

Drexl, Andreas; Kolisch, Rainer

Working Paper — Digitized Version

Produktionsplanung und -steuerung bei Einzel- und Kleinserienfertigung

Manuskripte aus den Instituten für Betriebswirtschaftslehre der Universität Kiel, No. 281

Provided in Cooperation with:

Christian-Albrechts-University of Kiel, Institute of Business Administration

Suggested Citation: Drexl, Andreas; Kolisch, Rainer (1991) : Produktionsplanung und -steuerung bei Einzel- und Kleinserienfertigung, Manuskripte aus den Instituten für Betriebswirtschaftslehre der Universität Kiel, No. 281, Universität Kiel, Institut für Betriebswirtschaftslehre, Kiel

This Version is available at:

<https://hdl.handle.net/10419/161410>

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.

Nr. 281

**Produktionsplanung und -steuerung
bei Einzel- und Kleinserienfertigung**

Drexl, A. und R. Kolisch

Professor Dr. Andreas Drexl, Dipl.-Wirtsch.-Ing. Rainer Kolisch, Institut für Betriebswirtschaftslehre, Christian-Albrechts-Universität zu Kiel, Olshausenstr. 40, 2300 Kiel 1

Produktionsplanungs- und -steuerungssysteme (PPS-Systeme) haben in den letzten Jahren in der wissenschaftlichen Literatur und der betrieblichen Praxis starke Beachtung gefunden. Während diese Systeme die Problematik der (Groß-) Serienfertigung (einigermaßen) bewältigen, sind sie für die spezifischen Anforderungen der Einzel- und Kleinserienfertigung ungeeignet. Angesichts einer zunehmenden Tendenz zu kundenauftragsbezogener Produktion muß und wird jedoch in den nächsten Jahren die Einzel- und Kleinserienfertigung verstärkt an Beachtung gewinnen. Der vorliegende Beitrag beschäftigt sich in Teil I mit den Grundlagen und in Teil II mit neuen computer-gestützten PPS-Systemen (sogenannten Montage-Leitständen) für die Einzel- und Kleinserienfertigung.

1. Einführung

Produktionsplanung umfaßt ganz allgemein die Vorbereitung von Entscheidungen im Produktionsbereich. Die strategische und taktische Planung, die sich mit der Gestaltung des Produktionssystems, der Produkte und Produktionsverfahren beschäftigen, werden im folgenden nicht betrachtet (vgl. hierzu z.B. *Zäpfel*, 1989, a, b). Die verbleibenden Planungsprobleme werden in der Regel zwei Ebenen zugeordnet, die mit dem Begriffspaar Produktionsplanung und -steuerung korrespondieren (vgl. dazu insbesondere *Fleischmann*, 1988):

- **Mittelfristig** müssen die von den einzelnen Produkten bzw. Produktgruppen herzustellenden Mengen festgelegt werden (Planungszeitraum 6 bis 24 Monate, Periodenraster 1 Woche bis 1 Monat). In der PPS-Terminologie wird der Begriff "Produktionsplanung" üblicherweise auf diese Ebene eingeschränkt. In der Literatur ist dafür auch der Begriff "Programmplanung" gebräuchlich (vgl. z.B. *Schneeweiß*, 1989).
- **Kurzfristig** muß der zeitliche Ablauf der Produktion geplant werden. In diesem Zusammenhang sind u.a. Produktionsaufträge Betriebsmitteln zuzuordnen, Losgrößen festzulegen und Reihenfolgeentscheidungen von Arbeitsgängen auf Maschinen zu treffen.

Die Einzelheiten der Planungsproblematik sind stark abhängig vom **Produktionstyp**; für ihn findet man in der Literatur vielfältige Klassifikationsschemata (vgl. z.B. *Zäpfel*, 1982 sowie *Silver / Peterson*, 1985). Wesentliche **Charakteristika** sind:

- Bedarfsauslösung (kundenauftragsbezogene Produktion = make-to-order-production bzw. Produktion für den anonymen Markt = make-to-stock-production)
- Wiederholungsgrad (Einzelfertigung bzw. Massenproduktion)
- Organisationstyp (Werkstatt- bzw. Fließfertigung)
- Produktionsstruktur (zahlreiche Fertigungsstufen bzw. einstufige Produktion)

Es sind jeweils die extremen Merkmalsausprägungen genannt; dazwischen gibt es vielfältige Abstufungen. Der hier betrachtete Produktionstyp läßt sich anhand der Ausprägungen auftragsbezogene Produktion, Einzel- bzw. Kleinserienfertigung, Verrichtungszentralisation und Objektdezentralisation (Werkstattfertigung) sowie mehrstufige Produktion charakterisieren. Die damit verbundene Planungsproblematik betrifft primär die Bestimmung zulässiger (insbesondere hinsichtlich knapper Ressourcen), kurzfristiger Bearbeitungsstermine.

Teil I: Grundlagen

2. Einzel- vs. Kleinserienfertigung

Beispiele für Projekte der Einzel- und Kleinserienfertigung sind:

- Bau von Schiffen, Kraftwerken, Fabriken etc.
- Maschinenbau (**Werkzeugmaschinen**, Fertigungsstraßen etc.)
- FuE-Projekte
- Einführung von EDV (betriebliche Organisation)
- Großveranstaltungen (Sport, Politik etc.)

Die im folgenden behandelten Modelle und Methoden zur Projektplanung und -steuerung sind besonders geeignet für Projekte der ersten beiden Kategorien. Der Werkzeugmaschinenbau ist darüber hinaus hervorgehoben, weil er bevorzugter Anwendungsbereich des in Teil II dargestellten PRISMA-Montage-Leitstandes ist.

Projekte lassen sich mit Hilfe der **Netzplantechnik** veranschaulichen. Elemente eines Netzplanes sind Vorgänge (Aktivitäten, Arbeitsgänge), Ereignisse und (Anordnungs- oder) Reihenfolgebeziehungen. Besonders geeignet sind sogenannte Vorgangsknoten- (oder MPM-) Netzpläne, bei denen Arbeitsgänge als Knoten und Reihenfolgebeziehungen als Pfeile dargestellt werden. Eine Systematik von Modellen und Methoden der Netzplantechnik findet man z.B. in *Domschke / Drexl*, 1991 a, S. 82 ff.

Bei Einzelfertigung ist in einem bestimmten Zeitpunkt ein Projekt, bei Kleinserienfertigung sind gleichzeitig mehrere Projekte zu planen und zu steuern. Im folgenden wird gezeigt, daß sich die Problematik bei Kleinserienfertigung in **einem** übergeordneten (integrierten) Netzwerk veranschaulichen läßt.

Gegeben seien die beiden Netzpläne bei Kleinserienfertigung in *Abb. 1*. Es seien also zwei Aufträge zu fertigen, wobei Auftrag 1 (2) aus den Arbeitsgängen 1 und 4 (2, 3 und 5) besteht. Die Pfeile geben die zu beachtenden Reihenfolgebeziehungen wieder (mehrstufige Fertigung).

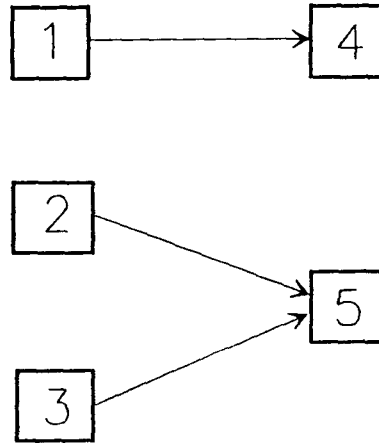


Abb. 1: Netzpläne bei Kleinserienfertigung

Aus Abb. 1 erhalten wir das (integrierte) Netzwerk von Abb. 2, indem wir zwei fiktive Vorgänge, nämlich eine (Super-) Quelle 0, eine (Super-) Senke 6 und die (gestrichelt dargestellten) Pfeile aus der Quelle und in die Senke einführen. Im Hinblick auf die Modellierung in Abschnitt 4.2 ist die Existenz einer einzigen Senke erforderlich, die einer einzigen Quelle optional.

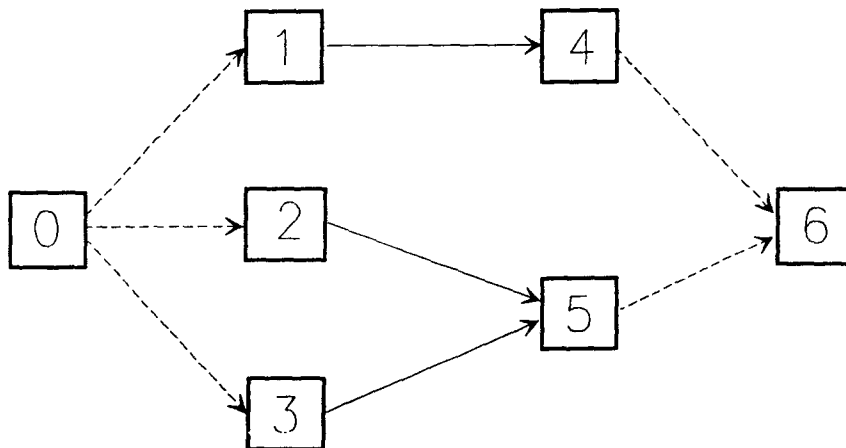


Abb. 2: Integriertes Netzwerk

Zwischen jeweils zwei Vorgängen h und i können unterschiedliche Arten von Anordnungsbeziehungen vorliegen. In Abb. 1 und 2 bedeutet jeder Pfeil, daß vom Ende eines Vorgangs bis zum Beginn des Folgevorgangs mindestens eine bestimmte Anzahl von Zeiteinheiten (hier 0) verstreichen muß. Diese Anordnungsbeziehung bezeichnet man auch als Mindest-Normalfolge.

In Tab. 1 sind die acht wichtigsten Arten von Folgebeziehungen wiedergegeben. Neben der Normalfolge gehören die Anfangs-, die End- und die Sprungfolge dazu. Jede dieser vier Folgebeziehungen kann entweder einen Mindest- oder einen Höchstabstand darstellen.

| Beschreibung | Bezeichnung |
|--|--------------|
| Mindestabstand von Anfang h bis Anfang i | Anfangsfolge |
| Maximalabstand von Anfang h bis Anfang i | Anfangsfolge |
| Mindestabstand von Ende h bis Anfang i | Normalfolge |
| Maximalabstand von Ende h bis Anfang i | Normalfolge |
| Mindestabstand von Ende h bis Ende i | Endfolge |
| Maximalabstand von Ende h bis Ende i | Endfolge |
| Mindestabstand von Anfang h bis Ende i | Sprungfolge |
| Maximalabstand von Anfang h bis Ende i | Sprungfolge |

Tab. 1: Arten von Anordnungsbeziehungen

Im folgenden verwenden wir für die unterschiedlichen Typen von Pfeilen und ihre Bewertungen folgende **Bezeichnungen**:

- t_{hi}^A bzw. \bar{t}_{hi}^A für Mindest- bzw. Maximalabstand bei Anfangsfolge
- t_{hi} bzw. \bar{t}_{hi} für Mindest- bzw. Maximalabstand bei Normalfolge
- t_{hi}^E bzw. \bar{t}_{hi}^E für Mindest- bzw. Maximalabstand bei Endfolge
- t_{hi}^S bzw. \bar{t}_{hi}^S für Mindest- bzw. Maximalabstand bei Sprungfolge

Unter Verwendung dieser Notation wären wir dazu in der Lage, in Abb. 2 z.B. folgende **zeitliche Anforderungen** darzustellen:

- Arbeitsgang 1 (von Auftrag bzw. Projekt 1) darf im Planungszeitpunkt beginnen ($t_{01}^A = 0$); Arbeitsgang 4 muß spätestens im Zeitpunkt 15 abgeschlossen sein ($\bar{t}_{04}^S = 15$).
- Die Arbeitsgänge 2 und 3 dürfen frühestens im Zeitpunkt 5 beginnen ($t_{02}^A = t_{03}^A = 5$); Auftrag 2 muß spätestens im Zeitpunkt 25 abgeschlossen sein ($\bar{t}_{05}^S = 25$).

Somit sind also auftragsspezifische Start- und Endtermine sehr einfach darstellbar. Darüber hinaus kann man damit auch Meilensteine, d.h. besonders wichtige Zeitpunkte im Projektablauf, genau fixieren.

Durch einfache Umrechnungen lassen sich die unterschiedlichen Arten von Folgebeziehungen beliebig ineinander transformieren. In Tab. 2 sind die Umrechnungsformeln zum Typ Mindest-Normalfolge wiedergegeben (vgl. auch Domschke / Drexl, 1991 a, S. 88).

| gegebener Wert | umgerechnet zu |
|--------------------------------|---|
| t_{hi}^A \bar{t}_{hi}^A | $t_{hi} = t_{hi}^A - d_h$ $t_{ih} = -\bar{t}_{hi}^A - d_i$ |
| t_{hi} \bar{t}_{hi} | t_{hi} $t_{ih} = -\bar{t}_{hi} - d_h - d_i$ |
| t_{hi}^E \bar{t}_{hi}^E | $t_{hi} = t_{hi}^E - d_i$ $t_{ih} = -\bar{t}_{hi}^E - d_h$ |
| t_{hi}^S \bar{t}_{hi}^S | $t_{hi} = t_{hi}^S - d_h - d_i$ $t_{ih} = -\bar{t}_{hi}^S$ |

Tab. 2: Umrechnungsformeln

Als **Fazit** ist festzuhalten, daß 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 kann. Die Reihenfolgebeziehungen können dabei durch geeignete Transformationen einheitlich dargestellt werden.

3. Zur Bedeutung der Kapazitätsplanung

In der Netzplantechnik unterscheidet man folgende Arten bzw. Stufen der Planung (zu Details vgl. *Domschke / Drexel*, 1991 a, S. 82 ff.):

- **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 gleichzeitig kostenminimalen Plan).

Die skizzierten Abhängigkeiten zwischen den einzelnen Planungsarten lassen sich mit Hilfe des "Zwiebelmodells" von Abb. 3 veranschaulichen.

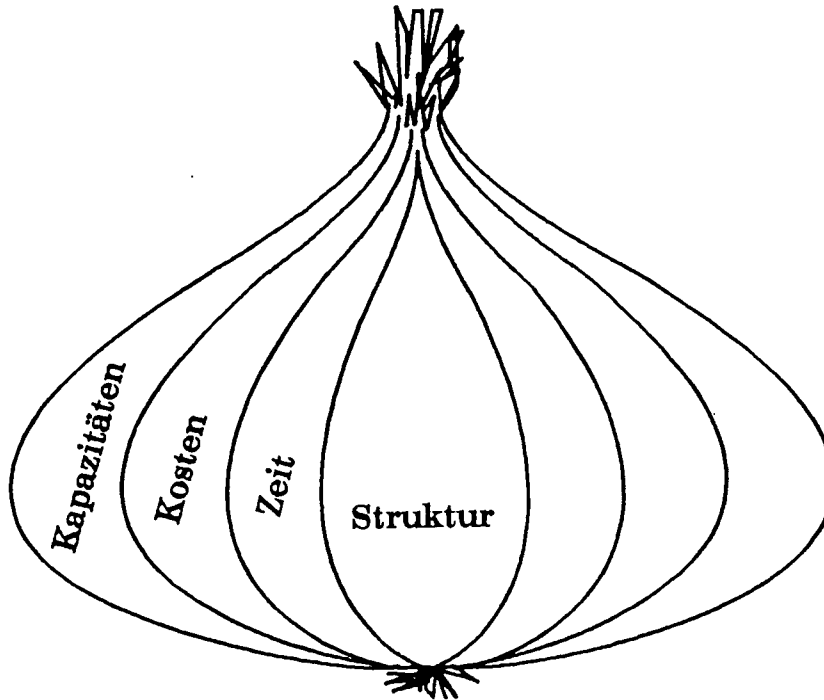


Abb. 3: Zwiebelmodell der Netzplantechnik

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

- Die Kapazitätsplanung ist (im Hinblick auf Abb. 3) am allgemeinsten und damit 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 PPS ist damit die wichtigste Möglichkeit der "Kapazitätserweiterung" (**ökonomisches Argument**).

4. Ein Kapazitätsplanungsmodell

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 Arbeitsgänge nur an a priori bekannten Stellen oder beliebig oft unterbrochen werden dürfen (Details hierzu findet man in *Domschke / Drexl*, 1991 b).

4.1 Annahmen

Im einzelnen gehen wir von folgenden Prämissen aus:

- Gegeben sei ein Projekt (bzw. ein integriertes Netzwerk), bestehend aus $j = 1, \dots, J$ Vorgängen. J sei die einzige Senke.
- V_j (M_j) sei die Menge der Vorgang j unmittelbar vorausgehenden (nachfolgenden) Vorgänge.
- Aus Vereinfachungsgründen seien alle Pfeile vom Typ Mindest-Normalfolge; ihre Bewertung sei gleich Null. Das Netzwerk sei zyklensfrei.
- Die einzelnen Vorgänge können ggf. auf mehr als eine Art und Weise (Modus) ausgeführt werden; für Vorgang j stehen $m = 1, \dots, M_j$ Modi zur Verfügung. Damit können unterschiedliche Arbeitspläne je Vorgang abgebildet werden (siehe auch Abschnitt 4.3).
- Vorgang j dauert d_{jm} Zeiteinheiten (ZE) im Modus m .
- Es stehen $|R|$ erneuerbare (mit beschränkter Periodenkapazität; z.B. Personal und Betriebsmittel) und $|N|$ nicht - erneuerbare (beschränkte Gesamtkapazität; z.B. Budget) Ressourcen zur Verfügung.
- Von Ressource $r \in R$ sind κ_r Einheiten pro Periode verfügbar; Vorgang j gebraucht während der Ausführung in Modus m pro Periode k_{jmr} Einheiten.
- Von Ressource $r \in N$ sind insgesamt K_r Einheiten vorhanden; Vorgang j verbraucht während der Ausführung in Modus m pro Periode k_{jmr} Einheiten.

Als **Zielsetzung** werde verfolgt, die Durchlaufzeit des Auftrages (= makespan) zu minimieren. Für diese Zielsetzung sprechen vor allem folgende Gründe:

- Kurze Projektlaufzeiten führen insofern zu einer Komplexitätsreduktion, als dann zu einem bestimmten Zeitpunkt vergleichsweise weniger Projekte parallel zu bearbeiten sind (z.B. vier Projekte parallel während eines halben Jahres vs. je zwei Projekte parallel innerhalb von drei Monaten).
- Zahlungsvereinbarungen sehen i.a. vor, daß ein erheblicher Teil (90 % und mehr) des Erlöses erst bei Auslieferung fällig wird. Kurze Projektlaufzeiten 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 Projektlaufzeiten führen damit implizit zu einer Reduzierung der Datenunsicherheit.

- Sieht man einen zeitlichen Puffer zwischen voraussichtlicher Fertigstellung und vereinbarter Auslieferung vor, so reduziert sich 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).

4.2 Modellformulierung

Für die Formulierung des Modells benötigen wir je Vorgang j das Intervall zwischen dem frühest möglichen und dem spätest zulässigen Fertigstellungszeitpunkt $[FE_j, SE_j]$, im folgenden als **Zeitfenster** bezeichnet. Für unser (zyklenfreies) Netzwerk (ohne Mindest- und Höchstabstände) verwendet man zur Berechnung der FE_j eine einfache Vorwärtsrekursion auf Basis der kürzesten Dauer je Vorgang. Nach Bestimmung einer oberen Schranke \bar{T} für die Durchlaufzeit werden die SE_j (ebenfalls auf Basis der kürzesten Dauer je Vorgang) mit einer einfachen Rückwärtsrekursion ermittelt (vgl. hierzu z.B. *Domschke / Drexel*, 1991 a, S. 89 ff. sowie das folgende Beispiel).

Unter Verwendung von Binärvariablen $x_{jmt} := 1$, falls Vorgang j in Modus m bearbeitet und in Periode t beendet wird (0, sonst), erhalten wir folgendes Modell:

$$\text{Minimiere } Z(\mathbf{x}) = \sum_{m=1}^{M_j} \sum_{t=FE_j}^{SE_j} t \cdot x_{jmt} \quad (1)$$

unter den Nebenbedingungen

$$\sum_{m=1}^{M_j} \sum_{t=FE_j}^{SE_j} x_{jmt} = 1 \quad (\forall j) \quad (2)$$

$$\sum_{m=1}^{M_h} \sum_{t=FE_h}^{SE_h} t \cdot x_{hmt} \leq \sum_{m=1}^{M_j} \sum_{t=FE_j}^{SE_j} (t - d_{jm}) x_{jmt} \quad (\forall j \text{ und } h \in \mathcal{V}_j) \quad (3)$$

$$\sum_{j=1}^J \sum_{m=1}^{M_j} k_{jmr} \sum_{q=t}^{t+d_{jm}-1} x_{jmq} \leq \kappa_r \quad (\forall r \in R \text{ und } t \in \{1, \dots, \bar{T}\}) \quad (4)$$

$$\sum_{j=1}^J \sum_{m=1}^{M_j} k_{jmr} d_{jm} \sum_{t=FE_j}^{SE_j} x_{jmt} \leq K_r \quad (\forall r \in N) \quad (5)$$

$$x_{jmt} \in \{0,1\} \quad (\forall j, m \text{ und } t) \quad (6)$$

Die Zielfunktion (1) führt zur Minimierung der Durchlaufzeit des Auftrages. (2) stellt sicher, daß jeder Vorgang genau einmal bearbeitet wird. (3) sorgt für die Einhaltung der Reihenfolgebeziehungen. (4) garantiert, daß die Periodenkapazitäten ausreichen. (5) sichert die Einhaltung der Gesamtkapazitäten.

4.3 Beispiel

Der in Abb. 2 dargestellte Netzplan zweier Aufträge bzw. eines integrierten (Gesamt-) Auftrages gibt die Reihenfolgebeziehungen zwischen den Endprodukten (EP) 4, 5 und den Baugruppen (BG) 1 bis 3 wieder. Bei der Montage von EP 5 werden BG 2 und 3, bei EP 4 wird BG 1 verwendet. EP 5 kann wahlweise von einem oder zwei Monteuren (in 5 bzw. 3 ZE), EP 4 nur von einem Monteur (in 4 ZE) montiert werden. BG 2 wird auf einer manuellen Fräsmaschine (FM) (in 3 ZE) gefertigt, BG 1 bzw. 3 können sowohl auf der manuellen FM (in 4 bzw. 5 ZE) als auch auf einer (produktiveren) numerisch gesteuerten FM (in jeweils 2 ZE) gefertigt werden. Unter Einhaltung der zur Verfügung stehenden (knappen) erneuerbaren Ressourcen (eine manuelle FM, eine numerisch gesteuerte FM und zwei Monteure) soll ein Ablaufplan mit kürzester Durchlaufzeit (Ende des fiktiven Vorgangs 6) bestimmt werden. Tab. 3 enthält die Daten des Beispiels (ohne fiktive Vorgänge; "-" entspricht der leeren Menge \emptyset).

| j | 1(=BG) | 2(=BG) | 3(=BG) | 4(=EP) | 5(=EP) | |
|-----------------|------------|----------|------------|----------|------------|-------------------------|
| \mathcal{V}_j | — | — | — | {1} | {2,3} | |
| m | 1 2 | 1 | 1 2 | 1 | 1 2 | |
| d_{jm} | 4 <u>2</u> | <u>3</u> | 5 <u>2</u> | <u>4</u> | 5 <u>3</u> | |
| k_{jm1} | 1 0 | 1 | 1 0 | 0 | 0 0 | $\kappa_1=1$ (FM, man.) |
| k_{jm2} | 0 1 | 0 | 0 1 | 0 | 0 0 | $\kappa_2=1$ (FM, num.) |
| k_{jm3} | 0 0 | 0 | 0 0 | 1 | 1 2 | $\kappa_3=2$ (Monteure) |

Tab. 3: Beispieldaten mit $|R| = 3$ sowie $|N| = 0$

Die für die Vorwärts- und Rückwärtsrekursion erforderliche kürzeste Dauer δ_j von Vorgang j ermittelt sich gemäß $\delta_j := \min \{d_{jm} \mid m = 1, \dots, M_j\}$ und ist in Tab. 3 durch Unterstreichen hervorgehoben.

Die Vorwärtsrekursion bestimmt nach Setzen von $FE_0 := 0$ die frühesten Endzeitpunkte der Vorgänge gemäß $FE_j := \max \{FE_i \mid i \in \mathcal{V}_j\} + \delta_j$.

Für die Rückwärtsrekursion ermitteln wir eine erste obere Schranke \bar{T} anhand der Überlegung, daß (im vorliegenden Fall $|N| = 0$) durch eine Hintereinanderreihung der Vorgänge jeder Vorgang in dem Modus mit der kürzesten Dauer ausgeführt werden kann. Wir erhalten damit $\bar{T} = 2+3+2+4+3 = 14$. Wie sich später zeigen wird, ist dieser Wert relativ schlecht. Für die Modellformulierung besitzt das den Nachteil einer großen

Variablenzahl. Um die Zahl der Binärvariablen zu reduzieren, greifen wir den Ausführungen von Abschnitt 5, in dem wir spezielle Verfahren zur Lösung des Problems vorstellen, voraus und verwenden die dort ermittelte (heuristische) Lösung von $\bar{T} := 9$ als obere Schranke. Vorgang 6 muß zu diesem Zeitpunkt fertiggestellt sein, weshalb wir $SE_6 := \bar{T}$ setzen. Die spätesten Endzeitpunkte der anderen Vorgänge errechnen sich dann gemäß $SE_j := \min \{SE_i - \delta_i \mid i \in \mathcal{N}_j\}$.

Das Ergebnis der Vorwärts- und Rückwärtsrekursion, d.h. die Zeitfenster der Vorgänge, zeigt Tab. 4.

| j | 0 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 |
|-----------------|---|---|---|---|---|---|---|
| FE _j | 0 | 2 | 3 | 2 | 6 | 6 | 6 |
| SE _j | 5 | 5 | 6 | 6 | 9 | 9 | 9 |

Tab. 4: Zeitfenster der Vorgänge

Wir erhalten damit für unser Beispiel die in Tab. 5 dargestellten Variablen (= Spalten des zu (1) - (5) gehörenden Tableaus). Der fiktive Vorgang 0 kann der Einfachheit halber weggelassen werden, der fiktive Vorgang 6 wird natürlich nur in einem Modus "ausgeführt".

| j | m | x _{jmt} | | | | |
|---|---|------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|
| 1 | 1 | x ₁₁₂ | x ₁₁₃ | x ₁₁₄ | x ₁₁₅ | |
| | 2 | x ₁₂₂ | x ₁₂₃ | x ₁₂₄ | x ₁₂₅ | |
| 2 | 1 | x ₂₁₃ | x ₂₁₄ | x ₂₁₅ | x ₂₁₆ | |
| | 2 | x ₃₁₂ | x ₃₁₃ | x ₃₁₄ | x ₃₁₅ | x ₃₁₆ |
| 3 | 1 | x ₃₂₂ | x ₃₂₃ | x ₃₂₄ | x ₃₂₅ | x ₃₂₆ |
| | 2 | x ₄₁₆ | x ₄₁₇ | x ₄₁₈ | x ₄₁₉ | |
| 4 | 1 | x ₅₁₆ | x ₅₁₇ | x ₅₁₈ | x ₅₁₉ | |
| | 2 | x ₅₂₆ | x ₅₂₇ | x ₅₂₈ | x ₅₂₉ | |
| 5 | 1 | x ₆₁₆ | x ₆₁₇ | x ₆₁₈ | x ₆₁₉ | |
| | 2 | | | | | |

Tab. 5: Variablen des Beispiels

Unter Verwendung der Variablen ist die Koeffizientenmatrix (1) - (5) sehr einfach vollständig aufstellbar, worauf wir jedoch aus Platzgründen verzichten. Insgesamt ergeben sich 38 Binärvariablen und 38 Nebenbedingungen, davon 6, 5 bzw. 27 vom Typ (2), (3) bzw. (4). (Durch eine "sparsamere" Formulierung ließe sich übrigens die Anzahl der Variablen auf 31 und die Anzahl der Nebenbedingungen auf 30 verringern.)

In Abschnitt 5 werden wir uns mit Lösungsmöglichkeiten beschäftigen.

4.4 Spezialfälle

Viele in der Literatur behandelte Probleme sind als Spezialfälle von (1) – (6) darstellbar. Dazu gehören Kapazitätsplanungsprobleme mit einem Modus (je Vorgang) und (nur) erneuerbaren Ressourcen (vgl. z.B. *Alvarez-Valdes / Tamarit*, 1989), Maschinenbelegungsprobleme bei Werkstatt- und Fließfertigung (Job Shop- und Flow Shop-Problem; vgl. z.B. *Baker*, 1974 sowie *Seelbach*, 1975) sowie die Auftragsreihenfolgeplanung an einer Maschine (siehe z.B. *French*, 1982). In der Regel sind spezielle (Modelle und) Methoden effizienter, dennoch wollen wir aus didaktischen Gründen die Darstellung des Job Shop- (*Baker*, 1974, S. 268; *Drexl*, 1990; *Slowinski et al.*, 1991) und Flow Shop-Problems (*Drexl*, 1990) innerhalb des in Abschnitt 4.2 verwendeten Modellierungsrahmens zeigen.

Bei beiden Problemstellungen geht man davon aus, daß A ($a=1, \dots, A$) Aufträge und I ($i=1, \dots, I$) Maschinen vorliegen; jeder Auftrag muß genau einmal auf jeder Maschine b_{ai} ZE ohne Unterbrechung bearbeitet werden. Zu einem Zeitpunkt kann jede Maschine höchstens einem Auftrag und jeder Auftrag höchstens einer Maschine zugeordnet werden. Die Reihenfolge, in der ein Auftrag auf den A Maschinen zu bearbeiten ist, bezeichnet man als **Maschinenfolge**. Bei der Werkstattfertigung besitzt jeder Auftrag eine andere Maschinenfolge, während bei der Fließfertigung die Maschinenfolgen der Aufträge identisch sind (siehe auch *Kistner / Steven*, 1990).

| Auftrag | Maschinenfolge | Bearbeitungsdauern |
|---------|----------------|--------------------|
| 1 | 1, 2 | 3, 4 |
| 2 | 2, 1 | 2, 4 |

Tab. 6: Beispiel zum Job Shop-Problem (vgl. *Drexl*, 1990)

Gegeben sei das Job Shop-Problem in Tab. 6 mit $A = 2$ Aufträgen und $I = 2$ Maschinen. Auftrag 1 muß zunächst auf Maschine 1 (3 ZE) und danach auf Maschine 2 (4 ZE) bearbeitet werden; bei Auftrag 2 ist die Maschinenfolge umgekehrt. Das Job Shop-Problem ist als spezieller Datensatz von (1) – (6) darstellbar, indem man für jede Kombination von Auftrag und Maschine einen Vorgang (mit einem Modus) bildet. Die Daten des Kapazitätsplanungsproblems (mit $|R|=2$, $|N|=0$, und $J=4$, wobei die Vorgänge $j=1$ und 2 Auftrag 1, $j=3$ und 4 Auftrag 2 entsprechen) sind Tab. 7 zu entnehmen.

| j | 1 | 2 | 3 | 4 | |
|----------|---|-----|---|-----|-------------------------|
| v_j | – | {1} | – | {3} | |
| d_j | 3 | 4 | 2 | 4 | |
| k_{j1} | 1 | 0 | 0 | 1 | κ_1 (Maschine 1) |
| k_{j2} | 0 | 1 | 1 | 0 | κ_2 (Maschine 2) |

Tab. 7: Job Shop- als Kapazitätsplanungsproblem

Job Shop-Probleme sind also ein Spezialfall des Problems (1) - (6) mit $|N| = 0$, $|R| = I$, $M_j = 1$ für alle j ($\Rightarrow d_j := d_{j1}$), $\kappa_r = 1$ für alle r , Kapazitätsbedarfen von 0 oder 1 sowie speziellen Reihenfolgebeziehungen.

Entsprechend ergibt sich aus dem Flow Shop-Problem in Tab. 8 das Kapazitätsplanungsproblem von Tab. 9. Die identische Maschinenfolge aller Aufträge hat bei sonst gleichen Daten zu einer anderen Besetzung der letzten beiden Zeilen (k_{j1} , k_{j2}) geführt.

| Auftrag | Maschinenfolge | Bearbeitungsdauern |
|---------|----------------|--------------------|
| 1 | 1,2 | 3,4 |
| 2 | 1,2 | 2,4 |

Tab. 8: Beispiel zum Flow Shop-Problem (vgl. Drexel, 1990)

| j | 1 | 2 | 3 | 4 | |
|----------|---|-----|---|-----|-------------------------|
| ν_j | — | {1} | — | {3} | |
| d_j | 3 | 4 | 2 | 4 | |
| k_{j1} | 1 | 0 | 1 | 0 | κ_1 (Maschine 1) |
| k_{j2} | 0 | 1 | 0 | 1 | κ_2 (Maschine 2) |

Tab. 9: Flow Shop- als Kapazitätsplanungsproblem

4.5 Faktorkombinationen als Modi

Die Modellierung alternativer Modi je Vorgang bietet die Möglichkeit, unterschiedliche Faktorkombinationen (Arbeitspläne) abzubilden. Dadurch erhöht sich die Anzahl der Planungsalternativen und es werden tendenziell bessere Lösungen erzielt (vgl. Ahn / Kusiak, 1991; Li / Willis, 1991).

Abb. 4 zeigt das Verhältnis zwischem dem Einsatz einer Ressource bzw. eines Faktors $r=1$ und der (zur Ausbringungsmenge umgekehrt proportionalen) Dauer von Vorgang $j=1$. Die effizienten Produktionspunkte A, B und C sind in Tab. 10 als Modi des Vorgangs $j=1$ abgebildet; der Produktionspunkt D ist ineffizient, weil er bei gleicher Vorgangsdauer eine Ressourceneinheit mehr ge- oder verbraucht als Produktionspunkt B. Die Abhängigkeit zwischen Vorgangsdauer und Ressourcenbeanspruchung wird in der Literatur zur Kapazitätsplanung auch als "time-resource-tradeoff" bezeichnet (vgl. Drexel / Domschke, 1991 b). Für Vorgang 5 des Beispiels in Abschnitt 4.2 besteht die Möglichkeit eines derartigen Tradeoffs.

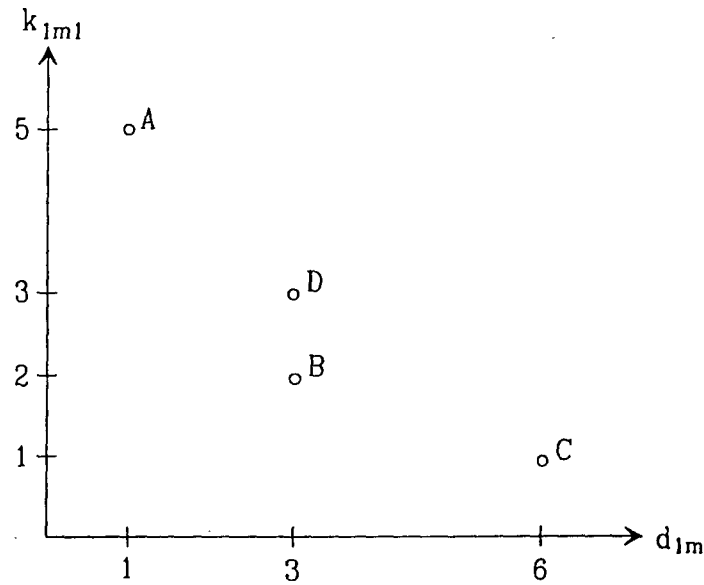


Abb. 4: Interaktion von Vorgangsdauer und Ressourcenverbrauch

| m | 1 | 2 | 3 |
|-----------|---|---|---|
| d_{1m} | 1 | 3 | 6 |
| k_{1m1} | 5 | 2 | 1 |

Tab. 10: Produktionspunkte eines Vorgangs

Als "resource-resource-tradeoff" kann man verschiedene Faktoreinsatzkombinationen bei identischer Dauer bezeichnen. In der Produktionstheorie spricht man in diesem Fall von Isoquanten (vgl. z.B. Fandel, 1991, S. 53). Das Faktordiagramm in Abb. 5 zeigt die Isoquanten für die Dauern 6 (Punkte A, B, C) und 2 (Punkte D, E, F) von Vorgang $j=1$ hinsichtlich der Ressourcen $r=1$ und $r=2$.

In Tab. 11 sind die in Abb. 5 dargestellten tradeoffs (vom Typ resource-resource auf den Isoquanten und vom Typ time-resource z.B. beim Übergang vom Produktionspunkt A nach D) als Modi von Vorgang $j=1$ angegeben.

| m | 1(A) | 2(B) | 3(C) | 4(D) | 5(E) | 6(F) |
|-----------|------|------|------|------|------|------|
| d_{1m} | 6 | 6 | 6 | 2 | 2 | 2 |
| k_{1m1} | 1 | 4 | 8 | 4 | 5 | 10 |
| k_{1m2} | 8 | 2 | 1 | 8 | 4 | 2 |

Tab. 11: Resource-resource- sowie time-resource-tradeoffs

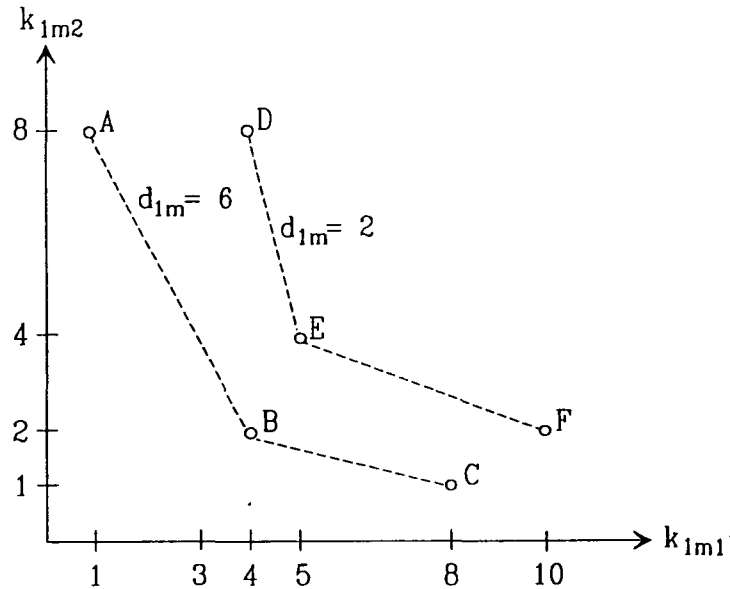


Abb. 5: Isoquanten im Faktordiagramm

5. Lösungsverfahren

5.1 Überblick

Für die Lösung des Problems (1) - (6) existieren neben Standardmethoden zur binären Optimierung ein spezielles exaktes und mehrere heuristische Lösungsverfahren. Standardmethoden basieren i.d.R. auf Branch & Bound (B & B) mit LP-Relaxation (vgl. z.B. Domschke / Drexl, 1991 a, S. 144 ff.). Das spezielle **exakte Verfahren** ist ein B & B-Verfahren, das simultan über Vorgangsreihenfolgen und Modusauswahl entscheidet. Treten hinsichtlich der Kapazitätsrestriktionen Unzulässigkeiten auf, so wird die letzte Einplanung rückgängig gemacht (vgl. Patterson et al., 1989, 1990). Da es sich hier um ein "schwer lösbares" (NP-vollständiges) Problem handelt, sind selbst "kleine" Probleme nicht mehr mit vertretbarem Rechenaufwand optimal zu lösen.

Heuristiken kann man danach unterscheiden, ob sie eine zulässige Ausgangslösung erzeugen oder darauf aufbauend versuchen, die Ausgangslösung zu verbessern (Domschke, 1990, S. 14 ff.):

- Verfahren zur Erzeugung einer zulässigen Ausgangslösung
 - Unvollständig exakte Verfahren auf der Grundlage von B & B (Patterson et al. 1989, 1990; Slowinski et al., 1991)
 - Deterministische und stochastische Prioritätsregelverfahren (Drexl / Grünewald, 1991, Slowinski et al., 1991)

- Verbesserungsverfahren
 - Simulated Annealing (*Slowinski et al.*, 1991)

5.2 Aufbau und Arbeitsweise von Prioritätsregelverfahren

Wir beschreiben zunächst die prinzipielle Vorgehensweise von Prioritätsregelverfahren bei der Lösung von Problemen des Typs (1) – (6) mit $M_j = 1$ für alle j sowie $|N|=0$.

Bei Prioritätsregelverfahren wird in jedem Planungszeitpunkt 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 unterscheidet zwei Verfahrensvarianten (*Baker*, 1974; *Kelley*, 1963):

- **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.

Beide Verfahren erweitern eine **Teillösung** (besteht aus bereits eingeplanten Vorgängen) durch Einplanen weiterer Vorgänge, bis eine zulässige Lösung erzeugt worden ist (*Schrage*, 1969). Aus zwei Gründen werden i.d.R. parallele gegenüber seriellen Verfahren bevorzugt.

- Der Rechen- und Speicheraufwand ist geringer, weil nur die (noch) verfügbaren Kapazitäten einer Periode gespeichert und verglichen werden müssen.
- Parallele Verfahren haben bei bisherigen Untersuchungen durchschnittlich bessere Ergebnisse erzielt (vgl. z.B. *Alvarez-Valdes / Tamarit*, 1989).

Sowohl serielle als auch parallele Verfahren können entweder deterministisch jeweils einen Vorgang auswählen, oder den Prioritätswert mit einer probabilistischen Komponente verknüpfen (siehe auch *Hart / Shogan*, 1987; *Drexel / Grünwald*, 1991; *Feo et al.*, 1991). 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.

Zum Verständnis der formalen Beschreibung des **parallelen deterministischen Verfahrens** sind folgende Hinweise notwendig:

- Beginnend mit Zeitpunkt $t = 0$ werden so lange Vorgänge für einen Start in t ausgewählt, bis es keine einplanbaren Vorgänge mehr gibt (weil (3) oder (4) bei Aufnahme eines weiteren Vorgangs verletzt würden). Der (gemeinsame) Anfangszeitpunkt der ausgewählten Vorgänge ist t , der jeweilige Endzeitpunkt (EZ_j) ist dann $EZ_j := t + d_j$.
- Der nächste Zeitpunkt, in dem erneut Vorgänge ausgewählt werden können, ist das früheste Bearbeitungsende eines der aktiven Vorgänge. Sobald alle Vorgänge entweder "bearbeitet" oder "aktiv" sind, hat das Verfahren eine zulässige Lösung ermittelt.

Für Kapazitätsplanungsprobleme (1) - (6) mit $M_j \geq 1$ für alle j und $|N| > 0$ ist der parallele Planungsrahmen in zwei Punkten zu erweitern:

- Da für (einen Teil der) Vorgänge nicht nur der Start- bzw. Endzeitpunkt, sondern auch der Modus ausgewählt werden muß, wird jede einplanbare Kombination von Vorgang und zugehörigem Modus (**Einplanungsvariante**) betrachtet (vgl. Drexl / Grünewald, 1991).
- Bei der Bildung der Einplanungsvarianten sind außer den Nebenbedingungen (3) und (4) die knappen nicht - erneuerbaren Ressourcen zu berücksichtigen (Nebenbedingung (5)). Im Gegensatz zu Problemen ohne (knappe) nicht-erneuerbare Ressourcen ist die Existenz einer zulässigen Lösung nicht mehr gewährleistet. Es handelt sich um ein sogenanntes "**Constraint Satisfaction Problem**", d.h. selbst das Bestimmen einer zulässigen Lösung (feasibility problem) ist ein NP-vollständiges Problem (vgl. Maes et al., 1991). Wenn (einige) nicht - erneuerbare Ressourcen sehr knapp sind, ist es deshalb sinnvoll, Prioritätsregeln zu verwenden, die Einplanungsvarianten mit einem geringen Verbrauch an knappen nicht - erneuerbaren Ressourcen auswählen. Auf unterschiedliche Prioritätsregeln wird in Abschnitt 5.5 eingegangen.

5.3 Detaillierte Verfahrensbeschreibung

Zur formalen Beschreibung des parallelen Verfahrens benötigen wir die folgenden (weiteren) **Bezeichnungen**:

| | |
|------------------|--|
| t | aktueller Einplanungszeitpunkt |
| $\mu(j)$ | Modus, in dem Vorgang j bearbeitet wird |
| $[j,m]$ | Einplanungsvariante (von Vorgang j in Modus m) |
| $P[j,m]$ | Priorität von Einplanungsvariante $[j,m]$ |
| EZ_j | Zeitpunkt, in dem Vorgang j fertiggestellt wird |
| π_{κ_r} | Aktuell verfügbare (Rest-) Periodenkapazität der Ressource $r \in R$ |

| | |
|--------|---|
| GK_r | Aktuell verfügbare (Rest-) Gesamtkapazität der Ressource $r \in N$ |
| AV | Menge der aktuell aktiven Vorgänge |
| BV | Menge der aktuell beendeten Vorgänge |
| JM | Menge der Einplanungsvarianten |
| | $JM := \{[j,m] \mid j \notin \{AV \cup BV\}, \mathcal{V}_j \subseteq BV \text{ und } m = 1, \dots, M_j : \\ k_{jmr} \leq \pi\kappa_r \forall r \in R \text{ und } d_{jm} \cdot k_{jmr} \leq GK_r \forall r \in N\}$ |

Paralleles Prioritätsregelverfahren

Initialisierung:

$t := 0; AV := BV := JM := \phi;$
 $\pi\kappa_r := \kappa_r \text{ für alle } r \in R; GK_r := K_r \text{ für alle } r \in N.$

Durchführung:

- (1a) Bestimmung aller (aktuellen) Einplanungsvarianten
 Ermittle JM; falls $JM = \phi$, gehe zu (2).
 - (b) Prioritätswerte der Einplanungsvarianten ermitteln
 $P[j,m]$ für alle $[j,m] \in JM$
 - (c) Auswahl der Einplanungsvariante mit minimalem Prioritätswert
 $[j^*, m^*]$ mit $P[j^*, m^*] := \min \{P[j,m] \mid [j,m] \in JM\}$
 - (d) Speicherung von Modus und Fertigstellungszeit sowie Aktualisierung
 $\mu(j^*) := m^*; EZ_{j^*} := t + d_{j^*\mu(j^*)}; AV := AV \cup \{j^*\};$
 $\pi\kappa_r := \pi\kappa_r - k_{j^*\mu(j^*)r} \text{ für alle } r \in R;$
 $GK_r := GK_r - d_{j^*\mu(j^*)} \cdot k_{j^*\mu(j^*)r} \text{ für alle } r \in N;$
 gehe zu (1a).
- (2) Bestimmung des nächsten Einplanungszeitpunktes sowie Aktualisierung
- Falls $|AV \cup BV| = J$, dann Ergebnis;
- falls $AV = \phi$, dann Abbruch;
- $t := \min \{EZ_j \mid j \in AV\};$
- $AV := AV \setminus \{j \mid EZ_j = t\};$
- $\pi\kappa_r := \pi\kappa_r + \sum \{k_{j\mu(j)r} \mid \text{alle } j \text{ mit } EZ_j = t\} \text{ für alle } r \in R;$
- gehe zu (1a).

Abbruch:

Es wurde keine zulässige Lösung gefunden.

Ergebnis:

Es wurde eine zulässige Lösung gefunden; EZ_j bzw. $\mu(j)$ ist der Fertigstellungszeitpunkt bzw. der zugeordnete Modus von Vorgang j , EZ_j die (Auftrags-) Durchlaufzeit.

* * * * *

In dem beschriebenen Verfahren werden nach jeder Einplanung (Schritt 1d) die Menge JM (Schritt 1a) und die Prioritätswerte der Elemente in JM (Schritt 1b) neu berechnet. Dadurch wird eine dynamische Prioritätswertberechnung in einem Einplanungszeitpunkt erreicht. Alternativ kann auch eine statische Prioritätswertberechnung in einem Zeitpunkt verwendet werden, indem man versucht, die Einplanungsvarianten in der den (einmal ermittelten) Prioritäten entsprechenden Reihenfolge einzuplanen. Eine Einplanungsvariante, die nicht (mehr) eingeplant werden kann, wird aus JM eliminiert (Alvarez-Valdes / Tamarit, 1989). Diese Möglichkeit verringert den Rechenaufwand, besitzt allerdings den Nachteil, daß eventuell nach nicht mehr aktuellen Prioritätswerten eingeplant wird.

In Schritt (1c) wird die Einplanungsvariante mit **minimalem Prioritätswert** bevorzugt ausgewählt. Diese Wahl ist sinnvoll im Hinblick auf die im folgenden näher betrachteten Prioritätsregeln.

5.4 Erläuterung an einem Beispiel

Mit dem (parallelen) Verfahren soll nun eine Lösung für das Beispiel von Abschnitt 4.2 errechnet werden. Als Prioritätsregel wird die (KOZ=) kürzeste Operationszeit-Regel, die die Einplanungsvariante mit der kleinsten Dauer auswählt, verwendet (vgl. Kistner / Steven, 1990). Bei Gleichheit wird die Einplanungsvariante mit kleinstem Index j ausgewählt.

Tab. 12 protokolliert den Verfahrensablauf. In Spalte 1 steht der Zeitpunkt t , Spalte 2 gibt den aktuellen Bestand der periodenbeschränkten Ressourcen wieder, in Spalte 3, 4 bzw. 5 befinden sich die zum Zeitpunkt t bereits bearbeiteten, die aktiven Vorgänge bzw. die Einplanungsvarianten. Spalte 6 enthält die Prioritätswerte, Spalte 7 die ausgewählte Einplanungsvariante und Spalte 8 deren Bearbeitungsende.

Als Ergebnis erhält man den in Abb. 6 als Gantt-Diagramm dargestellten Ablaufplan mit dem Zielfunktionswert von 9 Perioden. Zum Vergleich zeigt Abb. 7 den mit Hilfe von LINDO (vgl. Schrage, 1991) ermittelten optimalen Ablaufplan; er besitzt eine Dauer von 8 Perioden.

| t | $\pi\kappa_r$ | BV | AV | JM | P[j,m] | $[j,m^*]$ | EZ _{j,*} |
|---|---------------|---------------|----------|---------------------------------|-----------|-----------|-------------------|
| 0 | (1,1,2) | — | — | {[1,1],[1,2],[2,1],[3,1],[3,2]} | 4,2,3,5,2 | [1,2] | 2 |
| | (1,0,2) | — | {1} | {[2,1],[3,1]} | 3,5 | [2,1] | 3 |
| | (0,0,2) | — | {1,2} | — | | | |
| 2 | (0,1,2) | {1} | {2} | {[3,2],[4,1]} | 2,4 | [3,2] | 4 |
| | (0,0,2) | {1} | {2,3} | {[4,1]} | 4 | [4,1] | 6 |
| | (0,0,1) | {1} | {2,3,4} | — | | | |
| 3 | (1,0,1) | {1,2} | {3,4} | — | | | |
| 4 | (1,1,1) | {1,2,3} | {4} | {[5,1]} | 5 | [5,1] | 9 |
| | (1,1,0) | {1,2,3} | {4,5} | — | | | |
| 6 | (1,1,1) | {1,2,3,4} | {5} | — | | | |
| 9 | (1,1,2) | {1,2,3,4,5} | — | {[6,1]} | 0 | [6,1] | 9 |
| | (1,1,2) | {1,2,3,4,5,6} | Ergebnis | | | | |

Tab. 12: Protokoll zum Einplanungsverfahren

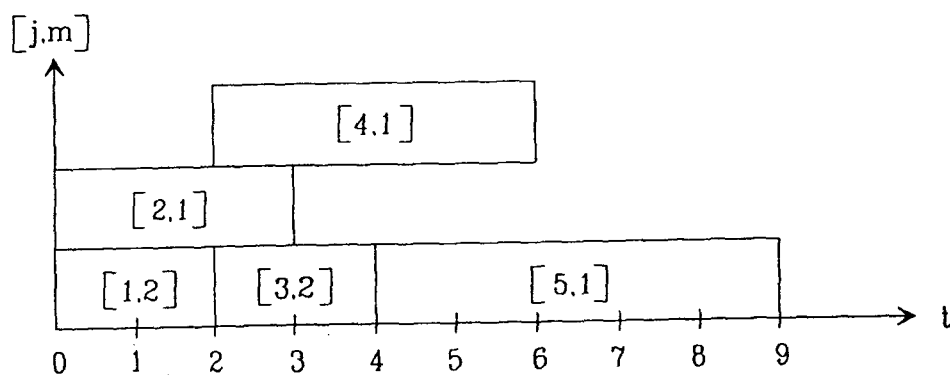


Abb. 6: Gantt-Diagramm der heuristischen Lösung

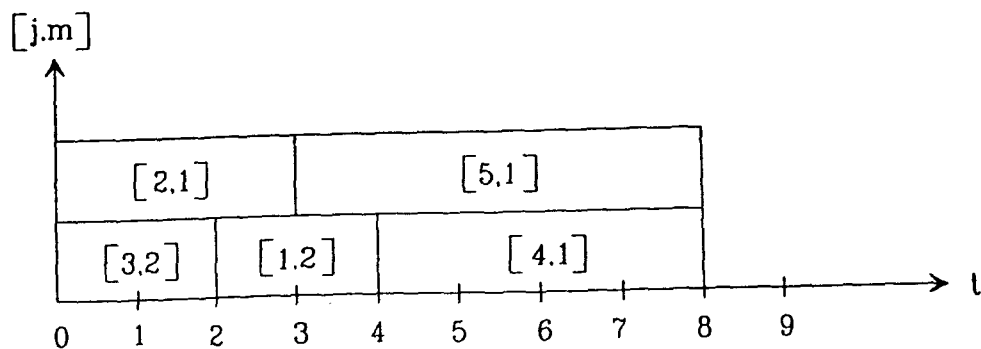


Abb. 7: Gantt-Diagramm der optimalen Lösung

5.5 Weitere Prioritätsregeln

Zur Auswahl eines Vorgangs bzw. einer Einplanungsvariante existieren neben der oben verwendeten KOZ-Regel zahlreiche Prioritätsregeln, die größtenteils aus der Literatur zur Maschinenbelegungsplanung (siehe z.B. Conway et al., 1967; Haupt, 1989), aber auch zu Kapazitätsplanungsproblemen mit $M_j = 1$ für alle j sowie $|N| = 0$ (vgl. z.B. Alvarez-Valdes / Tamarit, 1989) stammen.

Wir klassifizieren Prioritätsregeln nach den Eigenschaften statisch / dynamisch, lokal / global und danach, welche Daten (Struktur-, Zeit-, Kapazitätsdaten) verwendet werden (vgl. hierzu Panwalkar / Iskander, 1977; Slowinski, 1978; Lawrence / Morton, 1991). In Tab. 13 steht in Spalte 1 die Nummer der jeweiligen Regel, in Spalte 2 das Kriterium zur Prioritätswertberechnung, in Spalte 3 die Kennzeichnung als statisch (=S), dynamisch (=D), lokal (=L) bzw. global (=G), in Spalte 4 ein Hinweis auf die verwendeten Daten und in Spalte 5 die Quelle.

Statische Prioritätsregeln ermitteln unabhängig vom Planungszeitpunkt und/oder der aktuellen Teillösung für eine Einplanungsvariante immer den gleichen Prioritätswert, während **dynamische Prioritätsregeln** i.d.R. unterschiedliche Prioritätswerte für eine Einplanungsvariante errechnen. Ein Beispiel für eine statische Prioritätsregel ist die zur Lösung des obigen Beispiels verwendete KOZ-Regel, für eine dynamische Prioritätsregel die dynamische Schlupfzeit-Regel (Regel 2 in Tab. 13). Offensichtlich ermittelt die dynamische Schlupfzeit-Regel für die gleiche Einplanungsvariante in den (Einplanungs-) Zeitpunkten t und $t + \tau$ (mit $\tau > 0$) unterschiedliche Prioritätswerte.

Lokale Prioritätsregeln errechnen den Prioritätswert nur aus den Daten, die eine betrachtete Einplanungsvariante direkt betreffen (wie beispielsweise Dauer, Ressourcenverbrauch etc.), während **globale Prioritätsregeln** zusätzliche Daten (andere Einplanungsvarianten, noch verfügbare Kapazität, nicht nachgefragte Ressourcen etc.) verwenden. Die Anzahl der unmittelbaren (Regel 4 in Tab. 13) bzw. aller Nachfolger eines Vorgangs sind zwei verwandte Regeln, von denen die erste lokal, die zweite global ist (Cooper, 1976). Weil lokale Prioritätsregeln nur auf eine Einplanungsvariante und deren Daten fixiert sind, statt diese in Verbindung mit dem Gesamtproblem zu sehen, bezeichnet man lokale Prioritätsregeln auch als "myopisch" oder "kurzsichtig" (Lawrence / Morton, 1991; Kistner / Steven, 1990).

Vielfach werden auch mehrere Prioritätsregeln kombiniert. Kombinierte Regeln finden häufig dann Verwendung, wenn mehrere Ziele verfolgt werden (Gray / Hoseda, 1991) oder die Gefahr von Unzulässigkeiten besteht (beispielsweise "knappe" nicht-erneuerbare Ressourcen in (1) – (6)).

Generell kann man keine Aussagen über die Güte einzelner Regeln machen, sondern man muß Prioritätsregeln immer im Hinblick auf eine spezifische Problemstellung betrachten. Neben anderen Prioritätsregeln haben die in Tab. 13 aufgeführten Regeln 2 bis 4 für das

Kapazitätsplanungsproblem (1) - (6) mit $M_j = 1$ für alle j und $|N| = 0$ recht gute Ergebnisse geliefert (vgl. Davis / Patterson, 1975; Cooper, 1976; Patterson, 1976; Kurtulus / Davis, 1982; Alvarez-Valdes / Tamarit, 1989; Ulusoy / Özdamar, 1989). Umfangreiche Darstellungen von Prioritätsregeln findet man u.a. bei Panwalkar / Iskander, 1977; Haupt, 1989.

Regel 5, die in der angegebenen Form der oben verwendeten KOZ-Regel entspricht, hat sich in einer stochastisch modifizierten Version (unter Verwendung eines dauerorientierten Regretmaßes) bei der Lösung von (1) - (6) bewährt (vgl. Domschke / Drexel, 1991 b; Drexel / Grünwald, 1991).

| Nr. | P[.] | S/D/L/G | Daten | Quelle |
|-----|-------------------------|---------|---------------|------------------------------|
| 1 | $\sum_{r \in R} k_{jr}$ | S/L | Kapazität | Slowinski, 1978 |
| 2 | $SE_j - t - d_j$ | D/G | Struktur/Zeit | Davis/Patterson, 1975 |
| 3 | SE_j | S/G | Struktur/Zeit | Davis/Patterson, 1975 |
| 4 | $1/ N_j $ | S/L | Struktur | Alvarez-Valdes/Tamarit, 1989 |
| 5 | d_{jm} | S/L | Zeit | Drexel/Grünwald, 1991 |

Tab. 13: Ausgewählte Prioritätsregeln

Teil II: Leitstandskonzepte

Eine der interessantesten neuen Entwicklungen im Bereich computerintegrierter Fertigung (CIM) ist mit dem Begriff "Elektronischer Leitstand" verknüpft. Ein Leitstand ist ein computergestütztes Decision-Support-System (DSS) zur (kurzfristigen) Fertigungssteuerung, das neueste Möglichkeiten der Computergraphik verwendet.

Im folgenden beschreiben wir zunächst die wesentlichen Komponenten elektronischer Leitstände. Anschließend skizzieren wir einige der bedeutenderen Leitstandssysteme. Schließlich geben wir detaillierter die wesentlichen Komponenten des PRISMA-Montage-Leitstandes wieder.

6. Charakteristika elektronischer Leitstände

In Anlehnung an Kanet / Sridharan, 1990 sowie Adelsberger / Kanet, 1991, besitzen Leitstände (neben Möglichkeiten zur Erstellung von Statistiken, zum Druck von Arbeitsplänen usw.) im wesentlichen die Funktionen "Schedule Editor", "Datenbanksystem", "graphische, Generierungs- und Evaluierungskomponente".

6.1 Schedule Editor

Ein Schedule Editor ermöglicht die Eingabe spezifischer Daten und die manuelle Erstellung ganzer Ablaufpläne (=Schedules). Im einzelnen sollte er insbesondere folgende **Funktionen** bereitstellen:

- Eingabe der Arbeitspläne und der damit definierten Vorgänge sowie der zwischen ihnen bestehenden Reihenfolgebeziehungen; dabei werden vorrangig graphische Symbole verwendet. Auch das Hinzufügen und Löschen von Vorgängen ist einfach möglich.
- Alle relevanten Daten wie benötigtes Personal, erforderliche Maschinen, Rüst- und Bearbeitungszeiten usw. können unmittelbar eingegeben bzw. verändert werden.
- Manuelle Terminierung von Vorgängen bzw. ganzen Aufträgen mit automatischer Überprüfung der Restriktionen (Reihenfolgen, Termine, Kapazitäten). Der Benutzer kann so unmittelbar die Zulässigkeit erwünschter Änderungen überprüfen.
- Komfortable Editoren erlauben eine "animative Sensitivitätsanalyse". Dabei sieht der Benutzer über die Graphikschnittstellen unmittelbar die Auswirkungen auf Ressourcenprofile u.ä., die z.B. aus einer Verschiebung eines Vorganges resultieren.
- Über den Editor kann, z.B. wenn sich wichtige Daten infolge Teileverzug, Maschinenausfall usw. geändert haben, jederzeit eine Neuplanung "angestoßen" werden. Darüber hinaus muß eine revidierende Planung in vordefinierten Zeitabständen unterstützt werden.

Zeitgemäße Editoren stellen alle Funktionen über die Tastatur und eine Maus zur Verfügung.

6.2 Datenbanksystem

Ein Leitstand benötigt eine Reihe von Informationen; wichtige Daten sind:

- Marktorientierte Daten über vorliegende Aufträge oder zu erwartende Nachfragen.
- Stücklisten, Verwendungsnachweise sowie Arbeitspläne (vgl. dazu z.B. Zäpfel, 1991).
- Aktuelle Betriebsdaten über den Bearbeitungsstatus von Vorgängen (noch nicht begonnen, in Arbeit, erledigt), Maschinenzustand (Betriebsbereitschaft, Belegungszustand), Personalsituation usw.

Moderne Leitstände bieten einerseits dezentrale Datenerfassungsmöglichkeiten und haben andererseits einen Online-Zugriff auf alle relevanten Daten. Nur so ist die Aktualität und Genauigkeit der Planung sicherzustellen.

Zur Realisierung dieser Anforderungen müssen zum einen geeignete Schnittstellen (z.B. zu konventionellen PPS-Systemen und zur BDE=Betriebsdatenerfassung) vorgesehen

werden. Zum anderen sind mächtige Sprachkonstrukte erforderlich, die das Einfügen und Löschen von Daten sowie weitergehende Manipulationen erlauben. Diese Optionen machen aus einem reinen Datenhaltungssystem ein Datenbank-Management-System.

6.3 Graphische Komponente

Die graphische Komponente bietet unterschiedliche Sichtweisen auf Daten und Ergebnisse. Folgende sind von besonderer Bedeutung:

- Alle Vorgänge und die zwischen ihnen bestehenden Reihenfolgebeziehungen können (als Netzplan) graphisch dargestellt werden. Eine optische Hervorhebung (rote Farbe o.ä.) kritischer Wege ist von besonderer Bedeutung.
- Beim **Auftrags-Gantt** werden auf der Abszisse die Zeit und auf der Ordinate die Vorgänge abgetragen. Der (geplante oder aktuelle) zeitliche Ablauf wird so übersichtlich dargestellt. Abb. 7 zeigt das Auftrags-Gantt der optimalen Lösung für das Beispiel von Abschnitt 5.3.
- Beim **Ressourcen-Gantt** (Personal, Betriebsmittel usw.) werden auf der Abszisse ebenfalls die Zeit, auf der Ordinate jedoch die Ressourcen abgetragen. Für jede Ressource hat man so den Überblick über die Belegung im Zeitablauf. Abb. 8 enthält das Ressourcen-Gantt der optimalen Lösung für das Beispiel von Abschnitt 5.4 für die Ressourcen $r=1, 2$ bzw. 3 mit den jeweiligen Kapazitäten $\kappa_1 = 1$, $\kappa_2 = 1$ bzw. $\kappa_3 = 2$.

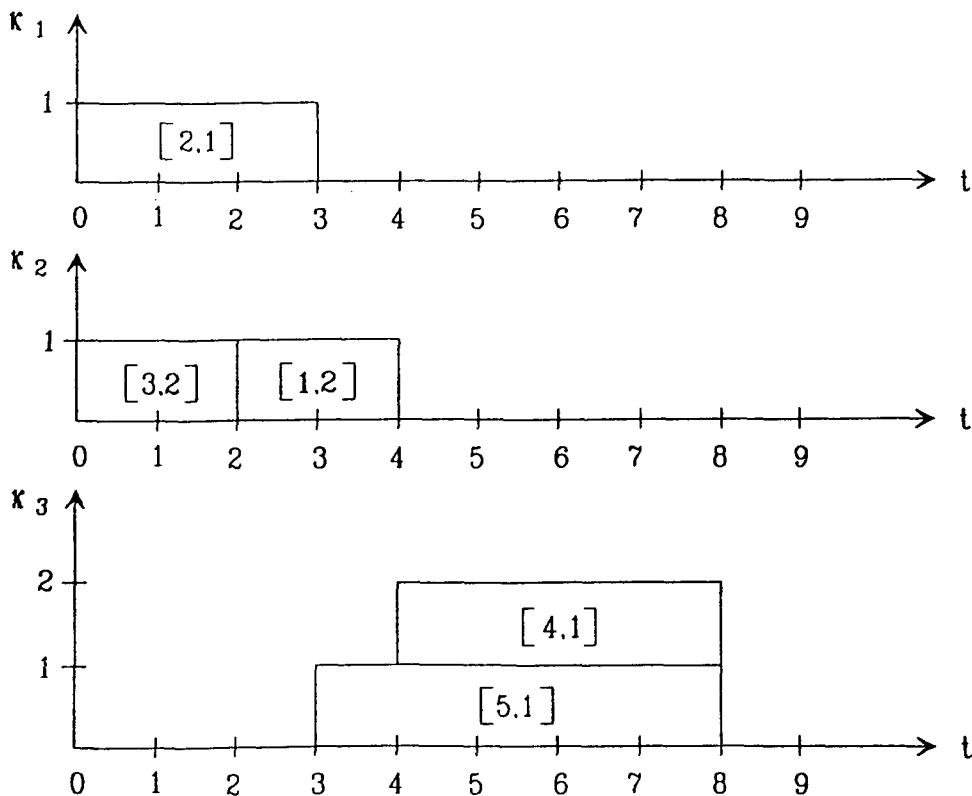


Abb. 8: Ressourcen-Gantt

Eine komfortable Fenstertechnik erlaubt es, einige oder alle der genannten Sichtweisen gleichzeitig in der gewünschten Größe darzustellen.

Verglichen mit einer konventionellen Plantafel ist ein Bildschirm vergleichsweise klein. Folgende Funktionen sind daher von besonderer Bedeutung:

- Durch Zoomen des Bildschirminhaltes kann der Ausschnitt beliebig vergrößert bzw. verkleinert werden.
- Eine Scroll-Funktion erlaubt es, genau den interessierenden Ausschnitt (in der gewünschten Vergrößerung) auf den Bildschirm zu bringen.
- Der Netzplan kann als Hardcopy bzw. Plot ausgegeben werden.

6.4 Lösungskomponente

Auf der Grundlage der eingegebenen Daten bestimmt die Lösungskomponente eine zulässige (bzw. optimale) Lösung (erfüllt alle vorliegenden Restriktionen).

Der Lösungskomponente liegt ein Modell zugrunde, das jedoch nicht vollständig (wie in Kap. 4.2) formuliert sein muß. In jedem Fall müssen (entweder explizit in einem Modell oder implizit in einer Methode) alle Einflußgrößen (Daten) und Handlungsmöglichkeiten (Variablen) sowie ihre gegenseitigen Abhängigkeiten (Restriktionen) abgebildet sein.

Durch Anwendung einer Methode wird eine Lösung bestimmt. Gegebenenfalls können hier auch mehrere Methoden (aus einer Modell- bzw. Methodenbank) zur Anwendung kommen und dem Entscheidungsträger mehrere Lösungen zur Auswahl vorgeschlagen werden.

6.5 Evaluierungskomponente

Die Aufgabe der Evaluierungskomponente eines Leitstandes ist die Bewertung eines (oder auch mehrerer) Schedules in Hinblick auf das verfolgte Zielkriterium.

Sind mehrere Zielkriterien zu beachten, so liegt eigentlich ein Optimierungsproblem bei mehrfacher Zielsetzung (MCDM = Multi Criteria Decision Making) vor. Die derzeit verfügbaren Leitstände betrachten in diesem Falle jedoch weder ein Vektor-Maximum-Problem noch eines der aus der Literatur bekannten Ersatzprobleme (vgl. z.B. *Dinkelbach*, 1982). Vielmehr werden im allgemeinen lediglich ineffiziente Schedules (hinsichtlich keiner Zielausprägung besser und mindestens einer Zielausprägung schlechter als ein anderer Ablaufplan) ausgesondert und gegebenenfalls verbleibende Schedules dem Entscheidungsträger präsentiert und seiner weiteren Beurteilung (z.B. hinsichtlich qualitativer Kriterien) überlassen.

7. Leitstandsysteme im Überblick

Wir skizzieren im folgenden die Funktionsweise von vier ausgewählten Leitständen; Hinweise auf weitere Leitstände findet der interessierte Leser vor allem in *Adelsberger / Kanet*, 1991.

7.1 Der AHP-Leitstand

Der AHP-Leitstand wurde von der Firma AHP Havermann und Partner entwickelt (vgl. *Kellermann / Wächter*, 1987). Er ist unter OS/2 implementiert, verfügt über eine SQL-Schnittstelle und ist netzwerkfähig.

Angeboten werden u.a. eine Vorwärts- und eine Rückwärtsrekursion. Ferner können Vorgänge, die z.B. eine Engpaßmaschine benötigen, spezifisch eingeplant werden.

7.2 Der Leitstand FI-2

Von der Firma IDS Prof. Scheer wird ein "intelligenter Leitand FI-2" vertrieben. (vgl. z.B. *Scheer / Hars*, 1991). FI-2 ist in C geschrieben, implementiert unter UNIX, läuft unter X-Windows und verwendet eine SQL-Schnittstelle.

Der Leitstand FI-2 besteht aus den folgenden Modulen: Schnittstelle zu einem BDE- und PPS-System, automatische Maschinenbelegungsplanung, manuelles Scheduling, graphische Oberfläche, Auftragsfreigabe.

7.3 Jobplan

Jobplan ist der Leitstand der Fa. Siemens (vgl. *von Lippe*, 1990). Jobplan ist explizit netzplanbasiert und läuft auf Workstations unter UNIX. Jobplan verwendet das relationale Datenbanksystem INGRES und die graphische Benutzeroberfläche MOTIVE.

Jobplan setzt zahlreiche Prioritätsregeln ein und bietet darüber hinaus ein Verfahren zur Verbesserung eines vorliegenden Schedules an. Insbesondere die Evaluierungskomponente dieses Leitstandes ist weit entwickelt.

7.4 Der L1-Leitstand

L1 ist ein PC-basierter, netzwerkfähiger Leitstand, implementiert unter MS-Windows (vgl. *Kurbel / Meynert*, 1988).

Zu den Funktionen von L1 gehört ein graphischer Kapazitätsabgleich, eine elektronische Plantafel sowie Module zur Auftragsfreigabe und Rückmeldung.

8. Der PRISMA-Montage-Leitstand

8.1 Das Projekt

Fallende Marktanteile durch wachsende Konkurrenz einerseits sowie der Trend zu kundenspezifischen Lösungen (mit der Folge eines wachsenden Anteils spezifischer Baugruppen und damit sinkender Losgrößen) andererseits stellen insbesondere die Werkzeugmaschinenindustrie vor große Probleme.

Die Montage mit einem erheblichen Anteil an der Auftragsdurchlaufzeit ist diesen Anforderungen in zunehmendem Maße nicht mehr gewachsen (geringe Transparenz, überwiegend manuelle Tätigkeiten, etc.).

PRISMA (production improvement of small batch machine tool assembly) ist als EUREKA-Projekt im Bereich FAMOS (flexibel automatisierte Montagesysteme) angesiedelt. Unter der Federführung des WZL (Laboratorium für Werkzeugmaschinen und Betriebslehre, RWTH Aachen) arbeiten Werkzeugmaschinenhersteller, Softwarehäuser und Forschungsinstitute gemeinsam in einem deutsch-italienischen Konsortium an der Lösung von Problemen insbesondere aus den folgenden Schwerpunkten (vgl. *Eversheim et al.*, 1990):

- **Anforderungsgerechte Produktstrukturen** (montagegerechte Erzeugnisstrukturen, Reduzierung der Variantenvielfalt; Datenmodell zur vollständigen Produktbeschreibung als Basis der Stücklistenorganisation, Arbeitsplangestaltung, Kalkulation, Angebotslegung, Auftragsdokumentation sowie der Montageplanung und -steuerung)
- **Zeitgemäße Montagestrukturen** (höhere Mechanisierung als Ziel; Entwicklung von Vorrichtungen und Handhabungshilfen)
- **Montageplanung und -steuerung**

Wir beschreiben im folgenden die im Bereich der Montageplanung und -steuerung verfolgte Vorgehensweise und skizzieren anschließend wesentliche weitere Komponenten des Leitstandes.

8.2 Montageplanung und -steuerung

Grundlage der Montageplanung und -steuerung ist folgende hierarchische Struktur:

- Auf der obersten Ebene werden **Kundenaufträge** unterschieden. Herausragendes Datum ist hier der Liefertermin.
- Jeder Kundenauftrag wird in **Montageaufträge** (Vor-, Haupt-, Endmontage) unterteilt. Sie sind Basis für die Ermittlung von Eckterminen (für Materialdisposition etc.).
- Jeder Montageauftrag kann in **Vorgänge** zerlegt werden (Detail-Netzplan). Erst hier ist es möglich und nötig, den erforderlichen Ressourcenbedarf detailliert anzugeben.
- Jeder Vorgang wird durch einen **Arbeitsplan** beschrieben. Alternative Arbeitspläne je Vorgang führen zu mehreren Modi je Vorgang (vgl. Abschnitt 4).

Das Gesamtsystem läßt sich grob in die zwei folgenden Teilsysteme gliedern (vgl. *Lehmann*, 1991):

- Ein Montageplanungssystem (CAAP = computer aided assembly planning) zur Erstellung kundenneutraler Planungsgrunddaten (statisches CAAP) und zur auftragsbezogenen Montageplanung auf der Grundlage der Produktstruktur (dynamisches CAAP).
- Einen Montageleitstand (AMS = assembly management system) zur Durchführung der Steuerungsaufgaben.

8.3 Weitere Komponenten des Leitstandes

Auf der Basis der in den Abschnitten 2 bis 4 skizzierten Netzplan-Modellierung unter Verwendung von Mindest- und Höchstabständen ist es möglich, eine **Mehrauftrags- und Multiressourcenplanung** durchzuführen. Im einzelnen werden folgende Planungsfunktionen bereitgestellt:

- **Mittel- bzw. langfristige Planung:** Reine Terminierung der Vorgänge (eines nicht notwendig zyklensfreien Netzwerkes) auf der Basis des FIFO-Algorithmus (*Domschke / Drexel, 1991 a*, S. 91 f.); entsprechende Prüfung der Kapazitätsauslastung mit dem Ziel, Engpässe frühzeitig zu erkennen, um ggf. nicht einzuhaltende Ecktermine anzupassen.
- **Kurzfristige termintreue Planung:** Überschreitungen von Eckterminen nicht zulässig; Kapazitätsgrenzen dürfen gegebenenfalls überschritten werden; Algorithmus von *Drexel / Grünewald, 1991* in geeignet modifizierter Form.
- **Kurzfristige kapazitätstreue Planung:** Überschreitungen von Kapazitätsgrenzen nicht erlaubt; Ecktermine dürfen gegebenenfalls überschritten werden; Algorithmus von *Drexel / Grünewald, 1991* in geeignet modifizierter Form.

Von besonderer Bedeutung für den Werkzeugmaschinenbau ist die Ressource (Montage-) Fläche. Deshalb wird sie nicht wie die anderen Ressourcen (Personal, Betriebsmittel) behandelt, sondern in einem separaten Modul "**Flächenbelegungsplanung**", das jedoch über die gemeinsame Datenbasis mit den anderen Modulen gekoppelt ist, angesprochen. Dadurch ist es möglich, den im Verlauf des Montageprozesses wachsenden Platzbedarf der einzelnen Aufträge (Werkzeugmaschinen) so aufeinander abzustimmen, daß es nicht zu Überschneidungen, Kollisionen und ähnlichem kommt. Die Ergebnisse (insbesondere) der Flächebelegungsplanung können "simulativ" im Zeitablauf visualisiert werden.

Der Bedeutung von Materialien im Rahmen der Montage wird durch folgende Klassifizierung Rechnung getragen:

- **Just in time Teile:** Großvolumige oder teure Komponenten; Abruf zum Bedarfszeitpunkt.
- **Kritische Teile:** Auf der Basis von Vergangenheitsdaten im Sinne der Materialverfügbarkeit als kritisch angesehene Teile; Abruf zu Beginn der Montage bzw. eines Montageabschnittes.

- **Unkritische Teile:** Ebenfalls auf der Basis von Vergangenheitsdaten als im Sinne der Materialverfügbarkeit unkritische Teile angesehen.
- **Sonstige Teile:** Standard- / Normteile werden verbrauchsbezogen disponiert und z.B. in Handlagern bereitgestellt.

Auf der Basis dieser Teileklassen bietet der Leitstand folgende **Möglichkeiten der Materialbereitstellung:**

- Bereitstellung aller Materialien oder eines überwiegenden Anteils zum Montagebeginn
- Gestufte Bereitstellung zum Beginn eines Montageabschnittes
- Bedarfsgerechte Bereitstellung von Abrufteilen

Über die bereits genannten Funktionen hinaus enthält der Leitstand insbesondere folgende weitere **Charakteristika bzw. Komponenten:**

- Graphisch-interaktiver Ressourcen-, Netzplan- und Layout-Editor sowie graphisch interaktive Gantt-Charts mit hoher Funktionalität
- PPS- und BDE-Schnittstellen auf Filetransferbasis
- UNIX-Implementierung auf Workstation in C unter OPEN LOOK
- Ein- und Mehrplatzversion
- Relationale INGRES Datenbank
- Statistikfunktionen
- Stammdatenverwaltung von (Montage-) Aufträgen, Personal (hierarchische Beschreibung von organisatorischen und Qualifikationsmerkmalen), Betriebsmitteln sowie Flächen / Maschinenlayouts.

9. Abschließende Bemerkungen

Für die computergestützte Produktionsplanung und -steuerung bei Einzel- und Kleinserienfertigung werden in den nächsten Jahren (Montage-)Leitstände zunehmend an Bedeutung gewinnen. Mit ihrer Hilfe werden über die **administrativen** und rein **steuernden Funktionen** hinaus vielfältige **weitere Analysen** möglich sein; als Beispiele seien genannt:

- Unterstützung von Auftragsannahmeentscheidungen, insbesondere bei der vertraglichen Fixierung von Lieferterminen.
- Ex ante-Analysen möglicher Szenarios hinsichtlich der Auftragsentwicklung (Kapazitätssituation / Termine bei Wachstum; Auslastung / Ertragslage bei Depression)
- Personal- und Investitionsplanung (Termintreue bei Personalabbau; technischer Fortschritt und Auslastung, etc.).

Literatur

- Adelsberger, H.H. / Kanet, J.J., The leitstand - A new tool for computer-integrated manufacturing, in: *Production and Inventory Management J.*, 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.
- Baker, K.R., *Introduction to sequencing and scheduling*, New York 1974.
- Conway, R.W. / Maxwell, W.L. / Miller, L.W., *Theory of scheduling*, Reading (Mass.) 1967.
- Cooper, D.F., Heuristics for scheduling resource-constrained projects: An experimental investigation, in: *Management Science*, Vol. 22 (1976), S. 1186-1194.
- Davis, E.W. / Patterson, J.H., A comparison of heuristic and optimum solutions in resource-constrained project scheduling, in: *Management Science*, Vol. 21 (1975), S. 944-955.
- Dinkelbach, W., *Entscheidungsmodelle*, Berlin - New York 1982.
- Domschke, W., *Logistik: Rundreisen und Touren*, 3. Aufl., München 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., Fließbandaustaktung, Maschinenbelegung und Kapazitätsplanung in Netzwerken - Ein integrierender Ansatz, in: *ZfB*, Jg. 60 (1990), S. 53-70.
- Drexl, A. / Grünwald, J., Nonpreemptive multi-mode resource-constrained project scheduling, erscheint in *IIE Transactions* (1991).
- Eversheim, W. / Grempe, R. / Lehmann, F. / Pieper-Musiol, R. / Schröder, D., PRISMA - Montage im Werkzeugmaschinenbau, in: *VDI-Zeitschrift* 132 (1990) Nr. 6, S. 80-84.
- Fandel, G., *Produktion I - Produktions- und Kostentheorie*, 3. Aufl., Berlin 1991.
- Feo, A.T. / Bard, J.F. / Chaffin, R.F., An overview of GRASPTM methodology and applications, *Arbeitspapier*, University of Texas 1991.
- Fleischmann, B., Operations-Research-Modelle und -Verfahren in der Produktionsplanung, in: *ZfB*, Jg. 58 (1988), S. 347-372.
- French, S., *Sequencing and scheduling - An introduction to the mathematics of the job-shop*, Chichester 1982.
- Gray, C. / Hoseda, M., Matching heuristic scheduling rules for job shop to the business sales level, in: *Production and Inventory Management J.*, Vol. 32 (1991) Nr. 1, S. 12-17.
- Hart, J.P. / Shogan, A.W., Semi-greedy heuristics: An empirical study, in: *Operations Research Letters*, Vol. 6 (1987), S. 107-114.
- Haupt, R., A survey of priority rule-based scheduling, in: *OR Spektrum*, Vol. 11 (1989), S. 3-16.
- 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.

- Kelley, J.E., The critical-path method: Resources planning and scheduling, in: Industrial scheduling, hrsg. von Muth, F. / Thompson, G.L., Englewood Cliffs (N.J.) 1963, S. 347-365.
- Kistner, K.P. / Steven, M., Maschinenbelegungsplanung, in: WiSt, Jg. 19 (1990), S. 60-67.
- Kurbel, K. / Meynert, J., Flexibilität in der Fertigungssteuerung durch Einsatz eines elektronischen Leitstands, in: Zeitschrift für wirtschaftliche Fertigung 83 (1988), S. 581-585.
- Kurtulus, I.S. / Davis, E.W., Multi-project scheduling: Categorization of heuristic rules performance, in: Management Science, Vol. 28 (1982) S. 161-172.
- Lawrence, S.R. / Morton, T.E., Resource-constrained multi-project scheduling with tardy costs: Comparing myopic, bottleneck and resource pricing heuristics, Arbeitspapier, George Washington University 1991.
- Lehmann, F., PRISMA - Rationalisierung der Montage komplexer Produkte, Arbeitspapier, WZL, RWTH Aachen 1991.
- Li, R.K.-Y. / Willis, R.J., Alternative resources in project scheduling, in: Computers & Operations Research, Vol. 18 (1991), S. 663-668.
- Lippe, J. v., Bringt die nächste Leitstand-Generation die Integration?, in: Zeitschrift für wirtschaftliche Fertigung und Automation 85 (1990).
- Maes, J. / McClain, J.O. / Van Wassenhove, L.N., Multilevel capacitated lot sizing and LP-based heuristics, in: European J. of Operational Research, Vol. 53 (1991), S. 131-148.
- Panwalkar, S.S. / Iskander, W., A survey of scheduling rules, in: Operations Research, Vol. 25 (1977), S. 45-61.
- Patterson, J.H., Project scheduling: The effects of problem structure on heuristic performance, in: Naval Research Logistics Quarterly, Vol. 23 (1976), S. 95-123.
- Patterson, J. / Slowinski, R. / Talbot, B. / Weglarz, J., An algorithm for a general class of precedence and resource constrained scheduling problems, in: Advances in project scheduling, hrsg. von Slowinski, R. / Weglarz, J., Amsterdam 1989, S. 3-28.
- 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 J. of Operational Research, Vol. 49 (1990), S. 68-79.
- 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.
- Schneeweiß, Chr., Einführung in die Produktionswirtschaft, 3. Aufl., Berlin 1989.
- Schrage, L., Solving resource-constrained network problems by implicit enumeration - nonpreemptive case, in: Operations Research, Vol. 26 (1969), S. 263-278.
- Schrage, L., LINDO - An optimization modelling system, 4. Aufl., San Francisco 1991.
- Seelbach, H., Ablaufplanung, Würzburg - Wien 1975.
- Silver E.A. / Peterson, R., Decision systems for inventory management and production planning, 2. Aufl., New York 1985.
- Slowinski, R., A node ordering heuristic for network scheduling under multiple resource constraints, in: Foundations of Control Engineering, Vol. 3 (1978), S. 19-27.
- Slowinski, R. / Soniewicki, B. / Weglarz, J., DSS for multiobjective project scheduling subject to multiple-category resource constraints, eingereicht bei: European J. of Operational Research (1991).

- Ulusoy, G. / Özdamar, L.*, Heuristic performance and network / resource characteristics in resource-constrained project scheduling, in: J. of the Operational Research Society, Vol. 40 (1989), S. 1145-1152.
- 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.
- Zäpfel, G.*, Stücklisten, Verwendungsnachweise, Arbeitspläne und Produktionsfunktionen, in: WiSt, Jg. 20 (1991), S. 340 - 346.