksichtigt und die entsprechenden Optimierungskriterien ermittelt.

##### Ende der Suche:

- a) Komplexitätskriterium PK
- b) Anzahl der Suchvorgänge =  $n^m$

##### Ergebnis:

$n^m$  verschiedene, entsprechend dem vorgegebenen Optimierungskriterium bewertete Maschinen- bzw. Zellenbelegungspläne

##### Rechenaufwand:

Für m Werkstücke, Lose bzw. Aufträge mit je (n-best) Arbeitsplanpfadalternativen werden  $n^m$  Belegungspläne ermittelt und gemäß vorgegebenem Komplexitätskriterium PK-Reihenfolgepläne ausgegeben. Der Rechenaufwand steigt exponentiell mit der Anzahl der einzuplanenden Werkstücke, Lose bzw. Aufträge.

**Beispiel:**

$m = 3, n = 2, PK = 8$

Pfadalternative:  $(i, j)$  = Werkstück  $i$ , Arbeitsplanpfad  $j$

BW = Bewertung eines Optimierungskriteriums

1.Schritt:	(1,1)	(2,1)	(3,1)	BW = 13
2.Schritt:	(1,1)	(2,1)	(3,2)	BW = 12
3.Schritt:	(1,1)	(2,2)	(3,1)	BW = 14
4.Schritt:	(1,1)	(2,2)	(3,2)	BW = 28
--> 5.Schritt:	(1,2)	(2,1)	(3,1)	BW = 10
6.Schritt:	(1,2)	(2,1)	(3,2)	BW = 18
7.Schritt:	(1,2)	(2,2)	(3,1)	BW = 24
8.Schritt:	(1,2)	(2,2)	(3,2)	BW = 19

Die optimale Pfadkombination ergibt sich im 5. Schritt.  
Daraus kann ein optimaler Belegungsplan ermittelt werden.

**c2) Der Planungsalgorithmus KOLALG2**

**Grundidee des Planungsalgorithmus**

Vorgaben: siehe KOLALG1

**Suchvorgang:**

Erweiterung und Bewertung von Maschinen- bzw.  
Zellenbelegungsplänen

**Erläuterung:**

Die Bewertung der Belegungspläne wird unter Berücksichtigung der vorgegebenen Optimierungskriterien ermittelt.

Unter der **Erweiterung** eines Belegungsplanes versteht man eine definierte Fortsetzung des Suchvorganges. Dabei werden unter Verwendung der aktuell besten Maschinen- bzw. Zellenbelegung die nächstschlechter bewerteten Pfadalternativen (aus EGOPLA) durch KOLALG2 bewertet. Die aktuell erweiterte Maschinen- bzw. Zellenbelegung wird markiert und für eine erneute Erweiterung gesperrt.

**Ende der Suche:**

- a) Komplexitätskriterium PK
- b) Abbruch des Suchvorganges bei genügender Anzahl von Erweiterungen

**Ergebnis:**

Bewertete Menge von markierten (erweiterten) und nicht markierten (nicht erweiterten) Reihenfolgeplänen zur Maschinen- bzw. Zellenbelegung.

**Rechenaufwand:**

- a) Anzahl der Erweiterungen
- b) Abbruch, wenn sich nach Erweiterung eines Belegungsplans die ersten k Belegungspläne entsprechend ihrer Bewertung nicht mehr ändern.

**Beispiel:**

$m = 3, n = 2, PK = 8$

Pfadalternative:  $(i, j)$  = Werkstück i, Arbeitsplanpfad j

BW = Bewertung eines Optimierungskriteriums

(\*) = Markierung; (-) = Streichung

1.Schritt:	(1,1)	(2,1)	(3,1)	(*)	BW = 13
Erweiterung:	(1,2)	(2,1)	(3,1)	(*)	BW = 10
	(1,1)	(2,2)	(3,1)		BW = 14
	(1,1)	(2,1)	(3,2)	(*)	BW = 12
2.Schritt:	(1,2)	(2,1)	(3,1)		
Erweiterung:	(1,1)	(2,1)	(3,1)	(-)	
	(1,2)	(2,2)	(3,1)		BW = 24
	(1,2)	(2,1)	(3,2)		BW = 18
3.Schritt:	(1,1)	(2,1)	(3,2)		
Erweiterung:	usw.				

**Darstellung bewerteter Belegungspläne**

Dem Planer ist ein Dialogsystem zur Verfügung zu stellen, das die Eingabe verschiedener Einflußparameter ermöglicht und die Ergebnisse der Belegungsplanung darstellt.

In Bild 40 sind für eine durchgeführte Belegungsplanung unter a) die verwendeten Rahmenbedingungen (Planungsalgorithmus, Planungsstrategie, Optimierungskriterien und deren Gewichtung) angegeben. Unter b) sind die einzuplanenden Objekte in Art und Menge beschrieben. Im obigen Beispiel wurden sechs Werkstücke bei der Belegungsplanung berücksichtigt. Das eigentliche Planungsergebnis ist unter c) angegeben. Für die 10 besten Arbeitsplanpfadalternativen (Anzahl wird durch PK festgelegt) wurden für jedes einzuplanende Werkstück die entsprechenden Arbeitsplanpfade (Pfadnummern aus EGOPLA) ermittelt.

a) Belegungspläne bei Planungsalgorithmus KOLALG2 und Planungsstrategie ADDITIV						
Optimierungskriterien :						
mittlere Durchlaufzeit						1
maximale Durchlaufzeit						1
mittlere Bearbeitungskosten						2
mittlere Leerzeit						1
b) Komb:	w1	w2	w3	w4	w5	w6
c) 1 :	11	57	112	75	13	13
2 :	12	57	112	75	13	13
3 :	11	57	112	75	14	13
4 :	7	57	80	64	13	13
5 :	11	57	112	75	13	1
6 :	12	57	112	75	13	1
7 :	11	57	112	75	14	1
8 :	12	57	112	75	14	1
9 :	6	57	112	75	13	13
10 :	12	57	112	75	14	13

Bild 40: Bewertete Arbeitsplanpfadkombinationen

Bild 41 analysiert speziell für den besten, durch KOLPLA ermittelten Belegungsplan das Zustandekommen der optimalen Gesamtbewertung (d). Unter a) ist für jedes einzuplanende Werkstück die betreffende Pfadnummer aus dem Arbeitsplangraphen und die, bei der Einplanung errechnete Durchlaufzeit angegeben. Die resultierenden Leerlaufzeiten der betrachteten Maschinen werden in b) analysiert. Wie die Gesamtbewertung durch Gewichtung der gewählten Optimierungskriterien zustande gekommen ist, erläutert das Analyseergebnis c).

a) Werkstück : Pfadnummer : Durchlaufzeit				
w1	11	35		
w2	57	41		
w3	112	48		
w4	75	51		
w5	13	48		
w6	13	53		
			Gewicht	
b) Leerlaufzeiten:		c) mittlere Durchlaufzeit:	46	1
Maschine 1	9	maximale Durchlaufzeit:	53	1
Maschine 2	38	mittlere Bearbeitungskosten:	17	2
Maschine 3	15	mittlere Leerzeit:	20	1
Maschine 4	11			
Maschine 5	31			
d) Gesamtbewertung:		153		

Bild 41: Detailanalyse des besten Belegungsplanes

In Bild 42 wird beispielhaft ein Belegungsplan in Zeitstrahldarstellung vorgestellt. Unter den in Bild 40 und Bild 41 angegebenen Rahmenbedingungen und Eingangsparametern wird für jeden werkstückbezogenen Arbeitsgang die geplante Dauer der Maschinenbelegung angezeigt. Der Belegungsplan gibt Auskunft über den jeweiligen Beginn- und Endzeitpunkt eines Arbeitsganges. Ebenso kann der Fertigstellungszeitpunkt eines Werkstückes oder des eingeplanten Werkstückspektrums

angezeigt werden. Die Maschinenleerlaufintervalle werden besonders übersichtlich dargestellt.

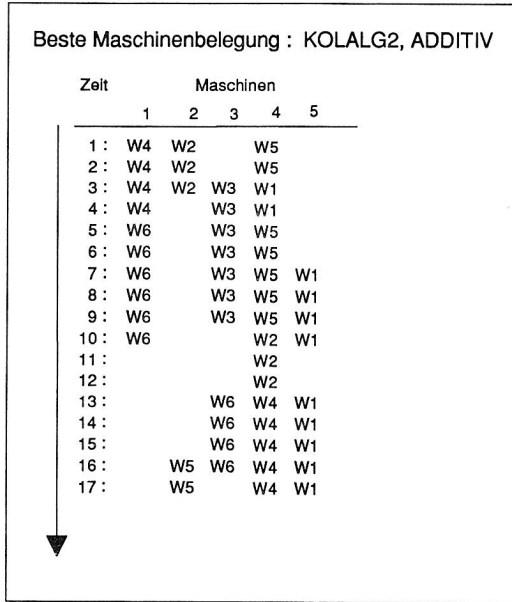


Bild 42: Belegungsplan in Zeitstrahldarstellung (Ausschnitt)

#### 4.3.2 Dynamische Offline-Planung in KOLPLA

Im Gegensatz zur statischen Offline-Planung in KOLPLA kann die dynamische Offline-Planung verschiedene Planungsdistanzen berücksichtigen, von beliebigen Fertigungszwischenzuständen aus gestartet werden und mehrmals pro Fertigungsperiode aktiviert werden.

Die dynamische Offline-Planung in KOLPLA wird nach dem Auftreten ungeplanter Ereignisse bzw. bei starken Abweichungen vom vorgegebenen Stationsbelegungsplan aktiviert. Dies tritt häufig dann ein, wenn die Online-Planungsalgorithmen im Fertigungsbereich keine befriedigenden Ergebnisse liefern. Die dynamische Offline-Planung stellt die Möglichkeit einer

partiellen Neuplanung, ggf. auch während einer laufenden Fertigungsperiode, dar. Es werden auf der Basis definierter Werkstück- bzw. Loszustände und der Betrachtung vorgegebener Planungsdistancen (u. U. bis zum Fertigungsperiodenende) ein neuer Stationsbelegungsplan ermittelt.

**Beispiel:** Statische und dynamische Offline-Planung

Die statische Offline-Planung ermittelt für ein vorgegebenes Werkstückspektrum (im Beispiel sechs verschiedene Werkstücke) einen Belegungsplan (siehe Bild 42). Im Beispiel wird unterstellt, daß zum Zeitpunkt  $t = 2$  Maschine 3 ausfällt und voraussichtlich bis zum Fertigungsperiodenende auch defekt bleibt. Arbeitsgänge, die zum Zeitpunkt  $t = 2$  an anderen Maschinen des Fertigungssystems ausgeführt werden, dürfen nicht unterbrochen werden. Für die dynamische Offline-Planung sind somit alle Werkstück- bzw. Loszustände zu ermitteln, welche nach Beendigung des aktuellen Arbeitsganges vorliegen. Weiterhin sind die Zeitpunkte zu ermitteln, ab denen die noch verfügbaren Arbeitsstationen wieder belegbar und arbeitsfähig sind. Für das Beispiel ergeben sich nach dem Zeitpunkt  $t = 2$  folgende Vorgaben für die dynamische Offline-Planung:

**a) Übersicht über die Bearbeitungszustände der Werkstücke bzw. Lose nach Beendigung des momentanen Arbeitsganges:**

Werkstück W1:	noch nicht begonnen
Werkstück W2:	Ende: $t = 3$
Werkstück W3:	noch nicht begonnen
Werkstück W4:	Ende: $t = 4$
Werkstück W5:	Ende: $t = 2$

**b) Übersicht über die Planungsverfügbarkeit der Maschinen nach  $t = 2$ :**

Maschine M1:	verfügbar ab $t = 5$
Maschine M2:	verfügbar ab $t = 4$
Maschine M3:	gestört ab $t = 2$
Maschine M4:	verfügbar ab $t = 3$
Maschine M5:	verfügbar ab $t = 3$



Das Vorliegen dieser Informationen (Zustandsdaten) ist Voraussetzung für die dynamische Offline-Planung. Neben den erwähnten Voraussetzungen sind auch die im Rahmen der statischen Offline-Planung vorgestellten Planungsstrategien, Optimierungskriterien und Planungsalgorithmen verwendbar. Wird die dynamische Offline-Planung für die maximale Planungsdistanz durchgeführt, so lassen sich aufgrund des Planungsergebnisses die Konsequenzen und Auswirkungen einer ungeplanten Störung quantifizieren. Beispielsweise können damit die Kosten, welche durch die Störung entstanden sind, nachgewiesen werden.

Das Ergebnis einer dynamischen Offline-Planung nach Zeitpunkt  $t = 2$  zeigt Bild 43. Es wurden im Beispiel die Werkstücke W3, W5 und W6 partiell neu eingeplant, wobei nur die Werkstücke W3 und W6 von der Maschinenstörung M3 direkt betroffen waren.

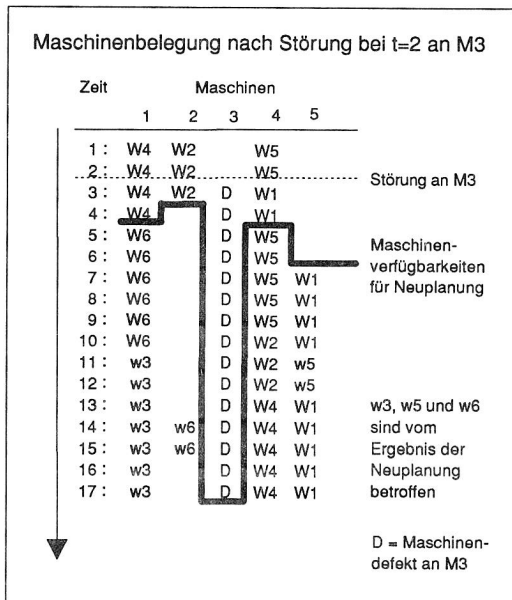


Bild 43: Belegungsplan nach dynamischer Offline-Planung

#### 4.4 Das Werkstattplanungssystem OLPLA

##### 4.4.1 Voraussetzungen für eine hierarchische Online-Planung

Kreimeier [52] deutet in seiner Arbeit die Notwendigkeit der Integration dezentraler Planungseinheiten in bestehende Formen der zentralen PPS an. Maier [55] beschreibt die Forderung nach variabel strukturierten Arbeitsplänen für die Arbeitsgangterminierung in seiner Arbeit. Weitere Ansätze finden sich in [3,18].

Mit der Konzeption und der Realisierung der Offline-Planungskomponenten EGOPLA (siehe Abschnitt 4.2) und KOLPLA (siehe Abschnitt 4.3) wurden die notwendigen Voraussetzungen geschaffen, ein verteiltes Online-Planungssystem (OLPLA) im Sinne der kurzfristigen Werkstattplanung zu realisieren und beispielhaft zu erproben. OLPLA realisiert die online-orientierte Maschinen- und Zellenbelegungsplanung (incl. der Reihenfolgeplanung) und die störungsbedingte Umdisposition auf jeder Planungsebene im hierarchisch organisierten Fertigungsbereich. OLPLA stellt somit eine Funktionskomponente der Werkstattauftragsveranlassung im Rahmen eines CAM-Systems dar. Die verteilte Online-Planung erhält Vorgaben aus EGOPLA und KOLPLA.

Der Schwerpunkt von OLPLA liegt in der kurzfristigen Vorausplanung (Online-Planung) auf jeder Planungsebene im Fertigungsbereich. Somit soll erreicht werden, daß auf ungeplante Ereignisse möglichst schnell und optimal reagiert werden kann. Eine dem Fertigungsverlauf angepaßte Planungsdistanz erscheint ebenso wichtig, wie die Vorgabe entsprechender Optimierungskriterien für die kurzfristige Online-Planung auf Leit- und Zellenebene. Die Unterstützung der Online-Planung durch Vorgaben aus EGOPLA und KOLPLA ist die Voraussetzung für den Integrationsverbund eines verteilten Planungssystems.

## **Verteilte Planung im Fertigungsbereich**

HIPS, das hierarchisch integrierte Planungssystem für den Produktionsbereich wurde als verteiltes Planungssystem konzipiert und realisiert. Die Funktionsverteilung erstreckt sich über die Arbeitsplangenerierung, Belegungsplanung und Werkstattplanung. Im Fertigungsbereich wird die Dezentralisierung der Planungsfunktionen weiter geführt. Das in Abschnitt 2.2 vorgestellte Konzept der hierarchischen flexiblen Fertigungssysteme ermöglicht eine Dezentralisierung der Planungsaufgaben im Fertigungsbereich, so daß die Anforderungsprämissen wie Flexibilität, Bereichsautonomie, usw. erfüllt werden können. Die Verteilung der Planungsfunktionen im Fertigungsbereich auf Leit- und Zellenebene stellt neue Anforderungen an die Arbeitsplangenerierung und die Belegungsplanung. In EGOPLA und KOLPLA wurden solche Anforderungen berücksichtigt, welche sich aufgrund der dezentralisierten Planungsfunktionen im Fertigungsbereich ergeben.

### **Planungsvorgaben für die Online-Planung im Fertigungsbereich**

Die **Offline-Belegungsplanung** (siehe Abschnitt 4.3, KOLPLA) ist notwendige Voraussetzung für OLPLA. Es handelt sich dabei um die in KOLPLA generierten Maschinen-, Stations- und Zellenbelegungspläne sowie einer oder mehrerer optimierter Belegungsalternativen für einzuplanende Werkstücke bzw. Lose. Diese Vorgaben dienen der Online-Planung als optimale Startbedingung vor Fertigungsbeginn.

Die **Arbeitsplangenerierung** (siehe Abschnitt 4.2, EGOPLA) stellt OLPLA bewertete Arbeitsplanalternativen zur Verfügung. Diese Vorgaben dienen der Online-Planung zur Ermittlung fertigungszustandsbezogener Planungsalternativen. Besonders für die störungsbedingte Umdisposition auf Leit- und/oder Zellenebene sind diese Informationen notwendig.

### **Einfluß von Störungen auf die Online-Planung**

Das wichtigste Merkmal der verteilten Online-Planungsalgorithmen im Bereich der rechnerunterstützten Fertigung ist in der Fähigkeit zu sehen, auf ungeplante Ereignisse reagieren zu können, welche während des Fertigungsablaufes auftreten können. Darunter fallen technische Störungen wie Maschinenausfälle, Werkzeugbruch, Defekte an Transportsystemen, aber auch organisatorische Probleme, wie Planungsfehler und Eilaufträge.

Unterstellt man einen störungsfreien Fertigungsablauf, dann würden die in der Offline-Planung (KOLPLA) generierten Vorgaben ausreichen, ein optimales Fertigungsergebnis im Sinn vorgegebener Zielkriterien zu bewirken. Während dem Fertigungsablauf auftretende Störungen mit Offline-Planungsalgorithmen zu kompensieren ist sehr zeitaufwendig und deshalb häufig nicht anwendbar. Sowohl im theoretisch wissenschaftlichen, als auch im praktisch orientierten Sinn ist die Konzeption von online-orientierten, verteilten Planungssystemen zur schnellen Bewältigung von Störungen im Fertigungsbereich ein hoffnungsvoller Ansatz.

Die Konfiguration von Online-Planungssystemen in kleineren Fertigungsbereichen (z. B. Fertigungszellen mit vier Bearbeitungsstationen) ermöglicht besonders effektive Umdispositionsmaßnahmen. Störungen, welche durch Umplanung innerhalb einer Fertigungszelle kompensiert werden können, beeinflussen das Gesamtsystem nicht. Die Online-Planung (bzw. Online-Umdisposition) führt der für die Fertigungszelle zuständige Zellenrechner (siehe Bild 44) durch.

Treten ungeplante Ereignisse in einer Fertigungszelle auf, welche die Planung anderer Fertigungszellen beeinflusst, dann übernimmt die Online-Umdisposition der dafür zuständige und übergeordnet organisierte Leitrechner (siehe Bild 45).

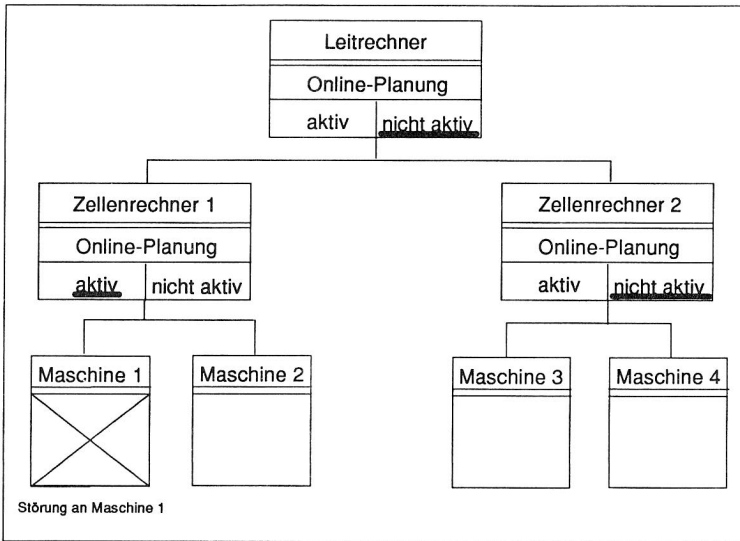


Bild 44: Umplanung bei zelleninterner Störungskompensation

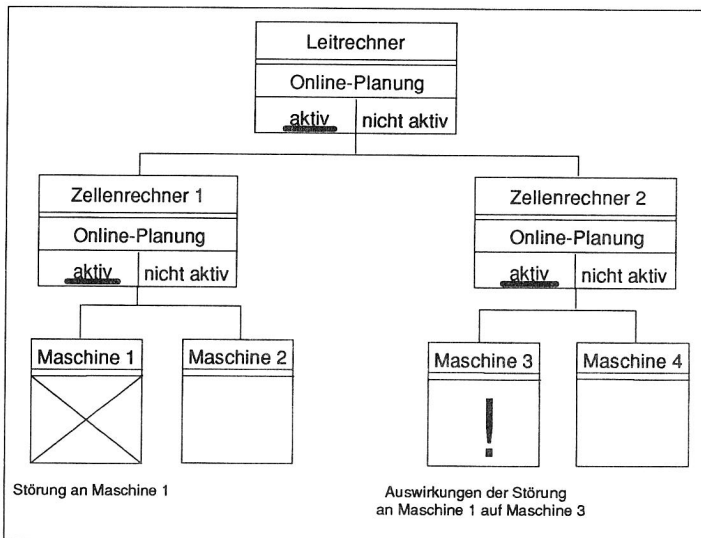


Bild 45: Umplanung bei systemweiter Störungskompensation

**Beispiel:**

Der kurzfristige Ausfall einer Maschine macht die Umplanung bzw. Rücknahme eines bereits eingeplanten Arbeitsganges in einer anderen Zelle erforderlich.

Ist eine befriedigende Kompensation der aufgetretenen Störungen im Kompetenzbereich des Leitrechners nicht möglich, dann wird dies der übergeordneten Belegungsplanung (Aufgabenbereich der PPS) gemeldet. Gegebenenfalls können dann weitere Maßnahmen wie beispielsweise eine Offline-Neuplanung durchgeführt werden.

**4.4.2 Online-Planung in OLPLA**

Das Online-Planungssystem OLPLA wurde für hierarchisch organisierte Fertigungssysteme konzipiert und realisiert. Entsprechend dieser Systemstrukturierung sind die Online-Planungskomponenten auf Leit- und Zellenebene des Fertigungssystems verteilt.

Die Vorgaben aus der Belegungsplanung (KOLPLA) und Arbeitsplangenerierung (EGOPLA) werden vor Fertigungsbeginn dem Leitrechner übermittelt. Die in KOLPLA generierten Zellen- bzw. Stationsbelegungspläne dienen dem Leitrechner bzw. den Zellenrechnern als optimale Startbedingung zum Fertigungsbeginn. Dabei wird unterstellt, daß vor Fertigungsbeginn noch keine ungeplanten Ereignisse zu berücksichtigen sind. Die aus KOLPLA vorgegebenen Zellen- bzw. Stationsbelegungspläne bleiben gültig, solange keine störungsbedingten Planabweichungen auftreten. Die Online-Planungsalgorithmen der Leit- und Zellenebene verarbeiten dabei die in KOLPLA generierten Belegungspläne im Rahmen der vorgegebenen **Planungsdistanz** (passive Phase der Online-Planung).

Treten nun auf Leit- oder Zellenebene Abweichungen vom vorgegebenen Zellen- bzw. Stationsbelegungsplan auf, dann beginnt die aktive Phase der Online-Planung. Die ebenenspezifischen Online-Planungsalgorithmen können durch die Parametrierung verschiedener **Optimierungskriterien** beeinflusst werden. Für den Zellenbediener bzw. Fertigungsleiter sind die Online-Planungsergebnisse transparent darzustellen.

Eine funktionsfähige Online-Planung auf Zellen- und Leitebene macht leistungsfähige und schnelle Kommunikationsmechanismen zwischen den Hierarchieebenen des Fertigungssystems (operative Ebene, Zellenebene, Leitebene) erforderlich. Planungsvorgaben und Rückmeldungen müssen in hoher Frequenz zwischen den Steuerungsebenen ausgetauscht werden.

#### **a) Planungsdistancen in der Online-Planung**

Die Konsequenzen kurzer bzw. langer Planungsdistancen in der Online-Planung sind Gegenstand der folgenden Ausführungen. Die Untersuchung verschiedener Planungsdistancen und deren Auswirkungen auf die in der Offline-Planung generierten Arbeitsplangraphen sind für die Online-Planung im Fertigungsbereich sinnvoll, jedoch nicht Voraussetzung. Das Konzept der Planungsdistanz ist das zentrale Merkmal der Online-Planungsphilosophie im Fertigungsbereich.

**Auswirkungen einer kleinen Planungsdistanz auf die Online-Planung: (+ positive, - negative Auswirkung)**

**Beispiel: Planungsdistanz ( $d=1$  oder  $d=2$ )**

- + Auf ungeplante Ereignisse (z. B. Maschinenstörung) kann in der Online-Planung schnell reagiert werden. Der Rechen- und Zeitaufwand für notwendige Umdispositionen ist relativ gering, da nur wenige Fertigungsalternativen berücksichtigt werden müssen.

- Eine kurze Planungsdistanz bereitet sowohl bei der fertigungsbegleitenden Online-Planung als auch bei der störungsbedingten Umplanung Probleme bei der Bereitstellung der notwendigen Betriebsmittel (beispielsweise Werkzeuge, NC-Programme, usw.).
- Kurze Planungsdistancen sind bei kurzen arbeitgangbezogenen Bearbeitungszeiten nicht sinnvoll.
- Kurze Planungsdistancen nutzen die verwendbaren Arbeitsplangraphen nur unvollständig. Dies reduziert die Anzahl der verwendbaren Planungsalternativen.

**Auswirkungen einer großen Planungsdistanz auf die Online-Planung: (+ positive, - negative Auswirkung)**

**Beispiel:** Planungsdistanz ( $d=d_{\max}$  oder  $d=d_{\max}/2$ )

- + Eine große Planungsdistanz ermöglicht die Untersuchung vieler Fertigungsalternativen, was in der Regel zu besseren Planungsergebnissen führt als die Verwendung kleiner Planungsdistancen. Die Planungsdistanz  $d=d_{\max}$  liefert unter Berücksichtigung der rechentechnischen Rahmenbedingungen optimale Planungsergebnisse.
- + Die arbeitgangbezogene Bereitstellung von Betriebsmitteln ist unkritisch.
- Beim Auftreten ungeplanter Ereignisse im Fertigungsbereich werden die bereits optimierten Planungsergebnisse ungültig.
- Eine große Planungsdistanz erfordert allgemein einen hohen Rechen- und Zeitaufwand bei der Planung. Die resultierenden Auswirkungen sind unter dem Begriff der kombinatorischen Explosion [7,10] bekannt.



Die kurze Gegenüberstellung der Vor- und Nachteile kleiner und großer Planungsdistancen bei der Online-Planung führt zu dem Konzept optimierender und individuell adaptierbarer Planungsdistancen  $d_{ad}$ .

Die Leistungsfähigkeit eines Online-Planungssystems im Fertigungsbereich hängt maßgeblich von der optimalen Einstellung der zugrundeliegenden Planungsdistanz ab. Sowohl während der passiven als auch der aktiven Phase der Online-Planung ist die Größe der Planungsdistanz von verschiedenen Fertigungsparametern abhängig. Diese sind in Bild 46 beispielhaft dargestellt. In verteilten Planungssystemen ist eine Abstimmung der Planungsdistancen zwischen den Planungsebenen (Leitebene, Zellenebene) erforderlichlich.

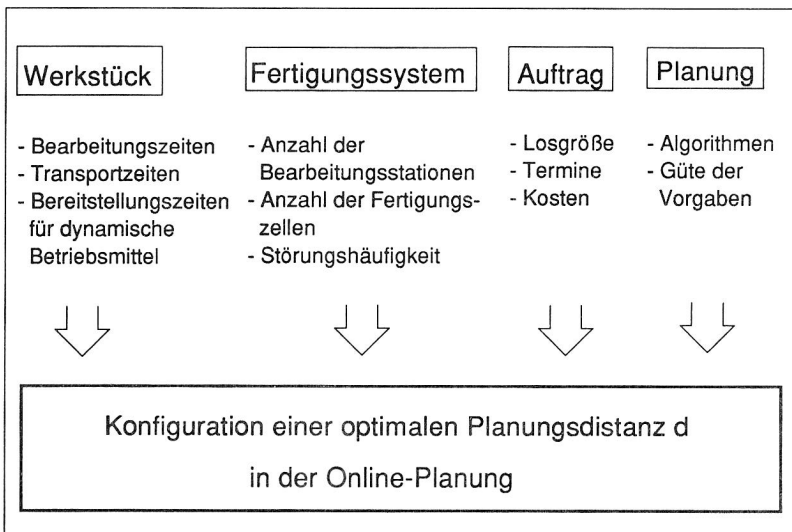


Bild 46: Einflußparameter für die Konfiguration der Planungsdistancen

## **b) Optimierungskriterien**

In der passiven Phase der Online-Planung werden die Planungsvorgaben aus KOLPLA von den Planungsinstanzen im Fertigungsbereich umgesetzt, somit auch die in KOLPLA vorgegebenen Optimierungskriterien. Treten Störungen auf, welche zu Planabweichungen führen, dann setzt die aktive Phase der Online-Planung ein. Dies kann auch zu einer Veränderung der in KOLPLA zugrundegelegten Optimierungskriterien führen. Die Güte der bei der Online-Planung verwendeten Optimierungskriterien hängt maßgeblich von der Planungsdistanz der Planungsalgorithmen ab. Kurzen Planungsdistancen können die Optimierungskriterien aus der Arbeitsplangenerierung (EGOPLA) zugrundegelegt werden. Für große Planungsdistancen sind Optimierungskriterien, welche in der Belegungsplanung (KOLPLA) verwendet wurden sinnvoller. Im Gegensatz zur Off-line-Planung werden in der verteilten Online-Planung höhere Anforderungen an Optimierungskriterien gestellt. Die hierarchische Organisationsstruktur im Fertigungsbereich erfordert die Verwendung ebenenspezifischer Optimierungskriterien bei Planungsentscheidungen.

### **Optimierungskriterien auf Leitebene**

Auf der Leitebene wird in einem hierarchischen Fertigungssystem das vorgegebene Fertigungsspektrum auf die vorhandenen Fertigungszellen eingeplant. Stehen für die Durchführung eines Arbeitsganges verschiedene Fertigungszellen mit ihren Bearbeitungsstationen zur Verfügung, dann müssen durch adäquate Optimierungskriterien die Planungsentscheidungen unterstützt werden. Beispiele für Optimierungskriterien auf Leitebene sind die Minimierung der Zellentransfers, die Minimierung der angelaufenen Bearbeitungskosten und die Anzahl der zelleninternen Bearbeitungsalternativen für den einzuplanenden Arbeitsgang. Die Optimierungskriterien, welche zur Online-Planung auf Leitebene verwendet werden, unterstützen systemweite Optimierungsziele.

### Optimierungskriterien auf Zellenebene

Auf der Zellenebene wird die Einplanung von Arbeitsgängen eines vorgegebenen Fertigungsspektrums auf die Maschinen vorgenommen. Dabei sind bei vorgegebenen Bearbeitungsalternativen entsprechende Optimierungskriterien anzuwenden, um zelleninterne Planungsentscheidungen fällen zu können. Denkbare Optimierungskriterien auf Zellenebene sind die Minimierung der Zellendurchlaufzeit, die Maximierung der Zellen- bzw. Maschinenauslastung und die Minimierung der zelleninternen Rüstzeiten bzw. -kosten.

#### c) Planung und störungsbedingte Umdisposition auf Zellenebene

In diesem Abschnitt werden Funktionen zur online-orientierten Planung und störungsbedingten Umdisposition auf Zellen-ebene als Teil des Werkstattplanungssystems OLPLA beschrieben.

Voraussetzung ist, daß der übergeordnete Fertigungsleit- rechner einer ausgewählten Fertigungszelle ein bestimmtes Auf- gabenspektrum zur weiteren Einplanung vorgegeben hat. Der Zellenrechner kann nun unter Berücksichtigung verschiedener Rahmenbedingungen den vorliegenden Flexibilitätsspielraum zur zelleninternen Planung nutzen.

Treten während des Fertigungsablaufes signifikante Planab- weichungen im Zellenbereich auf, dann muß der vorgegebene Flexibilitätsspielraum dazu genutzt werden, die Planabwei- chungen durch zelleninterne Umdisposition zu kompensieren. Falls eine zelleninterne Umplanung zellenexterne Planungs- konsequenzen hervorruft, wird der Fertigungsleitrechner aktiviert (siehe Bild 47).

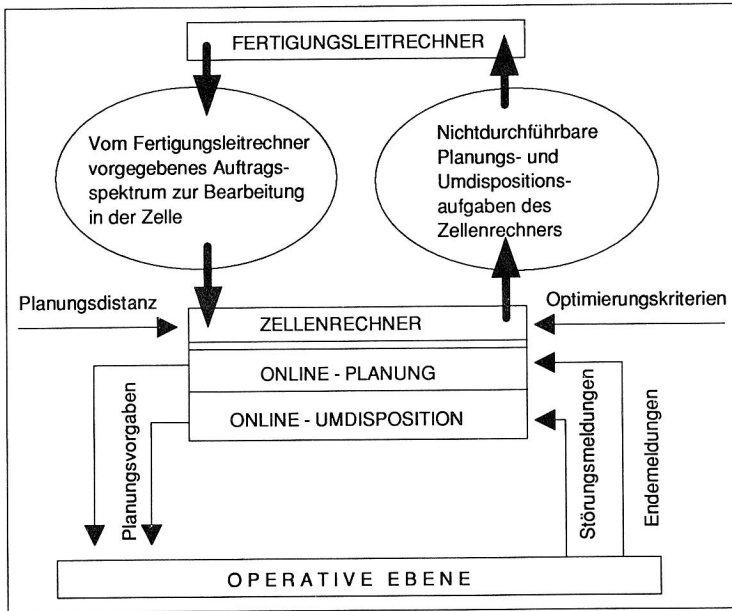


Bild 47: Planung und Umdisposition auf Zellebene

#### Kernfunktionen zur Online-Planung auf Zellebene

Der Fertigungsleitreehner übergibt dem Zellenreehner ein bestimmtes Arbeitsgangsspektrum, welches in der Fertigungszelle bearbeitet werden soll. Dabei plant der Fertigungsleitreehner die vorgegebenen Arbeitsgänge nicht auf einsetzbare Bearbeitungsstationen in der Zelle ein, sondern überläßt diese Aufgabe den Zellenrechnern. Durch die Vorgabe von Fertigungsalternativen in Form von Zellenarbeitsplänen erhalten die Zellenreehner den erforderlichen Planungsspielraum.

#### **Planungsfunktion: Werkstückselektion**

Liegen dem Zellenrechner mehrere Werkstücke, Lose bzw. Aufträge zur Einplanung vor, dann muß eine entsprechende Einplanungsreihenfolge ermittelt werden. Die Selektion der einzuplanenden Objekte ist von verschiedenen Einflußparametern (z. B. Prioritäten, Termine, Zeitbedingungen, Optimierung durch Reihenfolgebildung und technologische Zwänge) abhängig. Als Ergebnis werden die Fertigungsobjekte selektiert und identifiziert und können im nächsten Schritt auf eine Bearbeitungsstation eingeplant werden.

#### **Planungsfunktion: Maschinenselektion**

Für die selektierten Fertigungsobjekte, es kann sich dabei auch um Einzelwerkstücke handeln (Losgröße 1), werden aus allen möglichen zelleninternen Fertigungsalternativen die optimalen Bearbeitungsmöglichkeiten ausgewählt.

Unter Berücksichtigung des momentanen Zellenzustandes wird der selektierte Arbeitsgang einer bestimmten Bearbeitungsstation zugewiesen und in die Ausführungswarteschlange dieser Maschine gestellt. Kriterien, welche die Maschinenselektion beeinflussen können sind beispielsweise der Zustand der Fertigungszelle, Bearbeitungskosten, Bearbeitungszeiten und Transportzeiten.

#### **Planungsfunktion: Zellenaktualisierung**

Jeder zelleninterne Einplanungsvorgang führt zu einer Veränderung des Planungszustandes in der Zelle. Für alle weiteren Planungsvorgänge ist die schnelle Anpassung der Informationspools (Dateien) an den neuen Planungszustand von zentraler Bedeutung. Auch das Zellenabbild während der Einplanungsvorgänge wird von dieser Planungsfunktion geführt. Sowohl nach Einplanungs-, als auch nach Umdispositionsvorgängen, tritt die Zellenaktualisierung in Aktion.

### **Planungsfunktion: Zelleninterne Fertigungsdatenverarbeitung**

Sowohl nach Beendigung eines Arbeitsganges an einer Maschine, als auch nach dem Auftreten einer Störung, müssen die anfallenden Fertigungsdaten verarbeitet werden.

Tritt in der Fertigungszelle eine Störung auf, was zu einer zelleninternen Planabweichung führt, so werden die entsprechenden Umdispositionsmaßnahmen von der Fertigungsdatenverarbeitung initiiert. Die Stornierung der durch die Störung unmittelbar betroffenen Arbeitsgänge wird ebenso behandelt wie die Stornierung weiterer eingeplanter Arbeitsgänge der betroffenen Fertigungsobjekte. Eine ordnungsgemäße Endmeldung eines Arbeitsganges führt ebenfalls zur Aktivierung der Fertigungsdatenverarbeitung.

#### **d) Einplanung von Arbeitsgängen im Zellenbereich**

Nach Fertigstellung eines Arbeitsganges in einer Fertigungszelle oder nach Zuweisung von Arbeitsgängen vom Fertigungsleitendrechner muß der Zellenrechner entsprechend der gewählten Planungsdistanz weitere Arbeitsgänge einplanen. Unter Berücksichtigung des aktuellen Zellenzustandes, vorgegebener Optimierungskriterien und Rahmenbedingungen werden die einzuplanenden Arbeitsgänge in die entsprechenden Warteschlangen der selektierten Bearbeitungsstationen eingereiht. Bild 48 und Bild 49 zeigen beispielhaft einen zelleninternen Einplanungsvorgang. Die dem Beispiel zugrundeliegende Fertigungszelle besteht aus drei Maschinen (M1,M2,M3) und einem Zellenrechner.

#### **Warteschlangen vor der Einplanung auf Maschinen im Zellenbereich (siehe auch Bild 48)**

Vor der Einplanung der anstehenden Werkstücke (W1 und W2) befinden sich an den drei Maschinen die Werkstücke W4, W5 und W6 in Bearbeitung. In den Planungswarteschlangen der

Maschinen befinden sich Arbeitsgänge der Werkstücke W7, W8 und W9. Die Rückmeldewarteschlangen sind zu diesem Zeitpunkt leer.

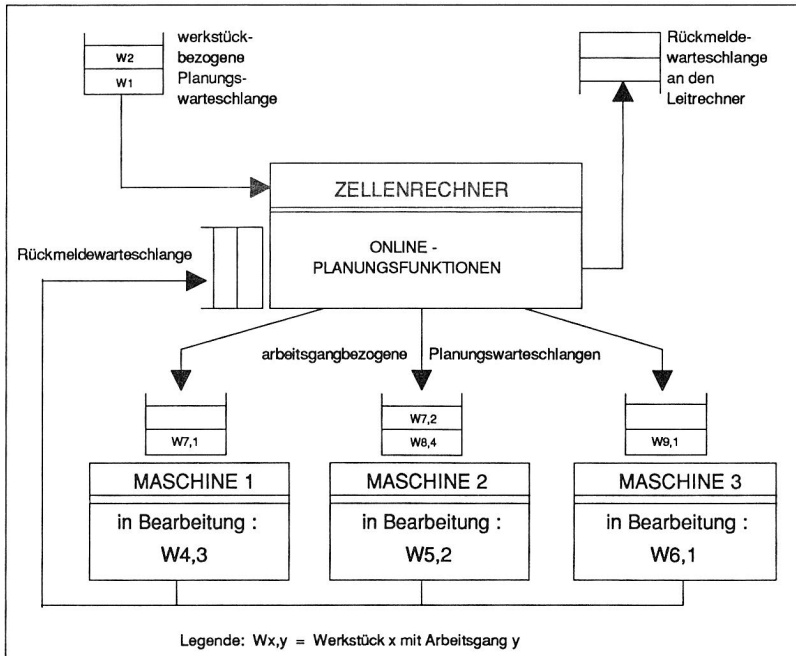


Bild 48: Warteschlangen vor Einplanung auf Fertigungszellen

### Warteschlangen während der Einplanung auf Maschinen

Die Online-Planungsfunktionen erhalten die Aufgabe, Arbeitsgänge der Werkstücke W1 und W2 zellenintern einzuplanen. Die Anzahl der einzuplanenden Arbeitsgänge eines Werkstückes ist abhängig von der gewählten Planungsdistanz. Unter Berücksichtigung von zelleninternen Fertigungsalternativen generiert der Online-Planungsalgorithmus einen Planungsvorschlag.

## Warteschlangen nach der Einplanung auf Maschinen

Das Ergebnis der Online-Planung ist in Bild 49 dargestellt.

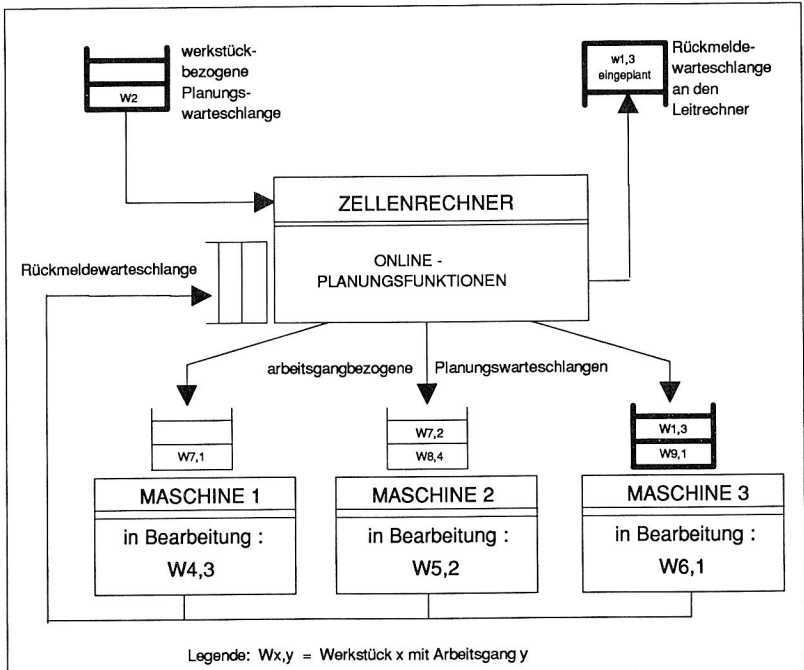


Bild 49: Warteschlangen nach Einplanung auf Maschinen

Der nächste, zellenintern auszuführende Arbeitsgang von Werkstück W1 wird in die Planungswarteschlange von Maschine M3 eingereiht. Natürlich meldet der Zellenrechner das entgültige Planungsergebnis an den Fertigungsleitreehner zurück. Danach steht Werkstück W2 zur zelleninternen Einplanung an.



#### **e) Umdisposition nach Störung im Zellenbereich**

Tritt während der laufenden Fertigungsperiode im Zellenbereich eine Störung ein, so sind die Auswirkungen auf das bereits eingeplante Arbeitsgangsspektrum zu analysieren und entsprechende Umplanungen vorzunehmen. Umdispositionen, welche im Zellenbereich möglich sind, werden durch Online-Planungsalgorithmen des Zellenrechners durchgeführt und nachfolgend beschrieben. Die planerischen Auswirkungen einer Störung auf andere Fertigungszellen können nur vom Fertigungsleitreechner kompensiert werden.

#### **Warteschlangen vor einer störungsbedingten Umdisposition im Zellenbereich**

Im nachfolgenden Beispiel zur störungsbedingten Umdisposition im Zellenbereich wird vor Störungseintritt eine Planungssituation, wie in Bild 49 dargestellt, zugrundegelegt. Dabei sind alle Stationen der Fertigungszelle mit Bearbeitungsaufgaben beschäftigt und intakt. Die Planungswarteschlangen vor den Maschinen sind mit anstehenden Bearbeitungsaufgaben gefüllt. Auch die werkstückbezogene Planungswarteschlange vor dem Zellenrechner ist nicht leer.

#### **Warteschlangen während einer störungsbedingten Umdisposition im Zellenbereich**

Nachdem der Arbeitsgang 2 von Werkstück W5 auf Maschine 2 abgeschlossen wurde, fällt die Maschine 2 auf unbestimmte Zeit aus. Folgende Situation ergibt sich:

- 1) Auf Maschine M2 eingeplante Arbeitsgänge der Werkstücke W7 und W8 müssen kurzfristig umgeplant werden.
- 2) Auswirkungen der Störung auf andere Planungswarteschlangen sind zu analysieren und Umplanungen sind vorzunehmen.
- 3) Werkstück W5, dessen Arbeitsgang kurz vor Störungsbeginn beendet wurde, muß weitergeplant werden.

Der zelleninterne Online-Planungsalgorithmus muß folgende Aufgaben ausführen:

- zu 1) Der Zellenrechner stellt fest, daß aufgrund der Störung an M2 die Werkstücke W8 und W7 umzuplanen sind. Es ist jedoch ratsam zunächst W7 neu einzuplanen, da der Vorgängerarbeitsgang des Werkstückes auf Maschine M1 eine kurze Bearbeitungsdauer hat.
- zu 2) Eine zelleninterne Zustandsanalyse ergibt, daß keine weiteren Nachfolgearbeitsgänge der Werkstücke W7 und W8 in der Zelle eingeplant sind. Möglicherweise sind solche Arbeitsgänge schon in anderen Zellen eingeplant. Diese Analyseaufgabe obliegt jedoch dem Fertigungsleitreechner.
- zu 3) Der Nachfolgearbeitsgang von Werkstück 5 ist auf Maschine M1 der betrachteten Zelle durchführbar. Die entsprechende Einplanung wird angestoßen.

#### **Warteschlangen nach einer störungsbedingten Umdisposition im Zellenbereich**

Das Ergebnis der durch den Ausfall von Maschine M2 resultierenden Umdisposition wird für dieses Beispiel in Bild 50 erläutert. Dabei wurde der anstehende Arbeitsgang von Werkstück W7 auf Maschine M3 eingeplant; d.h. eine zelleninterne Umdisposition eines Arbeitsganges konnte mit Erfolg durchgeführt werden. Die Umplanung von Werkstück W8 muß dem Fertigungsleitreechner übergeben werden. Der Nachfolgearbeitsgang von W5 kann auf Maschine M1 durchgeführt werden.

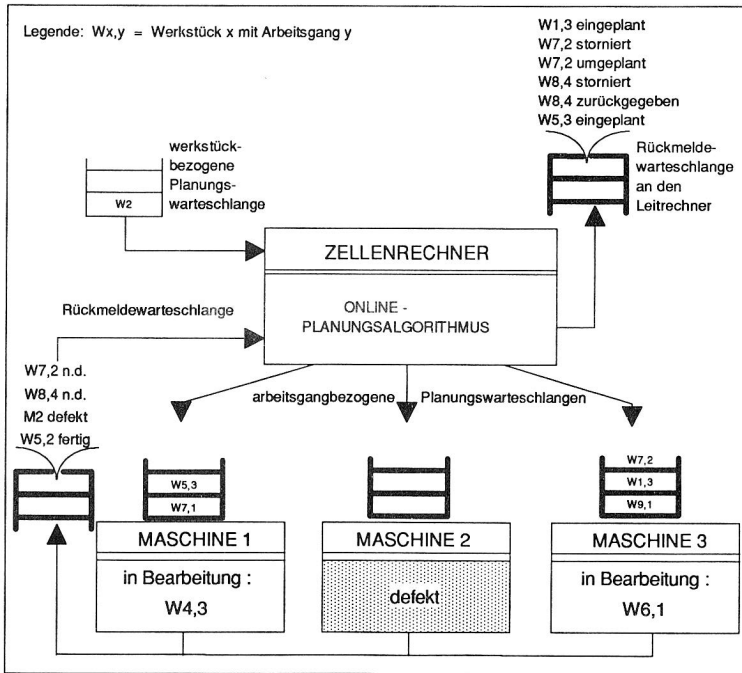


Bild 50: Warteschlangen nach störungsbedingter Umdisposition im Zellenbereich mit Rückweisung

#### f) Planung und störungsbedingte Umdisposition auf Leitebene

Im folgenden Abschnitt werden für die Leitebene des Werkstattplanungssystems OLPLA Funktionen zur Online-Planung und störungsbedingten Umdisposition beschrieben.

Die Vorgaben für die Planungsaufgaben des Fertigungsleitreechners stammen von der Arbeitsplangenerierung (EGOPLA) und Belegungsplanung (KOLPLA). Der Leitreechner hat die Aufgabe, unter Berücksichtigung verschiedener Optimierungskriterien und Rahmenbedingungen, den vorgegebenen Flexibilitätsspielraum auf der Leitebene des Fertigungssystems zu nutzen (siehe Bild 51). Dazu gehört die optimale, fertigungsbeglei-

tende Einplanung des vorliegenden Fertigungsspektrums auf die untergeordneten Fertigungszellen.

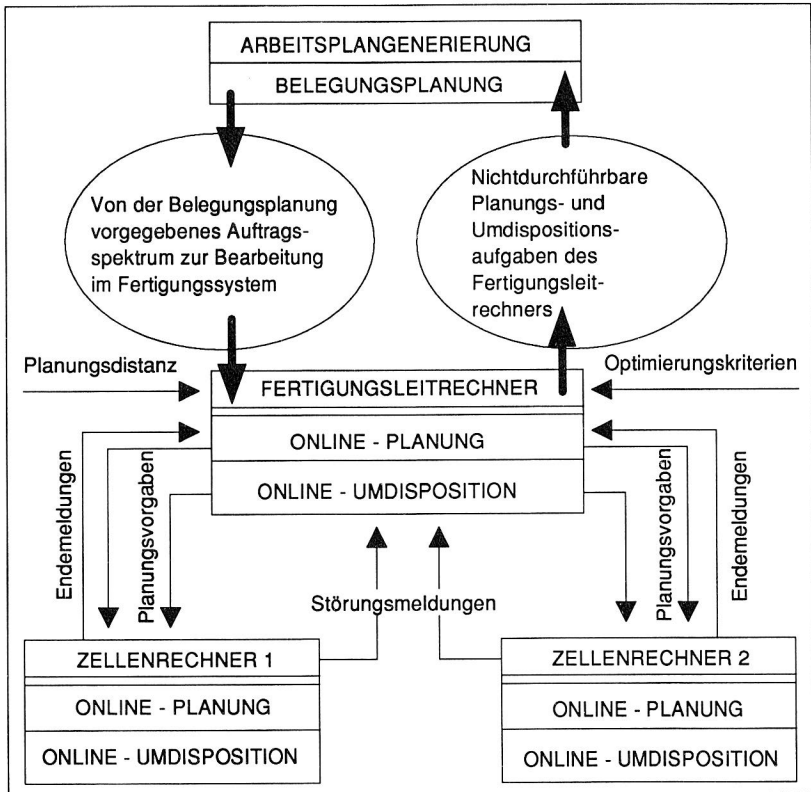


Bild 51: Planung und Umdisposition auf Leitebene

Treten während des Fertigungsablaufes ungeplante Ereignisse auf, beispielsweise meldet ein Zellenrechner nicht durchführbare Planungs- und Umdispositionsaufgaben an den Leitrechner oder im zellenübergreifenden Teil des Fertigungssystems treten Störungen auf, dann hat der Leitrechner für die notwendigen und möglichen Umplanungsmaßnahmen zu sorgen.

Dazu stehen aufgrund flexibler Vorgabestrukturen dem Leit-rechner verschiedene Planungsfreiheitsgrade zur Verfügung. Falls keine brauchbaren Planungs- bzw. Umplanungsergebnisse ermittelt werden können, dann wird diese Aufgabe dem über-geordneten Belegungsplanungssystem (PPS) übergeben, was häufig zu einer systemweiten Umplanung führt.

### **Kernfunktionen zur Online-Planung auf Leitebene**

Der Fertigungsleitrechner muß ein ihm von der Belegungsplanung vorgegebenes Fertigungsspektrum zur weiteren Einplanung an die ihm unterlagerten Zellenrechner delegieren. Unter Nutzung flexibler Arbeitsplangraphen fällt der Fertigungsleitrechner dabei die Entscheidung, in welcher Fertigungszelle der Fertigungsfortschritt erwirkt werden soll. Der Mindestfunktionsumfang zur Planung und Umdisposition auf Leitebene wird im folgenden kurz erläutert.

#### **Planungsfunktion: Werkstückselektion**

Bei der Einplanung des vorliegenden Fertigungsspektrums auf die untergeordneten Fertigungszellen ist eine bestimmte Reihenfolge (z. B. Prioritäten, Termine) zu beachten. Diese ist durch die Belegungsplanung (KOLPLA) vorgegeben und von den Arbeitsplangraphen abhängig. Die Werkstückselektion auf Leitebene unterscheidet sich nur unwesentlich von der Werkstückselektion auf Zellenebene.

#### **Planungsfunktion: Zellenselektion**

Mögliche Kriterien, welche bei der Zellenselektion Verwendung finden können, sind die Anzahl der alternativen Bearbeitungsmöglichkeiten in einer Zelle (Sicherheitsstrategie), die Anzahl der in Sequenz ausführbaren Arbeitsgänge in einer Zelle und die Kapazitätsauslastung der Zellen.

Die Kriterien, welche bei der Zellenselektion auf Leitebene bzw. bei der Maschinenselektion auf Zellenebene Verwendung finden, sind grundsätzlich verschieden. Während erstere eher nicht quantifizierbar sind, müssen letztere streng quantifizierbar sein. Nach der Zellenselektion wird das Arbeitsgangspektrum in die Warteschlange der ausgewählten Fertigungszelle eingereiht. Die weitere Bearbeitung dieser Anforderung übernimmt der betreffende Zellenrechner.

#### **Planungsfunktion: Zellenübergreifende Fertigungsdatenverarbeitung**

Sowohl das Ergebnis der exakten Einplanung eines Arbeitsganges auf eine Bearbeitungsstation durch den zuständigen Zellenrechner, als auch die Meldung einer nicht durchführbaren Planungs- und Umdispositionsaufgabe von einem Zellenrechner muß dem übergeordneten Fertigungsleitreechner gemeldet werden. Die Behandlung dieser Rückmeldeinformationen fällt in den Aufgabenbereich der zellenübergreifenden Fertigungsdatenverarbeitung und findet im Leitreechner statt.

Hat das Auftreten eines ungeplanten Ereignisses in einer Fertigungszelle auch zellenübergreifende Konsequenzen, dann ist es Aufgabe des Leitrechners die nötigen Umplanungsmaßnahmen durchzuführen. Diese führen sowohl auf Leitebene als auch auf Zellenebene zu Planabweichungen. Die Rückmeldung einer ordnungsgemäßen Einplanung im Zellenbereich ist für eine korrekte Weiterplanung auf der Leitebene notwendig.

#### **g) Einplanung von Arbeitsgängen und Fertigungszellen**

Der Fertigungsleitreechner hat die Aufgabe, das von der Belegungsplanung vorgegebene Fertigungsspektrum auf die unterlagerten Fertigungszellen einzuplanen. Weiterhin müssen Werkstücke, welche in einer Fertigungszelle bearbeitet, aber noch nicht den geforderten Fertigungsstand erreicht haben,

vom Fertigungsleitreechner weitergeplant werden. Die verwendete Planungsdistanz des Fertigungsleitrechners und die zugrundegelegten Entscheidungs- und Optimierungskriterien beeinflussen die Planungsdynamik in besonderer Weise.

Bild 52 und Bild 53 veranschaulichen beispielhaft die Einplanungsvorgänge des Leitrechners auf die unterlagerten Fertigungszellen. Das dem Beispiel zugrundeliegende Fertigungssystem besteht aus drei Fertigungszellen (Z1,Z2,Z3) und einem Fertigungsleitreechner.

#### **Warteschlangen vor der Einplanung auf Fertigungszellen**

Vor der Einplanung der durch die Belegungsplanung (siehe Bild 52) vorgegebenen Werkstücke, Lose bzw. Aufträge (hier: W15, W18, W29, W40) befinden sich in der werkstückbezogenen Planungswarteschlange der Fertigungszelle 1 die Werkstücke W1 und W2. In der Fertigungszelle sind Arbeitsgänge eingeplant bzw. in Bearbeitung. Die Rückmeldewarteschlangen sind noch leer.

#### **Warteschlangen während der Einplanung auf Fertigungszellen**

Die in der auftragsbezogenen Planungswarteschlange (siehe dazu Bild 52) vorgegebenen Werkstücke muß der Online-Planungsalgorithmus des Fertigungsleitrechners auf die unterlagerten Fertigungszellen einplanen. Das Einplanungsergebnis ist vom Fertigungszustand der Objekte, von der gewünschten Planungsdistanz, von zellenübergreifenden Entscheidungs- und Optimierungskriterien (Zellenselektion) und von den aktuellen Zellenzuständen abhängig.

Der Online-Planungsalgorithmus fällt somit im Rahmen der Zellenselektion eine Entscheidung und fügt die zu fertigenden Werkstücke in die werkstückbezogenen Planungswarteschlangen der entsprechenden Fertigungszellen ein.

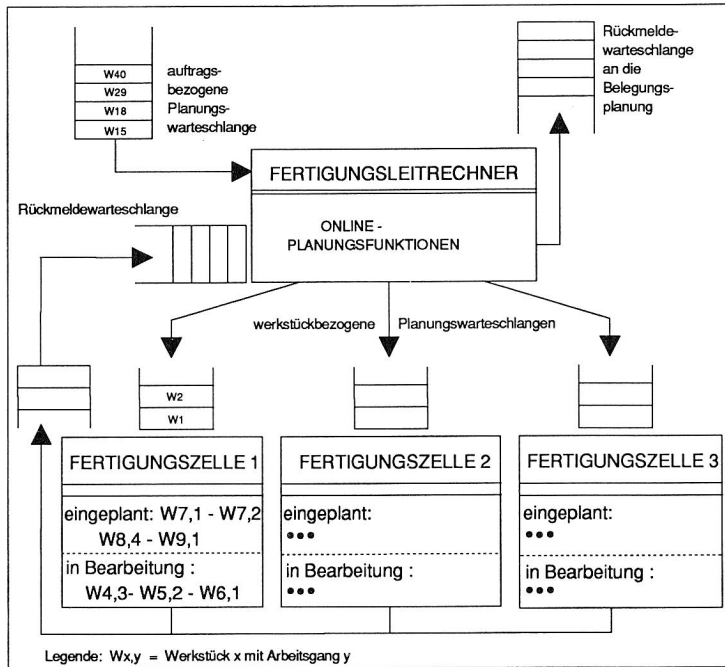


Bild 52: Planungswarteschlangen vor Einplanung auf Fertigungszellen

### Warteschlangen nach der Einplanung auf Fertigungszellen

Das Ergebnis der Online-Planung auf Leitebene ist in Bild 53 dargestellt. Dabei wurden die anstehenden Werkstücke (W15, W18, W29) auf entsprechende Fertigungszellen (im Beispiel Fertigungszelle 2 und 3) eingepplant. Die weitere Einplanung auf Zellenebene übernehmen die Zellenrechner. Sowohl die erfolgreiche Einplanung auf Zellenebene als auch die Rückweisung nach einem Einplanungsversuch wird in die Rückmeldewarteschlange eingetragen und dem Leitreechner zur weiteren Bearbeitung übergeben.



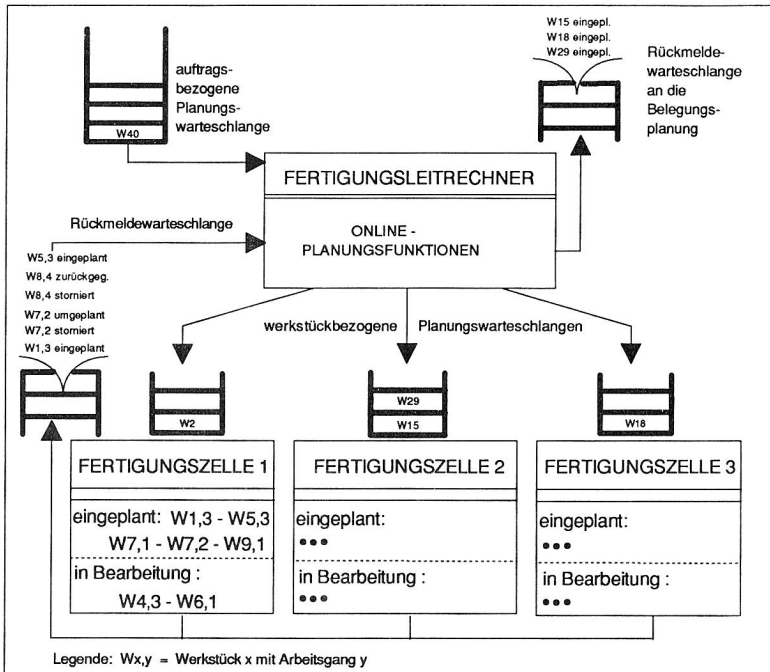


Bild 53: Warteschlangen nach Einplanung auf Fertigungszellen

#### h) Umdisposition nach Störung auf Leitebene

Treten während der laufenden Fertigungsperiode Störungen im zellenübergreifenden Bereich des Fertigungssystems (z. B. Ausfall eines Teiles des globalen Materialflußsystems) auf, oder meldet ein Zellenrechner die Nichtdurchführbarkeit bereits zugewiesener Fertigungsaufgaben, dann muß auf Leitebene umdisponiert werden. Störungen, welche im Zellenbereich auftreten (z. B. ein längerer Ausfall einer Bearbeitungsstation) und zellenübergreifende Auswirkungen haben, führen zu Umplanungsmaßnahmen auf Leitebene. Dies tritt bei der Verwendung großer Planungsdistancen häufiger auf als beim Einsatz kleiner Planungsdistancen.

Bild 54 erläutert beispielhaft einen zellenübergreifenden Umdispositionsvorgang.

#### **Warteschlangen vor einer störungsbedingten Umdisposition auf der Leitebene**

Aufgrund einer längerfristigen Maschinenstörung im Zellenbereich (Werkstück 8 mit Arbeitsgang 4 wird storniert und anschließend an den Leitrechner zurückgewiesen) wird ein Umplanungsverfahren auf Leitebene eingeleitet. Der Zustand der Planungwarteschlangen nach einem nicht erfolgreichen Umdispositionsversuch im Zellenbereich und vor den Umplanungsmaßnahmen auf Leitebene ist in Bild 53 dargestellt.

#### **Warteschlangen während einer störungsbedingten Umdisposition auf der Leitebene**

Bei einer störungsbedingten Umdisposition auf der Leitebene sind die Informationen aus der an den Leitrechner gerichteten Rückmeldewarteschlange maßgeblich und müssen mit hoher Priorität bearbeitet werden. Neue Ein- oder Weiterplanungsaufgaben treten dabei in ihrer Dringlichkeit zurück. Im hier betrachteten Fallbeispiel muß das auf Zellenebene stornierte und an den Leitrechner zurückgewiesene Werkstück W8 auf Leitebene umdisponiert werden. Findet der Leitrechner eine andere Fertigungszelle in der das Werkstück weiterbearbeitet werden kann, dann wird es in die werkstückbezogene Planungwarteschlange dieser Fertigungszelle eingetragen. Findet der Leitrechner keine weitere Einplanungsmöglichkeit, dann geschieht ein Eintrag in die Rückmeldewarteschlange zur Belegungsplanung.

## Warteschlangen nach einer störungsbedingten Umdisposition auf der Leitebene

In Bild 54 ist das Ergebnis der Umplanungsmaßnahme auf Leitebene nach dem erfolglosen Umplanungsversuch auf Zellenebene beschrieben. Ausgangspunkt dieser Umplanungsaktion war eine aufgetretene Maschinenstörung (M2) in Fertigungszelle 1. Der Leitrechner plant das betroffene Werkstück W8 in Fertigungszelle 2 ein. Dies wird auch an die Belegungsplanung gemeldet.

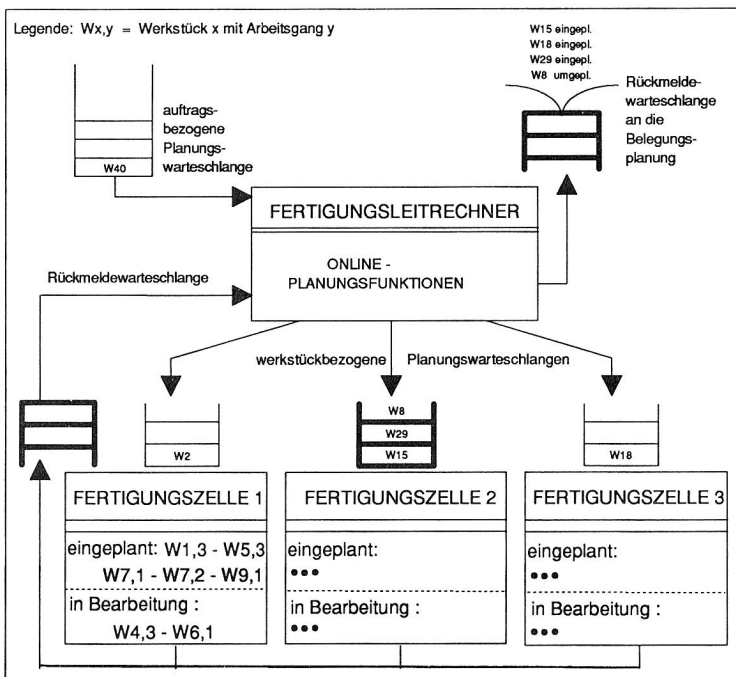


Bild 54: Warteschlangen nach störungsbedingter  
Umdisposition auf Leitebene

### i) Online-Simulation

Online-Planungsalgorithmen auf Zellen- und Leitebene erweitern den planerisch-dispositiven Flexibilitätsspielraum im Fertigungsbereich. Die Fähigkeit eines verteilten Planungssystems, auf ungeplante Ereignisse schnell und optimal reagieren zu können, ist nur mit fertigungsbegleitenden Planungsmechanismen realisierbar. Planungsdistanzen und Optimierungskriterien beeinflussen die Planungs- und Umdispositionsergebnisse direkt.

Bestimmte Rahmenbedingungen einzuhalten ist Vorgabe für jedes Planungssystem. Dabei kann es sich um die Einhaltung vorgegebener Anfangs- und Endtermine oder um produktbezogene Herstellungskosten handeln. Auch andere Zielsetzungen, welche ein fertigungsnahes Planungssystem beachten muß, sind denkbar.

Das vorgestellte, verteilte Online-Planungssystem stellt Mechanismen zur Verfügung, unter Nutzung vorgegebener Planungsfreiheiten auf eintretende Störungen effektiv reagieren zu können. Oberste Prämisse des Online-Planungssystems ist es, den planerischen Flexibilitätsspielraum so auszunützen, daß die dabei erzielbaren Fertigungsergebnisse die vorgegebenen Rahmenbedingungen erfüllen. Diese werden üblicherweise von einem der Fertigung übergeordneten PPS-Systeme oder von einem entsprechenden Belegungsplanungssystem (KOLPLA), wie in dieser Arbeit beschrieben, vorgegeben. Neben dem Online-Planungssystem (OLPLA), welches Planungs- und Umdispositionsaufgaben fertigungsbegleitend ausführt, ist eine weitere Planungskomponente, welche die vorgegebenen Rahmenbedingungen überprüft, notwendig.

#### Simulationskomponente von OLPLA

Sowohl auf Zellen- als auch auf Leitebene sind die in Abschnitt 4.4.2 beschriebenen Online-Planungsalgorithmen zur Lösung von Überprüfungsaufgaben einsetzbar (siehe Bild 55).

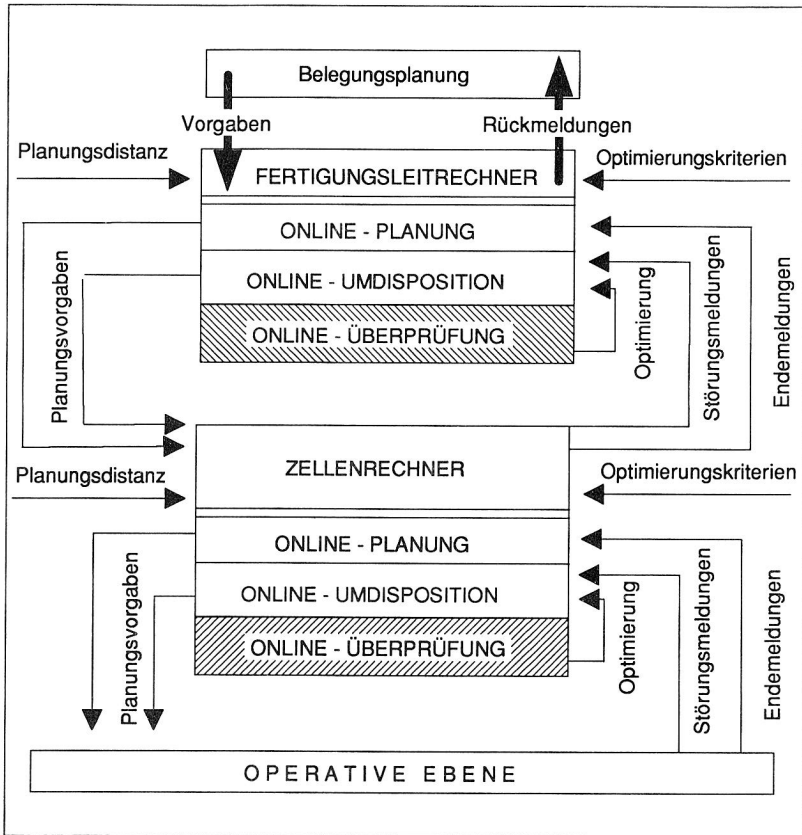


Bild 55: Online-Überprüfung auf Leit- und Zellenebene

### Wann müssen derartige Überprüfungen durchgeführt werden ?

Treten auf Zellen- oder/und Leitebene signifikante Planabweichungen auf, dann sind entsprechende Umdispositionsmaßnahmen durchzuführen. Werden im Rahmen der Online-Planung eine oder mehrere Möglichkeiten zur Fortsetzung der laufenden Fertigung gefunden, dann muß überprüft werden, ob die vorgegebenen Rahmenbedingungen noch erfüllt werden können.

Es ist ratsam, nach jeder erfolgreichen Umdisposition, die übergeordneten Zielsetzungen auf Erfüllbarkeit zu überprüfen.

**Wie können die bestehenden Online-Planungsalgorithmen zur Überprüfung der Rahmenbedingungen genutzt werden ?**

Nachdem das Ergebnis einer erfolgreichen Umdisposition vorliegt, kann die entsprechende Planungsinstanz (Leit- oder Zellenrechner) den Online-Planungsalgorithmus zur Ermittlung der durch die Umplanung ausgelösten Planungskonsequenzen einsetzen. Dabei werden die gleichen Planungsdistancen und Optimierungskriterien wie bei der Online-Planung und Online-Umdisposition zugrundegelegt. Unter diesen Prämissen und unter Berücksichtigung des vorliegenden Umplanungsergebnisses wird der Online-Planungsalgorithmus aktiviert. Die real durchzuführenden Bearbeitungsschritte und die entsprechenden Endemeldungen werden auf der Basis des vorliegenden Datmaterials vom Online-Planungsalgorithmus simuliert. Nach Simulationsende liegen als Ergebnisse alle Informationen über die voraussichtlichen Fertigstellungstermine der Werkstücke, Lose bzw. Aufträge, Maschinenauslastungsübersichten und Herstellungskosten vor.

Die Überprüfung, ob das Umplanungsergebnis noch die vorgegebenen Rahmenbedingungen erfüllt, ist trivial. Auf der Basis dieser Analyse kann eine erneute Online-Umdisposition bzw. eine Rückmeldung an das übergeordnete Planungssystem erfolgen. Im schlechtesten Fall muß eine Neuplanung erfolgen, dies wird in Abschnitt 4.4.3 beschrieben oder das vorgegebene Auftragsspektrum muß zurückgewiesen werden. Die Überprüfung des vorliegenden Umplanungsergebnisses unterstellt einen im weiteren störungsfreien Fertigungsverlauf.

#### 4.4.3 Nutzung des Belegungsplanungssystems KOLPLA

Vor Fertigungsbeginn sorgt die statische Offline-Planung des Belegungsplanungssystems KOLPLA für optimale Startbedingungen zur Fertigung des Auftragsspektrums. Dies wurde in Abschnitt 4.3.1 eingehend erläutert.

Ergeben sich Störungen während der laufenden Fertigungsperiode, welche zu Abweichungen vom vorgegebenen Plan führen, dann treten Online-Planungsalgorithmen im Werkstattplanungsbereich in Aktion. Je nach Notwendigkeit werden die Umplanungsmaßnahmen auf Zellen- oder/und Leitebene durchgeführt. Führen die Umdispositionsversuche nicht zu befriedigenden Ergebnissen, so ist eine Neuplanung unerlässlich.

##### Beispiele:

- Jeder Online-Umplanungsversuch führt zur Verletzung vorgegebener Rahmenbedingungen (Überschreitung der spätesten Endtermine).
- Es kann keine Online-Umdisposition durchgeführt werden (es existieren keine Umplanungsalternativen mehr).
- Die Ergebnisse der weiteren Online-Planung sind zu schlecht. Aufgrund mehrmaliger Umplanung entfernen sich die Online-Planungsergebnisse permanent vom erreichbaren Optimum.

Meldet der Fertigungsleitreechner die Nichtdurchführbarkeit (siehe Beispiele) von Planungs- und Umdispositionsaufgaben, dann wird die dynamische Offline-Planung des Belegungsplanungssystems KOLPLA aktiviert. Dies entspricht der Durchführung einer Neuplanung während der laufenden Fertigungsperiode, nachdem die Online-Planung im Werkstattbereich versagt hat. Die Bereiche, für welche die Neuplanung durchgeführt wird, das können einzelne Fertigungszellen, aber auch das gesamte Fertigungssystem sein, unterliegen im Zeitraum der Neuplanung einem Bearbeitungsstillstand. Eine möglichst schnelle Umplanung, auf deren Ergebnis basierend der Fertigungsablauf fortgesetzt werden kann, hat deshalb höchste Priorität.

## Durchführung der Neuplanung

Wichtigste Prämisse bei der Durchführung der dynamischen Offline-Planung ist die Erfassung der aktuellen Fertigungszustände der Fertigungsobjekte (Werkstücke, Lose und Aufträge). Dies führt zur Aktualisierung der zur Offline-Planung benötigten Arbeitsplanpfade. Dabei werden aus den zugrundeliegenden Arbeitsplangraphen Untergraphen extrahiert, welche alle möglichen Bearbeitungsalternativen beschreiben, die vom erreichten Fertigungszustand aus und unter Berücksichtigung des aktuellen Systemzustandes, durchführbar und einplanbar sind. Für die Neuplanung sind Optimierungskriterien und Planungsstrategien vorzugeben. Die weiteren Voraussetzungen zur dynamischen Offline-Planung sind in Abschnitt 4.3.2 eingehend erläutert.

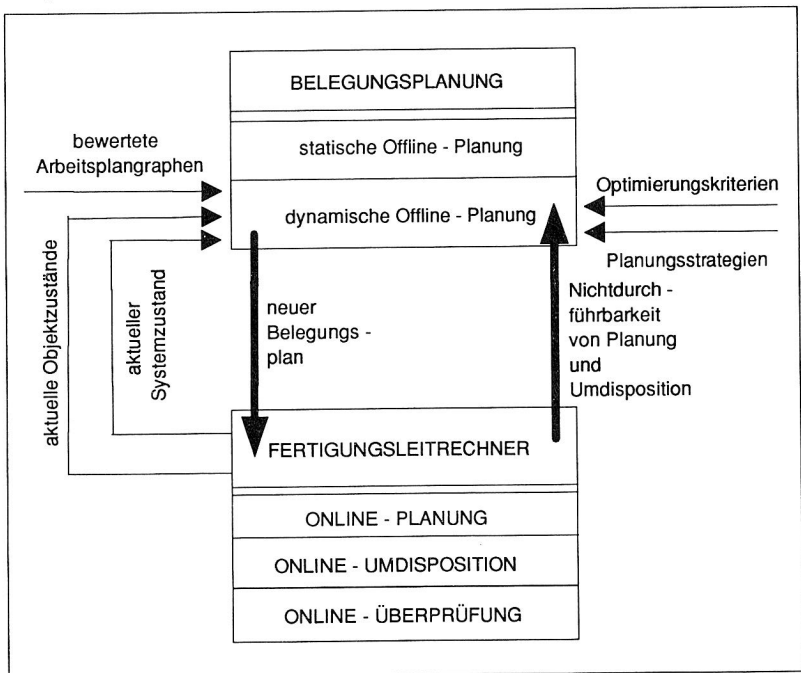


Bild 56: Neuplanung durch dynamische Offline-Planung



Das Ergebnis der dynamischen Offline-Planung ist ein neuer System- oder/und Zellenbelegungsplan, welcher als Startbedingung für die Fortsetzung der Fertigungsperiode dient. Der Fertigungsleitreechner empfängt diese von der übergeordneten Belegungsplanung. Die weiteren Planungsaufgaben während der laufenden Fertigungsperioden werden von der Online-Planung im Werkstattbereich übernommen (siehe Bild 56).

#### **4.4.4 Nutzung des Arbeitsplangenerierungssystems EGOPLA**

EGOPLA ist von grundlegender Wichtigkeit für die Leistungsfähigkeit der im Werkstattbereich eingesetzten Online-Planungsalgorithmen. Die Steigerung der Flexibilität bei Planungs- und Umdispositionsaufgaben ist durch Vorgabe und Nutzung flexibler Vorgabestrukturen (i. e. flexible Arbeitsplangraphen) in effektiver Weise möglich.

Die Offline-Bewertung der in EGOPLA generierten Arbeitsplangraphen reduziert bei komplexen Arbeitsplangraphen die Anzahl der Handlungsalternativen. Es erscheint sinnvoll, der Online-Planung im Werkstattplanungsbereich (Fertigungsleitreechner, Zellenrechner) bei Bedarf in der Arbeitsplanung nicht bewertete Fertigungsalternativen zur Verfügung zu stellen. Bei der Online-Umdisposition kann der Fall eintreten, daß die Berücksichtigung schlechter bzw. nicht bewerteter Arbeitsplanpfade größere Vorteile bringt, als die Durchführung einer Neuplanung.

In der Arbeitsplangenerierung werden auch arbeitgangbezogene Werte wie Bearbeitungszeiten, Bearbeitungskosten, usw. ermittelt. Die im Fertigungsbereich tatsächlich eintretenden Werte können der Arbeitsplangenerierung zur Optimierung neuer Vorgaben übergeben werden.

## **5 Ein Software-System zur Erprobung von HIPS**

### **5.1 Realisierungsumgebung für das verteilte Planungssystem HIPS**

HIPS stellt ein Experimentier- und Pilotsystem dar. Damit sollen neue Konzepte zur verteilten Planung im Produktionsbereich untersucht und für den realen Industrieinsatz erprobt werden.

Die Aufgaben der Arbeitsplangenerierung (EGOPLA), Belegungsplanung (KOLPLA) und Werkstattplanung (OLPLA) werden in einer verteilten Systemumgebung ausgeführt.

Zu diesem Zweck wurde eine Rechnerhard- und -softwareumgebung gewählt, welche es gestattet, die verschiedenen Planungsfunktionen (Offline- und Online-Planung) zu modellieren und in einem Experimentiersystem nutzbar zu machen. Die Aufgaben- und Funktionsverteilung des Planungssystems wurde in einem verteilten Prozeß-System gelöst. Das Implementierungskonzept stellt spezielle Anforderungen an die Systemsoftware und die benötigten Softwarewerkzeuge.

#### **a) Hardware des Experimentiersystems**

- Siemens PC 16-20 (80286, AT-kompatibel),
- 70 MB Festplatte,
- 2 MB Hauptspeicher,
- 1,2 MB Diskette,
- Bildschirme, Drucker, Maus.

Die Rechnerhardware ist bezüglich Verarbeitungsgeschwindigkeit und -leistungsfähigkeit als Experimentiersystem ausreichend, stellt jedoch eine Hardware-Minimalkonfiguration dar.

**b) System-Software und Software-Werkzeuge**

- Betriebssystem SCO Xenix V  
(multi-tasking, multi-user),
- Programmiersprache C,
- Datenverwaltungssystem C/ISAM (indexsequentiell),
- Softwareentwicklungswerkzeug INNOVATOR.

HIPS wurde als verteiltes Prozeß-System in einem Rechner realisiert. Eine realitätsnahe Implementierung setzt ein leistungsfähiges multi-tasking, multi-user Betriebssystem voraus. Wichtig dabei ist ein quasi-paralleler Betrieb verschiedener Planungsprozesse (z. B. Maschinenprozesse, Zellenrechnerprozesse, Leitrechnerprozesse, Arbeitsplangenerierungsprozesse und Belegungsplanungsprozesse).

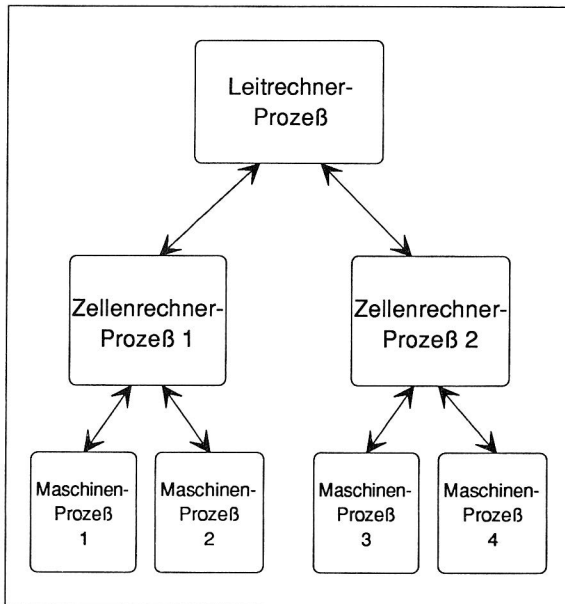


Bild 57: Beispiel einer rechnerinternen Prozeß-Struktur für ein verteiltes Planungssystem in der Teilefertigung

Bild 57 zeigt das Beispiel eines rechnerintern modellierten Online-Planungssystems für den Fertigungsbereich. Die Darstellung beinhaltet nur Planungsprozesse. Wichtige Verwaltungsprozesse, wie Kommunikationsüberwachung, Dialoghandling und Datenverwaltung wurden aus Darstellungsgründen weggelassen.

## 5.2 Softwareinfrastruktur des verteilten Planungssystems

### 5.2.1 Systemgenerierung und -konfigurierung

Für die Realisierung eines verteilten Planungssystems, welches an unterschiedliche Systemkonfigurationen adaptierbar sein soll, ist ein leistungsfähiges Generierungs- und Konfigurierungssystem notwendig.

Folgende Aufgabenbereiche müssen abgedeckt werden:

- Versorgung des Gesamtsystems mit unveränderlichen Parametern.
- Systeminterne Abbildung des zugrundeliegenden Anwendungssystems (Maschinen, Zellenrechner, Leitrechner, Offline-Planungsrechner).
- Vorgabe von Planungsparametern (z. B. Planungsdistanz).
- Konfiguration und Aufbau des Dialog und Monitoring-Systems.
- Konfiguration des Protokollierungssystems.
- Generierung der Kommunikations- und Dateistrukturen.

Das Ergebnis der Systemgenerierung und -konfiguration ist ein, an die vorliegende Experimentierumgebung angepasstes, funktionsfähiges Software-System.

### 5.2.2 Dialog- und Monitoring-System

Um das verteilte Planungssystem für experimentelle Untersuchungen adäquat einsetzen zu können, sind dem Bediener umfangreiche und leistungsfähige Dialog- und Monitoring-Mechanismen zur Verfügung zu stellen.

#### a) Dialog-System

Das Experimentiersystem muß vom Benutzer einfach veränderbar sein. Interaktive Dialog-Mechanismen können sowohl bedienerseitig als auch systemseitig initiiert werden.

Durch den Bediener initiierte Dialoge sind beispielsweise Systemeingaben, Funktionsaufrufe, und Informationswünsche. Während das System spezielle Dialoge für Aufforderungen an den Bediener, Systemmeldungen und Zustandsmeldungen benutzt.

#### b) Monitoring-System

Gleichermaßen wichtig beim experimentellen und realen Einsatz des verteilten Planungssystems sind Auskünfte über das dynamische Verhalten des Gesamtsystems. Dies geht weit über die Anforderungen an eine reine Ergebnisdarstellung hinaus. Um die "innere" Dynamik des verteilten Planungssystems transparent zu machen, ist eine leistungsfähige Monitorkomponente erforderlich. Je nach Interessenschwerpunkt kann das dynamische Verhalten des verteilten Planungssystems, insbesondere die Online-Planungskomponenten, fertigungstechnisch bzw. informationstechnisch aufbereitet und dargestellt werden. In Bild 58 ist ein Beispiel für einen "fertigungstechnischen" Online-Planungsmonitor des verteilten Planungssystems dargestellt.

Der "fertigungstechnische" Online-Planungsmonitor veranschaulicht dem Bediener das dynamische Verhalten des verteilten Planungssystems in Bezug auf den realen und planerischen Fertigungsfortschritt der im Fertigungssystem zu bearbeitenden Werkstücke. Jeder Zustandswechsel wird am Online-Monitor dargestellt und dem Bediener angezeigt.

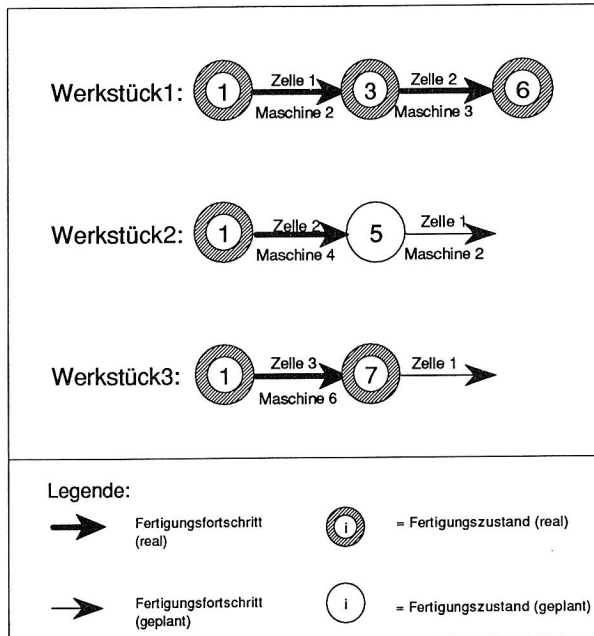


Bild 58: "Fertigungstechnischer" Online-Planungsmonitor  
Schwerpunkt: Fertigungsfortschritt

Die in Bild 58 dargestellte Monitorausgabe gibt dem Bediener folgende Informationen:

- Werkstück 1 befindet sich im Fertigungszustand 6 und kann sich weiter geplant werden. Es liegen momentan keine weiteren Planungsergebnisse vor.
- Werkstück 2 wird momentan auf Maschine 4 der Fertigungszelle 2 bearbeitet. Der Fertigungszustand 5 ist noch

nicht erreicht, jedoch ist die Weiterbearbeitung auf Maschine 2 der Fertigungszelle 1 bereits geplant.

- Werkstück 3 befindet sich im Fertigungszustand 7. Die Bearbeitungsfortsetzung ist bereits geplant (in Fertigungszelle 1), es steht jedoch die betreffende Maschine noch nicht fest.

Zusätzliche Angaben über Bearbeitungszeiten, -kosten oder ähnliches sind denkbar.

Bild 59 beschreibt ein Beispiel für einen "informationstechnischen" Online-Planungsmonitor. Dabei wird dem Bediener ein besonderes Interesse an den dynamischen Abläufen bei der Kommunikation zwischen den Planungsebenen im Fertigungsbereich (Leitrechner, Zellenrechner, Maschinen) unterstellt. Der Bediener erhält Auskunft über die Anzahl der ausgetauschten Meldungen zwischen den Planungsebenen. Während der Online-Planung ändern sich die entsprechenden Einträge laufend, so daß der Bediener auf das Kommunikationsverhalten im verteilten Planungssystem schließen kann.

Mit dem "informationstechnischen" Online-Planungsmonitor können die zwischen den Planungsebenen ausgetauschten Informationen noch wesentlich detaillierter dargestellt werden. Beispielsweise können die Kommunikationsanforderungen nach verschiedenen Informationsklassen (Fertigungsdaten, Werkstückzustandsdaten, Arbeitsgangreihenfolge, Maschinenzustandsdaten und stornierte Arbeitsgänge) dargestellt werden. Auch dynamische Zeitinformationen können mit dem Online-Planungsmonitor zu Kommunikationsuntersuchungen dargestellt werden.

In Bild 59 ist folgender Zustand dargestellt:

- Der Leitrechner hat 20 Meldungen an Zellenrechner 1, 13 Meldungen an Zellenrechner 2 und 2 Meldungen an übergeordnete Planungsrechner geschickt.
- Der Zellenrechner 1 hat 24 Meldungen an den Leitrechner und 16 an Maschine 1 geschickt.

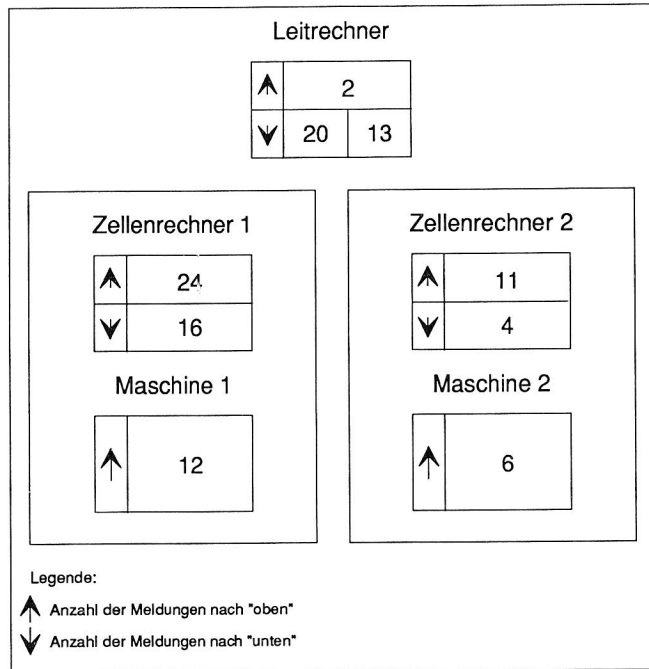


Bild 59: "Informationstechnischer" Online-Planungsmonitor  
Schwerpunkt: Kommunikationsverhalten

### 5.2.3 Interprozeßkommunikation im Online-Bereich

Die in Abschnitt 5.1 vorgestellten Rahmenbedingungen, welche bei der Realisierung des verteilten Planungssystems zu berücksichtigen waren, setzen ein leistungsfähiges Interprozeßkommunikationskonzept voraus.



Der Online-Bereich (Werkstattplanungssystem OLPLA) des verteilten Planungssystems wurde als hierarchisches Inter-Prozeßkommunikationssystem modelliert und realisiert. Bild 60 zeigt das Kommunikationskonzept an einem übersichtlichen Konfigurationsbeispiel. Ein Leitrechner-Prozeß bedient zwei Zellenrechner-Prozesse, welche wiederum je zwei Maschinen-Prozesse betreuen.

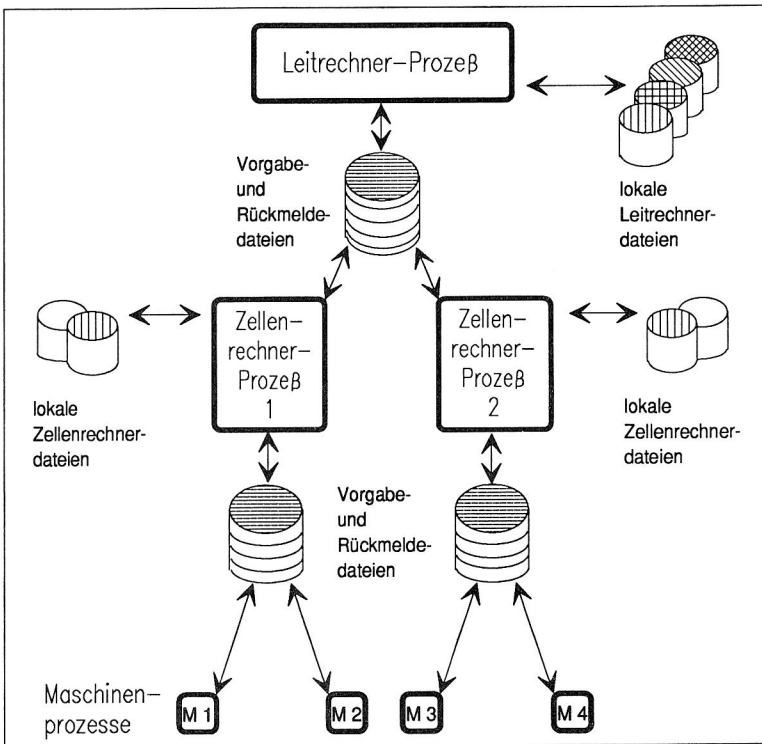


Bild 60: Konfigurationsbeispiel für die Interprozess-kommunikation im Online-Bereich

Im Online-Bereich werden zwei Kommunikationsrichtungen (vertikale und horizontale Kommunikation) unterschieden.

## **Vertikale Kommunikation: Interprozeßkommunikation**

Zwischen Leitebene und Zellenebene bzw. Zellenebene und Maschinenebene (operative Ebene) erfordert das Online-Planungssystem einen schnellen und konsistenten Informationsaustausch (Vorgaben und Rückmeldungen).

Die vertikale Kommunikation wurde als Duplex-System mit zwei unabhängigen Kommunikationskanälen realisiert. Der Informationstransfer vom Leitrechnerprozeß zu den Zellenrechnerprozessen wird über eindeutig zugeordnete Informationskanäle ermöglicht. Der Datenrückfluß von den Zellenrechnerprozessen zum übergeordneten Leitrechnerprozeß wird über eine zentrale Interprozeßkommunikationsschnittstelle gelöst. Die Kommunikation der Maschinenprozesse mit dem jeweiligen übergeordneten Zellenrechnerprozeß ist entsprechend gelöst.

Die vertikale Kommunikation zwischen Leit- und Zellenebene betrifft beispielsweise stornierte Arbeitsgänge, Zellenwarteschlangen, Fertigungsdaten, Bearbeitungsreihenfolge, Zellenzustände und Werkstückzustände. Zwischen Zellen- und Maschinenebene werden beispielsweise Startvorgaben, Fertigungsdaten und Maschinenzustände ausgetauscht.

Das vertikale Kommunikationskonzept gestattet das parallele Arbeiten der Prozesse auf den unterschiedlichen Hierarchieebenen. Zur Realisierung des vertikalen Interprozeßkommunikationskonzeptes wurden drei verschiedene Kommunikationstechniken untersucht und exemplarisch implementiert.

### **FIFO-Dateien (first-in, first-out)**

FIFO-Dateien eignen sich aufgrund ihrer einfachen Struktur besonders für die Interprozeßkommunikation. Die Kommunikationspartner (z. B. Leitprozeß, Zellenprozeß) tauschen dabei ihre Nachrichten über FIFO-Dateien aus. Ein spezieller Sperrmechanismus sichert störungsfreie Lese- bzw. Schreibaktionen zwischen den Kommunikationspartnern. Dieses Kommu-

nikationskonzept gewährleistet die Synchronisation in einem verteilten Prozeß-System.

### **Message-Queues (Warteschlangen für Nachrichten)**

Message-Queues realisieren ein Kommunikationskonzept, wobei unterschiedliche Nachrichtentypen der Absenderprozesse an die entsprechenden Empfängerprozesse geschickt werden können. Wartet ein Empfängerprozeß auf eine Nachricht, dann hat er dabei folgende Möglichkeiten:

- Warten, bis die Message-Queue einen Hinweis gibt, welcher das Eintreffen einer Nachricht anzeigt.
- Der Empfangsprozess versucht zyklisch von der Message-Queue Nachrichten zu lesen (polling).

Ebenso hat ein Sendeprozeß die Möglichkeit Nachrichten in eine Message-Queue zu schreiben, solange die Queue noch Nachrichten aufnehmen kann. Bei Überlastungen hat der Sendeprozeß folgende Möglichkeiten:

- Warten, bis die Message-Queue erkennen läßt, daß eine Nachricht abgeholt worden ist.
- Der Sendeprozeß versucht zyklisch in die Message-Queue zu schreiben (polling).

### **Shared-Memory (gemeinsamer Speicherbereich)**

Die schnellste und effektivste Art Nachrichten zwischen Kommunikationspartnern auszutauschen, ist die Nutzung eines gemeinsamen Speicherbereiches, in dem die zu übermittelnden Informationen temporär gehalten werden. Synchronisationsprobleme sind über Semaphore oder Signale zu lösen.

### **Horizontale Kommunikation: Prozeß-Datei-Kommunikation**

Sowohl auf Leitebene als auch auf Zellenebene benötigen die Planungsprozesse Daten im schnellen Zugriff. Im realisierten Werkstattplanungssystem OLPLA werden den Leit- bzw. Zellenrechnerprozessen die benötigten Informationen über ein indexsequentielles Datenverwaltungssystem zur Verfügung gestellt. Andere Organisationsformen sind denkbar, sollen an dieser Stelle jedoch nicht weiter betrachtet werden.

Lokale Dateien auf der Leitebene zur horizontalen Kommunikation sind beispielsweise Zellenzustände, Arbeitsgangreihenfolgen, Werkstückzustände und Arbeitsplangraphen. Auf der Zellenebene wird über die horizontale Kommunikation beispielsweise auf Maschinenzustände und Einplanungsdateien zugegriffen.

#### **5.2.4 Datenverwaltungssystem**

Bei der Realisierung des Experimentiersystems HIPS wurden sequentielle und indexsequentielle Datenverwaltungsmechanismen verwendet.

Die sequentielle Datenverwaltung ist für die Realisierung einfacher Zugriffsmechanismen geeignet. Sind häufig Sortier- und Selektionsaufgaben durchzuführen, dann bietet sich eine indexsequentielle Datenverwaltung an. Dabei werden die relevanten Daten in zwei Organisationsbereiche aufgeteilt. Die Datendatei dient der Speicherung der Datensätze, während die Zugriffs- und Suchaufgaben über sogenannte Indexdateien geregelt werden.

### 5.3 Modellierung der verteilten Planungskomponenten

#### Offline-Planungskomponenten

Das Arbeitsplangenerierungssystem EGOPLA und das Belegungsplanungssystem KOLPLA bilden den Offline-Bereich des verteilten Planungssystems HIPS. In den Abschnitten 4.2 und 4.3 wurden entsprechenden Algorithmen vorgestellt und spezifiziert. Jede Offline-Planungskomponente wurde als autonomer Prozeß im Sinne eines verteilten Planungssystems modelliert, implementiert und in die in Abschnitt 5.2 beschriebene Softwareumgebung integriert.

#### Online-Planungskomponenten

Das Werkstattplanungssystem OLPLA bildet den Online-Bereich des verteilten Planungssystems HIPS. Das Online-Planungssystem OLPLA ist hierarchisch strukturiert und dient als Planungsmodell für hierarchisch strukturierte Flexible Fertigungssysteme (HFFS). Im Abschnitt 4.4 wurden dazu notwendige Algorithmen erläutert und spezifiziert. Jede Planungskomponente des hierarchisch organisierten Online-Bereiches wurde als autonomer Prozeß im Sinne eines verteilten Planungssystems modelliert, implementiert und in die in Abschnitt 5.2 beschriebene Softwareumgebung integriert.

## **6 Anwendungsbeispiele für das verteilte Planungssystem HIPS**

### **6.1 Modellierung der Testumgebung**

HIPS dient als Pilot- und Experimentiersystem und ermöglicht die systematische Untersuchung der Wirkungsweisen und Randbedingungen eines verteilten Planungssystems. Besondere Beachtung finden dabei die Abhängigkeiten der Planungskomponenten untereinander und deren dynamisches Verhalten unter realitätsbezogenen Anforderungen. Zu diesem Zweck wird eine an der betrieblichen Praxis orientierten Produktionsumgebung realitätsnah modelliert und dient als Testumgebung für das verteilte Planungssystem. Es werden fünf Referenzwerkstücke (Gehäusedeckel) definiert, welche als Fertigungsobjekte für die Untersuchungen im gesamten Planungssystem dienen.

HIPS liefert Hinweise für den industriellen Einsatz verteilter Planungssysteme und deren positive Auswirkungen auf die Steigerung der Flexibilität im gesamten Produktionsbereich. Das Pilot- und Experimentiersystem HIPS dient als Demonstrationshilfsmittel, um die erreichbare Flexibilitätssteigerung im Produktionsbereich transparent und beweisbar machen zu können.

#### **6.1.1 Modellierung der Fertigungsanlage**

Das verteilte Planungssystem HIPS wird in einer modellierten, spanenden Fertigungsumgebung experimentell untersucht. Das modellierte Flexible Fertigungssystem besteht aus vier Fertigungszellen mit insgesamt 11 Arbeitsstationen. Bild 61 beschreibt Aufbau und Struktur des Flexiblen Fertigungssystems. Das Anlagenmodell erhebt weder den Anspruch auf Vollständigkeit noch der layoutorientierten Optimierung. Das Fertigungssystem kann Werkstücke, unter Anwendung der Bearbeitungstechnologien Drehen, Fräsen, Bohren und Schleifen herstellen. Eine hohe Systemflexibilität ergibt sich aus dem ersetzend konfigurierten Maschinenpark.

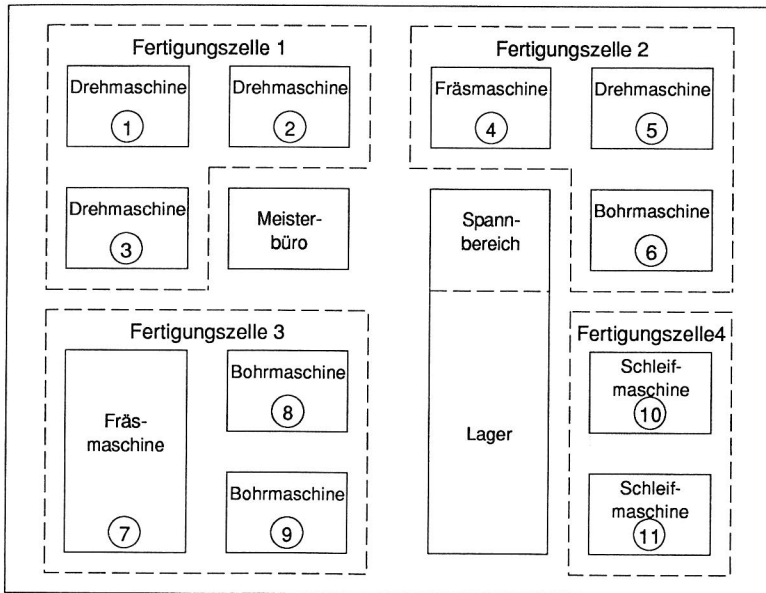


Bild 61: Flexibles Fertigungssystem zur spanenden Bearbeitung

### Beschreibung der Fertigungszellen

Die Fertigungszelle 1 besteht aus drei Drehmaschinen unterschiedlicher Leistungsfähigkeit. Die ersetzende Stationskonfiguration stellt eine leistungsfähige Drehzelle im flexiblen Fertigungssystem dar. Eine Drehmaschine, eine Fräsmaschine und ein Bohrzentrum bilden die technologisch ergänzende Fertigungszelle 2, in der Komplettbearbeitung möglich ist. Fertigungszelle 3 ist aus ersetzenden und ergänzenden Arbeitsstationen zusammengesetzt. Die vierte Fertigungszelle besteht aus zwei identischen Planschleifmaschinen. Die Bearbeitungsstationen und die Fertigungszelle selbst werden als streng ersetzend charakterisiert. Schleifoperationen sind ausschließlich in Zelle 4 auszuführen.

Spannbereich, Lager und Meisterbüro werden im Experimentiersystem nicht weiter betrachtet. Diese Bereiche sind nur aus pragmatischen Gründen im Anlagenplan (siehe Bild 61) eingezeichnet.

### Transportmatrix

Aufgrund der Maschinen- und Zellenanordnung innerhalb des Flexiblen Fertigungssystems ergeben sich für den hier betrachteten Werkstücktransport entsprechende Transportzeiten. Den zellenübergreifenden Transport übernimmt ein fahrerloses Transportsystem (FTS), während die zelleninternen Transporte mit Palettenförderern durchgeführt werden.

<div>nach</div> <div>von</div>	Fertigungs- zelle 1	Fertigungs- zelle 2	Fertigungs- zelle 3	Fertigungs- zelle 4
Fertigungs- zelle 1	10	20	20	40
Fertigungs- zelle 2	20	10	30	20
Fertigungs- zelle 3	20	30	10	30
Fertigungs- zelle 4	40	20	30	10

Bild 62: Zellentransportmatrix in Zeiteinheiten



Die Analyse der Transportwege und Transportmittel ergab folgende Transportzeiten:

Zelleninterne Transporte sind in jeweils 10 Zeiteinheiten durchzuführen. Die benötigten Zeiteinheiten für zellenübergreifende Transporte sind in einer Zellentransportmatrix (siehe Bild 62) beschrieben. Man beachte, daß sich in der Hauptdiagonale der Zellentransportmatrix die zelleninternen Transportzeiten eindeutig zuordnen lassen.

### **6.1.2 Modellierung der Werkstücke**

Um die Flexibilitätseigenschaften des verteilten Planungssystems HIPS untersuchen und bewerten zu können, sind Werkstücke zu modellieren, welche sowohl Technologiealternativen als auch Bearbeitungsalternativen zulassen. Fünf ähnliche, jedoch in ihren geometrischen Abmessungen unterschiedliche Gehäusedeckel dienen als Referenzobjekte in der Modellumgebung des verteilten Planungssystems. Die Gehäusedeckel werden nachfolgend vorgestellt. Die Maßangaben wurden für die exakte Ermittlung von Bearbeitungszeiten verwendet.

#### **Werkstück 1 (siehe Bild 63)**

Im Zentrum des Gehäusedeckels ist eine Bohrung für eine Welle vorgesehen. Vier Gewindebohrungen sind für die Befestigung einer Abdeckung notwendig. Die Befestigung des Gehäusedeckels wird durch acht Randbohrungen möglich.

#### **Werkstück 2**

Eine Ausführungsvariante ergibt sich durch die Notwendigkeit von zwei Wellenbohrungen. Zur Befestigung des Gehäusedeckels sind zehn Bohrungen notwendig. Die Wellenbohrungen müssen so exakt bearbeitet werden, daß eine Abdichtung ohne Abdeckung möglich wird.

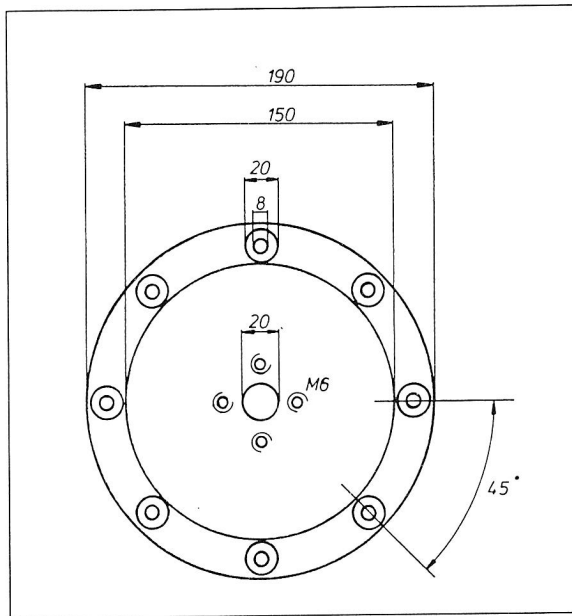


Bild 63: Runder Gehäusedeckel mit einer Wellenbohrung [27]

### Werkstück 3

Werkstück 3 ist eine Ausführungsvariante von Werkstück 2. Eine geometrische Formänderung hat jedoch Auswirkungen auf Rüstzeiten und Bearbeitungskosten.

### Werkstück 4

Eine Ausführungsvariante von Werkstück 1 stellt dieser Gehäusedeckel dar. Eine zweite asymmetrische Wellenbohrung ist aufgrund besonderer Anforderungen notwendig. Die Bohrungen für eine Abdichtung entfallen.

**Werkstück 5 (siehe Bild 64)**

Eine Ausführungsvariante von Werkstück 2 ist Werkstück 5. Anstatt einer zweiten Wellenbohrung ohne Befestigungsbohrungen wird nur eine Wellenbohrung, jedoch mit vier Befestigungsbohrungen benötigt.

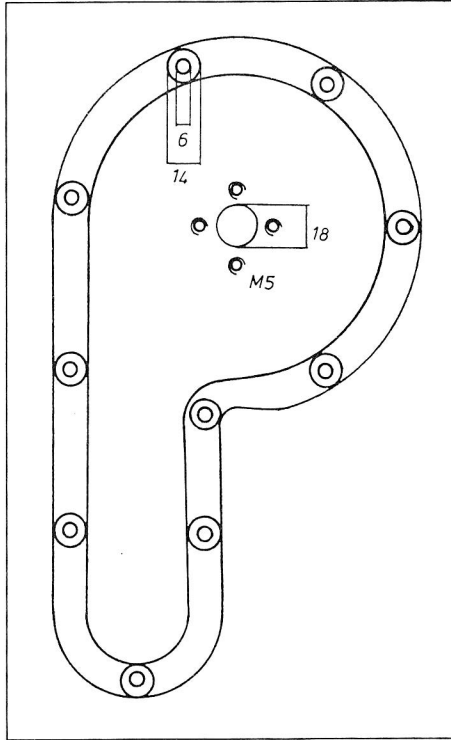


Bild 64: Asymmetrischer Gehäusedeckel mit einer Bohrung [27]

### 6.1.3 Modellierung der Fertigungsstrukturgraphen

Die zentrale und wichtigste Datenstruktur als Eingabe für das verteilte Planungssystem stellen die Fertigungsstrukturgraphen der Werkstücke dar. Die manuelle oder automatische Umsetzung der Zeichnungsinformation in eine technologische Alternativstruktur ist nicht Gegenstand der vorliegenden Arbeit. Für das vorliegende Experimentiersystem HIPS wurde dieser Umsetzungsprozeß für die fünf Referenzwerkstücke manuell durchgeführt. Die dabei generierten Fertigungsstrukturgraphen dienen dem Arbeitsplangenerierungssystem EGOPLA als Eingabe. Ein möglicher Fertigungsstrukturgraph für den asymmetrischen Gehäusedeckel mit einer Wellenbohrung (Werkstück 5) wird im folgenden dargestellt.

#### a) Fertigungsstrukturgraph für Werkstück 5

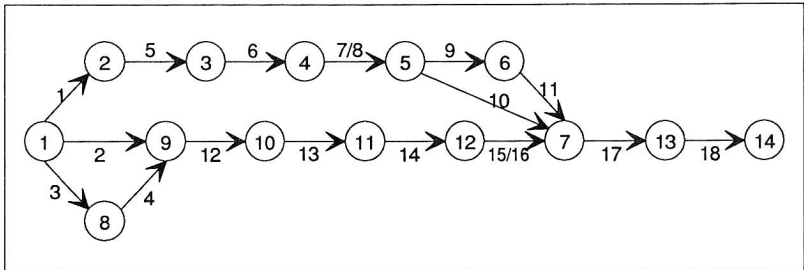


Bild 65: Fertigungsstrukturgraph für Werkstück 5

Der Fertigungsstrukturgraph für Werkstück 5 beschreibt im Betrieb mögliche, jedoch nicht alle technologischen Möglichkeiten, um ein Rohteil unter Anwendung spanender Fertigungsverfahren in ein Fertigteil (Gehäusedeckel) umzuwandeln. Aus experimentellen Komplexitätsgründen wurde nur ein Teil des maximalen Fertigungsstrukturgraphen behandelt. Die im Fertigungsstrukturgraph verwendeten Zustände und Zustandsübergänge werden im Bild 66 beschrieben.

## b) Zustandsattribute

Die zehn aufgeführten und erläuterten Zustandsattribute ermöglichen die Konfiguration von Zustandsparametervektoren. Am Beispiel des Gehäusedeckels werden geometrische Zustandsveränderungen vorgenommen, welche sich durch die erwähnten Zustandattribute beschreiben lassen (siehe Bild 67).

Zustand: Beschreibung	
A:	Rohteil
B:	Zehn Befestigungslöcher gebohrt
C:	Zehn Befestigungslöcher gesenkt
D:	Befestigung plan
E:	Vier Gewinde gebohrt
F:	Vier Gewinde gesenkt
G:	Vier Gewinde geschnitten
H:	Welle vorgebohrt
I:	Welle fertig gebohrt
J:	Fertigteil

Bild 66: Zustandsattribute für Werkstück 5

## c) Zustandsparametervektoren

Der Fertigungsstrukturgraph für Werkstück 5 kann in 14 verschiedenen Zuständen dargestellt werden (siehe Bild 67). Diese werden mit sogenannten Zustandsparametervektoren beschrieben.

Zustände	Zustandsattribute									
	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J
Zustand 1	X									
Zustand 2					X			X		
Zustand 3					X	X		X		
Zustand 4					X	X	X	X		
Zustand 5				X	X	X	X	X		
Zustand 6		X		X	X	X	X	X		
Zustand 7		X	X	X	X	X	X	X		
Zustand 8		X						X		
Zustand 9		X	X					X		
Zustand 10		X	X		X			X		
Zustand 11		X	X		X	X		X		
Zustand 12		X	X		X	X	X	X		
Zustand 13		X	X	X	X	X			X	
Zustand 14										X

Bild 67: Zustandsparametervektoren für Werkstück 5

**Beispiel:**

Erläuterung des Zustandsparametervektors für Zustand 7 des Werkstückes 5. In Klammern sind die Zustandsattribute angegeben.

**Zustandsbeschreibung:**

Zehn Befestigungslöcher gebohrt (B) und gesenkt (C).

Befestigungen plan (D),

Vier Gewinde gebohrt (E), gesenkt (F) und geschnitten (G),

Wellenbohrung vorgebohrt (H).

d) **Technologiebeschreibung der  
Zustandsübergänge (Arbeitsgänge)**

Für jedes zu betrachtende Werkstück ist eine Technologiebeschreibung anzufertigen. Neben der Bezeichnung und Beschreibung eines Zustandsüberganges aus dem Fertigungsstrukturgraphen sind alle möglichen Arbeitsstationen, welche den betreffenden Arbeitsgang ausführen können, anzugeben. Weiterhin werden Rüstzeiten, Bearbeitungszeiten und Bearbeitungskosten benötigt. Für exemplarische Anwendungen des verteilten Planungssystems HIPS reichen die Angaben.

**6.2 Das verteilte Planungssystem HIPS  
im experimentellen Einsatz**

**6.2.1 Konfiguration des verteilten Prozeß-Systems**

Die in Abschnitt 6.1.1 vorgestellte und modellierte Fertigungsanlage bestimmt die Konfiguration des Experimentiersystems. In Bild 68 wird die grobe Softwarestruktur des Experimentiersystems für das verteilte Planungssystem HIPS dargestellt. Das Arbeitsplangenerierungssystem EGOPLA und das Belegungsplanungssystem KOLPLA werden durch jeweils einen Softwareprozeß modelliert.

Die modellierte Fertigungsanlage soll als Grundlage für ein hierarchisch organisiertes Flexibles Fertigungssystem dienen. Jede Maschine und jeder Zellen- bzw. Leitreechner wird als autonomer Softwareprozeß implementiert. Das Werkstattplanungssystem OLPLA wird aus einem Leitreechner-, 4 Zellenreechner- und 11 Maschinenprozessen konfiguriert.

Die Experimentierversion des verteilten Planungssystems HIPS setzt sich aus 18 Softwareprozessen zusammen, welche über entsprechende Mechanismen miteinander kommunizieren. Darüber hinaus sind noch Verwaltungsprozesse notwendig, die aber von der Anlagenkonfiguration unabhängig sind.

### 6.2.2 Aufgaben und Ergebnisse des Arbeitsplan- generierungssystems EGOPLA

Am Beispiel des in Abschnitt 6.1.2 vorgestellten Musterwerk-  
stückes (W5) werden die einzelnen Generierungsschritte und  
Offline-Planungsergebnisse vorgestellt. Alle im folgenden  
präsentierten Ergebnisse wurden mit dem rechnerunterstützten  
verteilten Planungssystem HIPS erstellt.

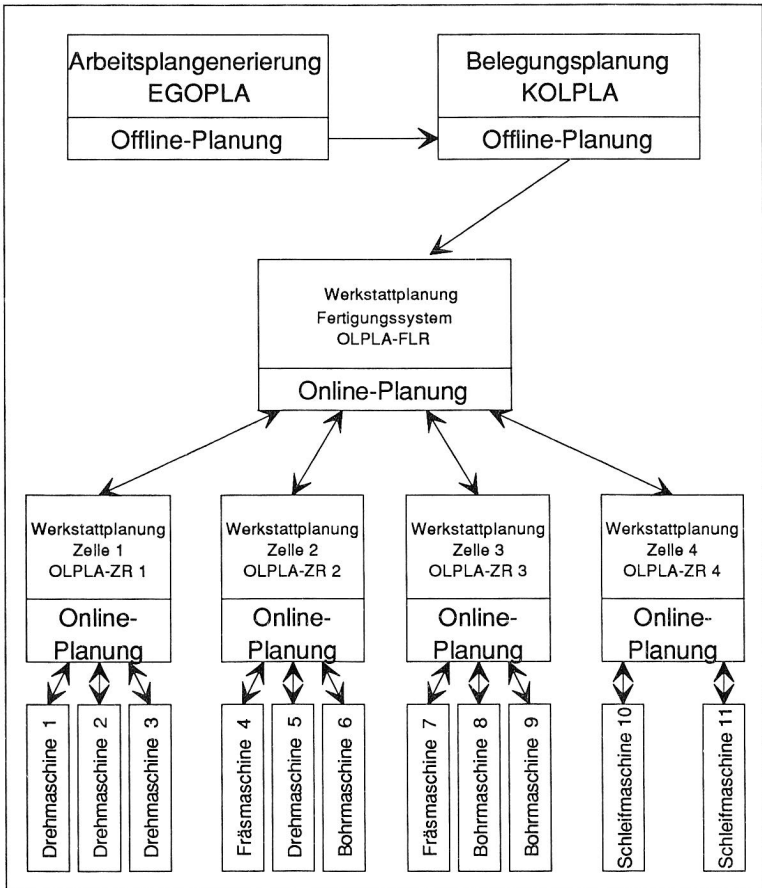


Bild 68: Experimentiersystem für eine Modellumgebung



## Generieren des Fertigungsstrukturgraphen

### a) Aufgabe

Die Modellierung des Fertigungsstrukturgraphen (FSG) für Werkstück 5 wurde in Abschnitt 6.1.3 durchgeführt und ist in Bild 69 fertigungsfortschrittsorientiert dargestellt.

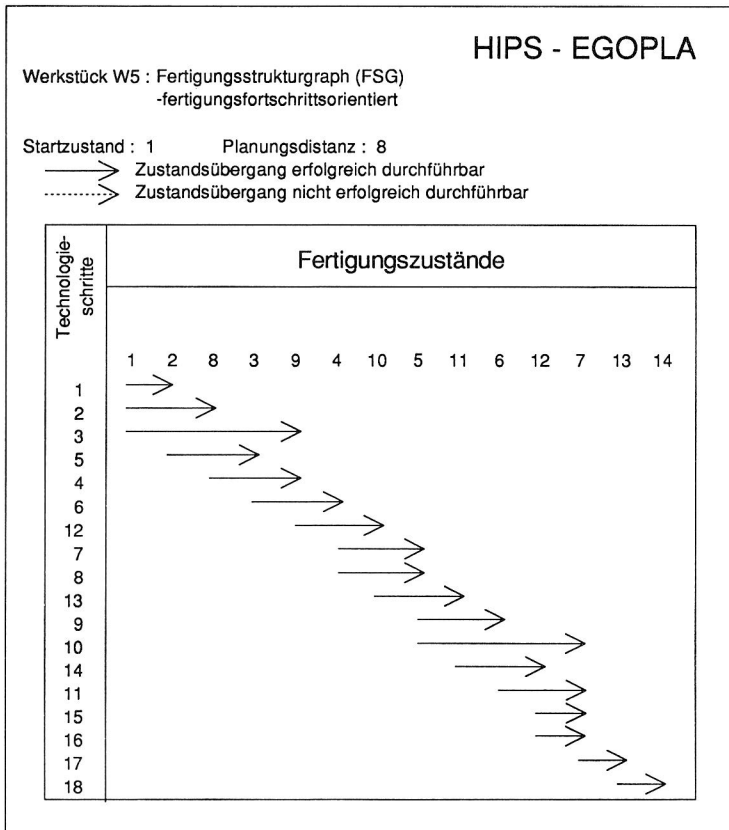


Bild 69: Fertigungsstrukturgraph für Werkstück W5  
(asymmetrische Gehäusedeckel mit  
einer Wellenbohrung)

**b) Ergebnisse**

Bild 69 stellt jeden möglichen Zustandsübergang (Technologieschritt) für Werkstück W5 dar. Der Endzustand des FSG ist markiert (14). Da keine Maschinenausfälle berücksichtigt wurden, sind auch alle Zustandsübergänge erfolgreich durchführbar.

**Generieren des Maschinenarbeitsplangraphen**

**a) Aufgabe**

Die modellierte Fertigungsanlage (siehe Abschnitt 6.1.1) ist Grundlage für die Generierung des Maschinenarbeitsplangraphen (MAPLG) für Werkstück W5. Für die Ausgabe wurde die fertigungsfortschrittsorientierte Darstellungsform gewählt.

**b) Ergebnisse**

In Bild 70 sind jedem möglichen Zustandsübergang (Technologieschritt) eine oder mehrere einsetzbare Maschinen zugeordnet. Dadurch vergrößert sich die Anzahl der möglichen Fertigungspfade beträchtlich. Maschinenstörungen wurden nicht berücksichtigt. In Bild 70 ist ein Ausschnitt des vollständigen MAPLG dargestellt.

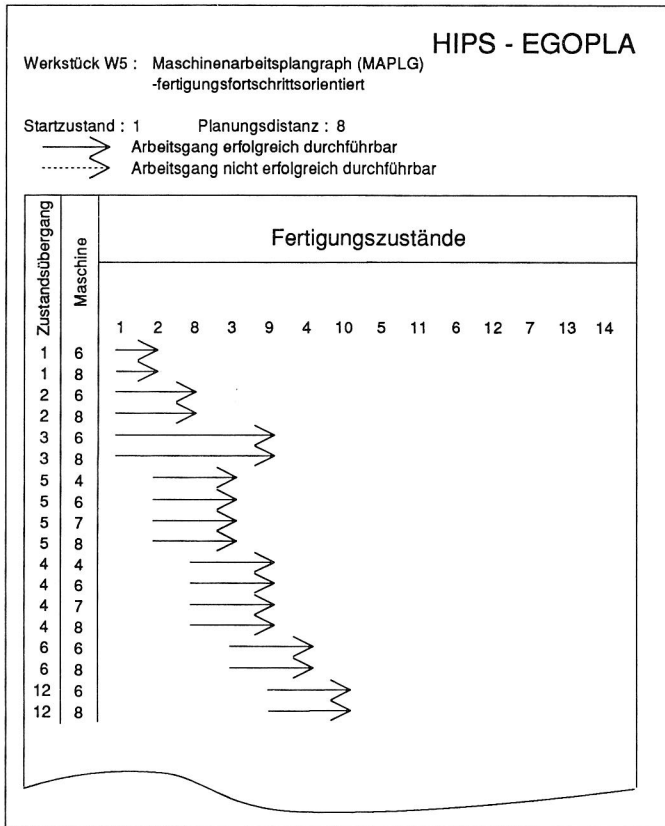


Bild 70: Maschinenarbeitsplangraph für  
Werkstück W5 (Ausschnitt)

### Generieren des Zellenarbeitsplangraphen

#### a) Aufgabe

Die Zellenstruktur der modellierten Fertigungsanlage (4 Fertigungszellen) wird zusätzlich mit berücksichtigt. Für Werkstück W5 wird in fertigungsfortschrittsorientierter Form der Zellenarbeitsplangraph (ZAPLG) generiert.

## b) Ergebnisse

In Bild 71 sind die ZAPLG für Fertigungszelle 2 und 4 dargestellt. Es läßt sich zeigen, daß Fertigungszelle 2 zur Komplettbearbeitung von Werkstück W5 fähig ist. Fertigungszelle 4 trägt zur weiteren Flexibilisierung des Fertigungsablaufes bei.

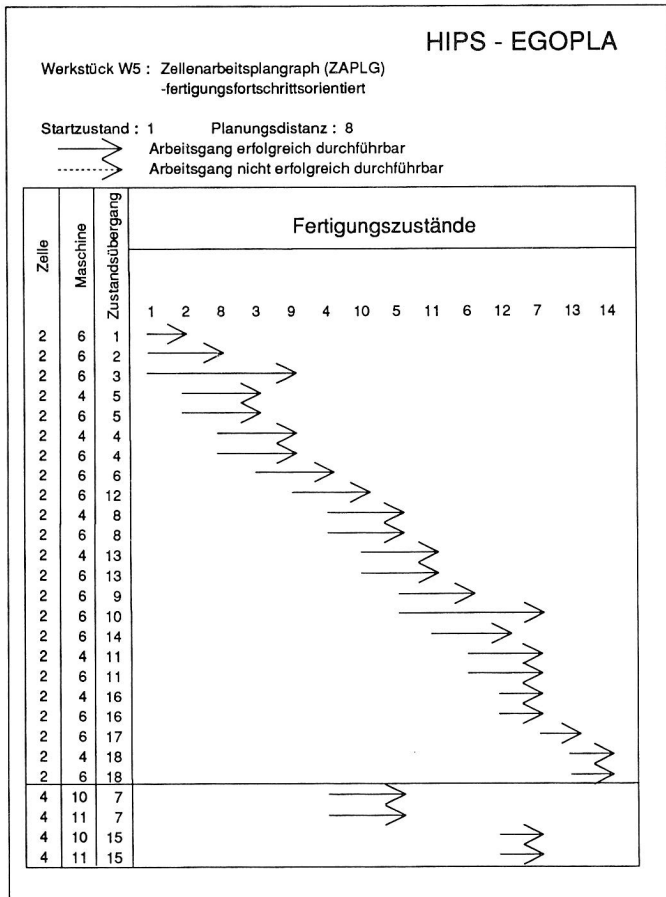


Bild 71: Zellenarbeitsplangraphen für Werkstück W5

## Simulation von Störungen

### a) Aufgabe

Besonders interessant ist die Möglichkeit der Offline-Simulation von Störungen mit EGOPLA. Es können die Auswirkungen von Maschinenausfällen auf die Fertigungsalternativen eines Werkstückes im FSG, MAPLG und ZAPLG demonstriert werden.

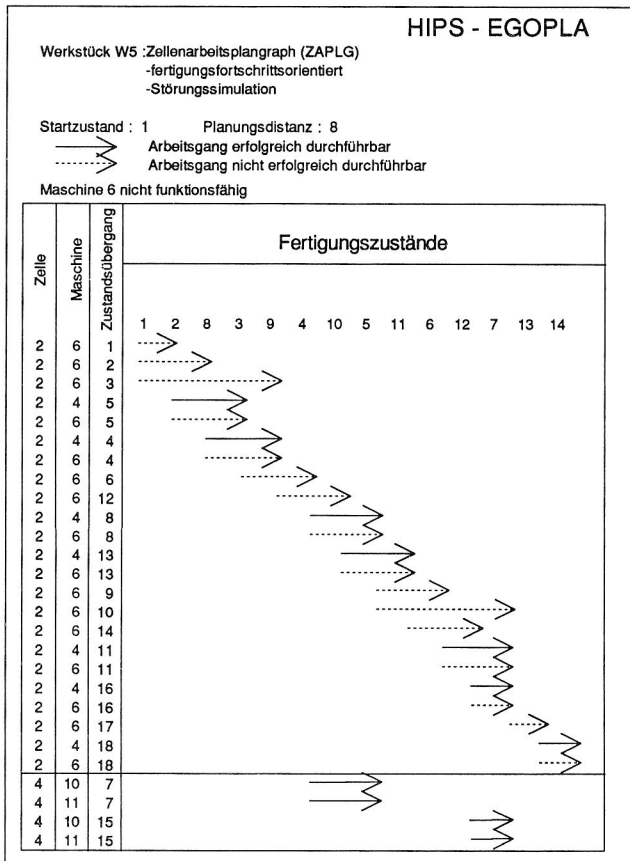


Bild 72: Auswirkungen einer Störung  
auf den Zellenarbeitsplan

#### **b) Ergebnisse**

Im vorliegenden Beispiel wurde die Maschine 6 (Bohrzentrum) der modellierten Fertigungsanlage für den gesamten Betrachtungszeitraum außer Funktion gesetzt. Der in Bild 72 dargestellte Zellenarbeitsplan zeigt eindrucksvoll die Auswirkungen dieser Maschinenstörung. Die Fertigungszelle 2 ist für die Bearbeitung von Werkstück W5 kaum mehr einsetzbar. Weitere Simulationsuntersuchungen sind mit EGOPLA durchführbar.

### **Bewertung und Analyse der Arbeitsplangraphen**

#### **a) Aufgabe**

EGOPLA liefert nach Vorgabe entsprechender Optimierungskriterien eine Auswahl von bewerteten Arbeitsplanpfaden. Im vorliegenden Beispiel (siehe auch Bild 73) wurde das Kriterium Bearbeitungskosten sehr hoch bewertet (9), die Zielkriterien Bearbeitungszeit, Rüstzeit und Transportzeit identisch und niedrig bewertet. Die anschließende Analyse (siehe Bild 74) wurde für den am besten bewerteten Bearbeitungspfad (Pfadnummer: 6639) durchgeführt.

#### **b) Ergebnisse der Bewertung**

Die Bewertung unter Verwendung der genannten Optimierungskriterien ermittelt die 20 besten Bearbeitungspfade (siehe Bild 73).

Der beste Bearbeitungspfad (6639) mit der Gesamtbewertung von 28458 führt über die Maschinen M8,M7,M8,M7,M8,M8,M7.

HIPS - EGOPLA

Werkstück W5	:	Bewertung	
Startzustand	:	1	Planungsdistanz : 8

Optimierungskriterien:

	Gewicht
Bearbeitungskosten	9
Bearbeitungszeit	1
Rüstzeit	1
Transportzeit	1

---

Pfad-Nr.	:	Bewertung	:	Arbeitsgang Maschine	:	Arbeitsgang Maschine
6639	:	28458	:	1: 8-- 5: 7-- 6: 8-- 8: 7--10: 8--17: 8--18: 7	:	
6637	:	28595	:	1: 8-- 5: 7-- 6: 8-- 8: 7--10: 8--17: 8--18: 4	:	
6479	:	28633	:	1: 8-- 5: 7-- 6: 8-- 8: 4--10: 8--17: 8--18: 7	:	
4719	:	28678	:	1: 8-- 5: 4-- 6: 8-- 8: 7--10: 8--17: 8--18: 7	:	
6477	:	28770	:	1: 8-- 5: 7-- 6: 8-- 8: 4--10: 8--17: 8--18: 4	:	
4717	:	28815	:	1: 8-- 5: 4-- 6: 8-- 8: 7--10: 8--17: 8--18: 4	:	
2799	:	28829	:	1: 6-- 5: 7-- 6: 8-- 8: 7--10: 8--17: 8--18: 7	:	
4559	:	28853	:	1: 8-- 5: 4-- 6: 8-- 8: 4--10: 8--17: 8--18: 7	:	
6631	:	28859	:	1: 8-- 5: 7-- 6: 8-- 8: 7--10: 6--17: 8--18: 7	:	
2797	:	28966	:	1: 6-- 5: 7-- 6: 8-- 8: 7--10: 8--17: 8--18: 4	:	
4557	:	28990	:	1: 8-- 5: 4-- 6: 8-- 8: 4--10: 8--17: 8--18: 4	:	
6471	:	28994	:	1: 8-- 5: 7-- 6: 8-- 8: 4--10: 6--17: 8--18: 7	:	
6629	:	28996	:	1: 8-- 5: 7-- 6: 8-- 8: 7--10: 6--17: 8--18: 4	:	
6640	:	28997	:	1: 8-- 5: 7-- 6: 8-- 8: 7--10: 8--17: 8--18: 8	:	
2639	:	29004	:	1: 6-- 5: 7-- 6: 8-- 8: 4--10: 8--17: 8--18: 7	:	
1879	:	29009	:	1: 6-- 5: 4-- 6: 8-- 8: 7--10: 8--17: 8--18: 7	:	
4711	:	29079	:	1: 8-- 5: 4-- 6: 8-- 8: 7--10: 6--17: 8--18: 7	:	
6469	:	29131	:	1: 8-- 5: 7-- 6: 8-- 8: 4--10: 6--17: 8--18: 4	:	
2637	:	29141	:	1: 6-- 5: 7-- 6: 8-- 8: 4--10: 8--17: 8--18: 4	:	
1877	:	29146	:	1: 6-- 5: 4-- 6: 8-- 8: 7--10: 8--17: 8--18: 4	:	

Bild 73: Bewertung des MAPLG für Werkstück W5

### c) Ergebnisse der Analyse

Der Bearbeitungspfad 6639 wurde rechnerunterstützt analysiert, das Ergebnis ist in Bild 74 dargestellt. Die Bewertung der an Werkstück W5 durchzuführenden Arbeitsgänge läßt sich sehr detailliert darstellen. Der Vergleich verschiedener Pfadanalysen ist möglich und sehr aussagekräftig.

HIPS - EGOPLA											
Werkstück W5:			Analyse								
Pfad-Nummer 6639											
Rang 1											
Startzustand 1			Planungsdistanz 8								
Optimierungskriterien:			Gewicht								
Bearbeitungskosten			9								
Bearbeitungszeit			1								
Rüstzeit			1								
Transportzeit			1								

Arbeitsgang	Maschine	Fertigungszustand	Bearbeitungskosten	Bewertung der Bearbeitungskosten	Bearbeitungszeit	Bewertung der Bearbeitungszeit	Rüstzeit	Bewertung der Rüstzeit	Transportzeit	Bewertung der Transportzeit	Arbeitsgang-bewertung
1:	8:	2:	194	: 1746	: 6	: 6	: 15	: 15	: 10	: 10	: 1777
5:	7:	3:	31	: 279	: 4	: 4	: 15	: 15	: 10	: 10	: 308
6:	8:	4:	2304	: 20736	: 72	: 72	: 15	: 15	: 10	: 10	: 20833
8:	7:	5:	23	: 207	: 3	: 3	: 15	: 15	: 10	: 10	: 235
10:	8:	7:	194	: 1746	: 6	: 6	: 15	: 15	: 0	: 0	: 1767
17:	8:	13:	368	: 3312	: 12	: 12	: 15	: 15	: 10	: 10	: 3349
18:	7:	14:	19	: 171	: 3	: 3	: 15	: 15	:	:	: 189
			3133		106		105		50		
Gesamtbewertung: 28458											

Bild 74: Analyse des besten Bearbeitungspfades für W5

Besonders interessant ist die Analyse einer schlechter bewerteten Pfadalternative. Dabei ist zu berücksichtigen, daß im vorliegenden Beispiel die Kostenminimierung im Vordergrund stand, was auch deutlich durch die hohe Bewertung der Bearbeitungskosten hervorgeht. In Bild 75 wird der 20. beste Bearbeitungspfad analysiert. Dabei läßt sich feststellen, daß sich die Bearbeitungskosten nur geringfügig von 3133 Einheiten auf 3205 Einheiten erhöhen. Die Transportzeiten sind dabei sprunghaft gestiegen (von 50 nach 90).



Werkstück W5:		Analyse		HIPS - EGOPLA						
Pfad-Nummer 1877										
Rang 20										
Startzustand 1		Planungsdistanz 8								
Optimierungskriterien:										
		Gewicht								
Bearbeitungskosten		9								
Bearbeitungszeit		1								
Rüstzeit		1								
Transportzeit		1								
Arbeitsgang Maschine	Fertigungszustand	Bearbeitungskosten	Bewertung der Bearbeitungskosten	Bearbeitungszeit	Bewertung der Bearbeitungszeit	Rüstzeit	Bewertung der Rüstzeit	Transportzeit	Bewertung der Transportzeit	Arbeitsgang- bewertung
1 : 6 : 2 :	233 :	2097 :	6 :	6 :	15 :	15 :	10 :	10 :	2128	
5 : 4 : 3 :	51 :	459 :	4 :	4 :	15 :	15 :	30 :	30 :	508	
6 : 8 : 4 :	2304 :	20736 :	72 :	72 :	15 :	15 :	10 :	10 :	20833	
8 : 7 : 5 :	23 :	207 :	3 :	3 :	15 :	15 :	10 :	10 :	235	
10 : 8 : 7 :	194 :	1746 :	6 :	6 :	15 :	15 :	0 :	0 :	1767	
17 : 8 : 13 :	368 :	3312 :	12 :	12 :	15 :	15 :	30 :	30 :	3369	
18 : 4 : 14 :	32 :	288 :	3 :	3 :	15 :	15 :	:	:	306	
		3205		106		105		90		
Gesamtbewertung : 29146										

Bild 75: Analyse eines schlecht bewerteten  
Bearbeitungspfades für Werkstück W5

Im einzelnen ergibt sich dabei eine Verschlechterung der

- Bearbeitungskosten um 6% !
- Transportzeiten um 80% .

Durch entsprechende Gewichtung der Optimierungskriterien können somit gezielt Bearbeitungspfade aus Maschinenarbeitsplangraphen selektiert werden.

### **6.2.3 Aufgaben und Ergebnisse des Belegungsplanungssystems KOLPLA**

Im Rahmen der in Abschnitt 6.1 modellierten Testumgebung werden Aufgaben und Ergebnisse von KOLPLA für fünf Musterwerkstücke (Gehäusedeckelvarianten) vorgestellt. Es werden Ergebnisse der statischen Offline-Planung (Belegungsplanung) in der modellierten Testumgebung vorgestellt und Analysen der generierten Belegungspläne diskutiert. Alle im weiteren vorgestellten Ergebnisse wurden mit dem rechnerunterstützten verteilten Planungssystem HIPS erstellt. Detaillierte Untersuchungen wurden in [27] durchgeführt.

#### **Vorbereitung der Belegungsplanung**

##### **a) Aufgabe**

Für die in Abschnitt 6.1.2 modellierten fünf Werkstücke (W1 bis W5) soll die Belegungsplanung durchgeführt werden. Der Übersicht halber werden die Werkstücke jeweils in Losgröße 1 betrachtet und eingeplant. Die in EGOPLA bewerteten Arbeitsplangraphen dienen als Grundlage zur Generierung und Bewertung von Belegungsplänen. Das Ergebnis der Belegungsplanung ist von der Parametrierung der Planungsstrategien, Optimierungskriterien und Planungsalgorithmen abhängig.

##### **b) Ergebnisse**

Die Maschinenarbeitsplangraphen der Werkstücke (W1 bis W5) werden unter dem Gesichtspunkt der Kostenminimierung bewertet (Bewertung der Bearbeitungskosten = 1, andere = 0). Für die Belegungsplanung werden die Optimierungskriterien mittlere Durchlaufzeit, maximale Durchlaufzeit, mittlere Leerlaufzeit und mittlere Bearbeitungskosten gleich gewichtet. Als Planungsstrategie wird FIFO (first-in-first-out) gewählt und das Planungsverfahren 1 verwendet (siehe Abschnitt 4.3.1). Bild 76 beschreibt das Ergebnis der Belegungsplanung. Die 20 besten Pfadkombinationen der 5 Muster-

werkstücke sind angegeben. Identifiziert werden die Pfadalternativen durch ihre in EGOPLA zugewiesene Pfadnummer.

### Beispiel:

Die beste Kombination ergibt sich für folgende werkstücksspezifischen Pfadnummern: (W1:619, W2:22039, W3:1110, W4:347, W5:2799). Andere Planungsparameter (Planungsstrategie, Planungsalgorithmus, Optimierungskriterien) verändern das Ergebnis der Belegungsplanung.

HIPS - KOLPLA					
Belegungsplanung für : W1 - W2 - W3 - W4 - W5					
Planungsstrategie : FIFO					
Planungsalgorithmus : Verfahren 1					
Optimierungskriterien:					
	Gewicht				
mittlere Durchlaufzeit	5				
maximale Durchlaufzeit	5				
mittlere Leerlaufzeit	5				
mittlere Bearbeitungskosten	5				
Pfadkombination	Werkstück W1	Werkstück W2	Werkstück W3	Werkstück W4	Werkstück W5
1 :	619	22039	1110	347	2799
2 :	619	22039	1110	347	2639
3 :	619	22039	1110	347	879
4 :	619	22039	1110	329	6639
5 :	619	22039	1110	331	6639
6 :	619	22039	1110	347	2797
7 :	619	22039	1110	347	2637
8 :	619	22039	1110	347	877
9 :	619	22039	1110	323	6639
10 :	619	22039	1110	345	6639
11 :	619	22039	1110	339	6639
12 :	619	22039	2594	347	6639
13 :	619	22039	1110	337	6639
14 :	619	22039	994	347	6639
15 :	619	22039	1110	347	6639
16 :	619	22039	1110	347	6471
17 :	619	22039	1110	343	6639
18 :	619	22039	1110	347	6640
19 :	619	22039	2710	347	6639
20 :	619	22039	1110	351	6639

Bild 76: Bewertete Pfadkombinationen zur Belegungsplanung

## Generieren des Belegungsplans

### a) Aufgabe

Die durch KOLPLA ermittelten Pfadkombinationen bilden die Grundlage für einen Stationsbelegungsplan.

HIPS - KOLPLA											
Belegungsplan für : W1 - W2 - W3 - W4 - W5											
Pfadkombination : 1											
Planungsstrategie : FIFO											
Planungsalgorithmus : Verfahren 1											
Optimierungskriterien:											
											Gewicht
mittlere Durchlaufzeit											5
maximale Durchlaufzeit											5
mittlere Leerlaufzeit											5
mittlere Bearbeitungskosten											5

Zeit	Maschinen										
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
1: W1						W5		W3			
2: W1						W5		W3			
3: W1						W5		W3			
4: W1						W5		W3			
5: W1						W5		W3			
6: W1						W5		W3			
7: W1						W5		W3			
8: W1						W5		W3			
9: W1						W5		W3			
10: W1						W5		W3			
11: W1						W5		W3			
12: W1						W5		W3			
13: W1						W5		W3			
14: W1						W5		W3			
15: W1						W5		W3			
16: W1						W5		W3			
17: W2						W5		W3			
18: W2						W5		W3			
19: W2						W5		W3			
20: W2						W5		W3			
21: W2						W5		W3			
22: W2						W5		W3			
23: W2						W5		W3			
24: W2						W5		W3			
25: W2						W5		W3			

Bild 77: Belegungsplan (Ausschnitt)

#### **b) Ergebnisse**

Für die in Bild 76 beste Pfadkombination wird ein Belegungsplan vom Startzeitpunkt bis zum Zeitpunkt  $t=25$  ermittelt. In Bild 77 ist der generierte Belegungsplan dargestellt.

### **Analyse des Belegungsplanes**

#### **a) Aufgabe**

Ein generierter Belegungsplan kann auf die zu optimierenden Zielkriterien hin analysiert werden. Interessant sind dabei die geplanten Durchlaufzeiten der Werkstücke. Weiterhin lassen sich die zu erwartenden Leerlaufzeiten der Maschinen ermitteln.

#### **b) Ergebnisse**

In Bild 78 wird der generierte Belegungsplan eingehend analysiert. Durchlaufzeiten, Leerlaufzeiten, Bearbeitungskosten sowie die Gesamtbewertung sind übersichtlich dargestellt.

Besonders interessant ist die Analyse eines schlechter bewerteten Belegungsplanes. In Bild 79 wird die 10. beste Pfadkombination analysiert. Dabei läßt sich feststellen, daß sich die mittleren Bearbeitungskosten (von 1765 auf 1767) im Vergleich zu den anderen Zielkriterien nur unwesentlich verändern.

Im einzelnen ergibt sich dabei eine Verschlechterung der

- mittleren Durchlaufzeit um 8%
- maximalen Durchlaufzeit um 9%
- mittleren Bearbeitungskosten um 1% !
- mittleren Leerlaufzeiten um 11% .

Daraus ergibt sich, daß auch von schlechter bewerteten Pfadalternativen das Zielkriterium der Kostenminimierung unterstützt wird. Ähnliche Aussagen lassen sich natürlich bei der Anwendung anderer Zielkriterien nachweisen.

HIPS - KOLPLA				
Belegungsplan für	: W1 - W2 - W3 - W4 - W5			Analyse
Pfadkombination	: 1			
Planungsstrategie	: FIFO			
Planungsalgorithmus	: Verfahren 1			
Optimierungskriterien:				
	Gewicht			
mittlere Durchlaufzeit (MDLZ)	5			
maximale Durchlaufzeit (MaDLZ)	5			
mittlere Leerlaufzeit (MBK)	5			
mittlere Bearbeitungskosten (MLZ)	5			

Werkstück : Pfadnummer : Durchlaufzeit				
W1	619	229		
W2	22039	216		
W3	1110	313		
W4	347	152		
W5	2799	389		

Leerlaufzeiten				
Maschine	1	:	160	
Maschine	2	:	389	
Maschine	3	:	389	
Maschine	4	:	389	
Maschine	5	:	389	
Maschine	6	:	368	
Maschine	7	:	252	
Maschine	8	:	28	
Maschine	9	:	389	
Maschine	10	:	389	
Maschine	11	:	389	

		Gewicht Bewertung		
MDLZ	:	259	5	1295
MaDLZ	:	389	5	1945
MBK	:	1765	5	8825
MLZ	:	321	5	1605

Gesamtbewertung : 13670				
-------------------------	--	--	--	--

Bild 78: Analyse des am besten bewerteten Belegungsplans

HIPS - KOLPLA			
Belegungsplan für	: W1 - W2 - W3 - W4 - W5	Analyse	
Pfadkombination	: 10		
Planungsstrategie	: FIFO		
Planungsalgorithmus	: Verfahren 1		
Optimierungskriterien:			
		Gewicht	
mittlere Durchlaufzeit ( MDLZ)		5	
maximale Durchlaufzeit (MaDLZ)		5	
mittlere Leerlaufzeit (MBK)		5	
mittlere Bearbeitungskosten (MLZ)		5	

---

Werkstück : Pfadnummer : Durchlaufzeit			
W1	619	229	
W2	22039	216	
W3	1110	349	
W4	345	182	
W5	6639	425	

Leerlaufzeiten			
Maschine	1	: 196	
Maschine	2	: 425	
Maschine	3	: 425	
Maschine	4	: 401	
Maschine	5	: 425	
Maschine	6	: 425	
Maschine	7	: 312	
Maschine	8	: 43	
Maschine	9	: 425	
Maschine	10	: 425	
Maschine	11	: 425	

		Gewicht	Bewertung
MDLZ	:	280	5 1400
MaDLZ	:	425	5 2125
MBK	:	1767	5 18835
MLZ	:	357	5 1785

Gesamtbewertung : 14145			
-------------------------	--	--	--

Bild 79: Analyse eines schlecht bewerteten Belegungsplans

#### 6.2.4 Aufgaben und Ergebnisse des Werkstattplanungssystems OLPLA

Die experimentellen Untersuchungen mit dem verteilten Online-Planungssystem OLPLA werden in der in Abschnitt 6.2 eingeführten Modellumgebung mit fünf einzuplanenden Musterwerkstücken durchgeführt. Voraussetzung dafür ist der Aufbau eines verteilten Prozeß-Systems als Abbildung der modellierten Experimentierumgebung. In Abschnitt 6.3.1 wurde die Konfiguration des verteilten Prozeß-Systems vorgestellt.

Alle im folgenden dargestellten Ergebnisse wurden mit dem rechnerunterstützten verteilten Planungssystem HIPS ermittelt. In [48] wurde das realisierte Werkstattplanungssystem OLPLA eingehend untersucht.

##### Voraussetzungen

In Abschnitt 6.2.3 wurden Ergebnisse des Belegungsplanungssystems KOLPLA vorgestellt und diskutiert. KOLPLA liefert Planungsvorgaben, welche für einen vorgegebenen Planungshorizont (Fertigungsperiode) offline, d. h. vor Fertigungsbeginn, generiert werden. Es können natürlich keine kurzfristig auftretende Störungen, welche während des Fertigungsablaufes auftreten, zu diesem Zeitpunkt berücksichtigt werden.

OLPLA hat die Aufgabe, störungsbedingte kurzfristige Neu- bzw. Uplanungen während der aktuellen Fertigungsperiode vorzunehmen. Diese Maßnahmen sollen online, d. h. fertigungsbegleitend durchgeführt werden. Die Effizienz der Online-Planung kann durch die Vorgabe einer Planungsdistanz in einer verteilten Planungsorganisation beeinflusst werden.

Den folgenden Beispielen und Ergebnissen liegt die Planungsdistanz  $d=2$  zugrunde, d. h. es werden im Online-Modus jeweils zwei Arbeitsgänge voraus- und eingeplant.



**Vergleich: Offline-/Online-Planung  
ohne auftretende Störungen**

**a) Aufgabe**

Die Korrektheit von Offline- und Online-Planung soll ohne Berücksichtigung fertigungsbedingter Störungen nachgewiesen werden.

Dazu sind folgende Initialisierungen zur Einplanung der Werkstücke (W1,W2,W3,W4,W5) vorzunehmen.

Gewichtungskriterien in EGOPLA:

- Bearbeitungskosten = 5,
- Bearbeitungszeit = 1,
- Rüstzeit = 1,
- Transportzeit = 0.

Gewichtungskriterien in KOLPLA:

- mittlere Durchlaufzeit = 1,
- maximale Durchlaufzeit = 1,
- mittlere Leerlaufzeit = 1,
- mittlere Bearbeitungskosten = 5.

Planungsstrategie in KOLPLA: FIFO

Planungsalgorithmus in KOLPLA: Verfahren 2

Planungsdistanz: 2

**b) Ergebnisse**

In Bild 80 sind die Ergebnisse bezüglich der errechneten werkstückbezogenen Bearbeitungskosten dargestellt.

Werkstück	1	2	3	4	5	Summe
KOLPLA	337	326	4402	609	3133	8807
OLPLA	337	326	4402	609	3133	8807

Bild 80: Bearbeitungskosten in KOLPLA und OLPLA

### c) Interpretation

Im störungsfreien Fall werden die von KOLPLA ermittelten Planungsergebnisse (Belegungsplan) von der hierarchischen Online-Planung im Fertigungsbereich übernommen. Das oben beschriebene Experiment und dessen Ergebnis ist ein Beweis für die Korrektheit der Offline- und Online-Planungsalgorithmen.

### Vergleich: Offline-/Online-Planung bei langfristigen Störungen

#### a) Aufgabe

Das Verhalten von Offline- bzw. Online-Planungsalgorithmen soll beim Auftreten langfristiger Störungen untersucht werden. Es sind die Ergebnisse von KOLPLA und OLPLA zu ermitteln, wobei die auftretenden Störungen berücksichtigt werden sollen. Zum Vergleich werden die Planungsvorgaben vor dem Auftreten von Störungen angegeben. Als Optimierungskriterien werden die mittleren Bearbeitungskosten gewählt.

Folgende Initialisierungen werden vorgenommen.

Gewichtungskriterien aus EGOPLA:

- Bearbeitungskosten = 5,
- Bearbeitungszeit = 5,
- Rüstzeit = 5,
- Transportzeit = 0.

Gewichtungskriterien aus KOLPLA:

- mittlere Durchlaufzeit = 5,
- maximale Durchlaufzeit = 5,
- mittlere Leerlaufzeit = 5,
- mittlere Bearbeitungskosten = 5.

Planungsstrategie in KOLPLA: FIFO  
Planungsalgorithmus in KOLPLA: Verfahren 2  
Planungsdistanz: 2

## b) Ergebnisse

In Bild 81 sind die Experimentiierungsergebnisse dargestellt. Die mittleren Bearbeitungskosten der fünf Referenzwerkstücke werden jeweils für OLPLA ohne Störungen und OLPLA mit bzw. ohne Berücksichtigung von Störungen errechnet und graphisch aufbereitet. Es werden drei Störungssituationen untersucht.

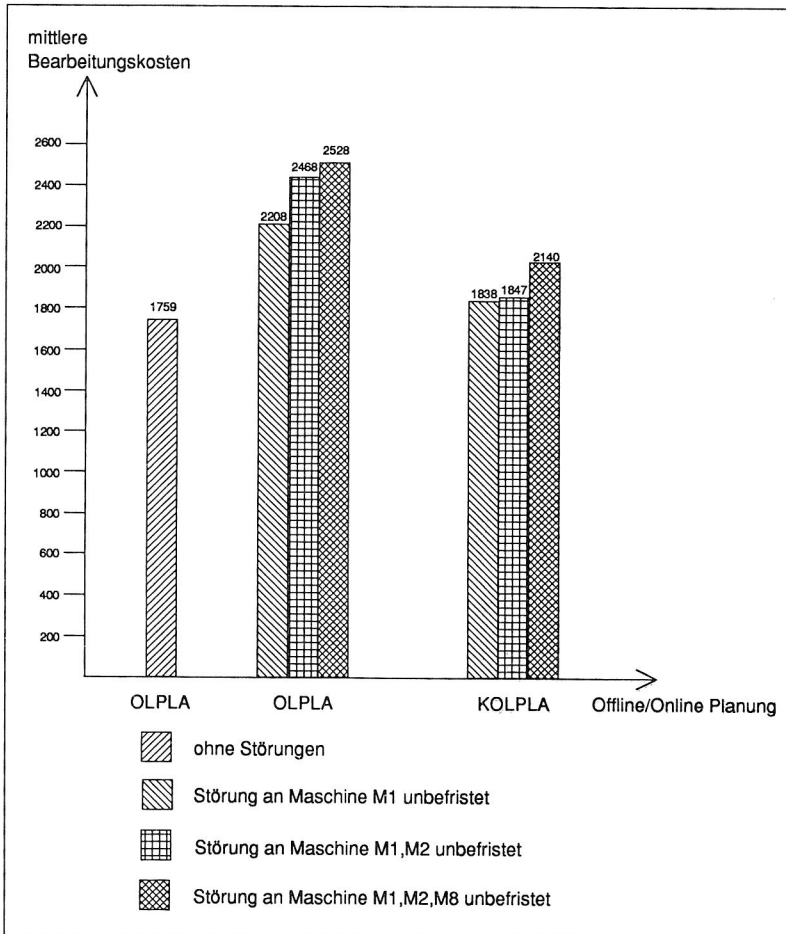


Bild 81: Mittlere Bearbeitungskosten bei Umplanung mit KOLPLA bzw. OLPLA (langfristige Störungen)

### c) Interpretation

In jeder Störungssituation liefert eine erneute Offline-Planung (Offline-KOLPLA) bessere Ergebnisse als eine Online-Planung mit OLPLA, was sich im Vergleich der mittleren Bearbeitungskosten belegen läßt.

Es ist jedoch zu berücksichtigen, daß eine erneute Offline-Planung bei Beginn oder auch während der Fertigungsperiode zu hohen Rechenzeiten und Bearbeitungsstillstand führen kann. Eine sofort aktivierte Online-Planung liefert in der Regel schlechtere Ergebnisse als eine erneute Offline-Planung. Die Bearbeitung der Werkstücke kann jedoch weitergeführt werden. Das vorliegende Planungsexperiment belegt diese Aussagen, was durch folgende Statistikdaten noch bekräftigt wird.

Erhöhung der mittleren Bearbeitungskosten (MBK) bei auftretenden Störungen (MBK=1759 im störungsfreien Fall):

- Störung M1,	KOLPLA: 1838	+ 4,5%
	OLPLA : 2208	+25,5%
- Störung M1,M2,	KOLPLA: 1847	+ 5%
	OLPLA: 2468	+40,3%
- Störung M1,M2,M8,	KOLPLA: 2140	+21,7%
	OLPLA: 2528	+43,7%

Eine erneute Offline-Planung (KOLPLA) ist rechenzeitintensiv. Dies wurde beim Vergleich der mittleren Bearbeitungskosten nicht berücksichtigt, um eine objektive Bewertung der Planungsphilosophien (Offline-/Online-Planung) zu ermöglichen.

## Kompensation von kurzfristigen Störungen durch Online-Planung

### a) Aufgabe

Es sollen in einer Untersuchung die Auswirkungen der Störungsdauer im kurzfristigen Zeitbereich auf die Veränderung der mittleren Bearbeitungskosten eines Fertigungsspektrums abgeleitet werden. Dazu wird die Störungsdauer stufenweise von 0 bis 50 Zeiteinheiten erhöht. Je nach Störungssituation schwankt die Durchlaufzeit des Fertigungsspektrums zwischen 334 Zeiteinheiten und 578 Zeiteinheiten. Einen weiteren Einflußparameter stellt die Anzahl der auftretenden Störungen dar. Das Fertigungsspektrum besteht aus den fünf Referenzwerkstücken W1, W2, W3, W4 und W5. Die Gewichtungskriterien aus EGOPLA und KOLPLA werden beibehalten.

### b) Ergebnisse

Bild 82 zeigt das Ergebnis der Untersuchung. In 15 verschiedenen Störungssituationen (Dauer der kurzfristigen Störung, Anzahl der defekten Maschinen) sind jeweils die Bearbeitungskosten des Fertigungsspektrums aufgetragen.

### c) Interpretation

Bei einer Maschinenstörung (im Beispiel Maschine M8) wird die kurzfristige Störungskompensation der Online-Planung besonders deutlich. Die Bearbeitungskosten steigen kontinuierlich mit der Dauer der Störung.

## Statistik

Bearbeitungskosten ohne Störungen BK = 1759

Störungsdauer: 10 ZE	=1867,	Erhöhung der BK um: 6,1%
20 ZE	=1960,	11,4%
30 ZE	=2057,	16,9%
40 ZE	=2079,	18,2%
50 ZE	=2079,	18,2%

### Zum Vergleich

Die Erhöhung der Bearbeitungskosten beim langfristigen Ausfall der Maschine M8 beträgt nach Berechnung der Online-Planung 18,2%!

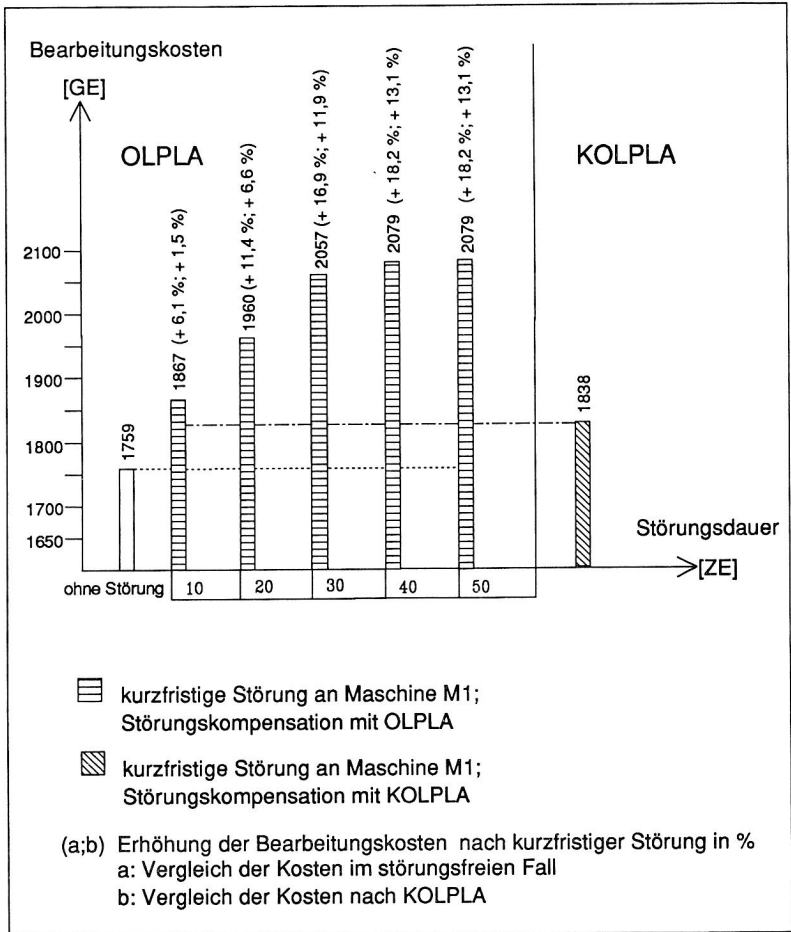


Bild 82: Störungskompensation bei kurzfristigen Störungen

In obigem Beispiel unterscheidet sich das Ergebnis der kurzfristigen Online-Planung signifikant von einer langfristig orientierten Störungskompensation. Bei mehreren gleichzeitig auftretenden kurzfristigen Störungen fällt die kontinuierliche Erhöhung der Bearbeitungskosten (bei zunehmender Störungsdauer) nicht mehr so deutlich aus.

Der Grund liegt in der allen Experimenten zugrundegelegten Planungsdistanz  $d=2$ . Dabei bleiben häufig "optimale" Bearbeitungspfade unbeachtet. Eine größere Planungsdistanz verbessert die Ergebnisse der Online-Planung deutlich, was jedoch zu Lasten der benötigten Rechenzeit geht.

### 6.3 Abschließende Bewertung des verteilten Planungssystems HIPS

Der experimentelle Einsatz und die Erprobung des verteilten Planungssystems HIPS soll zu weiterführenden Entwicklungen motivieren. Die Ergebnisse der Planungskomponenten (EGOPLA, KOLPLA und OLPLA) belegen in eindeutiger Weise die Vorteile des verteilten Planungskonzeptes gegenüber konventionellen Planungsverfahren.

Die Arbeitsplanung in einem verteilten Planungssystem erfordert einen erhöhten Aufwand bei der Generierung von Arbeitsplangraphen. Diese sind jedoch für eine leistungsfähige Online-Planung im Werkstattbereich die wichtigste Voraussetzung. Eine Simulationskomponente unterstützt die Flexibilitätsteigerung bei der Bewertung von Arbeitsplangraphen.

Die Aufgaben der Belegungsplanung im Rahmen der PPS verändern sich aufgrund der Einbeziehung und Berücksichtigung flexibler Arbeitsplangraphen. Die Belegungsplanung sorgt dabei für eine optimale, offline-generierte Startbelegung des Fertigungssystems. Die Simulation ermöglicht die Berücksichtigung unterschiedlicher Parameter und Optimierungskriterien bei der Generierung eines Offline-Belegungsplans.

Eine Steigerung der Flexibilität im Fertigungsbereich (i. e. der Teilefertigung) läßt sich durch

- die Dezentralisierung von Planungsfunktionen,
- die Anwendung online-orientierter Planungsalgorithmen
- und die Vergabe von offline-generierten Alternativstrukturen (Arbeitsplangraphen, Belegungspläne)

erreichen. Diese Aspekte wurden durch die in dieser Arbeit beschriebenen Anwendungsbeispiele und deren Ergebnisse bestätigt.

Das Konzept der Bereichsautonomie verteilter Planungssysteme unterstützt, auch bei auftretenden Störungen während des Fertigungsablaufes, eine stillstandsfreie Fertigung. Online-orientierte Umdipositionsmaßnahmen sorgen bei vertretbarem Rechenaufwand für kurzfristig verfügbare Planungsergebnisse. Die geringen Abweichungen der erreichten Fertigungswerte (beispielsweise die tatsächlichen Bearbeitungskosten) von den online-geplanten Zielwerten sind, gerade trotz fertigungsbegleitender Umplanungsmaßnahmen, beachtlich.

Durch eine große Anzahl von parametrierbaren Optimierungskriterien und Dialogmechanismen wird der Planer in jedem Planungsabschnitt konstruktiv in seiner Entscheidungsfindung unterstützt. Dabei steht die Simulationskomponente im Mittelpunkt des verteilten Planungssystems. Die Durchgängigkeit und Integration der Informationsflüsse in allen Phasen der Planung konnte nachgewiesen werden.

#### **6.4 Ansätze für weitere Arbeiten**

Das verteilte Planungssystem HIPS wurde im Rahmen dieser Arbeit konzipiert und als verteiltes Prozeß-System realisiert und praxisorientiert erprobt. Die Ergebnisse des Piloteinsatzes motivieren weitere Entwicklungen auf diesem Gebiet.



Die Möglichkeiten einer fertigungsvorbereitenden Offline-Planung und einer fertigungsbegleitenden Online-Planung stellen für nahezu jeden Fertigungsbetrieb eine wünschenswerte Kombination dar. Dadurch soll die Flexibilität im Fertigungsbereich gesteigert werden, insbesondere bei der Kompensation von ungeplant auftretenden Ereignissen während des Fertigungsablaufes. Das ist jedoch nur mit leistungsfähiger Rechner- und Softwareunterstützung möglich.

Das in dieser Arbeit vorgestellte verteilte Planungssystem HIPS stellt dafür einen ausbaufähigen Ansatz dar.

Relativ geringen Aufwand erfordert der Ausbau des verteilten Prozeß-Systems zu einem verteilten Rechner-System. Verschiedene Planungsrechner (z. B. Arbeitsplanungsrechner, PPS-Rechner, Leitrechner, Zellenrechner) übernehmen die in dieser Arbeit beschriebenen Aufgaben. Lediglich die Mechanismen der Interprozeßkommunikation (siehe auch Abschnitt 5.2.3) sind auf eine Interrechnerkommunikation abzubilden. Ein entsprechender Aufwand ist auch für die Neugestaltung einer konsistenten Datenverwaltung in einem verteilten Rechner-system zu investieren.

Weiterhin könnte das verteilte Planungssystem um Offline- und Online-Planungsfunktionen zur Betriebsmittelversorgung und -verwaltung (z. B. Werkzeugmanagement) erweitert werden.

Das verteilte Planungskonzept, welches in dieser Arbeit für den Bereich der Teilefertigung konzipiert wurde, kann auch für andere Technologiebereiche (z. B. Montage, Elektronikfertigung) als Konzeptgrundlage verwendet werden.

Schließlich kann das verteilte Planungssystem HIPS als Referenzbeispiel mit fertigungstechnischen Hintergrund für die Untersuchung verteilter Multiprozessoranwendungen dienen.

## 7 Zusammenfassung

Die Leistungsfähigkeit von Werkzeugmaschinen wurde durch den verstärkten Einsatz von Steuerungs- und Rechner-technik enorm gesteigert. Planungs- und Dispositionssysteme sind dieser Entwicklung nur teilweise gefolgt. Die technische Flexibilität der Maschinen kann häufig aufgrund der Inflexibilität der Planungs- und Dispositionssysteme nur unbefriedigend ausgenutzt werden. Konventionelle PPS-Systeme sind dazu nicht in der Lage, dezentralisierte Feinplanungssysteme sind noch nicht ausgereift. Darüber hinaus fehlen Arbeitsplanungssysteme entsprechender Funktionalität.

Ziel dieser Arbeit war es deshalb, ein verteiltes Planungskonzept zu entwickeln, zu realisieren und zu erproben, das die fertigungstechnische Flexibilität nützen kann. Es sollten Planungsmechanismen gefunden und untersucht werden, welche insbesondere störungsbedingte Ein- und Umplanungsmaßnahmen im kurzfristigen Zeithorizont ermöglichen.

Ausgehend vom Konzept der Flexiblen Fertigungssysteme (FFS) wurde eine hierarchische Organisationsform für den rechnerintegrierten Fertigungsbereich definiert. Hierarchische Flexible Fertigungssysteme (HFFS) bilden damit ein Anwendungsbeispiel für verteilte Systeme im allgemeinen.

Die Anforderungen an verteilte Planungssysteme wurden in sechs Postulaten beschrieben. Planungsaufgaben bestehender Arbeitsplanungs-, PPS- und Werkstattsteuerungssysteme wurden vorgestellt. Danach wurde ein Konzept für verteilte Planungssysteme mit den Komponenten

- Arbeitsplangenerierung,
- Belegungsplanung und
- Werkstattplanung

entwickelt und eingehend beschrieben.

Das verteilte Planungssystem HIPS wurde unter Berücksichtigung der konzeptionellen Anforderungen in seiner Funktionalität vorgestellt. Dabei wurden auch Planungsalgorithmen, Parameter, Darstellungs- und Simulationsmöglichkeiten eingehend erläutert.

Nach der Vorstellung der Realisierung und der Softwareinfrastruktur des verteilten Planungssystems HIPS, wurde diese in zahlreichen Anwendungsbeispielen erprobt. Dazu wurde zunächst eine realitätsnahe Modellumgebung generiert und das verteilte Prozeß-System konfiguriert.

Jede Planungskomponente wurde unter Zugrundelegung realer Aufgabenstellungen in seiner Wirkungsweise im Rahmen des Modellsystems erprobt. Die Ergebnisse der Experimente wurden dargestellt und interpretiert.

Die vollständige Darstellung des verteilten Planungssystems HIPS (Konzept, Entwicklung, Realisierung und Erprobung) soll es dem Leser ermöglichen, sich von der Effizienz des neuartigen Planungsansatzes zu überzeugen. Diese Arbeit soll weiterhin motivieren und ermutigen, die vorgestellten Konzepte in industriell einsetzbare Lösungen zu übertragen.

## 8 Literaturverzeichnis

1.     AWF/REFA (Hrsg.):   Handbuch der Arbeitsvorbereitung,  
                          Teil 1: Arbeitsplanung.  
                          Beuth-Verlag GmbH, Berlin
2.     AWK (Hrsg.):       Integrierte Systeme der  
                          Produktionstechnik im wirtschaft-  
                          lichen und sozialen Umfeld.  
                          VDI-Verlag, Düsseldorf, 1987
3.     Aldinger, L.:      Leitstandunterstützte kurzfristige  
                          Fertigungssteuerung bei Einzel- und  
                          Kleinserienfertigung.  
                          Dissertation, Stuttgart, 1985
4.     Bärnreuther, B.;   Die Standardisierung von Daten-  
                          schnittstellen in der  
                          Montageautomatisierung.  
                          Informatik - Spektrum, Dez. 1989  
                          Springer-Verlag, Berlin
5.     Balzert, H.:       Die Entwicklung von  
                          Software-Systemen: Prinzipien,  
                          Methoden, Sprachen, Werkzeuge.  
                          BI-Wissenschaftsverlag Reihe  
                          Informatik, Bd. 39,  
                          Mannheim, Wien, Zürich, 1984
6.     Brankamp, K.;      BDE-Daten als Basis für die Über-  
                          Paul, H. J.:       wachung der Fertigungssteuerung.  
  ZwF 81 (1986) 6, S. 297-301
7.     Brucker, P.:       Scheduling.  
                          Akademische Verlagsgesellschaft,  
                          Wiesbaden, 1981

8. Busch, U.: Entwicklung eines PPS-Systems.  
Hrsg.: Price Waterhouse GmbH,  
Erich Schmidt Verlag, Berlin, 1987
9. Chmielnicki, S.: Flexible Fertigungssysteme  
- Simulation der Prozesse als  
Hilfsmittel zur Planung und zum  
Test von Steuerprogrammen.  
Springer-Verlag, Berlin, 1985
10. Conway, R.-W.; Theory of scheduling.  
Maxwell, W. L.; Addison-Wesley Publishing  
Miller, L. W.: Company, 1967
11. Courant, J.; Optimierende Strategien der  
Strucks, M.: Produktionssteuerung zur Leistungs-  
steigerung integrierter flexibler  
Fertigungssysteme.  
Fertigungstechnik und Betrieb  
37 (1987) 10, S. 593-597
12. DIN: Normung von Schnittstellen für die  
rechnerintegrierte Produktion (CIM)  
Standortbestimmung und  
Handlungsbedarf.  
Beuth-Verlag, Berlin, Köln, 1987
13. DIN 8580: Begriffe der Fertigungsverfahren.  
DIN-Taschenbuch 109  
Deutsches Institut für  
Normung e.V., 1978
14. Dangelmaier, W.; Kurzfristige Fertigungssteuerung  
Aldinger, L.: mit Leitständen.  
wt-Zeitung in der Fertigung 76  
(1986) Nr. 2; S. 101-104

15. Diels, A.;  
Rozenfeld, H.: Datenmodell für eine integrierte Arbeitsplanerstellung. VDI-Zeitung 130 (1988), Nr.3, S. 40-44
16. Döttling, W.: Beitrag zur Steuerung und Überwachung des Fertigungsablaufes in flexiblen Fertigungssystemen. Dissertation, Uni Stuttgart, 1981
17. Enslow, P.H.: What is a "distributed" system? Computer, Januar, 1978
18. Erdlenbruch, B.: Grundlagen neuer Auftragssteuerungsverfahren für die Werkstattfertigung. Dissertation, Hannover, 1984
19. Eversheim, W.: Organisation in der Produktionstechnik, Band 3, Arbeitsvorbereitung. VDI-Verlag GmbH, Düsseldorf, 1989
20. Eversheim, W.;  
Thome, H. G.: Simulation verbessert Produktionsplanungs- und -steuerungssysteme (PPS). Industrie Anzeiger, Jg. 109 (1987) Nr. 53, S.9 ff.
21. Eversheim, W;  
Diels, A.;  
Rozenfeld, H.: Datenmodell für eine integrierte Arbeitsplanerstellung. VDI-Zeitung, Bd. 130 (1988), Nr. 3
22. Eversheim, W.;  
Cobanoglu, M.;  
Diels, A.: Aufbau von Methodenbanken für die Arbeitsplanung. VDI-Zeitung, 130 (1988) Nr. 10, S. 50-53

23. Feldmann, K.; Schmidt, B.: Simulation in der Fertigungstechnik.  
(Fachberichte Simulation 10)  
Springer-Verlag, 1988
24. Feldmann K.; Schlüter, K.: Simulation  
- Flexible Fertigungssysteme.  
In: ASIM (Hrsg.) "Simulation und Fabrikbetrieb"  
Tagungsband, gfmt, München, 1988
25. Feldmann, K.: Komponenten und Werkzeuge integrierter Systeme  
- Stand der Entwicklung.  
Spectrum, Berlin, 1988
26. Fischer, H.: Ein hierarchisch organisiertes Steuerungssystem für Flexible Fertigungssysteme.  
Prozeßrechnungssysteme '88  
Springer-Verlag, Berlin, 1988
27. Fischer, T.: Systematische Untersuchungen an einem Offline-Fertigungsplanungssystem in einer modellierten Experimentierumgebung.  
Universität Erlangen-Nürnberg,  
Lehrstuhl für Fertigungsautomatisierung und Produktionssystematik,  
Diplomarbeit, Erlangen, 1985
28. Fix-Sterz, J.; Lay, G.; Schultze-Wild, R.: Flexible Fertigungssysteme und Fertigungszellen, Stand und Entwicklungstendenzen in der Bundesrepublik Deutschland.  
VDI-Z 128 (1986) 11, S. 369-375

29. Förster, H.-U.;  
Hirt, K.: Entwicklung von Anforderungs-  
profilen flexibel automatisier-  
ter Fertigungskonzepte an die  
Produktionsplanung und -steuerung.  
Abschlußbericht zum Forschungs-  
vorhaben  
Nr. 5 134, FIR, Aachen, 1987
30. Fritz, A. H.: Fertigungstechnik.  
VDI-Verlag, Düsseldorf, 1985
31. Fuchs, H.: Automatische Arbeitsplanerstellung,  
ein Baustein im Rahmen der inte-  
grierten Fertigungsunterlagener-  
stellung.  
Dissertation, RWTH Aachen, 1981
32. Geiser, G.: Mensch - Maschine Kommunikation in  
Leitständen.  
Dissertation, Karlsruhe, 1985
33. Gentner, R.: Anforderungen an ein Informations-  
system zur kurzfristigen  
Fertigungssteuerung.  
In: FB/IE - Fortschrittliche  
Betriebsführung und Industrial  
Engineering, 32 (1983) 2, S. 99-105
34. Gewalt;  
Haake;  
Pfadler: Software- Engineering:  
Grundlagen und Techniken  
rationeller Programmentwicklung.  
Reihe Datenverarbeitung,  
München, Wien, Oldenburg, 1985



35. Graalmann, H.: Ein System zur automatischen Ermittlung von Arbeitsvorgangsfolgen auf der Basis einer analytischen Beschreibung des Bearbeitungsprozesses. Dissertation, RWTH Aachen, 1975
36. Grampp, K.: Ein Werkzeug zur Bewertung kurzfristiger Planungsstrategien bei vielen Fertigungsalternativen in hierarchisch organisierten Flexiblen Fertigungssystemen. Universität Erlangen-Nürnberg, Lehrstuhl für Fertigungsautomatisierung und Produktionssystematik, Diplomarbeit, Erlangen, 1988
37. Groha, A.: Universelles Zellenrechnerkonzept für flexible Fertigungssysteme. Springer-Verlag, Berlin, 1988
38. Guttman, H.-T.: Leistungsermittlung mit Betriebsdatenerfassungssystemen VDI-Zeitung, Bd. 128 (1986) Nr. 3
39. Hackstein, R.: Produktionsplanung und -steuerung (PPS). Ein Handbuch für die Betriebspraxis VDI-Verlag, Düsseldorf, 1984
40. Härdtnr, M.: Überwachung und Diagnose in flexiblen Fertigungssystemen. Beiträge zur Entwicklung des Produktionsprinzips VCH Verlagsgesellschaft, Basel 1988
41. Helberg, P.: PPS als CIM-Baustein. Erich Schmidt Verlag, Berlin, 1987

42. Hintz, G.-W.: Ein wissensbasiertes System zur Produktionsplanung und -steuerung für flexible Fertigungssysteme. Forschungsberichte VDI, Reihe 2, Nr. 128 VDI-Verlag, Düsseldorf, 1987
43. Holz, B.: Automatisierte Erstellung von NC-Programmen. Dissertation, RWTH Aachen, 1981
44. Junike, W.: Hierarchische Steuerungssysteme für die Automatisierung von Fertigungsanlagen. wt-Z für industrielle Fertigung 75 (1985) 8, S.469-472
45. Kang, M.: Entwicklung eines Werkstatt-steuerungssystems mit simulataner Termin- und Kapazitätsplanung. Carl-Hanser-Verlag, München, Wien, 1987
46. Kemmer, K.: Hierarchisch verteilte Online-Planung für Flexible Fertigungssysteme. Universität Erlangen-Nürnberg, Lehrstuhl für Fertigungsautomatisierung und Produktionssystematik, Diplomarbeit, Erlangen, 1989
47. Keramidis, S.: Eine Methode zur Spezifikation und korrekten Implementierung von asynchronen Systemen. Arbeitsberichte des IMMD, Friedrich-Alexander-Universität, Erlangen-Nürnberg, Band 15, Nr. 4, Erlangen, 1982

48. Kiener, A.: Integration und Erprobung von Offline- und Online-Planungskomponenten für Flexible Fertigungssysteme. Universität Erlangen-Nürnberg, Lehrstuhl für Fertigungsautomatisierung und Produktionssystematik, Studienarbeit, Erlangen, 1989
49. Kohen, E.: Adaptierbare Steuerungssoftware für Flexible Fertigungssysteme. Dissertation, RWTH Aachen, 1986
50. Kopp, H.: Kriterien und Methoden für die Überwachung hochautomatisierter Fertigungseinrichtungen. VDI-Berichte, Nr. 364, 1980, S. 69-74
51. Kraft, J.: Rechnerunterstützung bei dezentralisierten Funktionen der Arbeitsvorbereitung am Beispiel der autonomen Fertigungsinsel. Dissertation, Bochum, 1985
52. Kreimeier, D.: Konfigurierbares mikrorechnergestütztes Planungshilfsmittel zur Fertigungssteuerung autonomer Fertigungsstrukturen. Dissertation, Ruhr-Universität Bochum, 1987
53. Liesegang, G.; Schirmer, A.: Heuristische Verfahren zur Maschinenbelegungsplanung bei Reihenfertigung. Zeitschrift für Operations Research, Band 19, 1975

54. Loersch, U.: Aufbau eines Dialogplanungssystems:  
Dargestellt am Beispiel der  
Arbeitsplanerstellung.  
Dissertation, RWTH Aachen, 1983
55. Maier, U.: Arbeitsgangterminierung mit  
variabel strukturierten  
Arbeitsplänen.  
Springer-Verlag, Berlin, 1980
56. Mengerssen, M.: Bearbeitungsalternativen für  
prismatische Werkstücke.  
tz für Metallbearbeitung,  
Jg. 74 (1980), Nr. 10, S. 55
57. Mertins, K.: Steuerung rechnerunterstützter  
Fertigungssysteme.  
Carl-Hanser-Verlag,  
München, Wien, 1984
58. Minolla, W.: Rationalisieren in der  
Arbeitsplanung.  
Schwerpunkt Organisation,  
Dissertation, RWTH Aachen, 1975
59. Moll, W.-P.: Maschinenbelegungsplanung mit EDV.  
Vogel-Verlag, Würzburg, 1975
60. Müller, W.: Konzeption eines hierarchischen  
Planungssystems für Flexible  
Fertigungssysteme (CAM) unter  
Berücksichtigung bewerteter  
Arbeitsplanstrukturen (CAP).  
Universität Erlangen-Nürnberg,  
Lehrstuhl für Fertigungsautomati-  
sierung und Produktionssystematik,  
Studienarbeit, Erlangen, 1988

61. Müller-  
Merbach, H.: Optimale Reihenfolgen.  
Springer-Verlag, Berlin, 1970
62. Mußbach-  
Winter, U.: Entwicklung eines Verfahrens zur  
Arbeitsgangterminierung in  
flexiblen Fertigungssystemen.  
In: Flexibles Fertigungssystem  
VCH Verlagsgesellschaft,  
Basel, 1988
63. Niemann, H.: Klassifikation von Mustern.  
Springer-Verlag, Berlin, 1983
64. Nilsson, N.J.: Principles of Artificial  
Intelligence.  
Springer-Verlag, New York, 1983
65. Nissing, T.: Beitrag zur Entwicklung eines  
dezentralen Produktionsplanungs-  
und -steuerungssystems auf der  
Basis verteilter Datenbestände.  
Dissertation, RWTH Aachen, 1982
66. Noltemeier, H.: Graphentheorie mit Algorithmen und  
Anwendungen.  
de Gruyter-Verlag,  
Berlin, New York, 1976
67. Nyhius, F.: Rüstzeitanalyse - Voraussetzung für  
eine systematische Rüstzeit-  
reduzierung.  
Seminar "Statistisch orientierte  
Fertigungssteuerung"  
Hannover, 1984
68. N. N.: Handbuch der Arbeitsvorbereitung.  
Hrsg.: AWF/REFA, Beuth-Verlag,  
Berlin, Köln, Frankfurt, 1969

69. Paulik, R.: Kostenorientierte Reihenfolgeplanung in der Werkstattfertigung.  
- Eine Simulationsstudie  
Regensburger Beiträge zur betriebswirtschaftlichen Forschung  
Verlag Harupt, Bd. 6, 1984
70. Perl, J.: Graphentheorie, Grundlagen und Anwendung.  
Akademische Verlagsgesellschaft,  
Wiesbaden, 1981
71. Pistorius, E.: Informationsabbildungen für die automatisierte Arbeitsplanung.  
Produktionstechnik Berlin,  
Forschungsberichte für die Praxis  
Carl-Hanser Verlag,  
München, Wien, 1985
72. Pohlmann, G.: Rechnerinterne Objektdarstellungen als Basis integrierter CAD-Systeme.  
Produktionstechnik-Berlin,  
Forschungsberichte für die Praxis  
Hrsg.: Prof. Dres.-Ing. G. Spur  
Carl-Hanser-Verlag,  
München, Wien, 1982
73. Reese, J.: Standort- und Belegungsplanung für Maschinen in mehrstufigen Produktionsprozessen.  
Springer-Verlag,  
Berlin, Heidelberg, 1980
74. REFA: Methodenlehre der Planung und Steuerung, Teil 2 Planung.  
Carl-Hanser-Verlag, München, 1978

75. Reuter, W.: Flexibilität durch Integration.  
Carl-Hanser-Verlag,  
München, Wien, 1986
76. Rispoli, L.: Steuern eines flexiblen  
Fertigungssystems.  
wt-Z für industrielle Fertigung 76  
(1986) 9, S. 525-527
77. Roth, H.-P.;  
Zeh, K.-P.: Planungssicherheit durch Simulation  
Richtige Investition und bestmög-  
liche Auslastung flexibler Ferti-  
gungssysteme vorab durch Simulation  
ermitteln.  
VDI-Zeitung,  
Bd. 126 (1984), Nr. 12. S. 427 ff.
78. Scheiber, R. E.: Algorithmen zur flexiblen  
Gestaltung der kurzfristigen  
Fertigungssteuerung.  
Springer-Verlag,  
Berlin, Heidelberg, 1984
79. Scheller, J.: Hierarchisches Steuerungskonzept  
für flexible Montagezellen.  
atp 31 (1989) Nr.4, S. 166 - 173
80. Schlüter, K.: Nutzungsgradsteigerung von Montage-  
systemen durch den Einsatz der  
Simulationstechnik.  
Carl-Hanser-Verlag, München, 1985
81. Schmidt G.: CAM: Algorithmen und Decision  
Support für die Fertigungs-  
steuerung.  
Springer-Verlag, Berlin, 1989

82. Schmitt E.: Werkstattsteuerung bei wechselnder Auftragsstruktur.  
Forschungsberichte aus dem Institut für Werkzeugmaschinen und Betriebstechnik der Universität Karlsruhe  
Dissertation, Uni Karlsruhe, 1989
83. Schmitz-  
Mertens, H. J.: Entwicklung eines Steuerungskonzepts für Systeme mit heterogener Fertigungsstruktur.  
VDI-Verlag, Düsseldorf, 1989
84. Scholz, W.: Modell zur datenbankgestützten Planung automatisierter Montageanlagen.  
Dissertation, Carl-Hanser-Verlag, München, Wien, 1989
85. Schultz, R.: Automatisierte Fertigungsplanung für die numerisch gesteuerte Mehrmaschinenbearbeitung.  
Produktionstechnik Berlin  
Carl-Hanser Verlag,  
München, Wien, 1982
86. Schulz, H.;  
Vossloh, M.: Modellgestützte Diagnosesysteme zur flexiblen Überwachung der Fertigung.  
Werkstatt und Betrieb 119  
(1986) 4, S. 295-300
87. Schulz, H.;  
Dey, H.-J.;  
Schmidt, S.: Kostensenkungs-Potentiale in der Arbeitsvorbereitung durch Rechnerunterstützung.  
Werkstatt und Betrieb, 119 (1986) 1



88. Schulz, J.: Auslegung computerintegrierter  
Arbeitsplanung für flexible  
Fertigungssysteme.  
Dissertation, RWTH Aachen, 1988
89. Schwamborn, W.: Rechnerunterstützte Arbeitsplanung.  
VDI-Z, Bd. 129 (1987) Nr. 1
90. Schwetz, R.: Rechnerunterstützte Arbeitsplaner-  
stellung.  
wt-Z für industrielle Fertigung 73  
(1983), S. 91-94
91. Sloman, M.; Verteilte Systeme und  
Kramer, J: Rechnernetze.  
Carl-Hanser-Verlag, München, 1989
92. Soliman, M.: Rechnerunterstützte Optimierung  
des Betriebsmittelflusses in  
flexibel automatisierten  
Fertigungen.  
Fortschrittsberichte VDI, Reihe 2  
Fertigungstechnik Nr. 133,  
VDI-Verlag, 1987
93. Spur, G.; CAD-Technik.  
Krause, F.-L.: Carl-Hanser-Verlag,  
München, Wien 1984
94. Steinhilper, R.: FFS im In- und Ausland.  
tz für Metallbearbeitung,  
Nr. 77, 1983
95. Steudel, M.: Aufbau und Anwendungsmöglichkeiten  
eines modularen Systems zur auto-  
matischen Arbeitsplanerstellung.  
Dissertation, RWTH Aachen, 1980

96. Stommel, H.-J.;  
Kunz, D.: Untersuchungen über Durchlauf-  
zeiten in Betrieben der metall-  
verarbeitenden Industrie mit  
Einzel- und Kleinserienfertigung.  
Forschungsbericht des Landes NRW,  
Westdeutscher Verlag Oplaten, 1973
97. Turowski, W.: Gestaltung von Funktionsbausteinen  
für geometrieorientierte Arbeits-  
planungssysteme.  
Dissertation, Carl-Hanser-Verlag,  
München, Wien, 1986
98. Viehweger, B.: Planung von Fertigungssystemen mit  
automatisiertem Werkzeugfluß.  
Carl-Hanser-Verlag,  
München, Wien, 1985
99. Virnich, M.: Betriebsdatenerfassung  
- Ein "altes" Thema gewinnt  
zunehmend an Aktualität.  
VDI-Zeitung, Bd. 129  
(1987) 1, S. 10-16
100. Warnecke, H.-J.: Der Produktionsbetrieb.  
Springer-Verlag, 1984
101. Weck, M.: Simulation als Hilfsmittel für den  
Aufbau und Betrieb von flexiblen  
Fertigungssystemen.  
Simulationstechnik in der Fertigung  
Carl-Hanser-Verlag, München, 1986

102. Wendler, H.: Entwicklung eines Softwaresystems für die Generierung und Analyse von Flexiblen Arbeitsplänen. Universität Erlangen-Nürnberg, Lehrstuhl für Fertigungsautomatisierung und Produktionssystematik, Studienarbeit, Erlangen, 1988
103. Wessel, H.-J.; Steudel, M.: Gegenüberstellung von Systemen zur automatischen Arbeitsplanerstellung. VDI-Zeitung 122 (1980) Nr. 8, S. 302-310
104. Wildemann, H.: Investitionsplanung und Wirtschaftlichkeitsrechnung für flexible Fertigungssysteme. Fachverlag für Wirtschaft und Steuern, Schäfer GmbH & Co, Stuttgart, 1987
105. Zimmermann, W.; Gerhardt, J.: Algorithmen zur maschinellen Bestimmung des optimalen Fertigungsablauf- und Maschinenbelegungsplans. Zwf, Nr. 7, 1984
106. Zörntlein, G.: Flexible Fertigungssysteme: Belegung, Steuerung, Datenorganisation. Dissertation, Universität Erlangen-Nürnberg, 1987
107. Zons, K.-H.: Rechnerunterstützte Ermittlung von Arbeitsvorgangsfolgen auf der Basis von bearbeitungstechnologischen Grundlagen. Dissertation, RWTH Aachen, 1983



## Persönliches

## Schulbildung

## Studium

## Berufspraxis

Vom 1. April 1985 bis 30. April 1990 wissenschaftlicher Mitarbeiter und seit 1. Oktober 1988 Oberingenieur für Steuerungstechnik und Sensorik am Lehrstuhl für Fertigungsautomatisierung und Produktionssystematik der Universität Erlangen-Nürnberg

Leitung: Prof. Dr.-Ing. K. Feldmann



# Reihe Fertigungstechnik Erlangen

Band 1

Andreas Hemberger

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

208 Seiten, 107 Bilder. 1988. Kartoniert.

Band 2

Detlef Classe

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

194 Seiten, 70 Bilder. 1988. Kartoniert.

Band 3

Friedrich-Wilhelm Nolting

**Projektierung von Montagesystemen**

201 Seiten, 107 Bilder, 1 Tabelle. 1989. Kartoniert.

Band 4

Karsten Schlüter

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

177 Seiten, 97 Bilder. 1989. Kartoniert.

Band 5

Shir-Kuan Lin

**Aufbau von Modellen zur Lageregelung von Industrierobotern**

168 Seiten, 46 Bilder. 1989. Kartoniert.

Band 6

Rudolf Nuss

**Untersuchungen zur Bearbeitungsqualität im Fertigungssystem  
Laserstrahlschneiden**

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

Band 7

Wolfgang Scholz

**Modell zur datenbankgestützten Planung automatisierter Montageanlagen**

194 Seiten, 89 Bilder. 1989. Kartoniert.

Band 8

Hans-Jürgen Wißmeier

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

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

Band 9

Rainer Eisele

**Konzeption und Wirtschaftlichkeit rechnerintegrierter Planungssysteme**

183 Seiten. 1990. Kartoniert.

Band 10

Rolf Pfeiffer

**Technologisch orientierte Montageplanung**

**am Beispiel der Schraubtechnik**

216 Seiten, 102 Bilder, 16 Tabellen. 1990. Kartoniert.

Band 11

Herbert Fischer

**Verteilte Planungssysteme zur Flexibilitätssteigerung der**

**rechnerintegrierten Teilefertigung**

201 Seiten, 85 Bilder. 1990. Kartoniert.

Band 12

Gerhard Kleineidam

**CAD/CAP: Rechnergestützte Montagefeinplanung**

203 Seiten, 107 Bilder. 1990. Kartoniert.

Band 13

Frank Vollertsen

**Pulvermetallurgische Verarbeitung eines übereutektoiden**

**verschleißfesten Stahls**

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