ECONSTOR
Make Your Publications Visible.

A Service of

ZBW Leibniz-Informationszentrum Wirtschaft
Leibniz Information Centre for Economics

Drexl, Andreas; Eversheim, Walter; Grempe, Rainer; Esser, Heinrich

Working Paper — Digitized Version

CIM im Werkzeugmaschinenbau: Der PRISMA-Montageleitstand

Manuskripte aus den Instituten für Betriebswirtschaftslehre der Universität Kiel, No. 295

Provided in Cooperation with:
Christian-Albrechts-University of Kiel, Institute of Business Administration

Suggested Citation: Drexl, Andreas; Eversheim, Walter; Grempe, Rainer; Esser, Heinrich (1992) : CIM im Werkzeugmaschinenbau: Der PRISMA-Montageleitstand, Manuskripte aus den Instituten für Betriebswirtschaftslehre der Universität Kiel, No. 295, Universität Kiel, Institut für Betriebswirtschaftslehre, Kiel

This Version is available at:
https://hdl.handle.net/10419/161419

Standard-Nutzungsbedingungen:

Die Dokumente auf EconStor dürfen zu eigenen wissenschaftlichen Zwecken und zum Privatgebrauch gespeichert und kopiert werden.

Sie dürfen die Dokumente nicht für öffentliche oder kommerzielle Zwecke vervielfältigen, öffentlich ausstellen, öffentlich zugänglich machen, vertreiben oder anderweitig nutzen.

Sofern die Verfasser die Dokumente unter Open-Content-Lizenzen (insbesondere CC-Lizenzen) zur Verfügung gestellt haben sollten, gelten abweichend von diesen Nutzungsbedingungen die in der dort genannten Lizenz gewährten Nutzungsrechte.

Terms of use:

Documents in EconStor may be saved and copied for your personal and scholarly purposes.

You are not to copy documents for public or commercial purposes, to exhibit the documents publicly, to make them publicly available on the internet, or to distribute or otherwise use the documents in public.

If the documents have been made available under an Open Content Licence (especially Creative Commons Licences), you may exercise further usage rights as specified in the indicated licence.

WWW.ECONSTOR.EU

Mitglied der Leibniz-Gemeinschaft

Nr. 295

CIM im Werkzeugmaschinenbau: Der PRISMA-Montageleitstand

Drexl / Eversheim / Grempe / Esser

Oktober 1992

Professor Dr. rer. pol. *Andreas Drexl,* Institut für Betriebswirtschaftslehre, Christian–Albrechts–Universität zu Kiel;

Professor Dr.–Ing. *Walter Eversheim*, Dipl.–Ing. *Heinrich Esser*, Laboratorium für Werkzeugmaschinen und Betriebslehre (WZL), RWTH Aachen;

Dipl.–Ing. *Rainer Grempe*, DAT Informationssysteme GmbH, Ratingen.

1. Problemstellung

Hersteller komplexer Werkzeugmaschinen sind typische Vertreter der Einzel- und Kleinserienfertigung mit einer stark auftragsbezogenen, kundenorientierten Auftragsabwicklung. Die Entwicklungen der letzten Jahre, insbesondere

- die Zunahme kundenauftragsbezogener Anpassungen mit einem Neukonstruktionsanteil von nicht selten bis zu 30 %,[1]
- die zunehmende Komplexität der Produkte, z.B. im Bereich der Steuerungstechnik und der Peripherie sowie
- der Trend von der Einzelmaschine hin zur Systemlösung

haben einen raschen Wandel der traditionellen Maschinenbauindustrie hin zu "High-Tech"-Unternehmen bewirkt. Die schnellen Veränderungen haben zu Problemen in allen Unternehmensbereichen geführt (vgl. *Abbildung 1*), die sich zum Großteil direkt oder indirekt auf die Montage am Ende der Auftragsabwicklungskette auswirken.

In den meisten Unternehmensbereichen wurden in den vergangenen Jahren erhebliche Anstrengungen unternommen, um die Flexibilität zu erhöhen und trotz der schwierigen Randbedingungen wirtschaftlich zu produzieren. Beispiele hierfür sind der Einsatz von EDV-Hilfsmitteln in Konstruktion (CAD - Computer Aided Design) und Arbeitsvorbereitung (CAP - Computer Aided Planning). Im Fertigungsbereich konnten die Durchlaufzeiten neben den mit flexiblen Produktionseinrichtungen möglichen kleineren Losgrößen vor allem durch den Einsatz geeigneter Planungs- und Steuerungshilfsmittel wie PPS- (Produktionsplanungs- und -steuerungs-) Systeme, Leitstände[2] und Einrichtungen zur Betriebsdatenerfassung (BDE) deutlich reduziert werden. Versuche, diese Lösungsansätze auch auf die Planung und Steuerung der Montageabläufe zu übertragen, blieben bisher jedoch weitgehend erfolglos.[3]

Ein Grund für die geringe organisatorische und EDV-technische Durchdringung der Montage liegt in der geringen Prozeßsicherheit und der damit verbundenen hohen Störungshäufigkeit der Montage. Abhilfe ist hier durch die vorbeugende Analyse und Beseitigung von Störungsursachen möglich.[4] Gravierender ist allerdings, daß die derzeit verfügbaren Planungs- und Steuerungshilfsmittel durchweg für den Einsatz in der Serienproduktion bzw. im Fertigungsbereich entwickelt wurden und den montagespezifischen Anforderungen nach

- realitätsnaher Abbildung der Montagereihenfolge mit teilweise paralellen und/oder überlappenden Tätigkeiten,
- Berücksichtigung aller relevanten Ressourcen (Material, Information, Fläche, Personal, Betriebsmittel),

---

1 Vgl. hierzu insbesondere *Kosmas*, 1988.

2 Vgl. zu Fertigungsleitständen *Adelsberger / Kanet*, 1991; *Hars / Scheer*, 1991; *Kellermann / Wächter*, 1987; *Kanet / Sridharan*, 1990; *Kurbel / Meynert*, 1988, *Lippe*, 1990; *Scheer / Hars*, 1991; *Schmidt / Frenzel*, 1990 sowie *Stadtler / Wilhelm*, 1992.

3 Siehe hierzu vor allem *Konz*, 1989.

4 Vgl. *Eversheim*, 1990.

- rationeller Erstellung und variantenorientierter Verwaltung der Planungsgrunddaten sowie
- Unterstützung einer schnellen und gezielten Störungsreaktion

nicht gerecht werden.[5] Aufgrund fehlender Hilfsmittel wird daher weitgehend auf eine systematische Planung und Steuerung der Montage verzichtet. Die mangelhafte Synchronisation der Montageprozesse hat dabei zur Folge, daß heute bereits bis zu 75 % aller Montagevorgänge mit Verzug beendet werden.[6] Lieferterminüberschreitungen von mehreren Wochen sind trotz der branchenüblichen Konventionalstrafen (Pönale) keine Seltenheit.

Die Schwachstellen der Montageplanung wirken sich auch auf die vorgelagerten Unternehmensbereiche aus. So erschwert das Fehlen realistischer, regelmäßig aktualisierter Ecktermine die montagegerechte Materialbeschaffung und -bereitstellung sowie die Terminabstimmung mit dem Fertigungsbereich. Entgegen der derzeitigen Praxis muß die Montageplanung und -steuerung in den hier angesprochenen Unternehmen des Werkzeugmaschinenbaus daher als eine *zentrale CIM-Komponente* angesehen werden.

Zur Verbesserung der Ist-Situation wurde auf Initiative des Laboratoriums für Werkzeugmaschinen und Betriebslehre (WZL) der RWTH Aachen im Jahre 1989 das Verbundprojekt PRISMA (Production Improvement of Small Batch Machine Tool Assembly) gestartet.

2. PRISMA: Projektstruktur und -ziele

Das Projekt PRISMA wird unter dem EUREKA-Schirmprojekt FAMOS (Flexible automatisierte Montagesysteme) in Deutschland mit Mitteln des BMFT gefördert und von der Projektträgerschaft Fertigungstechnik im Kernforschungszentrum Karlsruhe (KfK) betreut. Ziel des Projekts ist die Reduzierung der Montagekosten und -zeiten im Werkzeugmaschinenbau. Hierzu werden in einem ganzheitlichen Rationalisierungsansatz vier Teilprojekte zu den Themengebieten

- montagegerechte Produktstrukturierung,
- zeitgemäße Montagestrukturen,
- Montageplanung und -steuerung sowie
- anforderungsgereche Organisationsstrukturen

bearbeitet (vgl. *Abbildung 2*). Die Zusammenfassung dieser vier Themengebiete unter einem Gesamtprojekt ermöglicht die Ausarbeitung bereichsübergreifender Rationalisierungsansätze. So erleichtert z.B. eine am Montageablauf orientierte, montagegerechte Produktstruktur eine bessere Steuerung der Materialbereitstellung im Rahmen der Montageplanung und -steuerung. Der Übergang zu einer detaillierteren, EDV-gestützten

---

[5] Siehe insbesondere *Eversheim* et al., 1992.

[6] Vgl. vor allem *Stolz*, 1989.

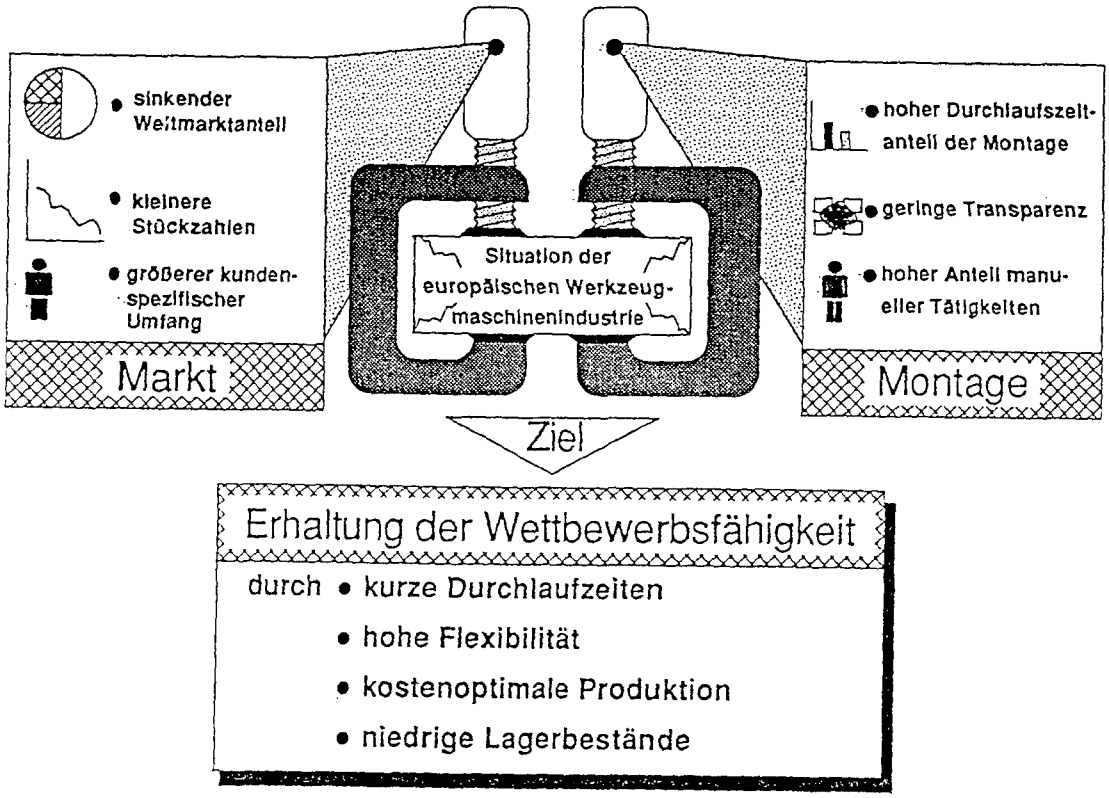


Abbildung 1: Zielsetzung des PRISMA Projektes[7]

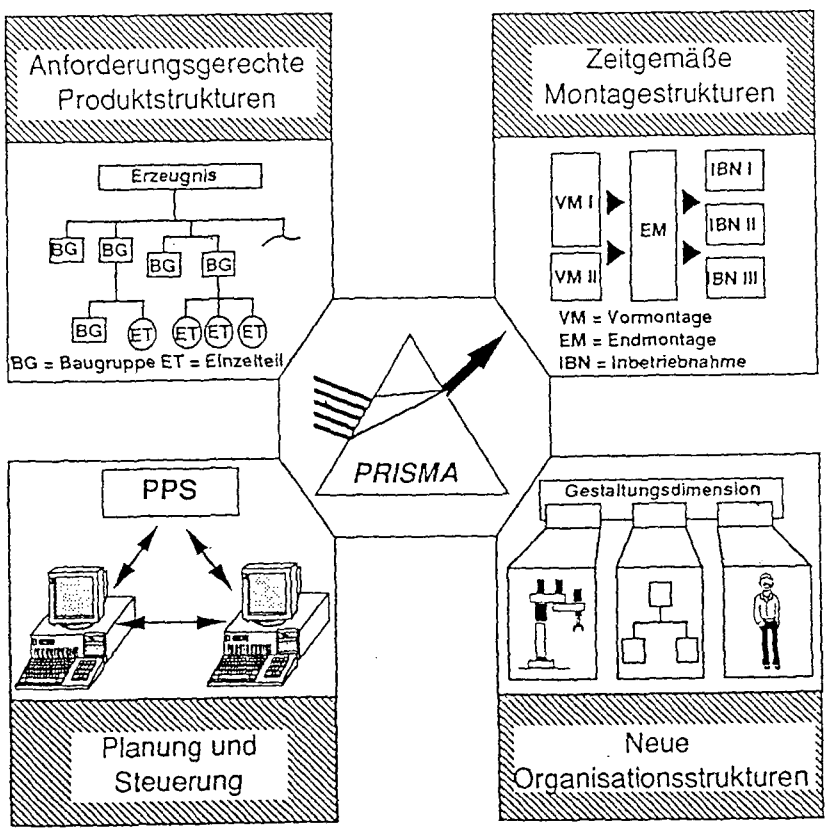


Abbildung 2: Struktur des PRISMA Projektes

[7] Bildnachweis für die Abbildungen 1 bis 9 sowie 11 bis 15: WZL; für 10 sowie 16 bis 18: DAT.

Montageplanung und -steuerung erfordert zudem die Anpassung der gewachsenen Organisationsstrukturen.

Zum *PRISMA-Konsortium* gehören neun (deutsche und italienische) *Partner:*

- *Werkzeugmaschinenhersteller:*
  - Mandelli S.p.A., Piacenza (I)
  - A. Monforts GmbH & Co, Mönchengladbach (D)
  - Dörries Scharmann GmbH, Mönchengladbach (D)
- *Softwarehäuser:*
  - SPRING S.p.A., Piacenza (I)
  - HITEC Campania S.p.A., Avellino (I)
  - DAT Informationssysteme GmbH, Ratingen (D)
  - S.C.O. Automation GmbH, Mönchengladbach (D)
- *Forschungsinstitute:*[8]
  - Tecnopolis CSATA, Bari (I)
  - WZL TH Aachen, Aachen (D)

Diese Zusammensetzung stellt die Entwicklung theoretisch-fundierter und gleichzeitig praxisrelevanter Lösungsansätze sicher.

3. Ist-Situation der Montageplanung und -steuerung

Wie bereits beschrieben, wird in der Einzel- und Kleinserienmontage von Werkzeugmaschinen bisher weitgehend auf eine detaillierte Planung und Steuerung verzichtet.[9] Die von einigen Unternehmen erstellten sequentiellen Montage-Arbeitspläne geben den tatsächlichen Montageablauf nur ungenau wieder und werden zudem kaum an die jeweiligen kundenspezifischen Randbedingungen angepaßt. Sie sind daher allenfalls für eine grobe Kalkulation des Kapazitätsbedarfs geeignet und werden kaum zur Planung und Steuerung genutzt. Als Grundlage für die Planung, Steuerung und Überwachung des Montageablaufs dienen statt dessen meist wenige grobe Ecktermine, wie sie zum Beispiel in der Terminliste des Montagemeisters verwaltet werden (vgl. *Abbildung 3*). Die eigentliche Planung und Steuerung der Montageabläufe wird den Werkern vor Ort überlassen.

Die selbständige *Durchführung* der Montage wirft aufgrund des hoch qualifizierten Montagepersonals kaum Probleme auf. Aus der unzureichenden übergeordneten Synchronisation der Montageabläufe resultieren jedoch charakteristische Mängel, wie z.B.

- häufige Unterbrechungen des Montageablaufs,
- ungleichmäßige Kapazitätsauslastung,
- Nutzung hochqualifizierter Monteure für Nebentätigkeiten und
- lange Standzeiten bei häufigen Lieferterminüberschreitungen.

---

[8] Der erste Autor wirkt (als Subcontractor) insbesondere bei der netzplanbasierten Modell- und Methodenentwicklung mit.

[9] Siehe dazu *Eversheim* et al., 1990.

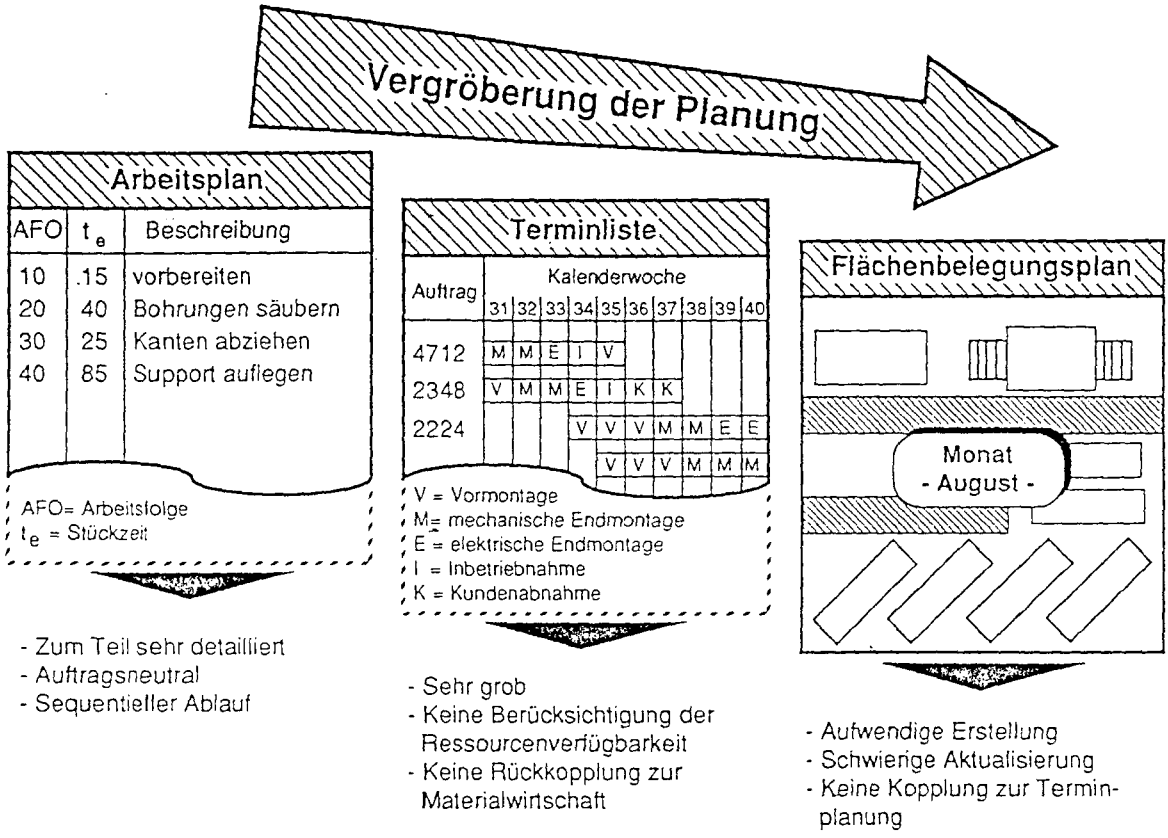


Abbildung 3: Istzustand der Montageplanung und -steuerung

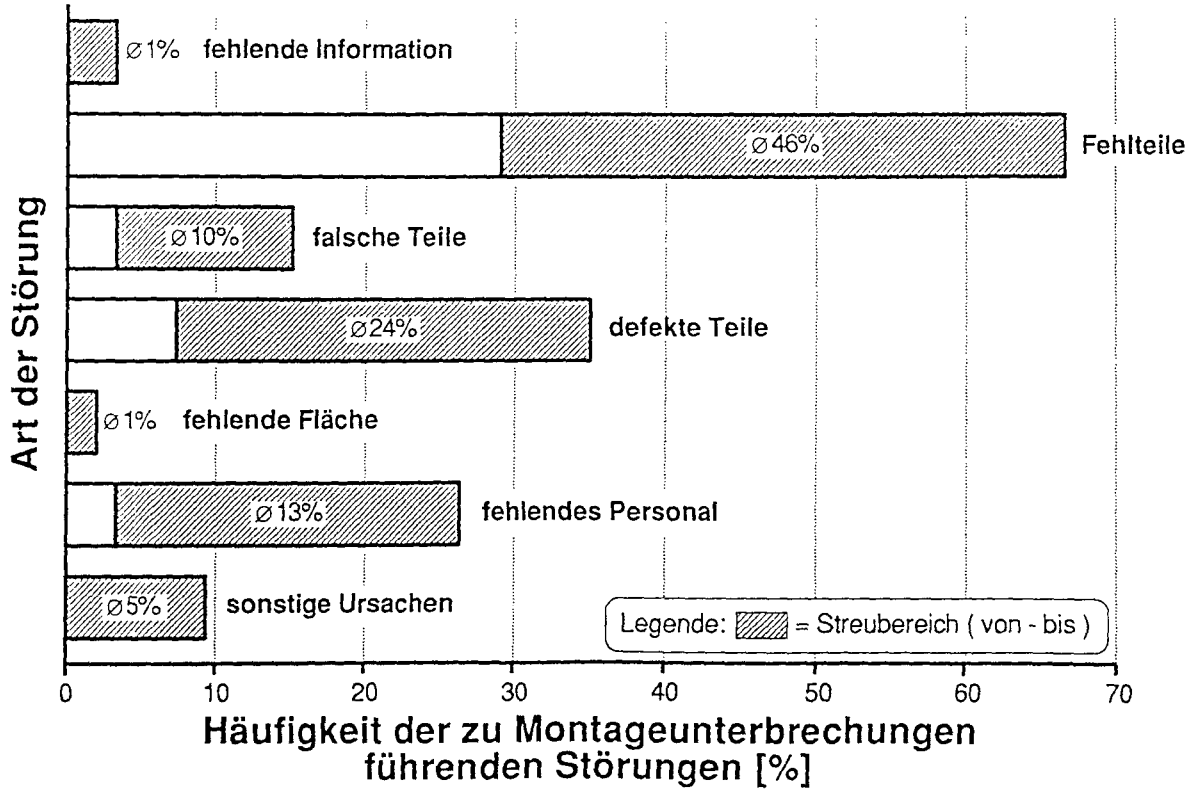


Abbildung 4: Störungsursachen und -häufigkeiten

(Datenbasis: Vier Werkzeugmaschinenhersteller)

Trotz der - z.B. im Vergleich zur meist deutlich besser geplanten Fertigung - unverkennbaren Mängel bei der Montageplanung und -steuerung wird der Grund für die genannten Probleme in der Praxis vielfach in anderen Ursachen, wie z.B.

- dem häufigen Auftreten von Fehlteilen,
- unzureichenden Montageflächen oder
- verspäteten kundenspezifischen Konstruktionsänderungen

gesucht. Diese Einschätzung wird bei einer Analyse der im Montagebereich auftretenden Störungen zunächst auch bestätigt (vgl. *Abbildung 4*). Hiernach sind etwa zwei Drittel der Ablaufunterbrechnungen allein auf fehlendes Material zurückzuführen. Bei näherer Betrachtung wird jedoch deutlich, daß auch die genannten vermeintlichen "Ursachen" weitgehend auf Mängel in der Montageplanung und -steuerung sowie in der Abstimmung mit den vorgelagerten Bereichen Fertigung und Beschaffung zurückgeführt werden können.

Untersucht man z.B. das Phänomen der umfangreichen Fehlteile genauer, so stellt man in den meisten Fällen fest, daß der Materialdisposition keine verläßlichen Informationen über die tatsächlichen Materialbedarfstermine zur Verfügung stehen. Die Montageecktermine basieren meist auf kundenneutralen, geschätzten Vorlaufzeiten, werden selten aktualisiert und weichen daher oft vom tatsächlichen Montagefortschritt ab.[10] Die hieraus resultierende Unsicherheit bei der Materialdisposition und -beschaffung führt zu einem hohen Fehlteilaufkommen trotz insgesamt hoher Bestände und z.T. erheblichen Liegezeiten einzelner Materialien. Zur Sicherstellung des Montagefortschritts hat sich daher in vielen Unternehmen eine manuelle Fehlteilverfolgung auf Basis des aktuellen Montagebedarfs etabliert. Diese Art der Fehlteilbeschaffung führt zwar zu einer erheblichen Bindung von Montagekapazitäten (vgl. *Abbildung 5*) sowie zu Unruhe und Mehrarbeit in Fertigung, Disposition, Beschaffung und Lager, eine befriedigende Materialverfügbarkeit wird jedoch trotzdem meist nicht erreicht.

Auch die besonders bei großvolumigen Produkten häufig auftretenden Flächenengpässe lassen sich überwiegend auf Mängel bei der Montageplanung und -steuerung zurückführen. Die Konzentration des Montageplaners auf eine optimale Auslastung des teuren Montagepersonals führt zur Schaffung von Arbeitsvorräten in Form von "angearbeiteten" Aufträgen. Der hieraus resultierende geringe Anteil produktiver Tätigkeiten an den Montagestandzeiten von nur etwa 30 - 50 % führt zu verlängerten Durchlaufzeiten und fehlenden Montageflächen für terminkritische Aufträge.

Im Gegensatz zu der beschriebenen "Meistersteuerung" strebt das im PRISMA-Projekt entwickelte Planungs- und Steuerungskonzept eine möglichst verzögerungsfreie Fertigstellung der gestarteten Aufträge durch Sicherstellung der Ressourcenverfügbarkeit sowie durch schnelle, flexible Reaktionsmöglichkeiten auf eintretende Störungen an. Der Vorteil dieser Strategie liegt in deutlich verkürzten, kalkulierbaren Durchlaufzeiten. Die Umsetzung bei gleichzeitiger Sicherstellung einer hohen, gleichmäßigen Kapazitätsaus-

---

[10] Vgl. hierzu erneut *Konz*, 1989.

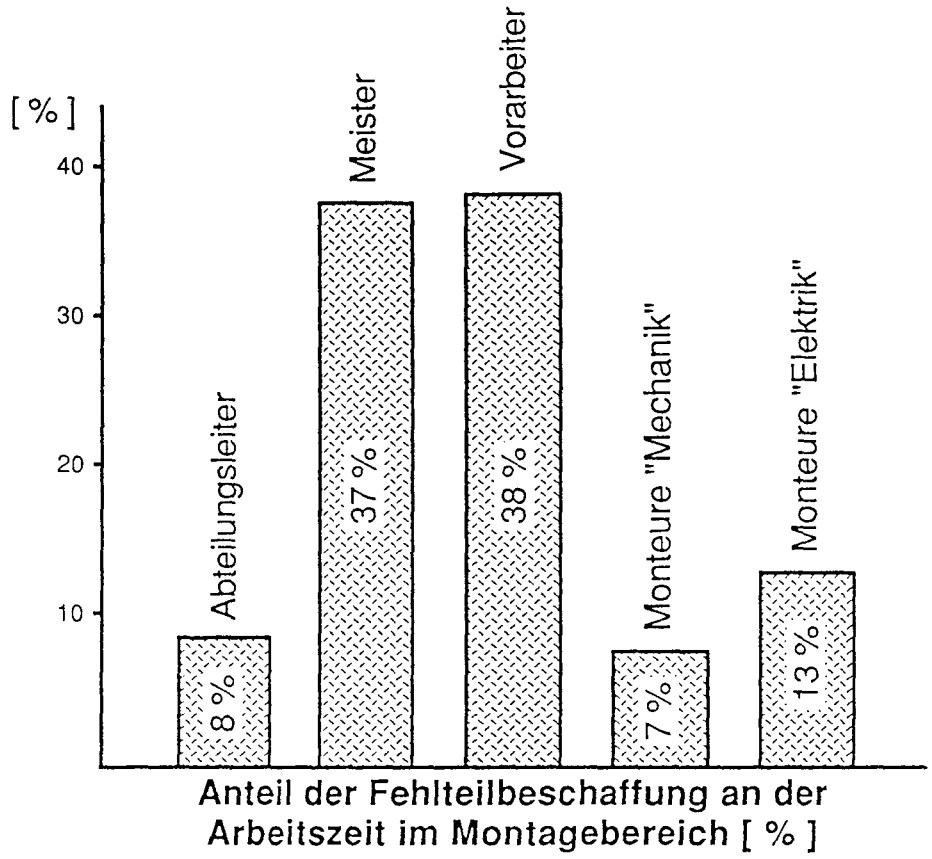


Abbildung 5: Fehlteilbeschaffung bindet Montagekapazität

(Datenbasis: Ein Werkzeugmaschinenhersteller)

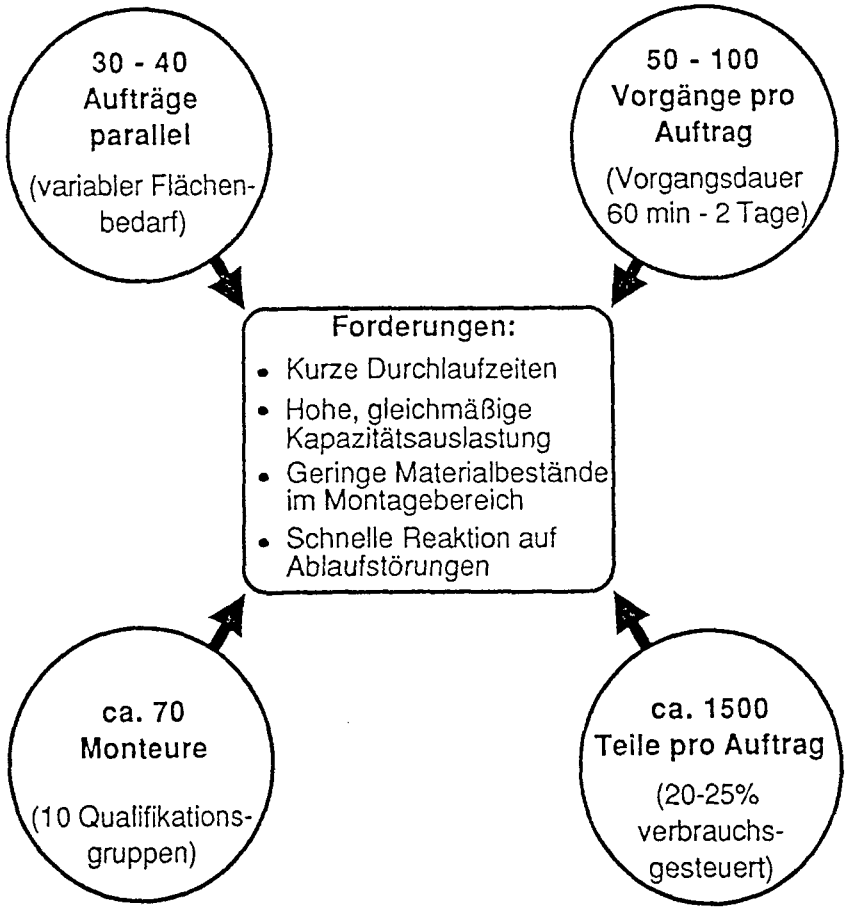


Abbildung 6: Komplexität des Planungsproblems

(Datenbasis: Ein Werkzeugmaschinenhersteller)

lastung setzt jedoch ausgeklügelte Einplanungsverfahren voraus. Die Komplexität des Planungsproblems mit der bei üblichen Mengengerüsten (vgl. *Abbildung 6*) enormen Anzahl möglicher Planungsalternativen[11] läßt eine befriedigende Lösung des Einplanungsproblems nur mit geeigneten, EDV-gestützten Hilfsmitteln zu.

4. Das hierarchische Planungs- und Steuerungskonzept

In Abhängigkeit vom Planungshorizont werden an die Montageplanung und -steuerung sehr unterschiedliche Anforderungen gestellt. Die Materialdisposition benötigt langfristig realistische Ecktermine. Mittel- und kurzfristig muß durch eine detaillierte Termin- und Kapazitätsplanung ein störungsarmer Montageablauf sowie eine gleichmäßige Kapazitätsauslastung gesichert werden. Die planmäßige Durchführung der Montagevorgänge erfordert zudem die Erstellung aktueller Arbeitsunterlagen sowie eine schnelle Reaktion auf Störungen des Montageablaufs. Um diesen Anforderungen gerecht zu werden, gliedert sich das im Rahmen des PRISMA-Projekts entwickelte Planungs- und Steuerungskonzept in drei Planungsebenen (vgl. *Abbildung 7*).[12]

Aufgabe der **strategischen Ebene** ist die Grobplanung des Montageablaufs. Hierfür wird der Montageablauf mit Hilfe der Netzplantechnik in grobe Abschnitte zerlegt und terminiert. Eine grobe Berücksichtigung der Ressourcenverfügbarkeit sowie ein regelmäßiger Abgleich der Grobtermine mit den Feinplanungsergebnissen bilden eine verläßliche Grundlage für die montageorientierte Materialdisposition sowie auch für die Planung weiterer auftragsbezogener Arbeitsschritte, wie z.B. der Konstruktion oder der Arbeitsvorbereitung.

Für die auf der **taktischen Ebene** stattfindende Termin- und Kapazitätsfeinplanung kann zu jedem Element des Grobnetzplans ein separater Feinnetzplan angelegt werden.[13] Eine realitätsnahe Abbildung des Ressourcenbedarfs wird durch die Möglichkeit zur Definition mehrerer unterschiedlicher Bedarfe (z.B. Fläche, Personal und Betriebsmittel) zu einem Vorgang erreicht. Die Verwaltung von vorgangsbezogenen Stücklisten erlaubt zudem kurzfristigen Materialabruf und die Berücksichtigung der aktuellen Materialverfügbarkeit. Die Terminierung auf der taktischen Ebene wird durch die von der strategischen Ebene vorgebenen Ecktermine eingeschränkt. Die Synchronisation der Montageabläufe mit den vorgelagerten Unternehmensbereichen (Beschaffung, Fertigung, etc.) geschieht somit nur über die strategische Ebene auf Basis der Ecktermine. Die hierdurch erreichte Entkopplung der Unternehmensbereiche sowie die Schaffung bereichsbezogener Planungsspielräume (Puffer) bildet die Voraussetzung für eine bereichsbezogene Optimerung der Abläufe. Terminänderungen können nicht unmittelbar auf andere

---

[11] Vgl. hierzu insbesondere *Eversheim*, 1990 sowie *Eversheim* et al., 1992.

[12] Die hier bei den Planungsebenen vorliegende zeitliche Reichweite entspricht nicht derjenigen, die in der produktionswirtschaftlichen Literatur üblicherweise damit verbunden wird; vgl. hierzu z.B. *Zäpfel*, 1982, 1989 a und 1989 b.

[13] Vgl. *Konz*, 1989.

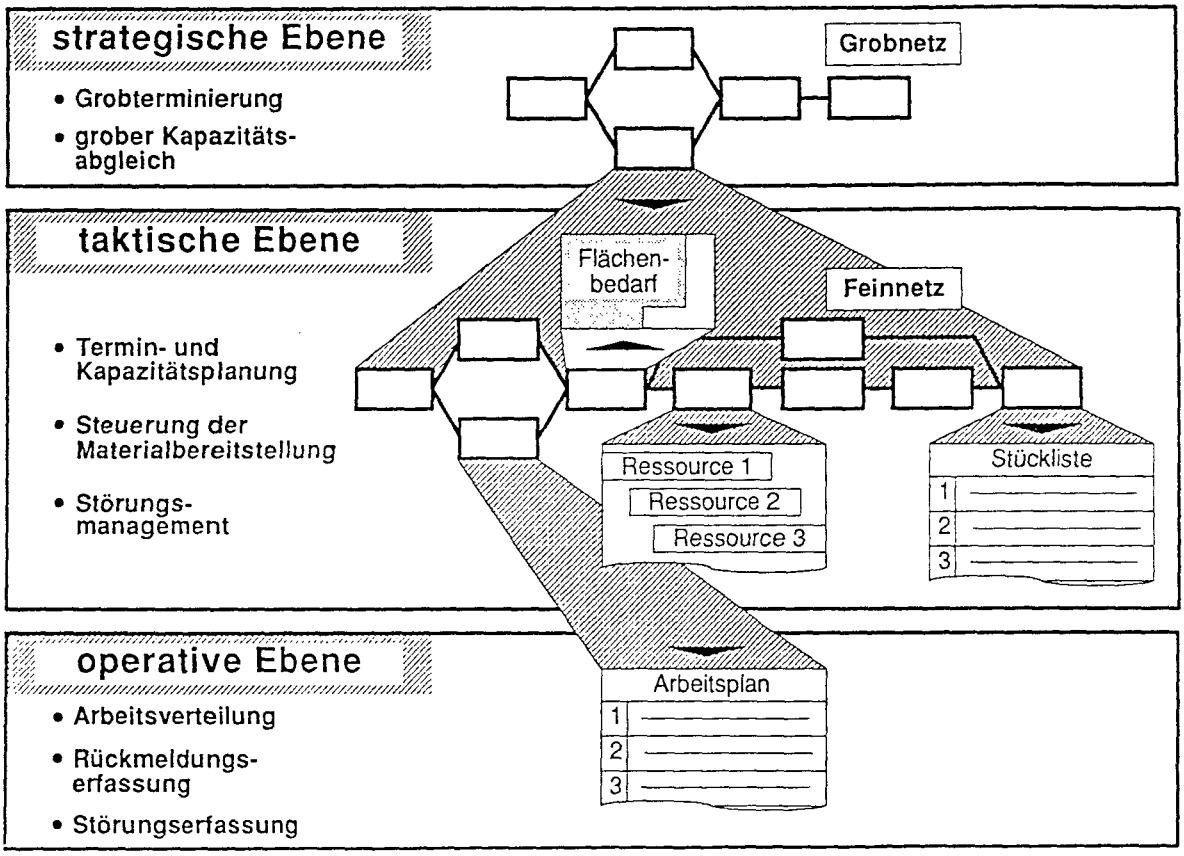


Abbildung 7: Hierarchische Gliederung der Auftragsabwicklung

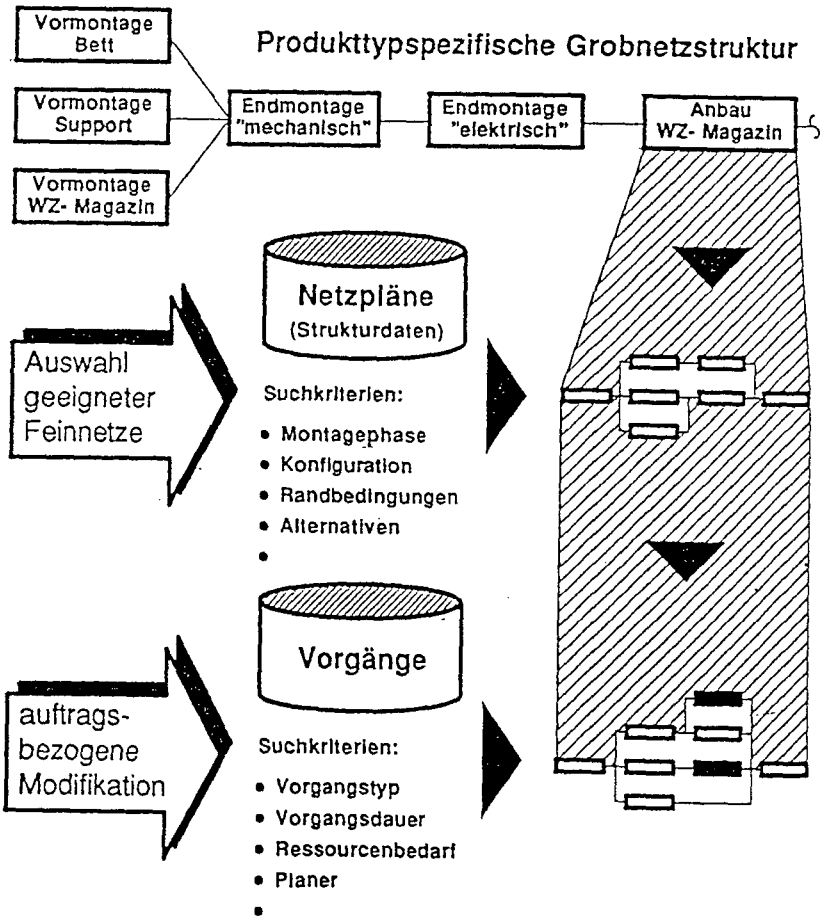


Abbildung 8: Unterstützung der auftragsbezogenen Planung

Bereiche durchschlagen, wodurch eine wesentliche Beruhigung der Planung erreicht wird. Dieser hierarchische Planungsansatz entspricht weitgehend der vom CIM-Normungsgremium KCIM des DIN vorgeschlagenen hierarchischen Prozeßmodellierung.

Zur näheren Beschreibung der auszuführenden Tätigkeiten auf der **operativen Ebene** kann zu jedem Vorgang des Feinnetzes ein Arbeitsplan angelegt werden. Die Arbeitsfolgen im Arbeitsplan werden nicht mehr explizit auf dem Leitstand geplant, sondern dienen lediglich zur Erstellung der Arbeitsunterlagen bzw. zur detaillierteren Rückmeldung des Arbeitsfortschritts. Diese zusätzliche Planungsverfeinerung auf der operativen Ebene ermöglicht eine Reduzierung des Planungsaufwands auf dem Leitstand, da im Rahmen der Termin- und Kapazitätsplanung nur so detailliert geplant werden muß (z.B. tagesgenau), daß eine bereichsübergreifende Synchronisation des Ressourceneinsatzes möglich ist.

Die Aufgaben der strategischen Planungsebene können von bereits existierenden Hilfsmitteln, wie dem vielfach bereits vorhandenen PPS-System oder einem separaten Grobplanungssystem wahrgenommen werden. Die Entwicklungen im PRISMA-Projekt konzentrieren sich daher auf die taktische Planungsebene. Im einzelnen werden ein Montageplanungssystem zur rationellen Erstellung der Planungsgrunddaten sowie ein Montageleitstand zur auftragsbezogenen Planung und Steuerung des Montageablaufs entwickelt.

Aufgabe des **Montageplanungssystems** (CAAP = Computer Aided Assembly Planning) ist die weitestmögliche Verringerung des Aufwands zur auftragsbezogenen Erstellung von Planungsgrunddaten (Grob- und Feinnetzpläne sowie Arbeitspläne). Hierzu wird eine weitgehende Verwendung bereits vorhandener Planungsdaten angestrebt. Erreicht wird dieses Ziel durch die klassifizierende Beschreibung der gespeicherten Netze anhand geeigneter Kriterien wie

- Produkttyp,
- Produktkonfiguration,
- kundenspezifische Randbedingungen und
- Ablaufalternativen

sowie durch zusätzliche Suchstrategien zum Auffinden geeigneter Vorgänge oder Arbeitspläne (vgl. *Abbildung 8*). Die getrennte Speicherung von Vorgangsdaten und Netzstrukturdaten läßt zudem die Verwendung ein und desselben Vorgangs in unterschiedlichen Netzen ohne Mehrfachspeicherung zu.

Sofern für einen Auftrag noch kein vollständig geeignetes Feinnetz vorhanden ist, kann ein ähnliches Feinnetz ausgewählt, manuell angepaßt und auf Wunsch als neue Variante abgespeichert werden. Die moderne graphisch-interaktive Benutzeroberfläche unterstützt die manuellen Änderungen durch die Möglichkeit zur direkten Eingabe in den jeweiligen Darstellungsfenstern.

Die Beschreibung des Ressourcenbedarfs geschieht anhand eines auf die Bedürfnisse der Montage zugeschnittenen Ressourcenmodells. Ziel ist es, bei der Planungsgrunddatenerstellung eine präzise Bedarfsbeschreibung zu ermöglichen, ohne die Planungsflexibilität

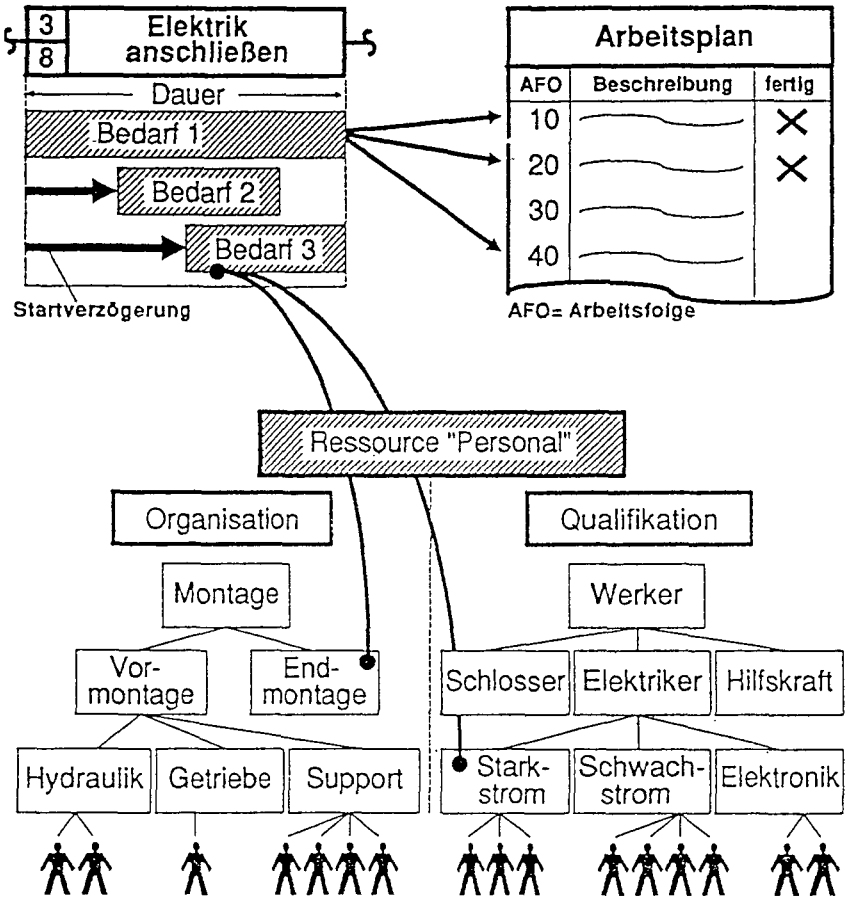


Abbildung 9: Spezifikation des Ressourcenbedarfs

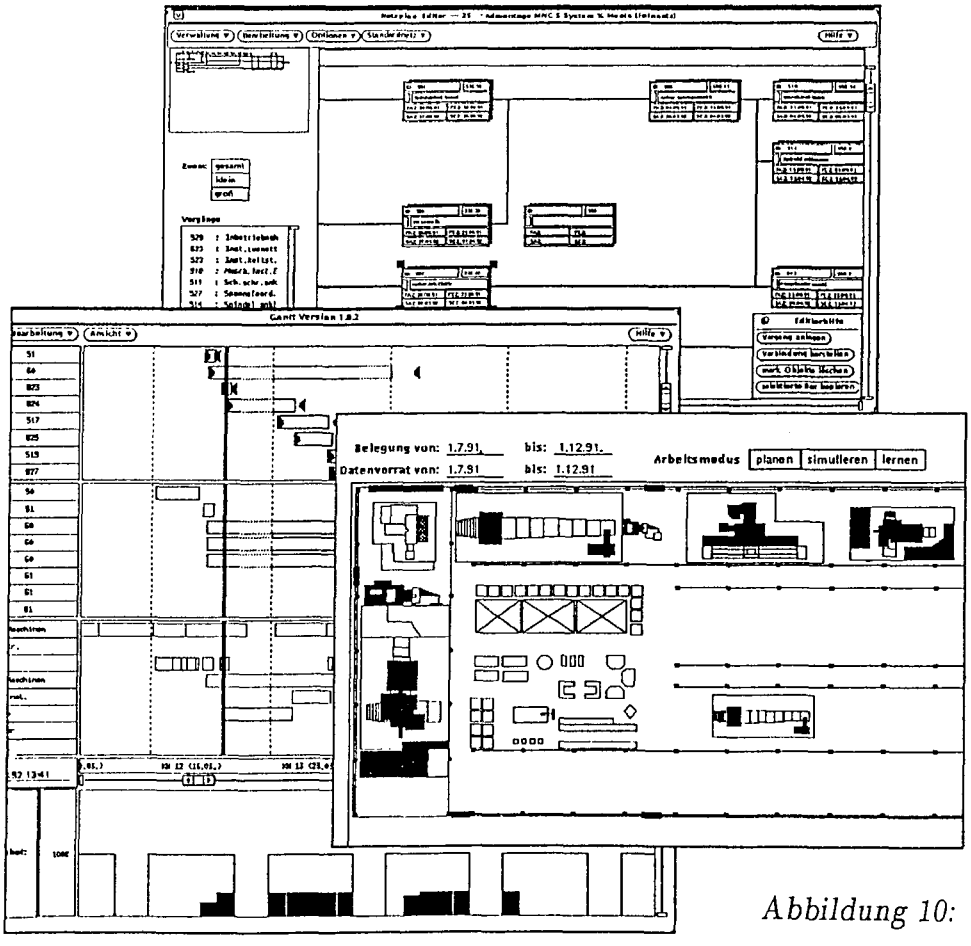


Abbildung 10: Benutzeroberfläche

auf dem Leitstand mehr als nötig einzuschränken. Hierzu werden die relevanten (zu verplanenden) Ressourcen der Montage (z.B. Personal, Betriebsmittel, Fläche) nach den Kriterien "Organisation" und "Qualifikation" beschrieben. Diese Form der Ressourcenstrukturierung erlaubt neben der genauen Bedarfsbeschreibung auch eine einfache und schnelle Suche nach Alternativressourcen auf dem Leitstand.

Zur exakten Beschreibung des Personal- und Betriebsmittelbedarfs können pro Vorgang mehrere Bedarfe angelegt und durch Angabe einer Startverzögerung sowie einer eigenen Dauer zeitlich spezifiziert werden (vgl. *Abbildung 9*). Hiermit kann der für die Montage typische Fall abgebildet werden, daß mehrere Werker (und u.U. begrenzt verfügbare Betriebsmittel) gleichzeitig für die Durchführung eines Montagevorgangs benötigt werden. Die Abbildung dieses Falles mittels mehrerer paralleler Vorgänge mit nur jeweils einem Ressourcenbedarf wäre zwar prinzipiell ebenfalls möglich, sie hätte jedoch wesentlich unübersichtlichere Netzpläne mit komplizierten Verknüpfungsbedingungen zur Folge. Die Verknüpfung der Bedarfe mit einzelnen Arbeitsfolgen im Arbeitsplan erlaubt den Druck separater Arbeitspapiere für jede Ressource sowie eine ressourcenbezogene Rückmeldungsverarbeitung.

Bei der Entwicklung des **Montageleitstands** (**AMS** = Assembly Management System) wurde besonderer Wert auf die Berücksichtigung der montagespezifischen Randbedingungen gelegt. Im Unterschied zu konventionellen Fertigungsleitständen zeichnet sich der Montageleitstand daher durch die Kombination von

- netzplanbasierter Mehr-Projekt- und Multi-Ressourcenplanung,
- Plantafelfunktionen (incl. manuellem Kapazitätsabgleich),
- Materialverfügbarkeitsprüfung,
- Materialbereitstellungssteuerung und
- integrierter Flächenbelegungsplanung

aus. Die einfache Bedienung des Leitstands wird durch die komfortable, weitgehend mit dem Montageplanungssystem identische Benutzeroberfläche unterstützt (vgl. *Abbildung 10*). Die grafisch interaktiven Darstellungs- und Eingabemöglichkeiten in den Bereichen Netzplanverarbeitung, Flächenbelegungsplanung und Plantafel erlauben eine intuitive Bedienung des Leitstands bei guter Übersichtlichkeit. Zusätzliche alphanumerische Eingabemöglichkeiten führen zudem zu einer effizienten Arbeitsweise des geübten Benutzers. Zur schnellen, selbständigen Reaktion auf Störungen verfügt auch der Leitstand über komfortable Eingabemöglichkeiten zur situationsbezogenen Anpassung der mit dem Montageplanungssystem erstellten Planungsgrunddaten.

Leistungsfähige Planungsalgorithmen unterstützen die Termin- und Kapazitätsplanung und erlauben die schnelle und gezielte Reaktion auf Störungen. Alle Planungsfunktionen können auch simulativ (vorausschauend) genutzt werden.

5. Grundlagen der Termin- und Kapazitätsplanung

Die bei Einzel- und Kleinserienfertigung vorliegende Planungsproblematik läßt sich mit Hilfe der **Netzplantechnik** veranschaulichen. Elemente eines Netzplanes sind Vorgänge (Jobs, Aktivitäten, Arbeitsgänge), Ereignisse und (Anordnungs- oder) Reihenfolgebeziehungen. Besonders geeignet sind sogenannte Vorgangsknoten- (oder MPM-) Netzpläne, bei denen Arbeitsgänge als Knoten und (unterschiedliche Arten von) Reihenfolgebeziehungen als Pfeile dargestellt werden.[14]

Bei Einzelfertigung ist in einem bestimmten Zeitpunkt ein Projekt, bei Kleinserienfertigung sind gleichzeitig mehrere Projekte zu planen und zu steuern. Die Problematik bei Kleinserienfertigung läßt sich in einem übergeordneten (integrierten) Netzwerk veranschaulichen. Dabei sind *auftragsspezifische Start- und Endtermine (=Zeitfenster)* problemlos darstellbar. Darüber hinaus kann man dabei auch *Meilensteine* (=Zeitfenster der Dauer Null), d.h. besonders wichtige Zeitpunkte im Projektablauf, genau fixieren. Generell ist die relative zeitliche Lage ganzer Aufträge, einzelner Teilmengen der Vorgänge eines Auftrages sowie einzelner Vorgänge selbst festlegbar. Damit kann man durch Zusammenfassen einzelner (Auftrags-) Netzwerke in einem integrierten Netzwerk auf der Basis der für die Einprojekt- (Einzelfertigungs-) planung entwickelten Methoden auch eine Mehrprojekt- (Kleinserienfertigungs-) planung durchführen.[15]

Zeitliche Anforderungen (in Form von Fertigstellungsterminen u.ä.) sind u.U. nicht einzuhalten. Aus der Sicht der Netzplantechnik liegen *zeitlich inkonsistente Anforderungen* vor. Man erkennt sie daran, daß bei der **Zeitplanung** (auf der Basis transformierter Reihenfolgebeziehungen) im Netzplan Zyklen positiver Länge auftreten.

Die Zeitplanung erfolgt durch Bestimmung längster Wege im Netzwerk. Zur Berechnung längster Wege in Netzplänen lassen sich Kürzeste-Wege-Verfahren in modifizierter Form verwenden, wobei sich für Netzpläne mit Zyklen v.a. eine Modifikation des FIFO – Algorithmus eignet.[16] Mit Hilfe der Variante "FIFO-knotenorientiert-Vorwärtsrechnung" erhält man die frühesten Anfangs- und Endzeitpunkte FA_j und FE_j für alle Vorgänge j; mit "FIFO-knotenorientiert-Rückwärtsrechnung" erhält man anschließend auch die spätesten Anfangs- und Endzeitpunkte SA_j und SE_j für alle Vorgänge j. Bei der Bestimmung von FA_j, FE_j, SA_j und SE_j können und müssen (ggf. vorhandene) Zyklen positiver Länge ermittelt werden.[17]

---

[14] Eine Systematik von Modellen und Methoden der Netzplantechnik findet man z.B. in *Domschke / Drexl*, 1991 a, S. 82 ff.

[15] Ein einfaches Beispiel hierfür findet sich in *Drexl / Kolisch*, 1992 a.

[16] FIFO steht für First-In First-Out; vgl. *Domschke / Drexl*, 1991 a.

[17] Vgl. hierzu die Erweiterung des FIFO-Algorithmus in *Domschke*, 1989, S. 67 ff.

Zur Bedeutung ressourcenorientierter Planung und Steuerung: In der Netzplantechnik unterscheidet man folgende Arten bzw. Stufen der Planung:[18]

- **Strukturplanung** (Zerlegen eines Projektes in Vorgänge und Ermitteln von Reihenfolgebeziehungen zwischen Vorgängen; Abbilden der Ablaufstruktur durch einen Netzplan).
- **Zeitplanung** (Bestimmen frühester und spätester Anfangs- und/oder Endzeitpunkte für Vorgänge, Ermitteln der Projektdauer, Berechnen von Zeitreserven / Pufferzeiten; baut auf der Strukturplanung auf).
- **Kostenplanung** (Abwägen / Optimieren projektdauerabhängiger Kosten, z.B. Konventionalstrafen bei Terminüberschreitungen oder Opportunitätskosten hinsichtlich weiterer Aufträge, gegenüber vorgangsdauerabhängigen Kosten; liefert gleichzeitig einen Zeitplan).
- **Kapazitätsplanung** (Ermitteln zulässiger Zeitpunkte für die Einplanung von Vorgängen unter Berücksichtigung knapper Ressourcen; liefert bei geeigneter Ausgestaltung[19] gleichzeitig kostenminimalen Plan).

Für eine ressourcenorientierte Steuerung der Produktion sprechen bei Einzel- und Kleinserienfertigung (und darüber hinaus) folgende Überlegungen:

- Die Kapazitätsplanung ist hinsichtlich des Allgemeinheitsgrades konzeptionell überlegen **(theoretischer Gesichtspunkt)**.
- Eine Terminierung und / oder Kostenminimierung unter Vernachlässigung verfügbarer Kapazitäten liefert i.a. Belastungsgebirge für die einzelnen Ressourcen, die nicht umsetzbar sind (**Pläne** müssen **zulässig**, d.h. vereinbar mit den Restriktionen sein).
- Kapazitäten verursachen Fixkosten, sie sollten daher nicht zu hoch bemessen werden. Spitzennachfragen sind sinnvollerweise durch Beschäftigungsglättung zu decken. Eine effektive Nutzung vorhandener Kapazitäten durch geeignete Planung und Steuerung ist damit die wichtigste Möglichkeit der "Kapazitätserweiterung" **(ökonomisches Argument)**.

Modellformulierung: Man unterscheidet in der Literatur verschiedene Arten von Modellen. Sie lassen sich danach untergliedern, welche Typen von Ressourcen (erneuerbare, nicht-erneuerbare, doppelt-beschränkte) betrachtet werden, ob Ressourcen diskret oder kontinuierlich teilbar sind und ob Vorgänge nur an a priori bekannten Stellen oder beliebig oft unterbrochen werden dürfen.[20]

---

[18] Zu Details vgl. *Domschke / Drexl*, 1991 a, S. 82 ff.; zur Veranschaulichung der Zusammenhänge zwischen den einzelnen Stufen in Form eines "Zwiebelmodells" siehe *Drexl / Kolisch*, 1992 a.

[19] Vgl. hierzu insbesondere *Blazewicz* et al. 1986, S. 180 ff.

[20] Details hierzu findet man in *Domschke / Drexl*, 1991 b.

Im einzelnen gehen wir von folgenden **Prämissen** aus:

(a) In einem bestimmten Planungszeitpunkt liegen h = 1,...,H Aufträge vor. Jeder Auftrag hat eine einzige (ggf. fiktive) Quelle und eine einzige (fiktive) Senke. Auftrag h kann frühestens im Zeitpunkt b_h beginnen; er muß spätestens im Zeitpunkt f_h fertiggestellt sein. Der spätestmögliche Zeitpunkt für die Beendigung aller Projekte ergibt sich damit gemäß $\bar{T} := \max \{f_h \mid h = 1,...,H\}$.

(b) Alle H Aufträge werden (wie oben skizziert) zu einem integrierten Netzwerk, bestehend aus j = 1,...,J Vorgängen, zusammengefaßt. j=1 (j=J) sei die einzige Superquelle (Supersenke).

(c) $\mathcal{V}_j$ ($\mathcal{N}_j$) sei die Menge der Vorgang j unmittelbar vorausgehenden (nachfolgenden) Vorgänge.
Zur Vereinfachung der Darstellung verzichten wir hier auf die explizite Einbeziehung von Pfeilbewertungen zur Modellierung von Zeitrestriktionen.

(d) Die einzelnen Vorgänge können ggf. auf mehr als eine Art und Weise *(Modus)* ausgeführt werden; für Vorgang j stehen m = 1,...,M_j Modi zur Verfügung. Damit können *unterschiedliche Arbeitspläne je Vorgang*[21] abgebildet werden. Quelle und Senke besitzen nur einen Modus ($M_1 = M_J = 1$).

(e) Vorgang j dauert im Modus m genau d_{jm} Zeiteinheiten (ZE). $\delta_j := \min \{d_{jm} \mid m = 1,...,M_j\}$ sei die auf jeden Fall erforderliche (minimale) Bearbeitungszeit von Vorgang j. O.B.d.A. sei $d_{11} := d_{J1} := 0$.

(f) Es stehen |R| erneuerbare (mit beschränkter Periodenkapazität; z.B. Personal und Betriebsmittel) Ressourcen zur Verfügung.

(g) Von Ressource r ∈ R sind κ_{rt} Einheiten pro Periode verfügbar; Vorgang j (= 2,...,J-1) gebraucht während der Ausführung in Modus m pro Periode k_{jmr} Einheiten.

Auf der Basis der Annahmen (a) - (e) können wir *Zeitintervalle für die Einplanung der Vorgänge* (FE_j und SE_j) mit Hilfe der oben skizzierten Methoden der Zeitplanung unter Verwendung der Mindest-Vorgangsdauern δ_j ermitteln.

Das grundlegende Modell läßt sich nun formulieren. Als **Zielsetzung** werde dabei verfolgt, den Fertigstellungszeitpunkt von Vorgang J, d.h. die Durchlaufzeit des (Gesamt-)Auftrages (= makespan) zu minimieren. Für diese Zielsetzung sprechen vor allem folgende Gründe:

---

[21] Vgl. hierzu z.B. *Ahn / Kusiak*, 1991 sowie *Drexl / Kolisch*, 1992 a.

- Kurze Auftragslaufzeiten führen insofern zu einer Komplexitätsreduktion, als dann zu einem bestimmten Zeitpunkt vergleichsweise weniger Aufträge parallel zu bearbeiten sind (z.B. vier Aufträge parallel während eines halben Jahres vs. je zwei Aufträge parallel innerhalb von drei Monaten).
- Zahlungsvereinbarungen sehen i.a. vor, daß ein erheblicher Teil (bis zu 90 %) des Erlöses erst bei Auslieferung fällig wird. Kurze Auftragslaufzeiten führen damit tendenziell zu einer Reduzierung der Kapitalbindungskosten.
- Weit in der Zukunft liegende Daten sind stärker mit Unsicherheit behaftet als diejenigen, die weniger weit vom Planungszeitpunkt entfernt sind. Kurze Auftragslaufzeiten führen damit implizit zu einer Reduzierung der Datenunsicherheit.
- Sieht man einen zeitlichen Puffer zwischen voraussichtlicher Fertigstellung und vereinbarter Auslieferung vor, so reduziert man die Gefahr von Terminüberschreitungen (und die damit verbundenen negativen Folgen wie Konventionalstrafen etc.).
- Eine frühzeitige Auslastung der Kapazitäten führt ceteris paribus dazu, daß Ressourcen "später" nicht in vollem Umfang belegt sind. Damit eröffnen sich (kaum quantifizierbare) Möglichkeiten zur Annahme und Abwicklung weiterer Aufträge (Opportunitätskosten hinsichtlich derzeit noch nicht vorliegender Aufträge).

Für die Formulierung des Modells verwenden wir je Vorgang j das Intervall zwischen dem frühestmöglichen und dem spätestzulässigen Fertigstellungszeitpunkt $[FE_j, SE_j]$, im folgenden als **Zeitfenster** bezeichnet. Unter Verwendung von Binärvariablen $x_{jm\tau} := 1$, falls Vorgang j in Modus m bearbeitet und in Periode τ beendet wird (0 sonst), erhalten wir folgendes Modell:

$$\text{Minimiere } Z(\mathbf{x}) = \sum_{\tau=FE_J}^{SE_J} \tau \cdot x_{J1\tau} \tag{1}$$

unter den Nebenbedingungen

$$\sum_{m=1}^{M_j} \sum_{\tau=FE_j}^{SE_j} x_{jm\tau} = 1 \quad (j = 1,\ldots,J) \tag{2}$$

$$\sum_{m=1}^{M_i} \sum_{\tau=FE_i}^{SE_i} \tau \cdot x_{im\tau} \leq \sum_{m=1}^{M_j} \sum_{\tau=FE_j}^{SE_j} (\tau - d_{jm})\, x_{jm\tau} \quad (j = 1,\ldots,J \text{ und } i \in \mathcal{V}_j) \tag{3}$$

$$\sum_{j=2}^{J-1} \sum_{m=1}^{M_j} k_{jmr} \sum_{q=\tau}^{\tau+d_{jm}-1} x_{jmq} \leq \kappa_{rt} \quad (r \in R \text{ und } \tau = 1,\ldots,\bar{T}) \tag{4}$$

$$x_{jm\tau} \in \{0,1\} \quad \text{(für alle j, m und } \tau) \tag{5}$$

Die Zielfunktion (1) führt zur Minimierung der Durchlaufzeit. (2) stellt sicher, daß jeder Vorgang genau einmal bearbeitet wird. (3) sorgt für die Einhaltung der Reihenfolgebeziehungen. (4) garantiert, daß die Periodenkapazitäten ausreichen.

Bei Vorliegen restriktiver zeitlicher Beschränkungen ist es u.U. nicht möglich, auf der Basis des Modells (1)-(5) einen auch termintreuen Ablaufplan zu generieren. Will man Kapazitäten *und* Termine unbedingt einhalten, so müssen dann Überstunden in Kauf genommen werden.[22]

Scheduling Methoden: Für die Lösung des Problems (1) - (5) existieren neben Standardmethoden zur binären Optimierung ein spezielles exaktes und mehrere heuristische Lösungsverfahren. Standardmethoden basieren in der Regel auf Branch & Bound (B & B) mit LP- Relaxation.[23] Das spezielle **exakte Verfahren** ist ein B & B- Verfahren, das simultan über Vorgangsreihenfolge und Modusauswahl entscheidet. Tritt hinsichtlich der Kapazitätsrestriktionen Unzulässigkeit auf, so wird die letzte Einplanung rückgängig gemacht.[24] Da es sich hier um ein schwer lösbares (NP-vollständiges) Problem handelt, sind selbst kleine Probleme nicht mehr mit vertretbarem Rechenaufwand optimal zu lösen.

Heuristische Verfahren zur Lösung des Problems (1) - (5) sind vor allem Prioritätsregelverfahren. Wir beschreiben zunächst die prinzipielle Vorgehensweise von Prioritätsregelverfahren.

Bei Prioritätsregelverfahren wird in jedem Planungszeitpunkt $t \in \{1,...,\bar{T}\}$ die Menge der Vorgänge in vier disjunkte Teilmengen zerlegt: *beendete Vorgänge* (sind bereits fertiggestellt), *aktive Vorgänge* (befinden sich in Bearbeitung), *einplanbare Vorgänge* (alle Vorgänger bearbeitet, ausreichend Kapazität bei jedem betrachteten Vorgang vorhanden) sowie *nicht-einplanbare Vorgänge* (verletzen Nebenbedingungen (3) und / oder (4)).

Prioritätsregelverfahren wählen anhand unterschiedlicher Kriterien (Prioritäten) aus der Menge einplanbarer Vorgänge jeweils einen Vorgang aus und ermitteln einen zulässigen Start- bzw. Fertigstellungszeitpunkt. Man unterschiedet zwei Verfahrensvarianten:

- **Parallele Verfahren** planen so lange Vorgänge für einen gemeinsamen Startzeitpunkt ein, bis die Reihenfolgebeziehungen oder die Kapazitätsrestriktionen verletzt werden.
- **Serielle Verfahren** wählen jeweils einen der (nur) hinsichtlich der Reihenfolgebedingungen zulässigen Vorgänge aus und ermitteln anschließend dessen frühestmöglichen zulässigen Einplanungszeitpunkt.

---

[22] Ein Modell zur Bestimmung eines Ablaufplanes mit minimaler Anzahl an Überstunden findet man in *Drexl / Kolisch*, 1992 b.

[23] Vgl. z.B. *Domschke / Drexl*, 1991 a, S. 144 ff.

[24] Vgl. *Patterson* et al., 1990.

Beide Verfahren erweitern eine **Teillösung** (besteht aus bereits eingeplanten Vorgängen) durch Einplanen weiterer Vorgänge, bis eine zulässige Lösung erzeugt worden ist. Aus zwei Gründen werden in der Regel parallele gegenüber seriellen Verfahren bevorzugt:

- Der Rechen- und der Speicheraufwand sind geringer, weil nur die (noch) verfügbare Kapazität **einer** Periode gespeichert und verglichen werden muß.
- Parallele Verfahren haben bei bisherigen Untersuchungen durchschnittlich bessere Ergebnisse erzielt.[25]

Sowohl serielle als auch parallele Verfahren können entweder deterministisch jeweils einen Vorgang auswählen oder den Prioritätswert mit einer probabilistischen Komponente verknüpfen.[26] Stochastisch modifizierte Prioritätsregelverfahren besitzen dabei den Vorteil, daß sie mit einer Prioritätsregel für ein Problem mehrere Lösungen erzeugen, unter denen sich im allgemeinen eine bessere als beim deterministischen Verfahren befindet.

Folgendes randomisierte Regretmaß wird im Montage-Leitstand (AMS) implemtiert:

$$\omega_{jm} := (\max \{d_{hk} \mid h \in EJ, k = 1,...,M_h\} - d_{jm} + \epsilon)^{\alpha} \quad (j \in EJ\ ,\ m = 1,...,M_j)$$

Dabei entspricht EJ der Menge der in einem bestimmten Zeitpunkt einplanbaren Vorgänge und $m = 1,...,M_j$ sind die zugehörigen Modi.

ω_{jm} entspricht der schlechtest möglichen Konsequenz hinsichtlich der Dauer der Bearbeitung von Vorgang j, falls Vorgang j aktuell *nicht* im Modus m eingeplant wird. $\epsilon > 0$ sorgt für positive ω_{ij}. $\alpha \geq 0$ transformiert den Term (.) auf exponentielle Art und Weise, so daß die Unterschiede zwischen den modusabhängigen Bearbeitungsdauern vergrößert ($\alpha > 1$) oder verkleinert ($\alpha < 1$) werden.

Aus konzeptioneller Sicht kann die Verwendung von ω_{jm} als stochastische Verallgemeinerung der Vogelschen Approximationsmethode zur Lösung klassischer Transportprobleme interpretiert werden.[27]

Bei wiederholter Anwendung eines Verfahrens, bei dem Prioritätswerte auf der Basis von ω_{jm} berechnet werden und dann mit einer Wahrscheinlichkeit proportional zu ω_{jm} ein Job ausgewählt und ein Modus zugeordnet wird, erhält man mehrere Ablaufpläne, deren Zielfunktionswerte durchschnittlich nur wenige Prozent vom Optimum abweichen. Der hierfür erforderliche Rechenaufwand ist vernachlässigbar gering.[28] Diese Ablaufpläne können anschließend hinsichtlich weiterer (ggf. qualitativer) Kriterien evaluiert werden.[29]

---

[25] Vgl. z.B. *Alvarez–Valdes / Tamarit*, 1989.

[26] Siehe auch *Hart / Shogan*, 1987; *Drexl / Grünewald*, 1992.

[27] Vgl. hierzu z.B. *Domschke / Drexl*, 1991 a, S. 73 ff.

[28] Vgl. hierzu *Drexl*, 1991 sowie *Drexl / Grünewald*, 1992.

[29] Zur Bedeutung der Evaluierungskomponente von Leitständen vgl. auch *Adelsberger / Kanet*, 1991; *Kanet / Sridharan*, 1990 sowie *Slowinski* et al., 1992.

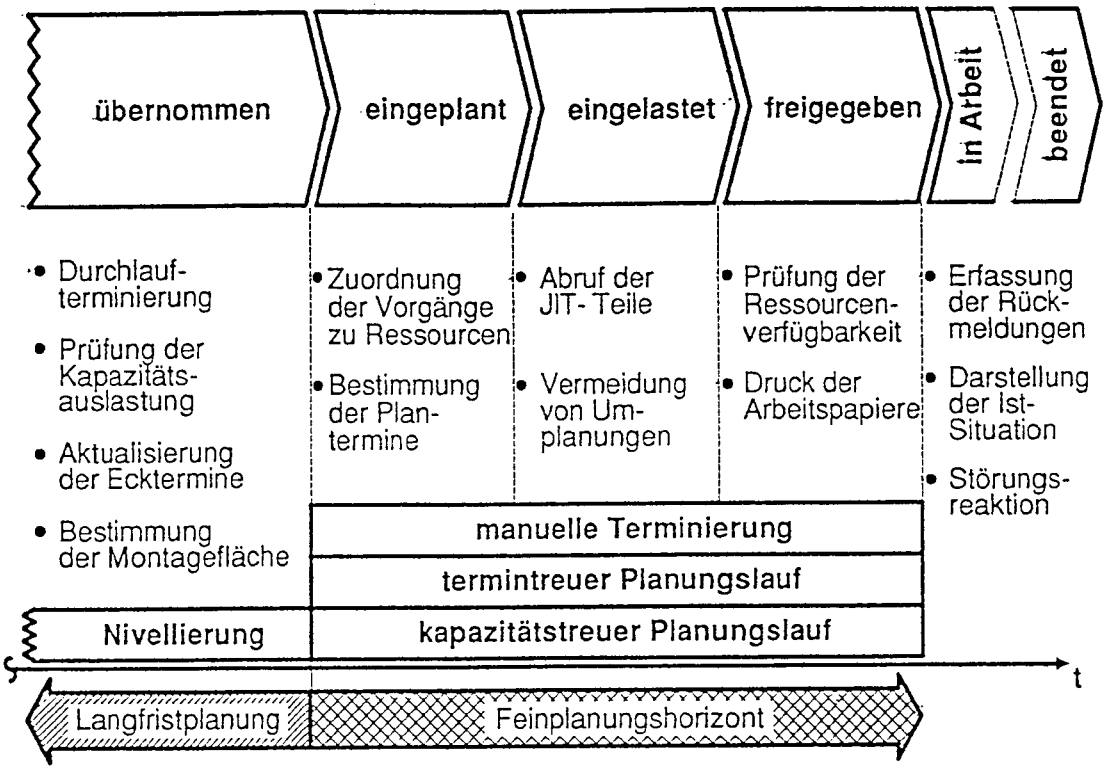


Abbildung 11: Funktionen der Termin- und Kapazitätsplanung

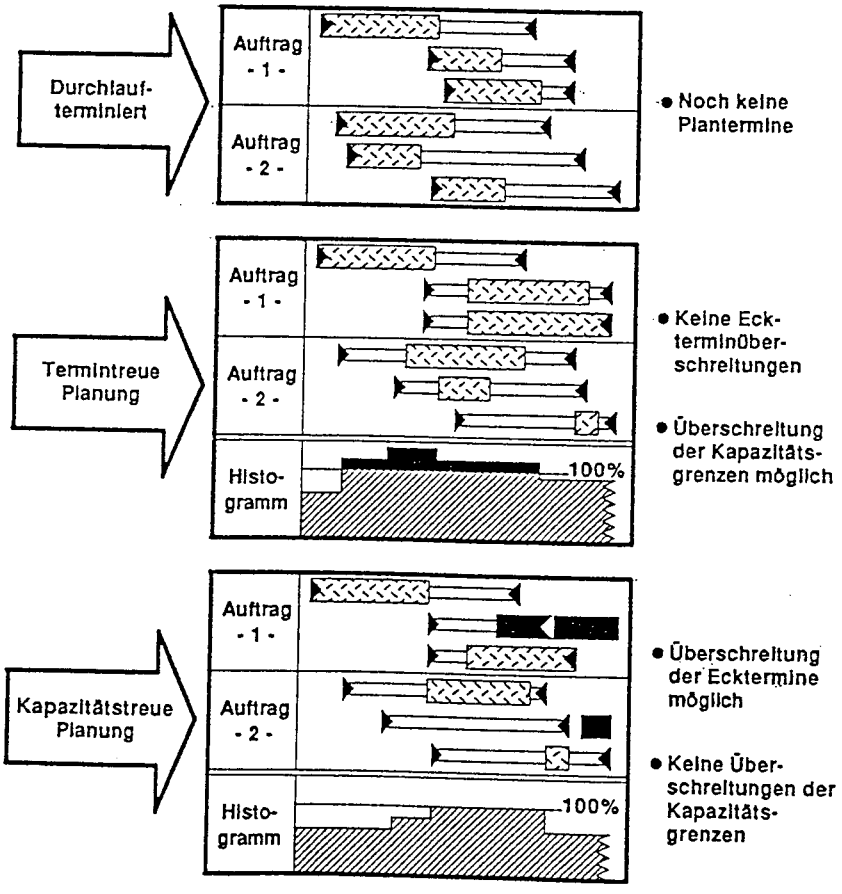


Abbildung 12: Alternative Einplanungsstrategien

6. Umsetzung der Terminplanung und -steuerung im PRISMA-Leitstand

Die in Abschnitt 5 beschriebenen (Modelle und) Methoden werden im PRISMA-Montageleitstand implementiert. Alle Planungsfunktionen beziehen sich jeweils auf die Vorgänge des Fein- und Grobnetzplanes.

Zur Reduzierung des Planungsaufwands wurde eine konsequente Unterscheidung der Prüfungs- und Überwachungsfunktionen der Langfristplanung und den Optimierungs- und Durchsetzungsfunktionen der Kurzfristplanung vorgenommen.

Für die auf den Leitstand übernommenen Aufträge können bereits im Rahmen der **Langfristplanung** die aktuellen Pufferzeiten mit Hilfe der Durchlaufterminierung ermittelt werden (vgl. *Abbildung 11*). Eine langfristige Prüfung der Kapazitätsauslastung ermöglicht das frühzeitige Erkennen von Engpässen und bildet die Grundlage für eventuell notwendige Anpassungen der Ecktermine in Abstimmung mit der strategischen Planungsebene.

Zur Nivellierung der Kapazitätsnachfrage auf der Ebene des Grobnetzplanes wurde ein einfaches Verfahren implementiert, das Vorgänge im Rahmen der verfügbaren Pufferzeiten verschiebt.[30]

Die Bestimmung und Reservierung einer geeigneten Montagefläche sollte ebenfalls möglichst frühzeitig innerhalb der Langfristplanung erfolgen, da kurzfristige Änderungen der Flächenbelegungsplanung meist mit hohem Aufwand verbunden sind.

Die Zuordnung der Vorgänge zu Ressourcen sowie die Bestimmung der Plantermine erfolgt nur innerhalb eines definierten Zeitfensters. Durch diesen **Feinplanungshorizont** ist eine Beschränkung auf realistisch planbare Zeiträume (beispielsweise eine Woche oder einen Monat) möglich. Die Vorgangseinplanung kann sowohl manuell mit Hilfe der grafischen Plantafel als auch automatisch mit Hilfe von termintreuen oder kapazitätstreuen Planungsläufen erfolgen (vgl. *Abbildung 12*). Bei der **termintreuen Einplanung** werden unter allen Umständen die vom Grobplanungssystem bzw. manuell vorgegebenen Ecktermine eingehalten. Hierbei kann es allerdings zu Überschreitungen der Kapazitätsgrenzen kommen. Bei der **kapazitätstreuen Planung** werden Überschreitungen des Kapazitätsangebots dagegen generell vermieden. Aus dabei notwendigen terminlichen Verschiebungen von Vorgängen resultierende Eckterminüberschreitungen werden dem Systembenutzer mitgeteilt.

Bei allen Planungsverfahren werden die Vorgänge automatisch mit dem Status "eingeplant" versehen und durch eine graublaue Färbung gekennzeichnet. Diese Farbe markiert sowohl die betroffenen Vorgänge in der Plantafel als auch im Netzplan. Während im Netzplan die zeitliche Lage ausschließlich über die Termine erkennbar ist, werden sie im Gantt als Balken über der Zeitachse dargestellt. Die Ganttdarstellung unterscheidet nach Vorgangs-, Ressourcen-, Plantafel- und Belastungssicht. So kann der Benutzer jederzeit schnell erkennen, welcher Vorgang wann geplant ist, welche Ressource

---

30 *Neumann*, 1975, S. 317 ff.

für welchen Zeitraum zugeordnet wurde und wie hoch welche Ressource belastet ist. Außerdem wird immer das zugehörige Kapazitätsangebotsprofil sowie die prozentuale Auslastung dargestellt.

Die bereits **eingeplanten** Vorgänge werden rechtzeitig vor dem geplanten Starttermin eingelastet. Hierdurch wird der Abruf der vorgangsbezogen bereitzustellenden (Just-in-Time) Materialien ausgelöst. Die eingelasteten und freigegebenen Vorgänge werden nur noch auf ausdrücklichen Wunsch des Systembenutzers in die automatischen Planungsläufe mit einbezogen. Durch dieses "Einfrieren" können ungewollte Änderungen des Planungszustands vermieden werden.

Zur **Vorgangsfreigabe** erfolgt eine abschließende Prüfung der Ressourcenverfügbarkeit. Ist zum Beispiel das Material des betreffenden Vorgangs noch nicht vollständig vorhanden, so erfolgt keine automatische Vorgangsfreigabe. In jedem Fall kann die Vorgangsfreigabe jedoch vom Systembenutzer erzwungen werden. Der Druck der Arbeitspapiere nach erfolgter Vorgangsfreigabe stellt eine größtmögliche Aktualität der Unterlagen sicher. Der aktuelle Zustand der freigegebenen Vorgänge (in Arbeit, unterbrochen, beendet) wird vom Leitstand über ein angeschlossenes BDE-System oder über manuelle Eingaben erfaßt und in der Netzplan- und Plantafeldarstellung anhand von farbigen Statusmarkierungen dargestellt.

Ablaufpläne werden zur weiteren Evaluierung in einer Ergebnisliste angeboten, aus der eine Auswahl getroffen werden kann. Dabei stehen für jeden Ablaufplan insbesondere die Visualisierung über ein Multiressourcen-Histogramm und die Plantafel (Gantt) zur Verfügung. Nach der Evaluation kann ein Ablaufplan in die Datenbank übernommen und damit zur Steuerungsgrundlage gemacht werden. Bei der Evaluierung kann man ggf. auf eine SQL-Schnittstelle zurückgreifen.

Alle Funktionen des PRISMA-Montageleitstands sind über eine gemeinsame Datenbasis gekoppelt. Hierdurch wird insbesondere sichergestellt, daß Änderungen bzw. Neueingaben in einem Funktionsmodul unmittelbar in allen anderen betroffenen Modulen Berücksichtigung finden. Dies ist z.B. für die Kopplung der zentralen Module Flächenbelegungsplanung und Termin- und Kapazitätsplanung von großer Bedeutung.

7. Materialmanagement

Ziel der Materialmanagementfunktionen des PRISMA-Montageleitstands ist die Berücksichtigung der Materialverfügbarkeit bei der Termin- und Kapazitätsplanung sowie die Unterstützung der montageorientierten Materialbereitstellung.

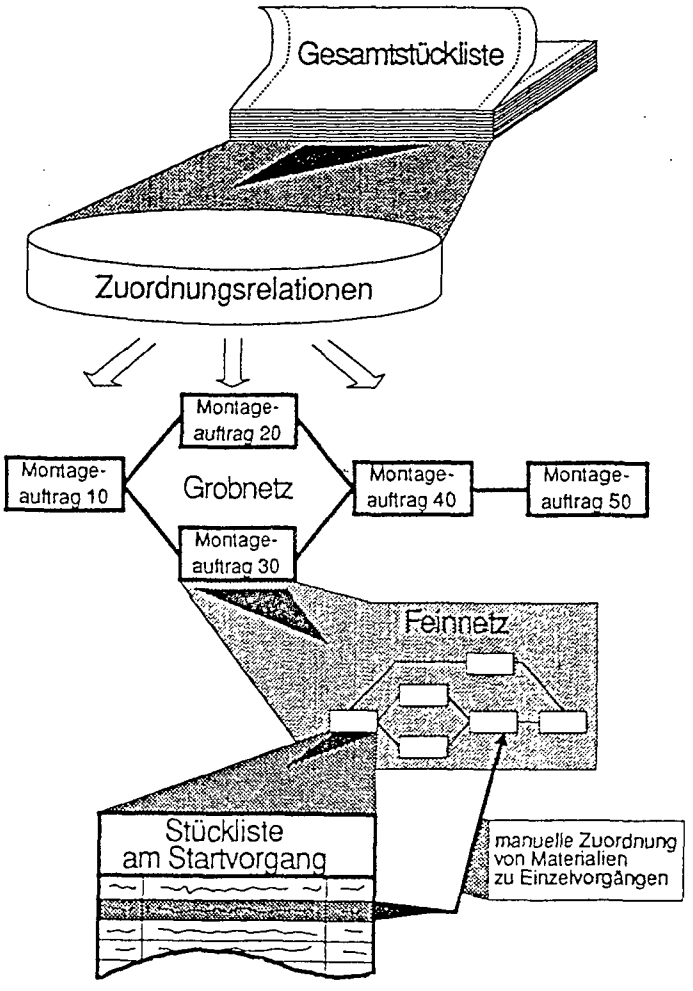


Abbildung 13: Möglichkeiten der Zuordnung von Stücklisten

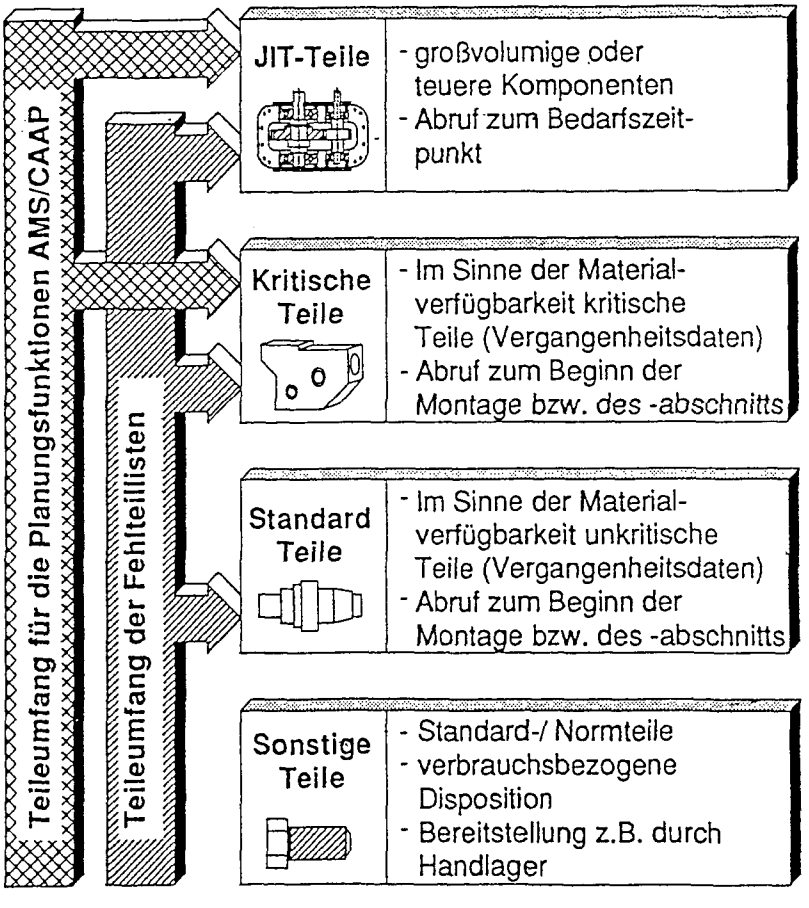


Abbildung 14: Planungsumfang im Rahmen des Materialmanagements

In der Einzel- und Kleinserienproduktion von Werkzeugmaschinen erfolgt die Materialbereitstellung häufig komplett zum Montagebeginn. Anhand der Fehlteilliste entscheidet der Meister bzw. die Werker vor Ort, welche Montagevorgänge durchgeführt werden können. Der Grund für die frühzeitige, komplette Bereitstellung liegt zum einen in dem geringen Steuerungsaufwand. Bei Mängeln in den Bereichen Lagerbestandsführung, Materialreservierung und Fehlteillistenerstellung wird die frühzeitige Materialbereitstellung zudem auch zur physikalischen Verfügbarkeitsprüfung und Reservierung genutzt. Neben einem hohen Such- und Greifaufwand führt diese Bereitstellstrategie jedoch zu einem erhöhten Aufwand für die Fehlteilnachlieferung (bzw. für Rückbuchungen bei nachträglichen konstruktiven Änderungen) und zu einer hohen Flächen- und Kapitalbindung für die im Montagebereich gelagerten Materialien. Weiterhin sinkt die Flexibilität des Unternehmens, da die bereits entnommenen Materialien nicht mehr für dringlichere Aufträge (Schnellschüsse) zur Verfügung stehen.

Zur Verbesserung dieser Ist-Situation unterstützt der PRISMA-Montageleitstand eine am Montagefortschritt orientierte, stufenweise Materialbereitstellung und stellt dem Planer zudem geeignete Informationen über die aktuelle Fehlteilsituation zur Verfügung. Als Grundlage für die stufenweise Materialbereitstellung kann zu jedem Grobnetzelement (Montageauftrag) eine Stückliste verwaltet werden (vgl. *Abbildung 13*).

Sofern in den Stücklistenstrukturen eines Unternehmens noch keine Relation zwischen Teilen und Montageaufträgen existiert, kann diese Zuordnung anhand der Gesamtstückliste und des Grobnetzplans am Montageplanungssystem eingegeben und dort auch auftragsneutral verwaltet werden. Bei dieser manuellen Zuordnung bietet eine montageorientierte (d.h. am Montageablauf orientierte) Produktstruktur wesentliche Vorteile, da hier in der Regel größere Baugruppen auf oderen Strukturebenen komplett zugeordnet werden können. Anderenfalls (z.B. bei einer funktionalen Stücklistenstruktur) steigt der Aufwand erheblich, da die in den nicht vormontierbaren Baugruppen enthaltenen Komponenten oft unterschiedlichen Montageaufträgen zugeordnet werden müssen.[31]

Die in der zum Montageauftrag gehörenden Stückliste enthaltenen Materialien werden zunächst automatisch dem Startvorgang des zugehörigen Feinnetzes zugeordnet. Hierdurch wird sichergestellt, daß Fehlteile in jedem Fall rechtzeitig erkannt werden. Zur exakteren Beschreibung des Bedarfstermins können einzelne Stücklistenpositionen jedoch auch auf dem Montageplanungssystem bzw. später auf dem Montageleitstand gezielt den betreffenden Vorgängen im Feinnetz zugeordnet werden. Dies ist vor allem für solche Teile sinnvoll, die kurzfristig zum Vorgangsstart bereitgestellt werden sollen.

Meist ist es nicht erforderlich, alle zur Montage eines Produktes benötigten Materialien bei der Montageplanung und -steuerung zu berücksichtigen. Zur Reduzierung des Datenvolumens ist daher eine Einteilung des Materials in die Teilegruppen

- Abrufteile (Just-in-Time Teile),
- kritische Teile,

---

[31] Vgl. *Eversheim*, 1987.

- Standardteile und
- sonstige Teile

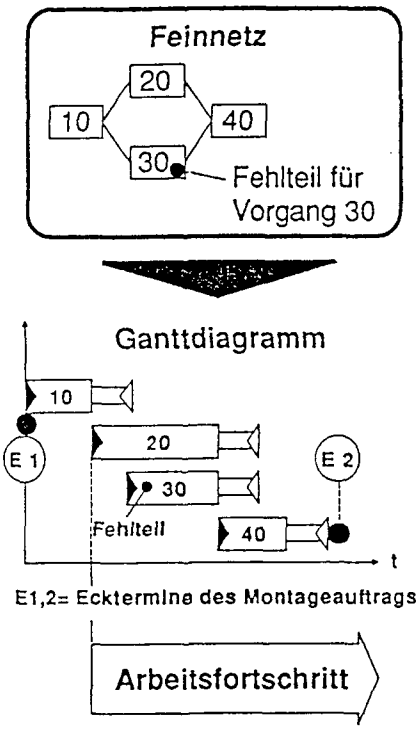
sinnvoll (vgl. *Abbildung 14*). Unter **Abrufteilen** werden dabei solche Teile verstanden, die nicht mit dem übrigen Material zum Start des Montageauftrags bereitgestellt werden sollen, sondern termingerecht zum Vorgangsstart (Just-in-Time) abgerufen werden. **Kritische Teile** sind für die planmäßige Durchführung der Montage von besonderer Bedeutung und müssen daher vor dem Start des Montageauftrags bzw. Vorgangs auf ihre Verfügbarkeit überprüft werden. Kritische Teile sind z.B. solche Teile, die zu einem späteren Zeitpunkt nicht mehr montiert werden können (Zugänglichkeit) oder die zur Durchführung der nachfolgenden Arbeitsschritte zwingend erforderlich sind.

Die Abrufteile sowie die kritischen Teile werden schon im Rahmen der Montageplanung den entsprechenden Vorgängen im Grob- bzw. Feinnetz zugeordnet. Die automatische Selektion dieser Teile aus der Gesamtstückliste ist z.B. anhand einer Kennzeichnung im Teilestammsatz des PPS-Systems möglich.

Zur Prüfung der Materialverfügbarkeit können neben den Stücklisten für jeden Montageauftrag auch die aktuellen Fehlteillisten auf den Leitstand übernommen und verwaltet werden. Die Zuordnung der Fehlteile zu den betreffenden Montageaufträgen bzw. Einzelvorgängen geschieht dabei anhand der bereits existierenden Zuordnungsrelationen (vgl. *Abbildung 14*). Die Fehlteile werden in der Stücklistendarstellung als Fehlbestand ausgewiesen. Hierdurch erhält der Planer am Bildschirm einen schnellen Überblick über Materialbedarf und -verfügbarkeit. Der anhand der Fehlteilinformationen abgeleitete Materialverfügbarkeitsstatus (verfügbar, teilweise verfügbar, nicht verfügbar) wird zusätzlich durch Farbmarkierungen in der Netzplandarstellung sowie in der Plantafel (Gantt) kenntlich gemacht. Zur vollständigen Darstellung der Fehlteilsituation können auch Fehlteile aus der Gruppe der **Standardteile**, welche bis dahin nicht auf dem Leitstand verwaltet wurden, übernommen und dem jeweiligen Startvorgang des betreffenden Montageauftrags zugeordnet werden. Voraussetzung hierfür ist allerdings, daß auch für diese Teile eine Zuordnungsrelation zu den jeweils relevanten Montageaufträgen hergestellt worden ist.

Sonstige Teile sind verbrauchsbezogen disponierte und bereitgestellte Standard- und Normteile, bei denen von einer Verfügbarkeit in ausreichender Menge ausgegangen werden kann. Diese Teile sollten daher nicht auf den Montageleitstand übernommen werden.

Abhängig von der aktuellen Situation sind im Rahmen der Terminplanung unterschiedliche Reaktionen auf Fehlteile denkbar (vgl. *Abbildung 15*). Bei frühzeitig bekannten Fehlteilen kann der voraussichtliche Liefertermin in Form eines "Material-Ecktermins" an den betroffenen Vorgang gekoppelt werden. Dieser Ecktermin wird bei allen folgenden Planungsläufen berücksichtigt und vermeidet ein vorzeitiges Einplanen des Vorgangs. Ist aufgrund eines zu späten Liefertermins die fristgerechte Fertigstellung des Montageauftrags im Rahmen seiner Ecktermine gefährdet, so kann unter Umständen durch Änderungen im Netzplan (Verlagerung der von den Fehlteilen betroffenen Arbeiten



- Fehlteil ist bis zum frühesten Anfangstermin (FA) des Vorgangs nicht verfügbar:
  - Vorgang verschieben; Liefertermin als Ecktermin (FA) übernehmen
- Fehlteil bis zum spätesten Anfangstermin des Vorgangs nicht verfügbar:
  1.) Liefertermin innerhalb des Vorgangs:
  - Vorgang ohne Teil anfangen, Erzwungene Freigabe durch den Meister
  2.) Liefertermin später als spätester Endtermin:
  - Erzwungene Freigabe
  - Vorgang trotz Fehlteil abschließen, Restarbeit in späteren Vorgang übertragen
  - Nächsten Vorgang später anfangen, Ecktermin muß verschoben oder Kapazität für den Folgevorgang erhöht werden.

Abbildung 15: Planungsmaßnahmen auf Basis von Fehlteilinformationen

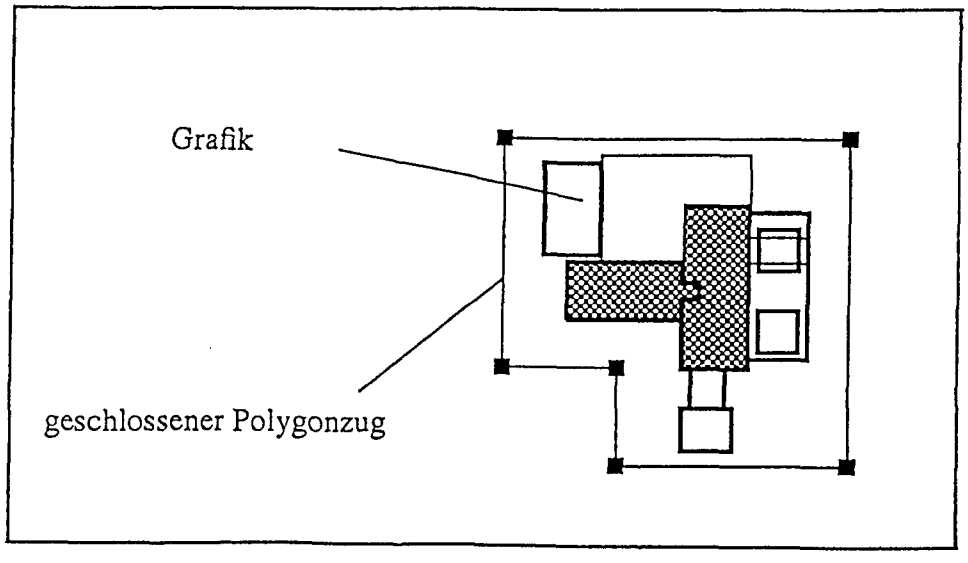


Abbildung 16: Flächenangebot / -nachfrage und umhüllender Polygonzug

in spätere Vorgänge) Abhilfe geschaffen werden.

Die montagegerechte Materialbereitstellung kann durch den Druck von Materialbedarfslisten unterstützt werden, in denen der aktuelle Materialbedarf der eingelasteten bzw. freigegebenen Vorgänge aufgelistet wird. Eine direkte Kopplung des Montageleitstands mit der Lagerverwaltung wurde ebenfalls bereits angedacht.

8. Integrierte Flächenbelegungsplanung

Die Flächenbelegungsplanung ist ein Modul des Montage-Leitstandes, mit dem das zur Verfügung stehende Flächenangebot und die Flächenbedarfe der zu verplanenden Montageaufträge angezeigt und verändert werden können, mit dem Ziel, den Vorgängen des Auftrags, ihrem Bedarf entsprechend, eine Hallenfläche zuzuordnen. Es lassen sich dabei zwei grundlegende Funktionen unterscheiden. Zum einen die Definition von Flächenangebot und -nachfrage, zum anderen die Zuordnung der Nachfrage auf das Angebot.

Definition des Flächenangebotes: Das zur Verfügung stehende Flächenangebot wird durch den Grundriß einer oder mehrerer Hallen definiert. Der Hallengrundriß wird als Geometrie-File in einem standardisierten Format (HPGL) von einem CAD-System oder einem Zeichenprogramm übernommen. Diese Geometrie kann aus beliebigen Elementen bestehen. Als Flächenangebot wird jedoch der umhüllende Polygonzug interpretiert (vgl. *Abbildung 16*). Weitere grafische Elemente dienen zur näheren bildlichen Erläuterung der Halle. Sie werden z.B. genutzt zur Darstellung von Meisterbüros oder Lagerplätzen. Funktional werden diese grafischen Elemente jedoch nicht berücksichtigt.

Nicht zur Verfügung stehende Flächenbereiche müssen als sogenannte *Sperrbereiche* definiert werden. Durch die Zuordnung eines sprechenden Namens zu einem Sperrbereich wird ein späteres Manipulieren durch den Benutzer erleichtert. So kann er sich beispielsweise alle Sperrbereiche, die als Fluchtwege gekennzeichnet sind, ansehen und auf einen Blick erkennen, wo es eine Einschränkung der verplanbaren Fläche gibt. Der Hallengrundriß stellt also für die Planung das Angebot dar - eingeschränkt durch die als Sperrflächen definierten Bereiche.

Wie bei den Ressourcen Personal und Betriebsmittel lassen sich diese Bereiche der Fläche hinsichtlich qualifikatorischer und organisatorischer Merkmale gliedern. Dazu können "Folien" über den Grundriß gelegt werden, denen die entsprechenden Merkmale zugeordnet wurden.

Das Vorliegen von Qualifiaktions- und Organisationsmerkmalen ist wesentlich bei der Suche nach geeigneten Flächen. Organisatorische und qualifikatorische Flächenbereiche können sich durchaus überschneiden. Geht man beispielsweise davon aus, daß ein organisatorischer Bereich "Fertigungszentren" und ein qualifikatorischer Bereich "Krantragfähigkeit 10 Tonnen" eingerichtet wurde, könnten im Schnittbereich Fertigungszentren, die zur Montage einen 10 Tonnen Kran benötigen, gebaut werden.

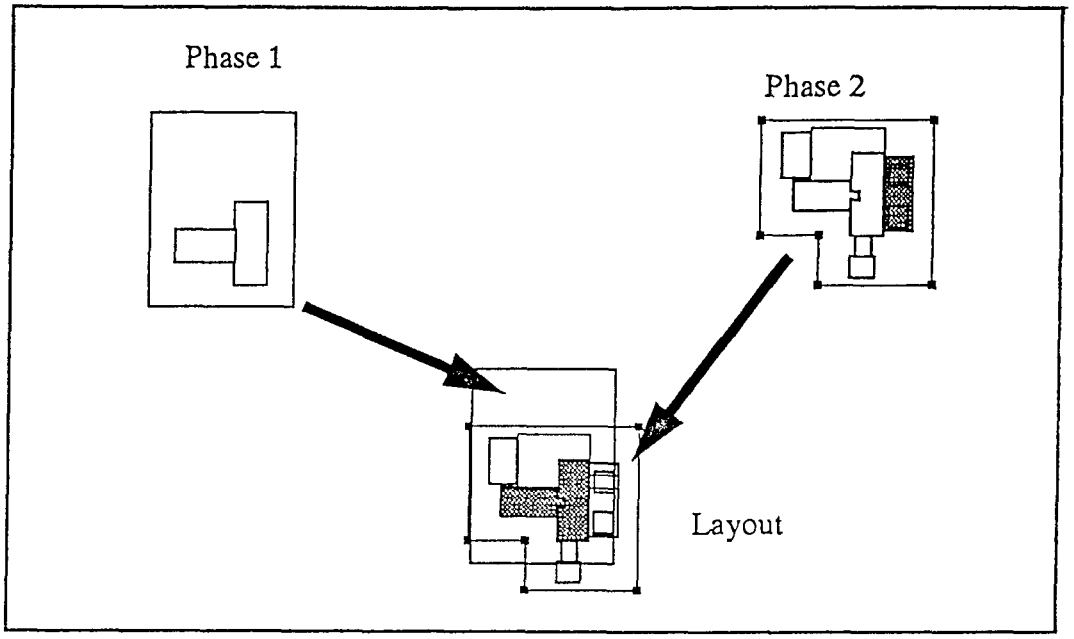


Abbildung 17: Zuordnen mehrerer Phasen zu einem Layout

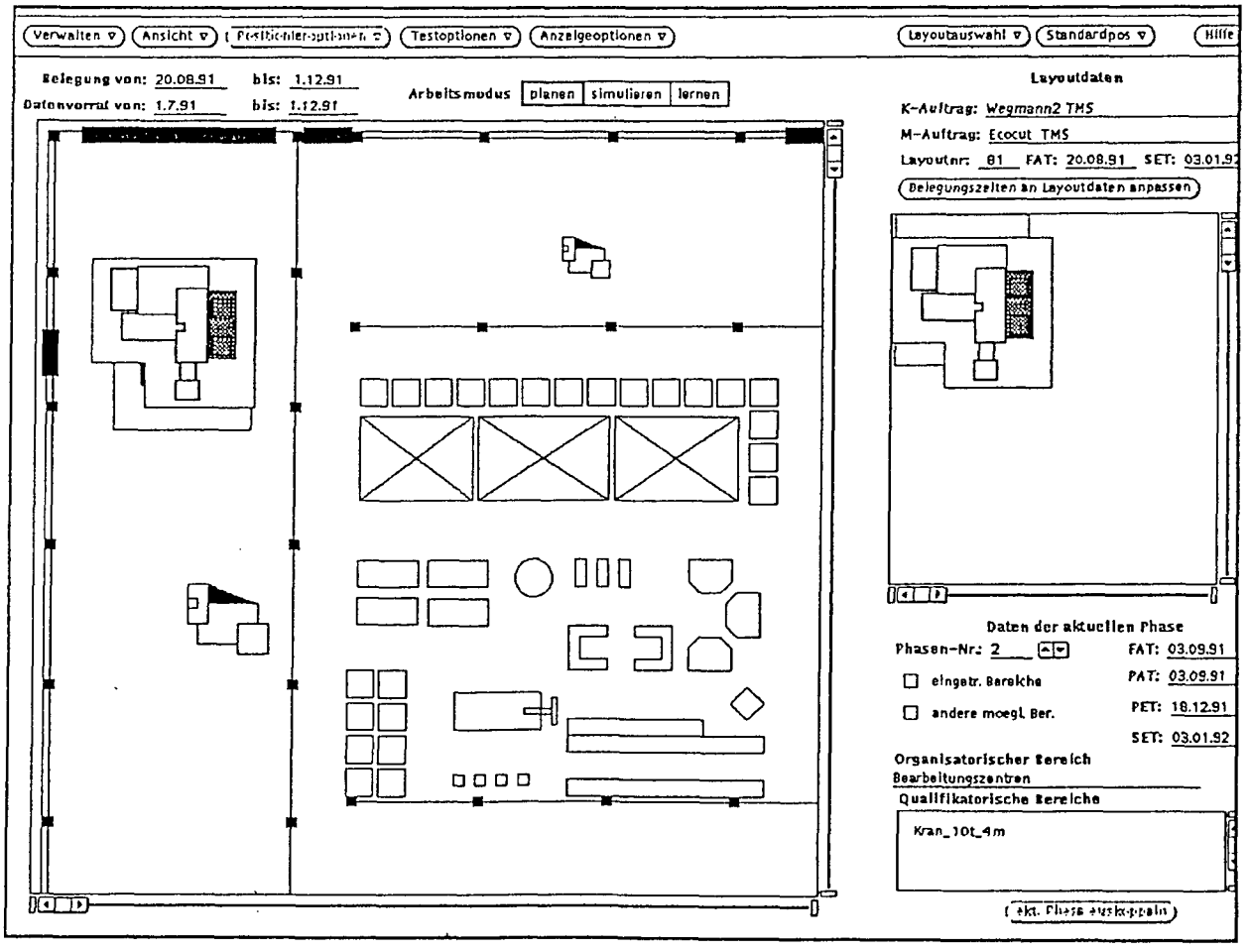


Abbildung 18: Manuelles Einplanen

Definition der Flächennachfrage: Die geometrische Flächennachfrage wird durch Maschinengrundrisse, die Layouts, abgebildet. Innerhalb eines Kunden- oder Montageauftrages treten i.d.R. Flächenbedarfsänderungen auf und es ist notwendig, diese "Dynamik" abzubilden. Der Montage-Leitstand stellt zu diesem Zweck die sogenannten *Phasen* zur Verfügung. Jede Phase entspricht einer Geometrie; sie definiert den Flächenbedarf einer Maschine in einem Montageabschnitt. Phasen sind in einem Layout logisch zusammengefaßt (vgl. *Abbildung 17*). Die Phasen eines Layouts haben dabei i.d.R. über der Zeitachse einen räumlichen Zusammenhang. Da einzelne Montagephasen aber auch räumlich unabhängig sein können, sind mehrere Layouts zu einem Kunden- oder Montageauftrag möglich.

Wie bei der Definition eines Hallengrundrisses ist es der umhüllende Polygonzug, der den eigentlichen geometrischen Flächenbedarf definiert. Grafische Elemente können zur leichteren Wiedererkennbarkeit benutzt werden. Ebenso kann für die optische Anzeige eine beliebige Farbe gewählt werden. Neben den optischen Attributen können auch logische Attribute wie benötigte Qualifikationen und Organisationen mitgegeben werden. Wesentlich dabei ist, daß nur eine solche Qualifikation oder Organisation zugeordnet werden kann, die als Angebot im Hallengrundriss vorhanden, also schon definiert ist.

Die im Zeitablauf variierende Flächennachfrage ergibt sich aus der Verknüpfung der zu einem Layout gehörenden Phasen mit den zugehörigen Vorgängen aus dem Auftragsnetz. Jeder Bauphase eines Auftrags wird folglich der früheste Anfangstermin des ersten Vorganges und der späteste Endtermin des letzten Vorganges zugeordnet.

Zuordnen von Flächennachfrage und Flächenangebot: Nachdem das Flächenangebot in Form des Hallengrundrisses und die Nachfrage in Form der Layouts mit ihren Phasen definiert ist, kann eine Zuordnung von Angebot und Nachfrage erfolgen. Dazu stellt der Montage-Leitstand eine Liste aller Layouts mit Kundenauftragsbezug dar, die noch nicht auf dem Hallengrundriß positioniert, also eingeplant wurden. Der Benutzer wählt einen Maschinengrundriß (Layout) aus, der dann mit seiner Geometrie und den logischen Attributen in einem separaten Fenster am Bildschirm angezeigt wird. Der eigentliche Einplanungsvorgang wird manuell durch Selektion der Layout-Grafik und Positionieren auf den gewünschten Standplatz in der Montagehalle (Hallengrundriss) erreicht (vgl. *Abbildung 18*).

Nachdem die Geometrie positioniert ist, werden mehrere Kollisionschecks durchgeführt. Zunächst wird geprüft, ob die geforderten organisatorischen und qualifikatorischen Merkmale, also die den Phasen mitgegebenen logischen Attribute, vorliegen. Anschließend wird auf terminliche Überschneidung geprüft, d.h. es wird automatisch ermittelt, ob in dem Zeitraum, in dem der neue Auftrag montiert werden soll, ein anderer Auftrag dieselbe Fläche benötigt. Kollisionen können, falls gewünscht, vom Benutzer ignoriert werden (allein der Benutzer besitzt Entscheidungsbefugnis).

Um die geeignete Standfläche in kurzer Zeit zu finden, stehen dem Benutzer mehrere Hilfen zur Verfügung. Er kann sich die vorhandenen Sperr-, Organisations- und Qualifikationsbereiche, die in der Halle existieren, anzeigen lassen. Die zeitliche Belegung kann

dargestellt werden, indem die Belegungszeiten an die Layoutdaten, also den Zeitraum, in dem der Auftrag geplant ist, angepaßt werden. Da der Montage-Leitstand den eingeplanten Auftragsbestand immer kumuliert darstellt, kann der Benutzer nach dieser Anpassung sofort den Hallenbereich erkennen, der noch frei disponierbar ist, ohne Kollisionen hervorzurufen.

Neben der Möglichkeit, die Layoutgeometrien beliebig auf dem Hallengrundriß zu plazieren, steht noch eine weitere Option zur Verfügung. Dem Montage-Leitstand können mittels eines "Teach-in-Verfahrens" Standardpositionen für Layouts mitgeteilt werden. Diese Standardpositionen sind beim Einplanvorgang abrufbar, sodaß bestimmte Maschinen immer denselben Positionen (z.B. für eine fest eingerichtete Boxenmontage) zuordenbar sind.

Simulation: Zusätzlich wurde in den Montage-Leitstand eine Simulationsfunktion integriert. Diese Funktion gestattet es, die Hallenbelegung über einen beliebig langen Zeitraum in (beliebig wählbaren) zeitdiskreten Schritten zu betrachten. Diese dynamisierte Darstellung ist außerdem geeignet, das Ausmaß von Kollisionen zu analysieren. Der Benutzer kann danach entscheiden, ob Kollisionen, die beispielsweise im Bereich von Manipulationsflächen auftreten, tolerierbar sind.

9. Realisierung und Test der Systeme

Im Rahmen des PRISMA-Projektes erhielt die Konzeptionsphase einen äußerst hohen Stellenwert. Ziel war es, die Anforderungen von 9 Partnern zu berücksichtigen. Wenn auch nach kurzer Zeit eine grundsätzliche Aufgabenteilung zwischen den italienischen und deutschen Partnern gefunden werden konnte, indem die Anforderungen nach Stammdatenerzeugung (CAAP) und Bewegungsdatenermittlung (AMS) unterteilt wurden, war eine Strukturierung der Anforderungen zunächst sehr schwierig, da auf unterschiedlichen Ebenen diskutiert wurde (Werkzeugmaschinenhersteller, Forschungsinstitute, Softwarehäuser). Als geeignetes Hilfsmittel zur Analyse und Strukturierung der Anforderungen bot sich die Methode der strukturierten Analyse (SA) an.[32] Mit Hilfe von diese Methode unterstützenden Softwaretools und von Szenarios, die die Benutzeroberfläche des Systems beschrieben, konnten die Anforderungen so exakt wie möglich definiert werden. Auf diese Weise wurde verhindert, daß ein EDV-System an den Anforderungen der Endanwender vorbei entwickelt wurde.

Grundlegende Zielsetzung bei der Systementwicklung: Das Systemdesign wurde von der primären Zielsetzung bestimmt, ein System zu schaffen, das eine einfache Bedienung ermöglicht. Dazu gehört die Minimierung des Aufwandes zur Erstellung des Grunddatenbestandes, ein maximaler Planungsspielraum für das Montagepersonal (keine "Bevormundung" durch ein System) und möglichst einfache Umplanungsfunktionen.

---

[32] Vgl. z.B. *Yourdon*, 1989.

Softwaretechnisch wurde daher eine grafische Oberfläche genutzt, die auf dem Stand der Technik, dem X-Windows-Standard basiert. Diese Art von grafischen Oberflächen bieten eine komplette Mausunterstützung, mit der Menüs und grafische Elemente interaktiv angesteuert werden können. Für alle wichtigen Editierfunktionen wurde eigens ein Grafiksystem geschaffen, mit dem Strukturinformationen bearbeitet werden können. Die einzelnen grafisch interaktiven Editoren des Montage-Leitstandes sind Netzplaneditor, Ressourcenmanager, Gantt-Chart und Flächenbelegungsplanung.

Das Prinzip "Minimierung des Aufwandes zur Erstellung des Grunddatenbestandes" findet sich in allen Editoren wieder. So verfügt der Netzplaneditor beispielsweise über eine Editierhilfe, ein Pop-UP-Menü (kleines, beliebig plazierbares Zusatzmenü), mit dessen Hilfe neue Montageaufträge und -vorgänge an beliebiger Stelle lokalisiert, Verbindungen zwischen Aufträgen bzw. Vorgängen angelegt und existierende Objekte (Aufträge, Vorgänge und Verbindungen) gelöscht werden können. Dieses einfache Instrument erleichtert die Neuanlage einer Netzstruktur erheblich.

Auch der Ressourcenmanager, das Instrument zur Anlage der verfügbaren Ressourcen, arbeitet grafisch interaktiv. Sowohl die organisatorische Struktur (z.B. Kostenstellen), als auch die qualifikatorische Struktur (Fähigkeiten der Mitarbeiter) können direkt mit der Maus am Bildschirm angelegt und bearbeitet werden. Auch die zeitliche Verfügbarkeit der Ressourcen (Schichtenmodell) wird auf diese Weise zugeordnet.

Das Gantt-Diagramm verfügt ebenso über diese Eigenschaft. So ist die "manuelle Planung", das Bestimmen von Planterminen für einzelne Vorgänge, so realisiert, daß der Anwender den Vorgangsbalken am Bildschirm selektieren und ihn innerhalb seines zeitlichen Puffers bewegen kann.

Der Montage-Leitstand ist einem PPS-System untergeordnet und einem BDE-System übergeordnet. Um diesen Beziehungen Rechnung zu tragen, wurde eine aufwendige Schnittstelle zu beiden Systemen konzipiert und realisiert. Das Konzept für diese Schnittstellen mußte jedoch berücksichtigen, daß es nicht "das PPS-System" gibt, sondern eine Vielzahl von Systemen mit unterschiedlichsten Strukturen, Konzepten und Schnittstellenfunktionen. Allen PPS-Systemen ist jedoch geimeinsam, daß sie zumindest die folgenden Informationen liefern: Liefertermin für Kundenaufträge, Start und Endtermin sowie Dauer von Montageaufträgen.

Die Schnittstelle des Montage-Leitstandes ist so vorbereitet, daß sie sowohl mit als auch ohne Netzstrukturen auskommt. Werden Netze, also Vorgänger-Nachfolgerbeziehungen geliefert, werden diese übernommen und entsprechend dargestellt. Um das gleiche Erscheinungsbild eines Netzes auf beiden Systemen zu erreichen, ist die Übergabe der entsprechenden Koordinatenpaare erforderlich. Verfügt das PPS-System nicht über eine Netzstruktur, wird vom Leitstand automatisch ein Beginn- und Endknoten angelegt. Für die zu einem Kundenauftrag gelieferten Montageaufträge wird dann angenommen, daß sie parallel bearbeitet werden können.

Können zusätzlich Arbeitsgänge vom PPS-System zur Verfügung gestellt werden, werden diese als Vorgänge (Elemente des Feinnetzplanes) interpretiert und analog zu den

Montageaufträgen behandelt. Zusätzlich ist auch, wie schon in Abschnitt 7 beschrieben, die Übergabe von Stücklisten und Fehlteillisten realisiert.

Anwendererfahrung: Im Rahmen des PRISMA-Projektes wurde ein erster ß-Test bei den am Projekt beteiligten Werkzeugmaschinenherstellern durchgeführt. Der Test war in drei Phasen unterteilt. Die erste Phase war, anschließend an eine Basisschulung, ein Test mit fiktiven Beispielen, die so gewählt waren, daß möglichst die komplette Funktionalität des Montage-Leitstandes benutzt werden sollte. Die zweite Phase bestand aus einem Test vor Ort mit Beispielen aus der Praxis der Anwender. Die dritte Phase, die im September 1992 gestartet wurde, prüft den Montage-Leitstand im praktischen Einsatz.

Als Ergebnis der Phase 1 kann gesehen werden, daß alle wichtigen Funktionen vorhanden sind und das Konzept des Leitstandes mit seinen hierarchischen Planungsebenen, dem Ressourcenkonzept sowie der integrierten Flächenbelegungsplanung den Anforderungen der Praxis gerecht wird. Bei der Benutzung traten jedoch teilweise Inkonsistenzen im Userinterface auf. Die in Phase 1 festgestellten Programmfehler wurden vor dem Start von Phase 2 beseitigt.

In Phase 2 konnte dann eine in hohem Maße stabilisierte Software eingesetzt werden. Bei der Arbeit mit den praxisnahen Datenbeständen traten daher auch im wesentlichen organisatorische und weniger funktionale Probleme auf. So wurde beispielsweise bei einem der Testanwender der komplette Nummernschlüssel für die Identifizierung der Vorgänge geändert, da sich der ursprünglich gewählte als ungeeignet für die schnelle Wiedererkennung erwies. Ergänzend wurden die Schnittstellen zu den PPS-Systemen, bei Anwender 1 eine selbstentwickelte Lösung, bei Anwender 2 ein weitverbreitetes Standardprodukt, realisiert und getestet. Da die Aktualisierungszyklen auf den überlagerten Systemen bei beiden Anwendern maximal tagesgenau sind, konnte auf eine aufwendige und teure Lösung mittels Programm zu Programm Kommunikation verzichtet werden. Vielmehr werden die Daten über Filetransfer übertragen. Die physikalische Kopplung zu den Hostrechnern erfolgt über entsprechend ausgestattete Industrie-PCs.

Als Resultat der Phase 2 wurden weitere Anregungen aufgenommen, die zur nochmaligen Stabilisierung der Basis- und Schnittstellensoftware führten, so daß Phase 3 mit dem Test unter Echtbetriebsbedingungen gestartet werden konnte. Parallel zu den softwaretechnischen Optimierungen konnten auch organisatorische Erkenntnisse gewonnen werden. So hat man erkannt, daß ein großer Zusatznutzen eines solchen EDV-Systems für den Anwender darin besteht, daß er aussagekräftige Listen an die Hand bekommt, die beispielsweise in den sogenannten Montagebesprechungen eingesetzt werden können. Diese Listen, die als Reports aus der SQL-Datenbank generiert werden, enthalten im wesentlichen Übersichten über den aktuellen Montagestand sowie den Auftragsfortschritt und die Mitarbeiterauslastung. Hier macht sich der Vorteil des modernen Datenbankkonzeptes bemerkbar, das es erlaubt, mit geringem Aufwand umfangreiche und nahezu beliebige Auswertungen zu generieren.

10. Ausblick

Abschließend kann gesagt werden, daß durch die bereits entwickelten Basissysteme eine erhebliche Verbesserung der bisher meist unbefriedigenden Montageplanung und -steuerung in der Einzel- und Kleinserienproduktion variantenreicher, komplexer Produkte erreicht werden kann. Hierdurch und durch die derzeit in der Entwicklung befindlichen Erweiterungen kann die Montage zukünftig als vollwertiger Baustein in moderne CIM-Umgebungen[33] integriert werden. Eine verbesserte Montageplanung trägt dabei durch realistische, aktuelle Termininformationen auch erheblich zur Effektivitätssteigerung der meist schon EDV-unterstützten Funktionen Materialdisposition, Einkauf und Fertigungssteuerung bei.

Zur zukünftigen Erweiterung der hier beschriebenen Basissysteme werden von den Autoren zur Zeit folgende **Forschungs- und Entwicklungsarbeiten** durchgeführt:

- *Integration von Funktionen und Hilfsmitteln zum Störungsmanagement:* Klassifikation von Störungsursachen, Eingrenzung von Störungen sowie Beschränkung notwendiger Umplanungen auf einen übersichtlichen Bereich.[34]
- *Kurzfristige termintreue Kapazitätsplanung:* Minimierung der Kosten (für Überstunden), die für den zur Termineinhaltung erforderlichen zusätzlichen Ressourcenbedarf anfallen.[35]
- *Flächenbelegungsplanung:* Einbeziehung von Modellen und Methoden der Layoutplanung[36] zur (automatischen) Bewertung und Auswahl von Layoutvarianten.
- *Erweiterung des Materialmanagements:* Modell- und methodengestützte systematische Bewertung und Auswahl materialwirtschaftlicher Alternativen.[37]

Literaturhinweise

Adelsberger, H.H. / Kanet, J.J.: The leitstand - A new tool for computer-integrated manufacturing, in: Production and Inventory Management Journal, Vol. 32 (1991) Nr. 1, S. 43-48.

Ahn, J. / Kusiak, A.: Scheduling with alternative process plans, in: Modern production concepts, hrsg. von *Fandel, G. / Zäpfel, G.*, Berlin 1991, S. 387-403.

Alvarez-Valdes, R. / Tamarit, J.M.: Heuristic algorithms for resource-constrained project scheduling: A review and an empirical analysis, in: Advances in project scheduling, hrsg. von *Slowinski, R. / Weglarz, J.*, Amsterdam 1989, S. 113-134.

Blazewicz, J. / Cellary, W. / Slowinski, R. / Weglarz, J.: Scheduling under resource constraints - deterministic models, Basel 1986.

---

[33] Vgl. z.B. *Scheer,* 1990; siehe auch *Steffen,* 1991.

[34] Siehe hierzu *Lehmann,* 1992.

[35] Vgl. z.B. *Drexl / Kolisch,* 1992 b.

[36] Vgl. z.B. *Domschke / Drexl,* 1990; *Francis* et al., 1992; *Mirchandani / Francis,* 1990; *Petersen,* 1992 sowie *Wäscher / Chamoni,* 1987.

[37] Vgl. z.B. *Silver / Peterson,* 1985 sowie *Tempelmeier,* 1992.

Domschke, W.: Logistik: Transport, 3. Aufl., München-Wien 1989.

Domschke, W. / Drexl, A.: Logistik: Standorte, 3. Aufl., München-Wien 1990.

Domschke, W. / Drexl, A.: Einführung in Operations Research, 2. Aufl., Berlin 1991 a.

Domschke, W. / Drexl, A.: Kapazitätsplanung in Netzwerken - Ein Überblick über neuere Modelle und Verfahren, in: OR Spektrum, Bd. 13 (1991 b), S. 63-76.

Drexl, A.: Scheduling of project networks by job assignment, in: Management Science, Vol. 37 (1991), S. 1590-1602.

Drexl, A. / Grünewald, J.: Nonpreemptive multi-mode resource-constrained project scheduling, erscheint in: IIE Transactions (1992).

Drexl, A. / Kolisch, R.: Produktionsplanung und -steuerung bei Einzel- und Kleinserienfertigung, erscheint in Wirtschaftswissenschaftliches Studium (1992 a).

Drexl, A. / Kolisch, R.: Production improvement in small batch machine tool assembly, Vortrag, 2nd ISDSS Conference, FAW / Ulm (1992 b).

Eversheim, W.: Strategien zur Rationalisierung der Montage. Einzel- und Kleinserienfertigung komplexer Produkte. VDI-Verlag, Düsseldorf, 1987.

Eversheim, W.: Inbetriebnahme komplexer Maschinen und Anlagen. VDI-Verlag, Düsseldorf, 1990.

Eversheim, W. / Anger, K. / Esser, H.: Der Leitstand erschließt sich neue Einsatz bereiche. VDI-Z 134 (1992), Nr. 1, S. 26-31.

Eversheim, W. / Esser, H. / Lehmann, F.: Computerunterstützte Montageplanung und -steuerung, Durchlaufzeit reduzieren. Industrie-Anzeiger 68 (1990), S. 14-15.

Francis, R.L. / McGinnis, L.F. / White, J.A.: Facility layout and location: an analytical approach, 2nd edition, Prentice Hall, Englewood Cliffs, New Jersey 1992.

Hars, A. / Scheer, A.-W.: Stand und Entwicklungstendenzen von Leitständen, in: Fertigungssteuerung - Expertenwissen für die Praxis, hrsg. von *Scheer, A.-W.*, München-Wien 1991, S. 247-268.

Hart, J.P. / Shogan, A.W.: Semi-greedy heuristics: An empirical study, in: Operations Research Letters, Vol. 6 (1987), S. 107-114.

Kanet, J.J. / Sridharan, V.: The electronic leitstand: A new tool for shop scheduling, in: Manufacturing Review, Vol. 3 (1990), S. 161-170.

Kellermann, T. / Wächter, R.: Informationsverbund in der Werkstatt mit einem Fertigungsleitstand, in: Zeitschrift für wirtschaftliche Fertigung 82 (1987), S. 597-601.

Konz, H.-J.: Steuerung der Standplatzmontage komplexer Produkte. Dissertation RWTH Aachen 1989.

Kosmas, I.: Strategien und Hilfsmittel für die Montagevorbereitung in Unternehmen der Einzel- und Kleinserienproduktion. Disssertation RWTH Aachen, 1988.

Kurbel, K. / Meynert, J.: Flexibilität in der Fertigungssteuerung durch Einsatz eines elektronischen Leitstands, in: Zeitschrift für wirtschaftliche Fertigung 83 (1988), S. 581-585.

Lehmann, F.: Störungsmanagement in der Einzel- und Kleinserienmontage - Ein Beitrag zur EDV-gestützten Montagesteuerung. Diss., RWTH Aachen 1992.

Lippe, J. v.: Bringt die nächste Leitstand-Generation die Integration?, in: Zeitschrift für wirtschaftliche Fertigung und Automation 85 (1990).

Mirchandani, P.B. / Francis, R.L. (Eds.): *Discrete location theory,* Wiley, New York 1990.

Neumann, K.: Operations Research Verfahren. Bd. III: Graphentheorie und Netzplantechnik, Hanser, München - Wien 1975.

Patterson, J. / Slowinski, R. / Talbot, B. / Weglarz, J.: Computational experience with a backtracking algorithm for solving a general class of precedence and resource-constrained scheduling problems, in: European Journal of Operational Research, Vol. 49 (1990), S. 68-79.

Petersen, U.: Spatially-oriented production planning and scheduling, erscheint in: Proceedings of the German / U.S. Conference on Recent Developments of Operations Research in Prodution Planning and Control, hrsg. *G. Fandel*, Berlin 1992.

Scheer, A.-W.: CIM - Der computergesteuerte Industriebetrieb, Springer, Berlin u.a. 1990.

Scheer, A.-W. / Hars, A.: The leitstand - A new tool for decentral production control, in: Modern production concepts, hrsg. von *Fandel, G. / Zäpfel, G.*, Berlin 1991, S. 370-385.

Schmidt, G. / Frenzel, B.: Anforderungen an Leitstände für die flexible Fertigung, in: CIM Management 4/1990, S. 33-37.

Silver, E.A. / Peterson, R.: Decision systems for inventory management and production planning, 2nd edition, Wiley, New York 1985.

Slowinski, R. / Soniewicki, B. / Weglarz, J.: DSS for multiobjective project scheduling subject to multiple-category resource constraints, erscheint in: European Journal of Operational Research (1992).

Stadtler, H. / Wilhelm, S.: Zum Einsatz von Fertigungsleitständen in der Industrie, erscheint in: CIM Management 1992.

Steffen, R.: Verbindung computergestützter Erzeugniskonstruktion (CAD) mit der Kosten- und Erlösrechnung in CIM-Konzeptionen, in: Zeitschrift für betriebswirtschaftliche Forschung, Jg. 43 (1991), S. 359-375.

Stolz, N.W.: Materialbereitstellung in der Montage. Dissertation RWTH Aachen 1989.

Tempelmeier, H.: Material-Logistik - Grundlagen der Bedarfs- und Losgrößenplanung in PPS-Systemen. 2. Aufl., Berlin 1992.

Wäscher, G. / Chamoni, P.: MICROLAY - An interactive computer program for factory layout planning on microcumputers, in: European Journal of Operational Research, Vol. 31 (1987), S. 185-193.

Yourdon, E.: Modern structured analysis, Englewood Cliffs 1989.

Zäpfel, G.: Produktionswirtschaft - Operatives Produktions-Management, Berlin - New York 1982.

Zäpfel, G.: Strategisches Produktions-Management, Berlin - New York 1989 a.

Zäpfel, G.: Taktisches Produktions-Management, Berlin - New York 1989 b.

Zusammenfassung

Im Werkzeugmaschinenbau müssen zahlreiche Aufträge simultan in einem mehrstufigen Produktionsprozess gefertigt werden. Infolge kundenspezifischer Anforderungen sind die Losgrößen sehr klein. Ein Arbeitsplan spezifiziert das benötigte Personal und die erforderlichen Maschinen. Das hier betrachtete Problem hängt eng zusammen mit der Mehr-Projekt Multi-Ressourcenplanung. Wir beschreiben die wesentlichen Komponenten des PRISMA-Systems (PRoduction Improvement in Small Batch Machine Tool Assembly), einem prototypischen DSS-Leitstand. PRISMA ist infolge seiner Schnittstellen zu PPS- und BDE-Systemen integraler Bestandteil einer CIM-Umgebung. Neben

leistungsfähigen Methoden zur Ablaufsteuerung enthält das System ein Modul zur integrierten Flächenbelegungsplanung sowie ein Modul zur Unterstützung des Materialmanagement.

Summary

In machine tool assembly several make-to-order products have to be manufactured simultaneously in a multi-stage production system. Due to customer requirements batches are very small. A process plan specifies the requirements for machines, tools, auxiliary devices as well as operations to be performed. We consider the small batch machine tool assembly problem with alternative process plans and multiple resource-constraints. This problem basically relates to nonpreemptive multi-project multi-mode resource-constrained project scheduling. We describe the main features of the PRISMA-system (PRoduction Improvement in Small Batch Machine Tool Assembly), a prototype DSS-leitstand. PRISMA is an integral part of a CIM-environment due to its interfaces to MRP- as well as factory data collection-systems. Besides advanced scheduling components the system provides an integrated ordering component as well as an integrated layout component.