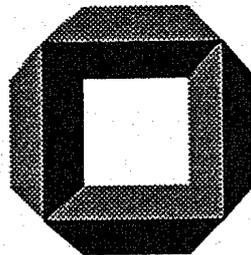


**INSTITUT FÜR WIRTSCHAFTSTHEORIE
UND OPERATIONS RESEARCH
UNIVERSITÄT KARLSRUHE**

**Vergleichende Beurteilung mehrerer Varianten der
Heuristik von Lambrecht und Vanderveken zur Lösung des
integrierten Losgrößen- und Ablaufplanungsproblems**

Christoph Schwindt

Report WIOR - 437



TECHNICAL REPORT

Kaiserstraße 12 · D - 76128 Karlsruhe · Germany

**Vergleichende Beurteilung mehrerer Varianten der
Heuristik von Lambrecht und Vanderveken zur Lösung des
integrierten Losgrößen- und Ablaufplanungsproblems**

Christoph Schwindt

Report WIOR - 437

Mai 1994

Vorwort

Der vorliegende Report faßt die Ergebnisse einer umfangreichen Simulationsstudie zusammen, die die vergleichende Beurteilung mehrerer Varianten der Heuristik von Lambrecht und Vanderveken zum Ziel hatte.

Das 1979 von M.R. Lambrecht und H. Vanderveken vorgestellte Verfahren verbindet eine Methode zur kapazitierten, dynamischen Losgrößenplanung mit einer Heuristik zur Ablaufplanung bei Job-Shop-Fertigung. Ablaufbedingte Wartezeiten einzelner Aufträge können bei Sukzessivplanung zu zeitlichen Kapazitätsüberschreitungen einzelner Ressourcen bei der Maschinenbelegungsplanung führen. Durch eine künstliche Verknappung der Kapazität, die bei der nächsten Iteration für die Losgrößenplanung verfügbar ist, wird eine geringere Belastung der kritischen Ressourcen erreicht. Diesen Anpassungsschritt führt man so lange durch, bis entweder eine zulässige Lösung bestimmt werden konnte oder die zur Verfügung stehende Kapazität nicht mehr zur Einplanung des aktuellen Periodenbedarfs ausreicht.

Dieser Ansatz ist grundsätzlich unabhängig von der Wahl des Losgrößen- und des Ablaufplanungsverfahrens, sofern sie sich zur exakten oder heuristischen Lösung des jeweiligen Einzelproblems eignen. Es erscheint daher sinnvoll, die in der Originalarbeit vorgeschlagene Kombination (Heuristik von Eisenhut - Heuristik von Giffler und Thompson) mit Varianten zu vergleichen, die neuere Verfahren einsetzen.

Im Rahmen dieser Untersuchung wurde neben den beiden ursprünglichen Verfahren eine auf den Fall der Mehrmaschinenfertigung erweiterte Fassung einer Heuristik von Dixon und Silver (1981) für die Losgrößenplanung verwendet, während bei der Ablaufplanung das permutierende Engpaßverfahren von Adams, Balas und Zawack (1988) zum Einsatz kam.

Inhaltsverzeichnis

Verzeichnis der verwendeten Symbole.....	III
Einleitung.....	1
1. Losgrößenplanung.....	2
1.1 Problemdefinition.....	2
1.2 Die Heuristik von Eisenhut.....	4
1.3 Die Heuristik von Dixon und Silver.....	7
1.4 Vergleichende Beurteilung.....	9
1.4.1 Gesamtkosten.....	13
1.4.2 Rüstkosten.....	14
1.4.3 Lagerhaltungskosten.....	14
1.4.4 Zuverlässigkeit.....	15
1.5 Fazit.....	15
2. Ablaufplanung.....	16
2.1 Problemdefinition.....	16
2.2 Zulässige, semiaktive, aktive und unverzögerte Belegungspläne.....	18
2.3 Der Algorithmus von Giffler und Thompson.....	19
2.4 Das permutierende Engpaßverfahren von Adams, Balas und Zawack.....	22
2.5 Vergleichende Beurteilung.....	25
2.5.1 Beurteilung von Prioritätsregeln in der Heuristik von Giffler und Thompson.....	26
2.5.2 Vergleich der Heuristik von Giffler und Thompson mit verschiedenen Varianten des permutierenden Engpaß- verfahrens.....	28
2.5.3 Weitere Verbesserung der Heuristik von Giffler und Thompson durch Beschränkung auf unverzögerte Ablaufpläne.....	30
2.6 Fazit.....	31
3. Integrierte Seriengrößen- und Ablaufplanung.....	33
3.1 Problemdefinition.....	33
3.2 Die Heuristik von Lambrecht und Vanderveken.....	34
3.3 Vergleichende Beurteilung.....	36
3.3.1 Rüst- und Lagerhaltungskosten.....	39
3.3.2 Kapitalbindungs- und Maschinenkosten.....	40
3.3.3 Verzugskosten.....	41
3.3.4 Zuverlässigkeit.....	42
3.4 Fazit.....	43
Literaturverzeichnis.....	44

Verzeichnis der verwendeten Symbole

(1) Losgrößenplanung

c	Relevante Gesamtkosten einer Losgrößenplanung
c^h	Gesamtlagerkosten einer Losgrößenplanung
c_{jt}^h	Lagerkosten des Produktes j in Periode t
c^s	Gesamtrüstkosten einer Losgrößenplanung
d_{jt}	Nachfrage nach Produkt j in Periode t
density(d)	Belegungsdichte, d.h. $ O / M \times J $
density(m)	Nachfragedichte, d.h. $ \{d_{jt} > 0\} / (nT)$
$\eta_{jt}(\tau_{jt})$	Lagerkosten für Produkt j bei Einlastung der Nachfragen der Perioden $t, \dots, t + \tau_{jt} - 1$ in das Los der Periode t
h_j	Lagerkostensatz des Produktes j pro ME und ZE
J	Menge der Produkte bzw. Aufträge
J_i	Menge der Produkte, die auf Maschine i bearbeitet werden
κ_{it}	Kapazität der Maschine i in Periode t
$\hat{\kappa}_{it}$	verbleibende Kapazität der Maschine i in Periode t
KSP	Menge der positiven Kostensenkungspotentiale in der Heuristik von Eisenhut
m	Anzahl der Maschinen
M	Menge der Maschinen
$M_j \subseteq M$	Menge der Maschinen, auf denen Produkt j bearbeitet wird
n	Anzahl der Aufträge
$O \subseteq M \times J$	Menge der Operationen
p_{ij}	Bearbeitungszeit des Produktes j auf Maschine i ohne Rüstzeiten
s_j	Rüstkosten des Produktes j auf Maschine i
τ_j	Reichweite des Loses für Produkt j in der aktuellen Planungsperiode
τ_{jt}	Reichweite des Loses für Produkt j in der Planungsperiode t
ϑ_{ij}	Rüstzeit des Produktes j auf Maschine i
$t(i)$	Periode, in der in der Heuristik von Dixon und Silver die maximale kumulierte Kapazitätsunterdeckung für Maschine i auftritt
T	Planungshorizont
$u_j(\tau_{jt})$	Kostensenkungspotential des Produktes j in Periode t bei Erhöhung der Reichweite von $\tau_{jt} - 1$ auf τ_{jt}
x_{jt}	Losgröße des Produktes j in Periode t
z_{jt}	Lagerbestand an Produkt j am Ende der Periode t

(2) Maschinenbelegungsplanung:

α	Quelle eines Netzplans
c_{ij}	(vorläufiger) Fertigstellungszeitpunkt der Operation (i,j) in der Heuristik von Giffler und Thompson
C_i^m	Belegungszeit der Maschinen i
C_j^p	Durchlaufzeit des Auftrags j
C_{\max}	Zykluszeit
d_j	Liefertermin des Auftrags j
FEZ_{ij}	Frühester Fertigstellungszeitpunkt der Operation (i,j)
$L(v,w)$	längster Weg von Knoten v zu Knoten w
M_0	Menge der belegten Maschinen im permutierenden Engpaßverfahren
$m(j,l)$	l -te Maschine in der Maschinenfolge des Auftrags j
\mathcal{NP}	Menge aller von einer nicht-deterministischen Turing-Maschine in mit polynomialer Zeitkomplexität lösbaren Probleme
π_{ij}	Bearbeitungszeit des Loses des Produktes j der aktuellen Planungsperiode auf Maschine i einschließlich der Rüstzeit
$\pi(i,j)$	Maschine, auf der Produkt j vor dem Arbeitsgang auf Maschine i bearbeitet wird
q_j	Zusatzzeit des Auftrags j
r_j	Bereitstellungstermin des Auftrags j
R	Menge der als nächstes zu belegenden Maschinen in der Heuristik von Giffler und Thompson
R_{ij}	Menge der Maschinen, auf denen Auftrag j im Anschluß an i noch zu bearbeiten ist
$\sigma(i,j)$	Folgeoperation des Arbeitsgangs (i,j) in der Maschinenfolge des Auftrags j
S	Menge der einplanbaren Operationen in der Heuristik von Giffler und Thompson
t_{ij}	(vorläufiger) Startzeitpunkt der Operation (i,j) in der Heuristik von Giffler und Thompson
T_j	Terminüberschreitung des Auftrags j
T_{CPU}	Laufzeitkomplexität
ω	Senke eines Netzplans
z_i	aktuelle Startzeitgrenze der Maschine i in der Heuristik von Giffler und Thompson

Symbole mit hochgestelltem Index t symbolisieren Größen aus der Ablaufplanung bezüglich des in Periode t erstellten Belegungsplans.

Die Bedeutung hier nicht aufgeführter Symbole und sonstiger Bezeichnungen ergibt sich aus dem jeweiligen Kontext, in dem sie verwendet werden.

Einleitung

Das Problem der optimalen Seriengrößen- und Seriensequenzplanung ist wesentlicher Bestandteil der Produktionssteuerung bei Sorten- und Serienfertigung. Verfahren zur isolierten Lösung beider Teilprobleme sind seit Jahrzehnten Gegenstand intensiver Forschungen. Zahlreiche Modellierungsansätze erlauben die Abbildung mehr oder weniger restriktiver Annahmensysteme.

Im Falle beschränkter Produktionskapazitäten, für den verschiedene Produkte um Mehrzweckmaschinen konkurrieren, müssen die Planungen der Losgrößen und der Maschinenbelegung koordiniert werden, da ablaufbedingte Brachzeiten der Maschinen sich erst aus der Feinterminierung der Aufträge ergeben und andererseits die Reihenfolgeplanung die Produktionslose als Vorgaben ihrer Planung benötigt. Verfolgt man das Ziel, eine optimale Lösung zu generieren, so erfordert die Berücksichtigung dieser wechselseitigen Interdependenzen einen simultanen Planungsansatz, der sämtliche Handlungsalternativen beider Teilbereiche in einem monolithischen Modell erfaßt und eine gleichzeitige Bestimmung optimaler Seriengrößen und -sequenzen vornimmt. Eine derartige Vorgehensweise scheidet jedoch an der hohen Modellkomplexität, zumal die Unstetigkeit der Zielfunktion und der Nebenbedingungen, die die Kapazitäten und die Auftragsfolgen auf den Maschinen betreffen, die Einführung von Binärvariablen unumgänglich macht. Bereits die isolierte Lösung beider Teilprobleme erweist sich, von einigen für den praktischen Einsatz irrelevanten Sonderfällen abgesehen, als $\mathcal{N}P$ -schwer. Die Hoffnung, einen effektiven Algorithmus zur exakten Lösung des integrierten Losgrößensequenzproblems finden zu können, muß demzufolge als wenig aussichtsreich gelten.

Man bedient sich deshalb sukzessiver Ansätze, die über eine vertikale Dekomposition des Gesamtproblems in interdependente Teilprobleme zu einer erheblichen Komplexitätsreduktion führen. Die Heuristik von Lambrecht und Vanderveken (1979) realisiert das Konzept einer Sukzessivplanung, indem in einem ersten Schritt Losgrößen bestimmt werden. Eventuelle Abhängigkeiten von der Ablaufplanung bleiben zunächst unberücksichtigt. In einem zweiten Schritt werden dann die Vorgaben der Losgrößenplanung in Form von Fertigungsaufträgen auf den einzelnen Maschinen eingeplant. Falls die ermittelte Lösung unzulässig ist, d.h. die Kapazitätsbeschränkung auf mindestens einer Maschine überschritten wurde, korrigiert man die Kapazität dieser Engpaßmaschinen nach unten, um in einem erneuten Durchlauf die Modifikation einzelner Seriengrößen zu erzwingen. Der Anpassungsschritt erfolgt so oft, bis entweder eine zulässige Lösung gefunden wurde oder das Problem im Losgrößenplanungsschritt aufgrund zu knapper Kapazitäten nicht mehr gelöst werden kann.

Im Rahmen dieser Arbeit wurden jeweils zwei Verfahren zur dynamischen Losgrößenplanung und zur Ablaufplanung untersucht, die in der Heuristik von Lambrecht und Vanderveken eingesetzt werden können. Neben der Heuristik von Eisenhut (1975) wurde eine auf den Fall einer Mehrmaschinenfertigung erweiterte Version des Verfahren von Dixon und Silver (1981) implementiert, das bei einstufiger Produktion eine zulässige Lösung für das Seriengrößenproblem garantiert. Die Maschinenbelegungsplanung konnte entweder mit der Heuristik von Giffler und Thompson (1960) oder einem neueren Ansatz, dem permutierenden Engpaßverfahren von Adams, Balas und Zawack (1988), erfolgen.

1. Losgrößenplanung

1.1 Problemdefinition

Die ersten Ansätze zu einer optimierenden, statischen Losgrößenplanung gehen auf das Jahr 1913 zurück, in dem Harris seine bekannte Losgrößenformel zur Bestimmung wirtschaftlicher Losgrößen vorstellte. Im Jahre 1958 wurde von Wagner und Whitin ein exaktes Verfahren zur Lösung des dynamischen Losgrößenproblems bei nicht kapazitiertem Ein-Maschinen-Fertigung vorgeschlagen, das unter Ausnutzung spezieller Modelleigenschaften die Steuerbereiche der dynamischen Optimierung erheblich einschränkt. Im Laufe der Jahre wurden zahlreiche weitere Ansätze entwickelt, in denen einige einschränkende Annahmen des Wagner-Whitin-Modells auf Kosten der Optimalität der generierten Lösung aufgegeben wurden. Die unterschiedlichen Annahmensysteme haben zu einer Unterscheidung verschiedener Problemklassen geführt, von denen die wichtigsten in Abbildung 1.1 dargestellt sind:

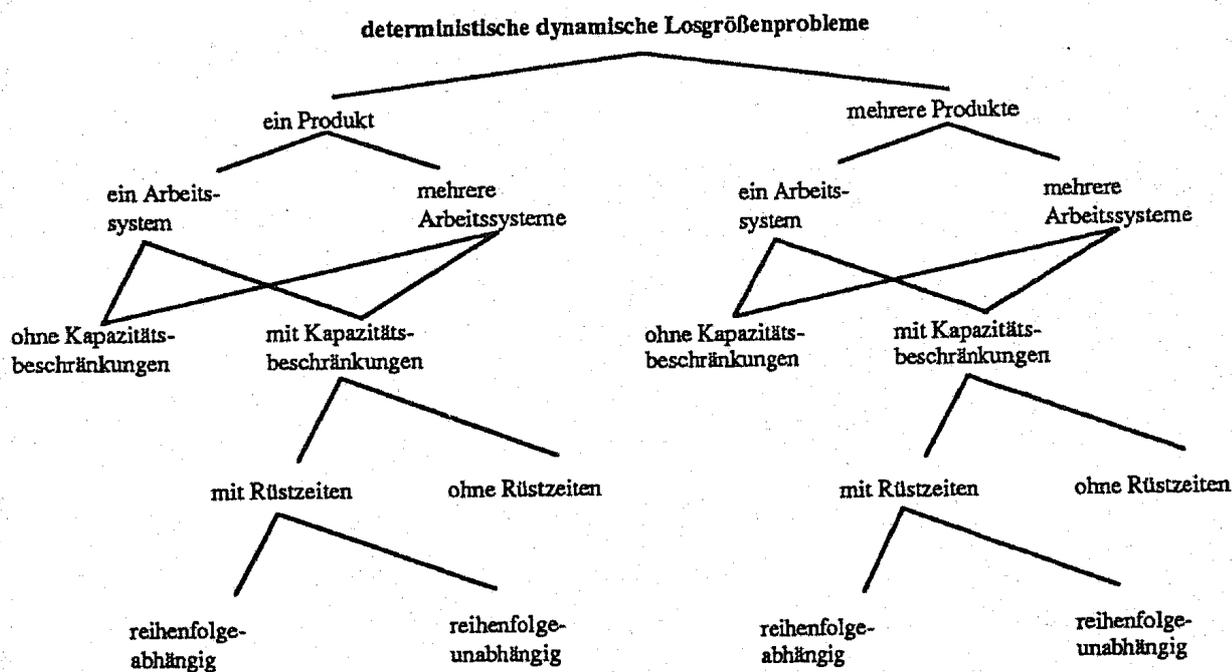


Abb. 1.1: Klassifizierung wesentlicher deterministischer dynamischer Losgrößenprobleme (nach Zäpfel und Attmann 1978)

Die im Rahmen dieser Arbeit behandelten Losgrößenprobleme lassen sich entsprechend dem Schema aus Abbildung 1.1 wie folgt charakterisieren:

- Mehrere Erzeugnisse werden auf
- mehreren Maschinen mit
- Kapazitätsbeschränkungen gefertigt,
- unter Beachtung von Rüstzeiten,
- die unabhängig von der Produktsequenz sind.

Eine exakte Problemdefinition ergibt sich aus den folgenden Prämissen:

- (1) Das Ziel der Planung besteht in der Minimierung der entscheidungsrelevanten Kosten.
- (2) Der Planungszeitraum $[0, H]$ wird in T gleichlange Perioden $t = 1, 2, \dots, T$ eingeteilt.
- (3) Im Planungszeitraum bestehen Nachfragen nach n Produkten. Die Terminierung der Nachfragen geschieht durch die Angabe einer Periode, zu deren Ende das betreffende Produkt in gewünschter Menge bereitstehen muß.
- (4) Die Nettobedarfe d_{jt} nach jedem Produkt j sind für alle Perioden t bekannt. Sie werden in Mengeneinheiten (ME) gemessen.
- (5) Jedes Produkt muß auf mindestens einer Maschine bearbeitet werden. Wir gehen von einer seriellen Produktionsstruktur aus. Insgesamt sind m Maschinen in das Planungsproblem involviert. Die Bearbeitungszeit eines Erzeugnisses auf einem Arbeitssystem ist periodenunabhängig und bekannt.
- (6) In jeder der Perioden t kann für jedes Produkt j entweder ein Los aufgelegt werden oder nicht. Ist die Produktionsmenge $x_{jt} > 0$, so fallen beim Auflegen eines Loses für Produkt j auf Maschine i Rüstkosten in Höhe von s_{ij} an:
$$s_{ij}^t = \begin{cases} s_{ij}, & \text{falls } x_{jt} > 0 \\ 0, & \text{sonst} \end{cases}$$
. Die Rüstkosten s_{ij} sind periodenunabhängig.
- (7) Die Produktionskosten pro ME sind für jedes Produkt ebenfalls periodenunabhängig und können somit als nicht entscheidungsrelevant vernachlässigt werden.
- (8) Die Lagerhaltungskosten c_{jt}^h des Produktes j in Periode t mögen vereinfachend vom Lagerbestand z_{jt} am Ende der Periode abhängen. Es gilt: $c_{jt}^h = z_{jt} \cdot h_j$ mit h_j als dem periodenunabhängigen Lagerkostensatz.
- (9) Die Lageranfangsbestände z_{j0} und Lagerendbestände z_{jT} sind für alle Produkte null.¹

¹ Wenn ein positiver Lageranfangsbestand existiert oder ein positiver Lagerendbestand gewünscht wird, so müssen die Nettonachfragen entsprechend bestimmt werden. Der Lageranfangsbestand wird dann so genutzt, daß eine möglichst große Nachfrage zu den frühest möglichen Zeitpunkten aus diesen Beständen befriedigt werden kann. Die Nettonachfrage ist dann die Nachfrage, die vom Lageranfangsbestand noch nicht befriedigt wurde. Wenn wir jetzt noch die Nachfrage der letzten Periode um den gewünschten Lagerendbestand erhöhen, haben wir ein äquivalentes Problem, das unsere Bedingungen bezüglich Lageranfangs- und -endbestand erfüllt.

- (10) Die Nachfrage d_{jt} kann entweder aus der laufenden Produktion x_{jt} oder dem Lagerbestand z_{jt-1} , der am Anfang der Periode vorhanden ist, befriedigt werden.² Es werden keine Fehlmengen zugelassen, d.h. notwendige Voraussetzung für die Zulässigkeit der gebildeten Lose ist die termin- und mengengerechte Befriedigung aller Nachfragen.
- (11) Die Kosten der einzelnen Perioden werden nicht diskontiert, d.h. Zinseffekte werden statisch betrachtet und schlagen sich lediglich in den Lagerhaltungskosten nieder. Die Kosten werden in Geldeinheiten (GE) gemessen.
- (12) Überlappung und Splittung von Losen werden ausgeschlossen.
- (13) Die Kapazität des Lagers ist unbeschränkt.
- (14) Die Kapazität der Fertigungseinrichtungen hingegen ist endlich. Sie wird in Zeiteinheiten (ZE) gemessen und ist für jede Periode bekannt. Das Auflegen eines Loses der Größe x_{jt} des Produktes j in Periode t vermindert die Kapazität \hat{k}_i der Maschine i in Periode t um $(\vartheta_{ij} + x_{jt} \cdot p_{ij})$ ZE, wobei ϑ_{ij} die Rüstzeit und p_{ij} die Bearbeitungszeit des Produktes j auf Maschine i pro ME ist.

Die Beschränkung der Produktionskapazität, die in Annahme (14) gemacht wird, kann nicht in das Modell von Wagner und Whitin einbezogen werden, weil der zentrale Satz vom komplementären Schlupf³, auf dem das Verfahren der Vorwärtsrekursion beruht, voraussetzt, daß es möglich ist, die Nettobedarfe beliebig vieler Perioden in einem Los zusammenzufassen. Für das kapazitierte Problem der Losgrößenplanung müssen demnach völlig unterschiedliche Lösungsverfahren angewandt werden, die aber in den meisten Fällen keine zulässige Lösung, geschweige denn eine optimale Losbildung garantieren können.⁴

1.2 Die Heuristik von Eisenhut

Das von P.S. Eisenhut 1975 vorgestellte Verfahren zur Lösung des Losgrößenproblems ist in seiner ursprünglichen Fassung eine Heuristik für die Planungssituation mit mehreren Produkten und einer kapazitätsbeschränkten Maschine. Es kann jedoch relativ einfach auf den Fall einer seriellen Produktionsstruktur erweitert werden. Die implementierte Version des Verfahrens soll nun kurz anhand des Programmablaufplans aus Abbildung 1.2 erläutert werden:

-
- ² Wir nehmen also an, daß die Produktion der Periode t dazu verwandt werden kann, die Nachfrage derselben Periode zu befriedigen. Wenn Vorlaufzeiten existieren, muß die Datierung der Nachfragen geeignet umgestellt werden.
 - ³ Dieser Satz besagt: Für jedes Planungsproblem, das dem Modell von Wagner/Whitin entspricht, existiert eine optimale Losbildung, für die gilt: $x_{jt} \cdot z_{jt-1} = 0 \quad \forall j = 1, \dots, n, t = 1, \dots, T$. Dies bedeutet, daß immer eine optimale Politik existiert, die nur dann produziert, wenn zu Beginn einer Periode kein positiver Lagerbestand verfügbar ist.
 - ⁴ Das kapazitierte Problem der dynamischen Losgrößenplanung mit einer Maschine und einem Produkt ist bereits \mathcal{NP} -schwer, so daß es sehr unwahrscheinlich erscheinen muß, daß jemals exakte Algorithmen mit polynomialer Laufzeitkomplexität gefunden werden können (Florian et al. 1980).

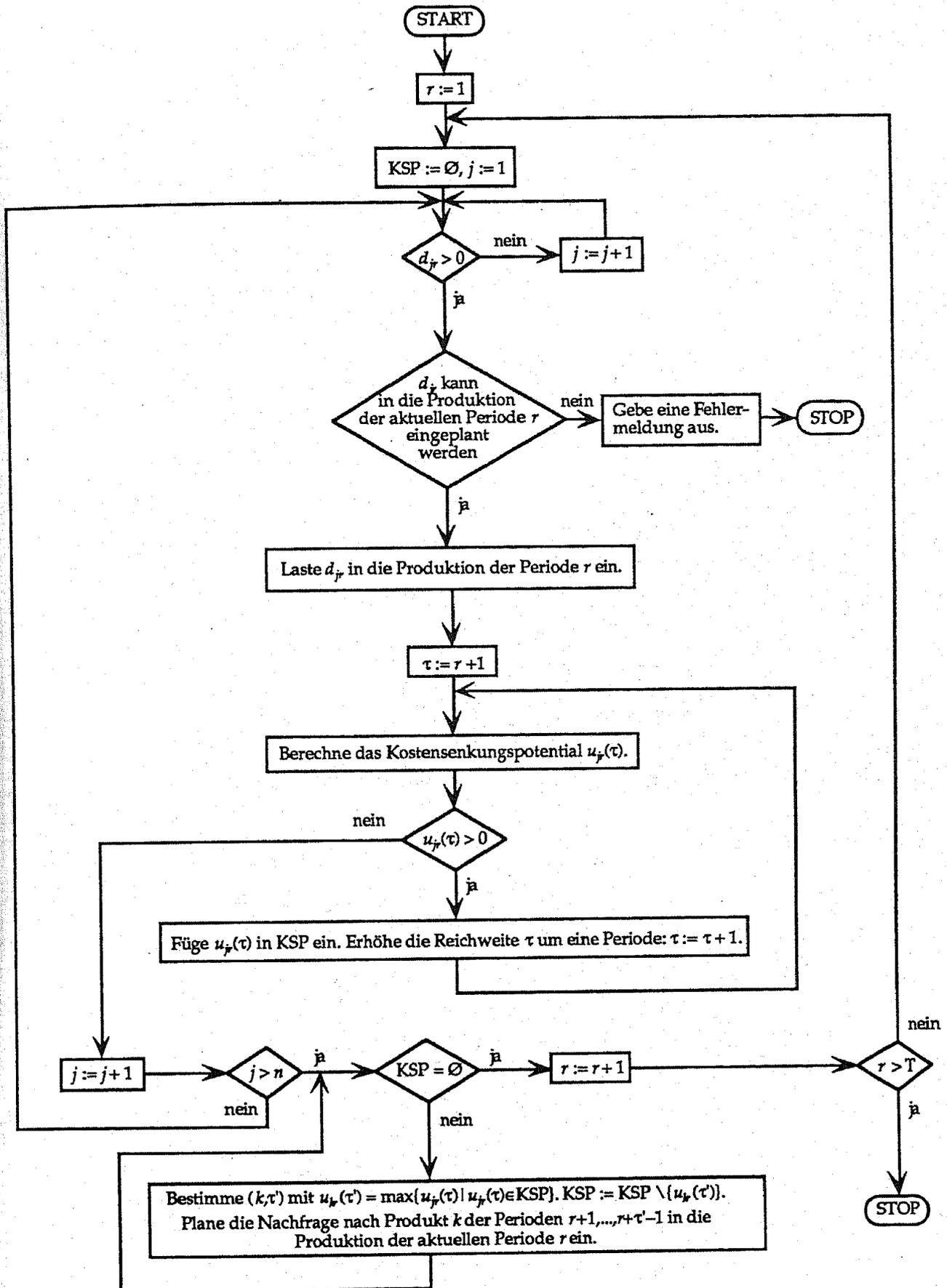


Abb. 1.2: Programmablaufplan der Heuristik von Eisenhut

In die Produktion der aktuellen Periode r werden zunächst für alle Produkte die nicht bereits zuvor eingeplanten Nachfragen der Planungsperiode r eingelastet. Steht dann weitere Produktionskapazität zur Verfügung, so werden sogenannte Kostensenkungspotentiale berechnet, und zwar bis zu einer Losreichweite, bei der sich erstmals ein negatives Potential ergibt.

Das Kostensenkungspotential $u_j(\tau_{jr})$ ist hierbei als die Verringerung der periodischen Rüst- und Lagerhaltungskosten bei Erhöhung der Reichweite um eine Periode auf τ_{jr} definiert, bezogen auf die zusätzlich in die Produktion der Periode r eingeplante Nachfrage:

$$u_j(\tau_{jr}) := \begin{cases} \frac{1}{d_{j,r+\tau_{jr}-1}} \cdot \left\{ \frac{s_j + \eta_{jr}(\tau_{jr}-1)}{\tau_{jt}-1} - \frac{s_j + \eta_{jr}(\tau_{jr})}{\tau_{jt}} \right\} \\ \text{mit } s_j := \sum_{i=1}^m s_{ij} \text{ und } \eta_{jr}(\tau_{jr}) = h_j \cdot \sum_{t=r}^{r+\tau_{jr}-1} (t-r) \cdot d_{jt}, \text{ falls } d_{j,r+\tau_{jr}-1} > 0 \\ 0, \text{ sonst} \end{cases}$$

In der Arbeit von Eisenhut wird die periodenbezogene Kostensenkung durch die Grenzperiodenkosten der Periode $r+\tau_{jr}-1$ approximiert. Diese Vorgehensweise führt jedoch gegenüber der exakten Berechnung zu einer leichten Verschlechterung der Ergebnisse und bringt keine nennenswerten Vorteile bei der Laufzeit des Verfahrens mit sich.

In einem zweiten Schritt werden die Nachfragen zukünftiger Perioden $r+1, \dots$ in der Reihenfolge nicht wachsender Kostensenkungspotentiale eingelastet. Hierbei ist zu beachten, daß immer nur die Nachfrage der zum Kostensenkungspotential gehörenden Reichweite eingeplant wird.

In der Originalfassung des Verfahrens von Eisenhut wird verlangt, die Reichweiten dürften nur schrittweise um eine Periode erhöht werden. Diese Forderung hängt mit der Eigenschaft einer optimalen Lösung für das Wagner/Whitin-Modell zusammen, wonach Lose nur die Nachfrage geschlossener Intervalle abdecken dürfen. Da $u_j(\tau_{jr})$ jedoch im Falle einer nicht extrem schwankenden Nachfrage eine monoton fallende Funktion von τ_{jr} ist, diese Forderung somit implizit meist erfüllt wird und zudem optimale Lösungen des kapazitierten Problems nicht immer geschlossene Produktionszyklen besitzen, ist im Rahmen dieser Arbeit auf diese Forderung verzichtet worden.

Ein Schwachpunkt des Verfahrens liegt in der von den unkapazitierten Losgrößenmodellen übernommenen Eigenschaft, nur ganze Periodenbedarfsmengen in Lose aufzunehmen, obwohl die Voraussetzungen des Satzes über den komplementären Schlupf bei Kapazitätsrestriktionen nicht mehr erfüllt sind. Dieser Mangel könnte durch die anschließende Verwendung von Verbesserungsschritten, wie sie bei Dixon und Silver (1981) beschrieben werden, gelindert werden.

Ein für die Praxis sehr bedeutsamer Nachteil stellt die Tatsache dar, daß gerade bei einer relativ hohen Auslastung der Ressourcen, wie sie in der Praxis angestrebt wird, die Heuristik von Eisenhut oftmals eine zulässige Lösung (auch wenn eine solche existiert) nicht garantieren kann. Dieser Mangel wird durch das im nächsten Abschnitt vorgestellte Verfahren von Dixon und Silver behoben, das (für den Ein-Maschinen-Fall) durch vorausschauende Planung Kapazitätsengpässe vermeiden kann.

1.3 Die Heuristik von Dixon und Silver

In einer 1981 von Dixon und Silver veröffentlichten Arbeit wird eine Heuristik zur Lösung des Losgrößenproblems bei Ein-Maschinen-Fertigung mehrerer Produkte und begrenzter Kapazität vorgeschlagen. Die herausragende Eigenschaft dieses Verfahrens besteht darin, daß es im Gegensatz zur Heuristik von Eisenhut eine zulässige Lösung garantiert, falls eine solche existiert.

Da die Heuristik im Rahmen dieser Arbeit als Losgrößenmodul im Verfahren von Lambrecht und Vanderveken eingesetzt werden sollte, mußte sie auf den allgemeineren Fall einer Mehrmaschinenfertigung mit Rüstzeiten erweitert werden. Um die vorausschauende Kapazitätsplanung auch für den allgemeineren Fall realisieren zu können, wurde das Verfahren in einigen Punkten umgestellt, wobei die grundsätzliche Struktur der Heuristik jedoch die gleiche blieb. Abbildung 1.3 zeigt den Programmablaufplan der implementierten Version der Heuristik von Dixon und Silver.

Das Eröffnungsverfahren läßt sich in vier Schritte untergliedern:

- (1) Plane den Periodenbedarf der aktuellen Periode in die Produktion ein.
- (2) Bestimme für jede Maschine alle Perioden, in denen die Maschinenkapazität unter Berücksichtigung der Kapazität der Vorgängerperioden nicht ausreicht, um die Nachfrage zu befriedigen.⁵ Wie bei der Originalversion des Verfahrens wird ein Engpaß nur dann gemeldet, wenn die aktuelle Planungsperiode r die letzte Periode ist, in der er noch behoben werden kann. Diese Vorgehensweise vermeidet unnötige Lagerhaltungskosten durch zu frühes Einlasten von Nachfragen.
- (3) Falls Kapazitätsunterdeckungen ausgemacht wurden, werden sie durch geeignetes Erweitern von Losen der Planungsperiode beseitigt. Als Produkt, dessen Nachfrage der Periode t in der aktuellen Periode $r < t$ produziert wird, um in t eine Engpaßmaschine i zu entlasten, bestimmt man ein Erzeugnis,
 - das auf i gefertigt wird,
 - für das eine Nachfrage in t besteht,
 - für das eine Erhöhung der Losgröße in r noch möglich ist,
 - für das in t die maximale Kapazität von i freigesetzt werden kann.Wird die Produktion einer gesamten Nachfrage vorverlegt, so muß beachtet werden, daß dann die Kapazität der Engpaßmaschine auch um die entsprechenden Rüstkosten entlastet wird.

⁵ Da beim Einplanen eines Produktes in der Regel mehrere Maschinen betroffen sind, kann es dazu kommen, daß zur Beseitigung eines Engpasses einer Maschine die Kapazität einer anderen überschritten wird. Da die gegenseitige Kopplung von der Art und Weise abhängt, wie die jeweiligen Engpässe beseitigt werden, kann sie nur sehr schwer vorausberechnet werden und wird im hier implementierten Ansatz nicht berücksichtigt. Deshalb kann es in Sonderfällen vorkommen, daß trotz einer vorausschauenden Kapazitätsplanung die Produktion der Nachfrage der aktuellen Periode r nicht mehr möglich ist.

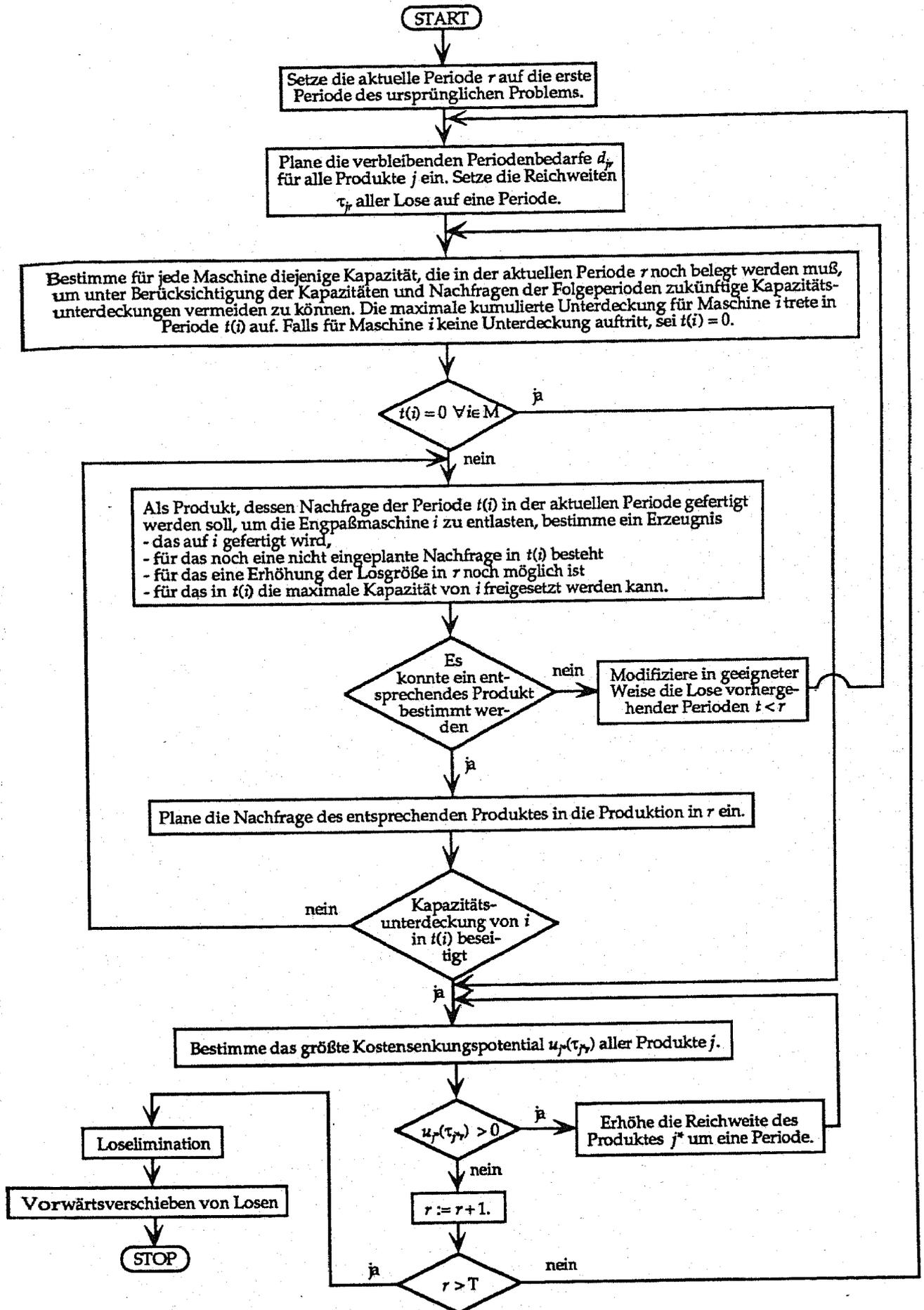


Abb. 1.3: Implementierte Variante der Heuristik von Dixon und Silver

- (4) Mit der verbleibenden Kapazität können Nachfragen zukünftiger Perioden in der Reihenfolge abnehmender, positiver Kostensenkungspotentiale eingelastet werden.

Da mehrere Maschinen an der Fertigung eines Produktes j beteiligt sind, wird die Senkung der Periodenkosten bei Erhöhung der Reichweite τ_{jr} um eine Periode auf die Summe der Anteile der in Anspruch genommenen Kapazitäten $p_{ij} \cdot d_{j,r+\tau_{jr}-1}$ an den jeweiligen *verbliebenen* Maschinenkapazitäten \hat{k}_{ir} bezogen:⁶

$$u_j(\tau_{jr}) := \begin{cases} \frac{1}{\sum_{i=1}^m \frac{p_{ij} \cdot d_{j,r+\tau_{jr}-1}}{\hat{k}_{ir}}} \cdot \left\{ \frac{s_j + \eta_{jr}(\tau_{jr}-1)}{\tau_{jr}-1} - \frac{s_j + \eta_{jr}(\tau_{jr})}{\tau_{jr}} \right\} \\ \text{mit } s_j := \sum_{i=1}^m s_{ij} \text{ und } \eta_{jr}(\tau_{jr}) = h_j \cdot \sum_{t=r}^{r+\tau_{jr}-1} (t-r) \cdot d_{jt}, \text{ falls } d_{j,r+\tau_{jr}-1} > 0 \\ 0, \text{ sonst} \end{cases}$$

Im Anschluß an das Eröffnungsverfahren kann man wie bei der Originalversion versuchen, durch Optimierungsschritte die generierte Anfangslösung zu verbessern. Im vorliegenden Fall wurden zwei Methoden implementiert. Zum ersten eine Prozedur, mit deren Hilfe man versucht, durch das Zusammenfassen von Losen Rüstkosten einzusparen, die höher als die zusätzlich anfallenden Lagerhaltungskosten sind (eine verallgemeinerte Variante der von Dixon und Silver beschriebenen Loselimination). Ferner wurde eine Heuristik eingesetzt, die zur Einsparung von Lagerhaltungskosten durch die termingerechte Aufteilung eines Loses auf die Lose späterer Perioden beitragen soll.

Um das Verfahren von Eisenhut unabhängig von der Engpaßvermeidung und zusätzlichen Optimierungsschritten mit dem von Dixon und Silver vergleichen zu können, wurde eine drittes Verfahren implementiert, das in die Heuristik von Eisenhut die Schritte (2) und (3) (Bestimmung und Beseitigung von Kapazitätsengpässen) der Heuristik von Dixon und Silver integriert und die erzeugten Fertigungsaufträge durch Loselimination und Vorwärtsverschiebung optimiert ("Modified Dixon"). Hierdurch konnte der Einfluß der Entscheidung über die einzuplanenden Nachfragen auf die mit der Planung verbundenen Gesamtkosten gesondert untersucht werden.

1.4 Vergleichende Beurteilung

Um die drei implementierten Verfahren vergleichend bewerten zu können, wurden für unterschiedliche Konstellationen in Bezug auf die Anzahl der Maschinen m und die Anzahl der Produkte n eine große Anzahl an Zufallsproblemen generiert. Diese mußten jeweils von den drei untersuchten Heuristiken gelöst werden. Für jede erzeugte Menge an Fertigungsaufträgen wurden einige charakteristische Größen festgehalten, allen voran die Optimalitätskriterien Rüst- und Lagerhaltungskosten. Tabelle 1.1 zeigt eine Auswahl der ausgewerteten Kriterien:

⁶ Im Gegensatz zum Ansatz von Eisenhut wird bei Dixon und Silver also in erster Linie die Kapazität und nicht die Nachfragemenge als bindende Restriktion angenommen.

lfd. Nr.	Kriterium	Definition
1	Gesamtkosten c	$c^s + c^h$
2	Rüstkosten c^s	$\sum_{r=1}^T \sum_{j=1}^n \sum_{i=1}^m s_{ij} \cdot \delta(x_{jr})$ mit $\delta(x_{jr}) := \begin{cases} 1, & \text{falls } x_{jr} > 0 \\ 0, & \text{sonst} \end{cases}$
3	Lagerhaltungskosten c^h	$\sum_{r=1}^T \sum_{j=1}^n \left(\sum_{i=1}^r x_{rj} - \sum_{i=1}^r d_{rj} \right)$
4	durchschnittliche Losgröße \bar{x}	$\frac{\sum_{r=1}^T \sum_{j=1}^n x_{jr}}{\left \{(j,r) \mid x_{jr} > 0\} \right }$
5	Variationskoeffizient der Losgrößen	$\frac{s_{\bar{x}}}{\bar{x}}$
6	Variationskoeffizient der Losgrößen einer Periode	$\frac{s_{x_t}}{\bar{x}_t}$
7	Variationskoeffizient der Losgrößen eines Produktes	$\frac{s_{x_j}}{\bar{x}_j}$

Tab. 1.1: Beurteilungskriterien einer Losgrößenpolitik

Um die Allgemeingültigkeit der Untersuchungsergebnisse gewährleisten zu können, wurden die Heuristiken für eine Vielzahl unterschiedlicher Planungssituationen getestet: Für jede Konstellation mit zwischen 5 und 10 Maschinen und zwischen 10 und 50 Produkten wurden jeweils 100 Probleme auf der Basis von Gleichverteilungen erzeugt.⁷

Tabelle 1.2 gibt die Verteilungen und Mittelwerte der in die Generierung der Zufallsprobleme eingehenden Größen an. $\text{density}(m)$, die sogenannte Belegungsdichte, ist hierbei ein Parameter, mit dem vorgegeben werden kann, auf wieviel Maschinen ein Produkt durchschnittlich bearbeitet werden muß. Ein Wert von 1.0 bedeutet, daß jedes Produkt auf allen Maschinen bearbeitet wird, ein Wert von 0.5, daß die Aufträge im Durchschnitt etwa die Hälfte aller Maschinen durchlaufen.⁸ $\text{density}(d)$, die Nachfragedichte, gibt an, in wieviel Perioden für ein Produkt durchschnittlich eine positive Nachfrage besteht, bezogen auf die maximale Anzahl T . Bei der Interpretation dieser Kennziffer muß ebenfalls wieder beachtet werden, daß für jedes Produkt in mindestens einer Periode eine positive Absatzmenge existieren mußte, so daß die effektive Nachfragedichte etwas größer als $\text{density}(d)$ ausfällt.

⁷ Der Planungshorizont war jeweils konstant $T = 8$, da das Verhalten der Verfahren aufgrund ihrer Myopik kaum von der Anzahl der in die Planung einbezogenen Perioden beeinflusst werden dürfte.

⁸ Der Erwartungswert der Anzahl der Operationen lag dennoch nicht bei $nm/2$, sondern etwas darüber, da jeder Auftrag auf mindestens einer Maschine bearbeitet werden mußte.

Größe	Verteilung	Mittelwert
Bearbeitungszeit p_{ij}	$\sim\text{GL}[1.0;8.0]^9$	4.5
Rüstzeit ϑ_{ij}	$\sim\text{GL}[0.1;1.0]$	0.55
Rüstkosten s_{ij}	$\sim\text{GL}[15.0 \cdot \text{density}(d); 18.75 \cdot T \cdot \text{density}(d)]^{10}$	$\text{density}(d) \cdot (7.5 + 9.375 \cdot T)$
Lagerkostensatz h_j	$\sim\text{GL}[5.0;25.0]$	15.0
Nachfragemenge d_{jt}	$\sim\text{GL}[1;5]$	3
Maschinenkapazität κ_{it}	$\sim\text{GL}[24 \cdot \text{density}(m) \cdot n \cdot \text{density}(d); 24 \cdot \text{density}(m) \cdot n \cdot T \cdot \text{density}(d)]^{11}$	$12 \cdot \text{density}(m) \cdot n \cdot \text{density}(d) \cdot (T+1)$

Tab. 1.2: Parameter der generierten Zufallsprobleme

Die Belegungsdichte $\text{density}(m)$ und die Nachfragedichte $\text{density}(d)$ betragen für alle 24600 Testläufe jeweils 0.5.

Die nächste Tabelle faßt die Leistungen der drei untersuchten Verfahren für alle in Tabelle 1.2 definierten Größen in Form der Mittelwerte über alle 23430 Simulationsläufe zusammen, bei denen alle Verfahren das generierte Losgrößenproblem lösen konnten. In der zweiten Zeile eines Feldes ist fettgedruckt der Rang angegeben.

⁹ $\text{GL}[a;b]$ ist das Symbol einer Gleichverteilung, deren Dichtefunktion zwischen a und b positive Werte besitzt.

¹⁰ Die minimalen Rüstkosten wurden so angesetzt, daß sie den Lagerhaltungskosten einer durchschnittlichen Nachfragemenge über eine Periode bei minimalem Lagerkostensatz entsprechen, während sich die maximalen Rüstkosten als die Lagerhaltungskosten einer durchschnittlichen Nachfragemenge über vier Perioden bei maximalem Lagerkostensatz ergeben.

¹¹ Die minimale Maschinenkapazität wurde so festgelegt, daß sie gerade zur Produktion einer durchschnittlichen Nachfragemenge bei maximalen Bearbeitungszeiten (unter Vernachlässigung der Rüstzeit) ausreicht. Es konnte demnach der Fall eintreten, daß Probleme nicht lösbar waren.

Kriterium	Dixon	Mod. Dixon	Eisenhut
Gesamtkosten	13393.90 1	13526.45 2	15301.60 3
Rüstkosten	9485.04 1	9485.83 2	13032.73 3
Lagerhaltungskosten	3908.87 2	4040.61 3	2268.87 1
durchschnittliche Losgröße ¹²	5.88840 2	5.90533 1	4.46581 3
Variationskoeffizient der Losgrößen ¹³	1.51775 2	1.57415 3	1.39187 1
Variationskoeffizient der Losgrößen einer Periode	1.45136 2	1.46374 3	1.43779 1
Variationskoeffizient der Losgrößen eines Produktes	1.51427 2	1.53130 3	1.45291 1
Anteil ungelöster Probleme in %	2.4 1	2.4 2	4.5 3
Laufzeit in msec ¹⁴	32620 ¹⁵ 3	17680 2	5754 1

Tab. 1.3: Mittelwerte und Ränge für verschiedene Optimalitätskriterien der Losgrößenplanung

Die beiden folgenden Diagramme erlauben eine unmittelbare vergleichende Bewertung der untersuchten Heuristiken bezüglich der Höhe und der Zusammensetzung der Gesamtkosten. Das erste Schaubild bezieht sich auf die Anzahl der erzielten besten Ergebnisse. Ein schraffiertes Feld entspricht signifikant häufigem Erzeugen bester Werte, ein weißes Feld steht für signifikant seltenes Erreichen dieses Ziels (immer im Vergleich zu den anderen beiden Verfahren und zum Signifikanzniveau $\alpha = 1\%$). Das zweite Schaubild macht eine Aussage hinsichtlich der Anzahl generierter schlechtester Pläne. Hier bedeutet ein schraffiertes Feld, daß ein Verfahren signifikant

¹² Je weniger Lose aufgelegt werden, desto übersichtlicher wird die Organisation der Produktion und desto weniger Verwaltungsaufwand fällt an.

¹³ Der Variationskoeffizient als relatives Schwankungsmaß ist auch immer ein Maß für das Risiko. Häufige Ausreißer bei den Losgrößen können z.B. bedeuten, daß die Lager sehr viel größer dimensioniert werden müssen als bei einer gleichmäßigeren Planung.

¹⁴ Die Testläufe erfolgten auf einem mit 25 MHz getakteten IBM-kompatiblen Rechner mit Intel-CPU der Baureihe 80386 DX-25. Die Implementierung der einzelnen Verfahren erfolgte in der objektorientierten Programmiersprache Objectworks®\Smalltalk, Release 4.0. Die Laufzeit entspricht somit aufgrund der im Hintergrund ablaufenden Prozesse nicht der in Anspruch genommenen CPU-Zeit.

¹⁵ Durch eine nachträgliche Modifikation des Verfahrens konnte die Laufzeit auf die Größenordnung der Variante "Mod. Dixon" herabgesetzt werden.

Paßt man an die CPU-Zeiten der Simulationsläufe durch multiple Regression Funktionen in Abhängigkeit von der Anzahl der Produkte und der Maschinen an, so ergibt sich für die Heuristik von Eisenhut $T_{CPU} \in O(n^{1.1} \cdot m^{0.7})$ und für die Heuristik von Dixon und Silver $T_{CPU} \in O(n^{1.15} \cdot m^{0.8})$ bei einem Bestimmtheitsmaß von über 99 %. Die Zeitkomplexitäten beider Verfahren verhalten sich demnach sehr ähnlich. Maes und Van Wassenhove (1988) ermitteln für die Originalversion der Heuristik von Dixon und Silver eine Zeitkomplexität $O(n^{1.74})$. Dieser hohe Exponent liegt in der aufwendigen, nach jedem Einplanungsvorgang vorzunehmenden Ermittlung der ersten kritischen Periode begründet. Für die Version zur Planung bei mehrstufiger Fertigung entfällt diese Prozedur, da die Kapazitätsengpässe vor der eventuellen Einlastung der Nachfragen zukünftiger Perioden beseitigt werden.

selten den schlechtesten Wert lieferte, während ein weißes Feld für signifikant häufiges Versagen steht.

Ein weißes Feld in beiden Schaubildern deutet also darauf hin, daß die zugehörige Regel keinesfalls für die entsprechende Zielsetzung eingesetzt werden sollte. Es ist mit einem nach unten zeigenden Pfeil (↘) gekennzeichnet. Entsprechend signalisiert ein nach oben weisender Pfeil (↗) eine signifikante Eignung der zugehörigen Heuristik.

Kriterium	Dixon	Mod. Dixon	Eisenhut
Gesamtkosten	↗	↗	↘
Rüstkosten	↗	↗	↘
Lagerhaltungskosten	↘	↘	↗

Tab. 1.4: Häufigkeit bester Ergebnisse

Kriterium	Dixon	Mod. Dixon	Eisenhut
Gesamtkosten	↗	↗	↘
Rüstkosten	↗	↗	↘
Lagerhaltungskosten	↘	↘	↗

Tab. 1.5: Häufigkeit schlechtester Ergebnisse

Daß ein hoher Anteil im Vergleich zu den anderen Verfahren bester Ergebnisse nicht zwangsläufig mit einem niedrigen Anteil schlechtester Ergebnisse verbunden sein muß, werden wir bei der Diskussion der Ablaufplanung sehen. Bei der Losgrößenplanung scheint jedoch eine eindeutige Korrelation zu bestehen, so daß eindeutige Aussagen hinsichtlich der Eignung möglich sind.

Für die Kriterien Gesamtkosten, Lagerhaltungs- und Rüstkosten sollen diese Ergebnisse nun näher untersucht werden.

1.4.1 Gesamtkosten

Die für die Losgrößenplanung relevanten Kosten ergeben sich aus der Summe der Rüst- und der Lagerhaltungskosten des Planungszeitraums. Diese sind sowohl von der Anzahl der Produkte als auch in Form der Rüstkosten von der Anzahl der Maschinen abhängig.

Das Verfahren von Dixon und Silver in der implementierten Fassung erweist sich als überlegen. Für jede der 246 Konstellationen ergaben sich für diese Heuristik die niedrigsten Mittelwerte über jeweils 100 Simulationen. Bemerkenswert ist, daß sich die prozentuale Abweichung zwischen den Leistungen der Verfahren von Dixon/Silver und von Eisenhut mit wachsender Maschinenzahl m weiter vergrößert, während sie sich bei steigender Anzahl der Erzeugnisse geringfügig verringert. Eine Losgrößenpolitik, die von der Heuristik von Eisenhut berechnet wurde, ist in der Regel mit höheren Rüstkosten verbunden als eine Planung, die vom Dixon/Silver-Verfahren ausgeführt wurde. Da einerseits die Rüstkosten linear von der Anzahl der Maschinen abhängen, andererseits die Lagerhaltungskosten über die Rüstkosten hiervon nur mittelbar beeinflusst werden, sind die Gesamtkosten der Heuristik von Eisenhut stärker von der Maschinenzahl abhängig.

Die Dominanz des Verfahrens von Dixon und Silver ist jedoch in erster Linie auf die beiden Verbesserungsschritte zurückzuführen, die die Gesamtkosten noch um ca. 10 % senken können, während der auf die Methode zur Bestimmung einer Eröffnungslösung im Verfahren von Dixon und Silver zurückzuführende Vorteil im Größenordnungsbereich von 1 % liegt. Dies ist eine wichtige Feststellung, denn die Optimierungsschritte lassen sich problemlos auch auf Produktionslose anwenden, die mit der Heuristik von Eisenhut bestimmt wurden, sie sind mithin nicht spezifisch für das Verfahren von Dixon und Silver. Des Weiteren können die Optimierungsschritte in Verfahren zur sukzessiven Lösung des Losgrößensequenzproblems wie der Heuristik von Lambrecht und Vanderveken nicht eingesetzt werden, da ihre Verwendung die notwendige Eigenschaft, Lose periodenweise in einem Durchlauf zu bilden, nicht erfüllt.

Um die Gründe für das bessere Abschneiden der Heuristik von Dixon und Silver genauer analysieren zu können, wollen wir nun die Gesamtkosten getrennt nach Rüst- und nach Lagerhaltungskosten untersuchen.

1.4.2 Rüstkosten

Die Abweichung der Heuristik von Eisenhut von den Varianten des Verfahrens von Dixon und Silver in bezug auf die Rüstkosten der generierten Fertigungsaufträge ist beträchtlich, während sich die beiden Varianten nur sehr geringfügig voneinander unterscheiden: Eisenhut erzeugt durchweg für alle Problemgrößen zwischen 30 % und 43 % höhere Rüstkosten, die maximale Differenz zwischen den beiden Versionen des Dixon/Silver-Verfahrens beträgt hingegen lediglich 0.53 %. Dieser Befund kann relativ einfach erklärt werden: die erste der beiden implementierten Methoden zur Verbesserung der Eröffnungslösung in der Heuristik von Dixon und Silver zielt darauf ab, Lose zusammenzufassen und hierdurch Rüstkosten einzusparen. Sie verschiebt die Produktion von Nachfragen auf frühere Perioden, wenn die eingesparten Rüstkosten die zusätzlichen Lagerkosten übertreffen. Bereits in der Arbeit von Dixon und Silver wird angedeutet, daß diese Vorgehensweise sehr gute Ergebnisse zeitigt. Sie ist deshalb auch bei ihnen Bestandteil der Basisheuristik. Bei den Simulationen mit der implementierten Fassung zeigte sich, daß die Loselimination in der Regel weitaus größere Effekte erzielt als die nachgeschaltete Prozedur zur Vorwärtsverschiebung, die die Lagerkosten senken soll. Während die Loselimination mit der Erhöhung der Lagerkosten verbunden ist, führt die Vorwärtsverschiebung zu keinen zusätzlichen Rüstkosten. Es ist deswegen zu erwarten, daß die Lagerhaltungskosten der Heuristik von Eisenhut geringer ausfallen werden als die des Dixon/Silver-Verfahrens.

1.4.3 Lagerhaltungskosten

Auch bei den Lagerhaltungskosten ist wieder zu beobachten, daß sich die Diskrepanz zwischen den beiden Verfahren mit zunehmender Anzahl an Produkten etwas verringert, während sie bei wachsender Maschinenzahl weiter zunimmt. Da die Rüstkosten mit der Anzahl der Bearbeitungen eines Produktes anwachsen, teilt die Prozedur zur Loselimination umso mehr Lose auf vorhergehende Perioden auf, je mehr Maschinen durchschnittlich zur Fertigung eines Erzeugnisses eingesetzt werden. Dies ist jedoch zwangsläufig mit wachsenden Lagerhaltungskosten verbunden, so daß die Gesamtlagerkosten der Fertigungsaufträge, die mit der Heuristik von Dixon und

Silver generiert wurden, mittelbar stärker von der Anzahl der Maschinen als von der Anzahl der Produkte beeinflusst werden.

Die Unterschiede zwischen den beiden Varianten der Methode von Dixon und Silver erweisen sich als sehr viel geringer als die zwischen den beiden Verfahren von Eisenhut und Dixon/Silver. Dies bestätigt wiederum den großen Einfluß der Verbesserungsprozeduren auf die Güte der Losgrößenplanung.

1.4.4 Zuverlässigkeit

Eine der wichtigsten Eigenschaften eines Verfahrens zur Losgrößenplanung ist seine Zuverlässigkeit, wenn es darum geht, für lösbare Probleme auch bei knappen Kapazitäten zulässige Produktionslose zu generieren. Gerade bei der Integration des Losgrößenmoduls sollte zumindest gewährleistet sein, daß solche Versagensfälle die Ausnahme sind.

Hier kommt der entscheidende Vorteil der vorausschauenden Kapazitätsplanung des Dixon/Silver-Verfahrens zum Tragen. Die Anzahl der ungelösten Probleme konnte im Vergleich zur Heuristik von Eisenhut um fast 50 % gesenkt werden. Zudem dürfte von den 592 ungelösten Problemen ein großer Anteil unlösbar gewesen sein. Ferner ist zu beobachten, daß die Anzahl der nicht gelösten Probleme mit der Problemgröße stark zurückgeht.

1.5 Fazit

Abschließend kann man folgende Feststellungen treffen:

- (1) Das bessere Verfahren zur Minimierung der Gesamtkosten ist das Verfahren von Dixon und Silver.
- (2) Diese Überlegenheit resultiert fast ausschließlich aus der Anwendung von Verbesserungsschritten im Anschluß an die Berechnung einer Eröffnungslösung.
- (3) Die Prozedur zur Loseliminierung hat hierbei eine größere Wirkung als die Methode zur Vorwärtsverschiebung von Losen.
- (4) Die Vermeidung von Kapazitätsengpässen durch vorausschauende Ressourcenplanung liefert auch in der auf den Mehrmaschinenfall erweiterten Version des Verfahrens von Dixon und Silver gute Ergebnisse, auch wenn die implementierte Fassung im Gegensatz zur einfachen Originalversion der Autoren eine zulässige Losbildung nicht garantieren kann. Fälle, in denen für ein lösbares Problem keine zulässige Lösung generiert werden konnte, sind allerdings selten.
- (5) Die Laufzeiten beider Verfahren bewegen sich selbst für praxisrelevante Konstellationen in der Größenordnung weniger Sekunden. Sie können deshalb problemlos auch in umfassendere Planungssysteme eingebunden werden.

2. Ablaufplanung

2.1 Problemdefinition

Die Maschinenbelegungsplanung bei Ein-Maschinen-, Flow-Shop- und insbesondere bei Job-Shop-Fertigung ist seit Jahrzehnten Gegenstand zahlreicher Arbeiten gewesen. Während des ersten Weltkriegs wurde von Gantt mit den nach ihm benannten Balkendiagrammen zum ersten Mal ein systematisches Verfahren zur Belegungsplanung ins Leben gerufen. Durch den Einsatz dieser Methode bei der Planung des Beladungsvorgangs von Schiffen konnte die Ladezeit auf annähernd die Hälfte reduziert werden. Seither sind für die unterschiedlichsten Planungssituationen und Zielsetzungen heuristische und exakte Verfahren zur Ablaufplanung entwickelt worden.

Im vorliegenden Fall wollen wir uns mit der Lösung statischer Job-Shop-Probleme $(J|C(t))^{16}$ beschäftigen, wobei $C(t)$ für verschiedene reguläre Kriterien¹⁷ stehen kann. Für die nachfolgenden Ausführungen machen wir eine Reihe von einschränkenden Annahmen:

- (1) Das gesamte Produktionsprogramm ist in Lose aufgespalten; die Bestimmung der kostenoptimalen Losgröße für jedes Produkt ist somit aus der Betrachtung ausgeschlossen.
- (2) Jeder Auftrag j bildet auch dann eine unteilbare Einheit, wenn er aus mehreren Produkteinheiten besteht (keine Splittung von Losen).
- (3) Wir behandeln den Fall einer seriellen Mehrmaschinenfertigung. Für jeden Auftrag ist die Maschinenfolge technologisch festgelegt.
- (4) Auch die Bearbeitungszeiten sind für jede Operation fest vorgegeben und bekannt. Die Möglichkeit einer intensitätsmäßigen Anpassung wird also ausgeschlossen.
- (5) Die Bearbeitungszeiten sind unabhängig von der Auftragsfolge. Sie schließen eventuelle Umrüst-, Sortenwechsel- und Transportzeiten mit ein. Diese müssen somit reihenfolgeninvariant sein. Hierdurch wird das eigentliche Sortenwechselproblem ausgeklammert. Rüstzeiten und -kosten sind Gegenstand der Betrachtungen bei der Losgrößenplanung.

¹⁶ Zur Klassifikation eines Problems der Ablaufplanung ist eine Tripelnotation $(\alpha|\beta|\gamma)$ eingeführt worden, wobei α den Fertigungstyp (J =Job-Shop-Problem mit einer beliebigen Anzahl von Maschinen), β bestimmte Auftragseigenschaften wie Bereitstellungsstermine oder Zusatzzeiten und γ die zu minimierende Zielfunktion kennzeichnet.

¹⁷ Ein reguläres Kriterium ist eine streng monoton wachsende Funktion der Durchlaufzeiten der einzelnen Aufträge. Wichtige reguläre Kriterien sind z.B. die Zykluszeit, die mittlere Durchlaufzeit, die mittlere Wartezeit, die mittlere Belegungszeit, die mittlere Leerzeit, die mittlere und die maximale Terminabweichung sowie die mittlere und die maximale Verspätung.

- (6) Jeder Auftrag wird auf jeder Maschine höchstens einmal bearbeitet. Dies ist lediglich eine vereinfachende, nicht eine einschränkende Annahme, da die Benennung der Produkte beliebig ist. Falls notwendig, kann man annehmen, daß jede Operation ein eigenes Produkt herstellt. Für diesen Fall ist die Einhaltung der Annahme automatisch gewährleistet.
- (7) Jede begonnene Bearbeitung eines Auftrags muß ohne Unterbrechung zu Ende geführt werden (keine Unterbrechbarkeit von Arbeitsgängen).
- (8) Auf jeder Maschine kann jeweils nur ein Auftrag zur gleichen Zeit bearbeitet werden (keine Überlappung).
- (9) Die Maschinen stehen ohne wartungs- und störungsbedingte Unterbrechungen während des gesamten Planungszeitraums für die Bearbeitung der Aufträge bereit. Ihre Kapazität sei unbegrenzt.
Die tatsächlichen Kapazitäten werden üblicherweise bei der Planung der Losgrößen oder durch einen Kapazitätsabgleich berücksichtigt.
- (10) Es bestehen unbegrenzte Zwischenlagerkapazitäten.
- (11) Es wird von einem statischen Ablaufplanungsproblem ausgegangen, d.h. es wird unterstellt, daß alle Aufträge gleichzeitig als Ergebnis vorgeschalteter Planungsschritte generiert werden. Diese Vorgehensweise erfordert eine hohe Planungsfrequenz im Bereich der kurzfristigen Feinterminierung.

Im Gegensatz zur Losgrößenplanung, bei der sich jeder Politik unmittelbar die zugehörigen Kosten zuordnen lassen, gestaltet sich die monetäre Bewertung eines Maschinenbelegungsplans wesentlich schwieriger. Eine interessante Kritik der gängigen Optimalitätskriterien findet man bei Siegel (1974) und Seelbach (1975). Diese sind in der Regel zeitliche Größen, da eine korrekte Kostenzuordnung die Kenntnis bester alternativer Anlagemöglichkeiten voraussetzt.

1973 wurde von Panwalkar in den U.S.A. eine empirische Untersuchung durchgeführt, die zum Ziel hatte, die Relevanz einzelner Ziele in der Praxis zu erforschen (Zäpfel, 1982). Es wurden u.a. folgende Zielkriterien der Reihenfolgeplanung vorgelegt:

- A: Minimierung der Gesamtdurchlaufzeit
- B: Einhaltung von Lieferterminen
- C: Minimierung der Lagerhaltungskosten

Es ergab sich folgendes Bild:

Kriterium	Anzahl der Antworten				
	Rang	1	2	3	4
A		6	14	9	11
B		33	2	1	4
C		2	8	11	19

Tab. 2.1: Relevanz von Beurteilungskriterien in der Ablaufplanung

Obwohl bei einer Auswertung von 40 Antworten kaum von einer repräsentativen Umfrage die Rede sein kann, so zeigt sich doch deutlich, daß die Praxis verständlicherweise großen Wert auf die Einhaltung von Terminen legt.

Die in der Literatur geäußerte Vermutung, daß Zeitkriterien in Grenzen gleichgerichtet seien, läßt sich zum Teil damit erklären, daß für alle regulären Zielsetzungen gemeinsame Teile der Gesamtlösungsmenge aufgrund bestimmter Kriterien als nicht-optimal ausgesondert werden können. Wie man die Menge der potentiell optimalen Maschinenbelegungspläne schrittweise einengen kann, soll Inhalt des nächsten Abschnittes sein.

2.2 Zulässige, semiaktive, aktive und unverzögerte Belegungspläne

Unter *zulässigen* Ablaufplänen wollen wir solche Pläne verstehen, die die technologischen Nebenbedingungen erfüllen, deren Auftragsfolgen endlich sind und bei denen sich Operationen gleicher Aufträge zeitlich nicht überlappen. Wichtig ist die Feststellung, daß in der Ablaufplanung Maschinenkapazitäten für die Zulässigkeit eines Belegungsplans unerheblich sind.

Die Menge der zulässigen Ablaufpläne ist für ein lösbares Belegungsproblem unbeschränkt. Die Menge der potentiell optimalen Pläne kann jedoch in einem ersten Schritt so eingeschränkt werden, daß sie endlich wird. Ein intuitiver Ansatz bei der Lösung von Schedulingaufgaben wird sein, nur Pläne zu untersuchen, bei denen der Beginn keiner Operation vorgezogen werden kann, ohne eine Auftragsfolge zu ändern oder eine Maschinenfolgebedingung zu verletzen. Jeder Maschinenbelegungsplan kann problemlos in einen äquivalenten *semiaktiven* Belegungsplan überführt werden, indem man die die Operationen repräsentierenden Balken des Auftragsfolgenganttts möglichst weit nach links verschiebt. Man bezeichnet ein solches Vorgehen als limitierte Linksverschiebung.

Führt man den Gedanken der limitierten Linksverschiebung weiter, so stößt man auf die Menge der *aktiven* Belegungspläne, die eine Untermenge der semiaktiven Belegungspläne darstellt. Ein aktiver Ablaufplan ist dadurch charakterisiert, daß es nicht möglich ist, den Beginn irgendeines Arbeitsvorgangs vorzuverlegen (eventuell auch unter Vertauschung einer Auftragsfolge), ohne den Beginn mindestens einer anderen Operation zu verzögern. Es läßt sich zeigen, daß (1) ein semiaktiver Ablaufplan in bezug auf reguläre Zeitkriterien nie besser ist als der aus ihm abgeleitete aktive Ablaufplan und (2) die Menge der aktiven Pläne immer mindestens einen Belegungsplan enthält, der bezüglich eines festgelegten regulären Kriteriums optimal ist. Die Menge der aktiven Pläne dominiert somit die der semiaktiven, und wir können uns bei der Suche nach optimalen Lösungen auf erstere beschränken. Der Algorithmus von Giffler und Thompson in seiner enumerativen Version ist ein Verfahren zur Generierung aller aktiven Pläne.

Da diese Menge jedoch immer noch prohibitiv groß werden kann, versucht man die zu untersuchenden Alternativen weiter einzuschränken. Eine Teilmenge der aktiven Pläne bilden die *unverzögerten* Ablaufpläne (Nondelay-Schedules), die dadurch gekennzeichnet sind, daß jede Maschine zum frühest möglichen Zeitpunkt mit einem verfügbaren Auftrag belegt wird. Allerdings dominieren unverzögerte Ablaufpläne die aktiven Pläne nicht in gleicher Weise wie aktive die semiaktiven Auftragsfolgen.

Vielmehr ist nicht immer gewährleistet, daß ein optimaler Ablaufplan existiert, der unverzögert ist.

Abb. 2.1 faßt die Beziehungen zwischen den verschiedenen Mengen von Belegungsplänen noch einmal zusammen:

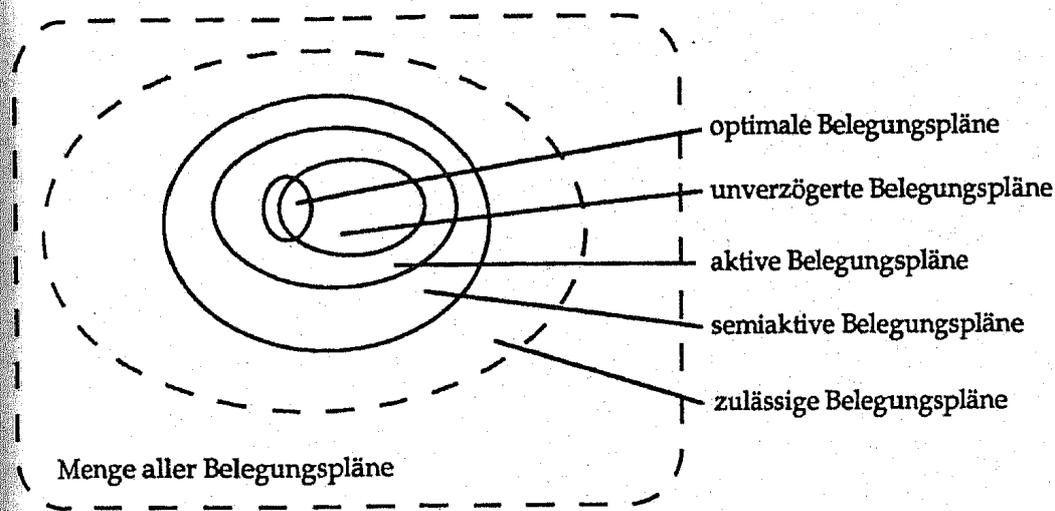


Abb. 2.1: Venn-Diagramm zur Klassifikation von Ablaufplänen bei Verwendung regulärer Optimalitätskriterien¹⁸

2.3 Der Algorithmus von Giffler und Thompson

In einem Beitrag für die Zeitschrift 'Operations Research' stellten B. Giffler und G.L. Thompson 1960 ein Verfahren zur Generierung aller aktiven Maschinenbelegungspläne für einen gegebenen Maschinenpark und Auftragsbestand vor. Die Berechnung aller aktiven Belegungspläne kann allerdings sehr aufwendig werden, weshalb man sich in der Regel darauf beschränken wird, durch den Einsatz von sogenannten Prioritätsregeln zur Konfliktlösung eine gute, jedoch nicht notwendigerweise optimale Lösung zu erhalten.

Abbildung 2.2 zeigt den Programmablaufplan einer bei Baker (1974) und Neumann, Morlock (1993) veröffentlichten Variante des Verfahrens von Giffler und Thompson, die *einen* aktiven Maschinenbelegungsplan erzeugt. Durch den Einsatz verschiedener Prioritätsregeln läßt sich die Heuristik flexibel zur Reihenfolgeplanung bei sehr unterschiedlichen Optimalitätskriterien einsetzen. Dies ist eine wesentliche Eigenschaft, die diesen Ansatz von vielen neueren heuristischen Verfahren unterscheidet, die sich nur zur (allerdings leistungsfähigeren) Optimierung eines ganz bestimmten Kriteriums (i.a. der Zykluszeit) eignen.

¹⁸ Definiert man lediglich solche Ablaufpläne als optimal, die bezüglich des festgelegten regulären Kriteriums den Optimalwert erreichen und deren Summe der Startzeitpunkte aller Operationen minimal ist, so ist die Menge der optimalen Belegungspläne eine Teilmenge der Menge der aktiven Belegungspläne.

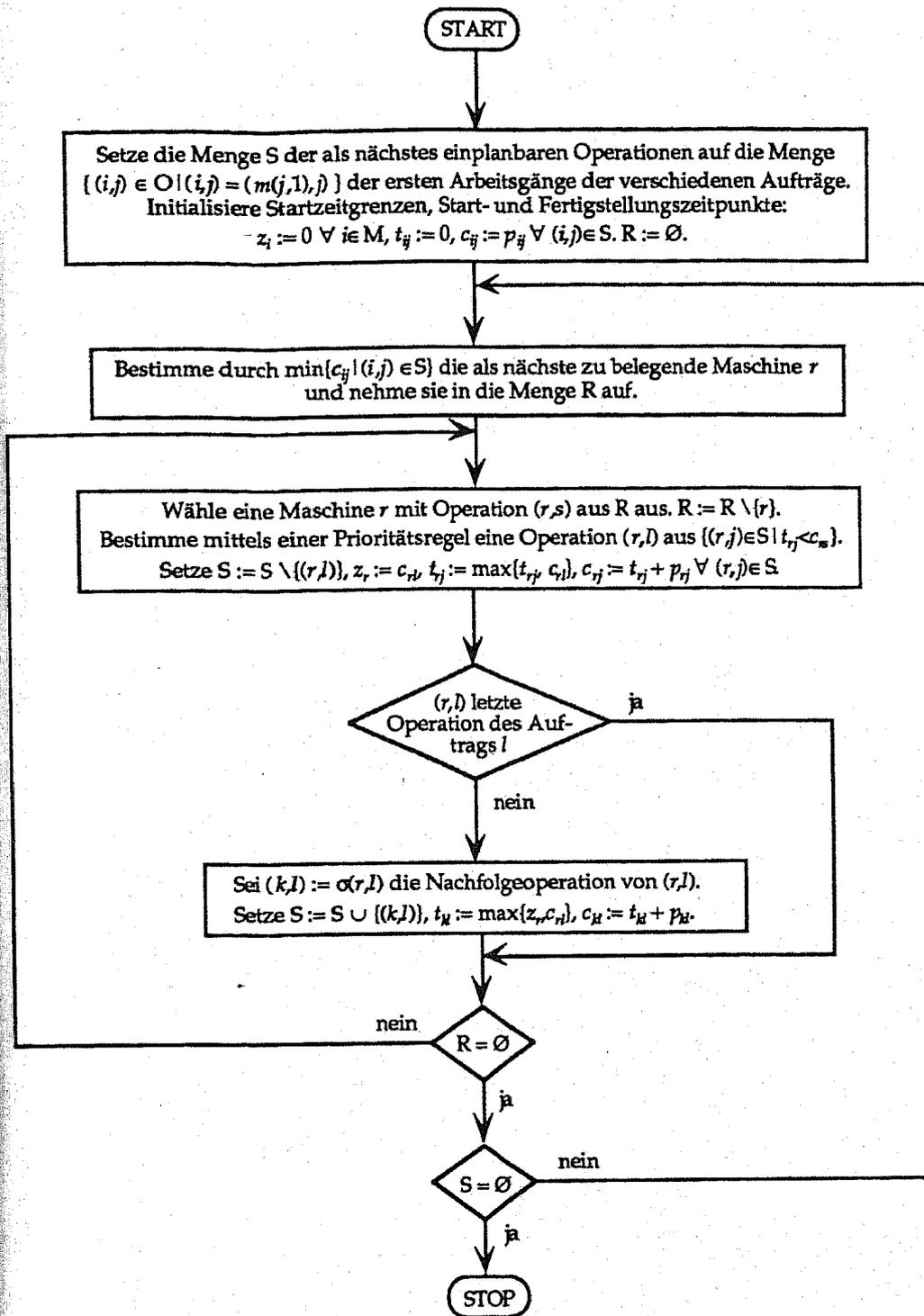


Abb. 2.2: Eine Variante des Verfahrens von Giffler und Thompson

Bereits im Beitrag von Giffler und Thompson wurde die Möglichkeit erwähnt, die während des Planungsprozesses auftretenden Konflikte mit Hilfe von Prioritätsregeln zu lösen. Diese Regeln sind seither ein beliebter Gegenstand von Simulationsstudien. Eine Übersicht getesteter Prioritätsregeln und spezifische Empfehlungen für deren Einsatz in der Maschinenbelegungsplanung geben beispielweise Baker (1974), Blackstone et al. (1982), Gere (1966), Haupt (1989) sowie Panwalkar und Iskander (1977). Einige bekannte Regeln wurden im Rahmen dieser Arbeit implementiert und sind in

Tabelle 2.2 zusammengefaßt. Die spezifische Eignung der Regeln soll Gegenstand des Abschnittes 2.5.1 sein.

Regel	Bez.	für zu wählende Operation $(r,l) \in K$ gilt
shortest processing time (Kürzeste-Operationszeit-Regel)	SPT	$p_{r,l} = \min\{p_{r,j} \mid (r,j) \in K\}$
most work remaining (Restbearbeitungszeitregel)	MWR	$\sum_{\mu \in R_{r,l}} p_{\mu} = \max \left\{ \sum_{\mu \in R_{r,j}} p_{\mu} \mid (r,j) \in K \right\},$ wobei $R_{r,j}$ die Menge der Maschinen sei, auf denen j im Anschluß an r noch bearbeitet werden muß.
shortest slack time (Kürzeste-Schlupfzeit-Regel)	SST	$d_l - t_{r,l} - \sum_{\mu \in R_{r,l}} p_{\mu} = \min \left\{ d_j - t_{r,j} - \sum_{\mu \in R_{r,j}} p_{\mu} \mid (r,j) \in K \right\},$ wobei d_j der Liefertermin für Auftrag j sei.
first come - first served (FIFO-Regel)	FCFS	$c_{\pi(r,l)l} = \min\{c_{\pi(r,j)j} \mid (r,j) \in K\},$ wobei $\pi(r,j)$ die Maschine bezeichne, auf der Produkt j vor Maschine r bearbeitet wurde.
longest processing time (Längste-Operationszeit-Regel)	LPT	$p_{r,l} = \max\{p_{r,j} \mid (r,j) \in K\}$
shortest relative slack time (Kürzeste-Relative-Schlupfzeit-Regel)	SRST ¹⁹	$s_{r,l} := \begin{cases} \frac{d_j - t_{r,j} - \sum_{\mu \in R_{r,j}} p_{\mu}}{ R_{r,j} }, & \text{für } d_j - t_{r,j} - \sum_{\mu \in R_{r,j}} p_{\mu} > 0 \\ \left(d_j - t_{r,j} - \sum_{\mu \in R_{r,j}} p_{\mu} \right) \cdot R_{r,j} , & \text{sonst} \end{cases}$ Wähle dann Auftrag l mit $s_{r,l} = \min\{s_{r,j} \mid (r,j) \in K\}.$
first in S	FIS	(r,l) ist diejenige Operation aus K , die als erste in S aufgenommen wurde.
random	RND	(r,l) ist eine zufällig ausgewählte Operation aus K , wobei jede Operation mit gleicher Wahrscheinlichkeit gewählt werden kann.

Tab. 2.2: Untersuchte Prioritätsregeln

¹⁹ Diese Regel wurde so konzipiert, daß Aufträge mit einer großen Anzahl noch durchzuführender Arbeitsgänge bevorzugt eingeplant werden, um hierdurch Stauungen von Aufträgen mit großen Schlupfzeiten zu vermeiden, wie sie bei der klassischen SST-Regel zu beobachten sind.

2.4 Das permutierende Engpaßverfahren von Adams, Balas und Zawack

Im folgenden soll die 1988 von Adams, Balas und Zawack veröffentlichte Heuristik zur Lösung des Minimierungsproblems der Zykluszeit bei Job-Shop-Fertigung vorgestellt werden. Das Verfahren basiert auf dem Disjunktivgraphenmodell für die Maschinenbelegungsplanung. Es wird jeweils diejenige Maschine als einzuplanender Engpaß unter den noch nicht belegten Maschinen identifiziert, die bei der Belegung durch das exakte Verfahren von Carlier (1982) die größte Belegungszeit hervorbringt. Jedesmal, wenn eine neue Maschine eingeplant wird, werden alle vorher erstellten Reihenfolgen neu bestimmt. Auch diese lokale Reoptimierung beruht auf dem wiederholten Lösen von Ein-Maschinen-Problemen mit Bereitstellungsterminen und Zusatzzeiten durch das Branch-and-Bound-Verfahren von Carlier. Neben dieser Grundversion des permutierenden Engpaßverfahrens haben die Autoren eine Variante implementiert, die die Prozedur auf die Knoten eines partiellen Suchbaums anwendet. Aufgrund der erheblichen Laufzeiten und der Geringfügigkeit der erzielten Verbesserungen war das Enumerationsverfahren nicht Gegenstand dieser Untersuchung.

Abbildung 2.3 stellt den Programmablaufplan der implementierten Variante des permutierenden Engpaßverfahrens dar. Für Einzelheiten sei z.B. auf die Darstellung von Domschke, Scholl und Voß (1993) verwiesen.

In einem ersten Schritt wird die Menge der bereits eingeplanten Maschinen M_0 auf die leere Menge gesetzt und der erste Disjunktivgraph erzeugt. Die technologisch vorgegebenen Maschinenfolgen der einzelnen Aufträge werden hierbei durch Konjunktivkanten abgebildet, die die jeweiligen als Knoten repräsentierten Arbeitsgänge verbinden. Operationen, die auf der gleichen Maschine bearbeitet werden, müssen im Laufe des Verfahrens in eine eindeutige Reihenfolge gebracht werden. Sie werden im Anfangsgraphen durch Diskjunktivkanten verbunden.

Im nächsten Schritt wird zunächst für jeden Arbeitsgang i auf den noch nicht belegten Maschinen der Bereitstellungstermin $r_i = L(\alpha, i)$ und die Zusatzzeit $q_i = L(i, \omega) - p_i$ berechnet. Mit diesen Größen kann dann für jede Maschine aus $M \setminus M_0$ mit dem Algorithmus von Carlier ein optimaler Ein-Maschinen-Belegungsplan ermittelt werden. Als Engpaßmaschine plant man anschließend die Maschine mit der maximalen Belegungszeit ein, indem die zugehörigen Disjunktiv- durch die sich aus dem Belegungsplan ergebenden Konjunktivkanten ersetzt.

Um den Einfluß späterer Belegungen auf früher vorgenommene Planungen zu erfassen, wird sodann eine lokale Reoptimierung durchgeführt. Hierzu entfernt man in einer bestimmten Reihenfolge bereits eingeplante Maschinen wieder aus dem Graphen und plant sie von neuem ein. Bei der ersten von insgesamt höchstens drei Iterationen entspricht diese Reihenfolge der Sequenz, in der die Maschinen eingeplant wurden, bei den folgenden wird die Reihenfolge durch die fallenden Belegungszeiten der Maschinen nach ihrer Neubelegung in der vorhergehenden Iteration der lokalen Reoptimierung definiert.

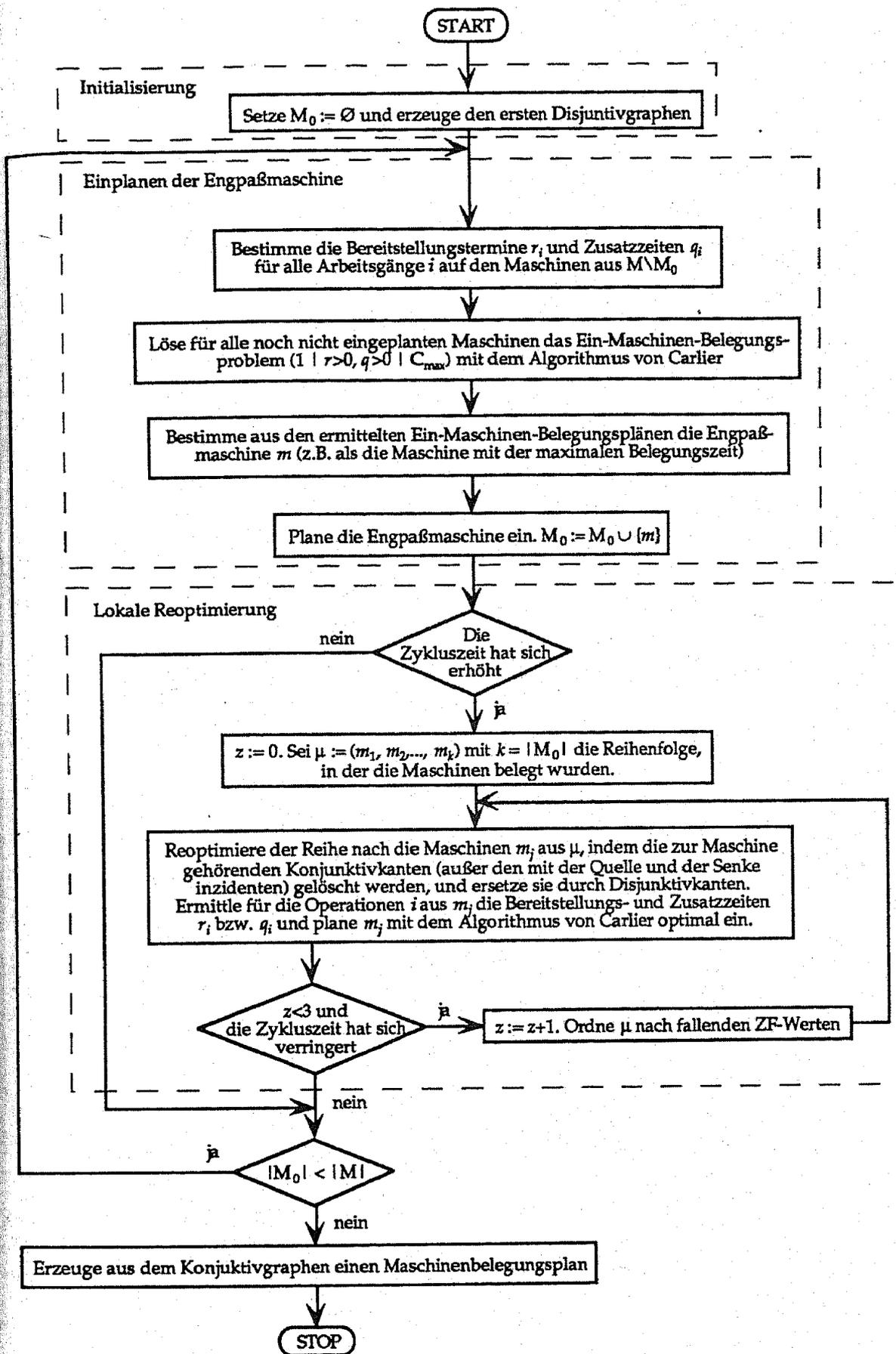


Abb. 2.3: Permutierendes Engpaßverfahren von Adams, Balas und Zawack

Im Unterschied zur Originalversion wird die lokale Reoptimierung nur dann ausgeführt, wenn sich durch das Einplanen einer zusätzlichen Maschine im vorhergehenden Schritt eine Verschlechterung des Zielfunktionswertes ergeben hat. Da, wie bereits in der Arbeit von Adams, Balas und Zawack erwähnt, bei Problemen mit einer großen Anzahl an Maschinen die Zykluszeit des Belegungsplans für das Gesamtproblem oft der Belegungszeit der ersten eingeplanten Maschine entspricht, lassen sich durch diese Modifikation ganz erhebliche Zeitvorteile erzielen, zumal der Aufwand einer Reoptimierung in der dritten Potenz mit der Anzahl der Maschinen wächst. Tests mit der Original- und der modifizierten Version haben zudem ergeben, daß sich keine nennenswerte Verschlechterung ergibt.

Insgesamt wurden sechs verschiedene Varianten des permutierenden Engpaßverfahrens implementiert, von denen fünf in die Testläufe einbezogen wurden. Diese seien im folgenden kurz beschrieben:

(1) standard:

Entspricht dem permutierende Engpaßverfahren, wie es in Abbildung 2.3 vorgestellt wurde. Die selektive Enumeration wurde aufgrund ihrer hohen Laufzeiten nicht implementiert. Sie ist für einen Einsatz in der Praxis nur in Sonderfällen von Interesse, z.B. wenn extrem hohe Maschinenstundensätze angenommen werden müssen.

(2) standard, no reoptimization:

Wie standard, jedoch ohne Reoptimierungszyklen. Wie später anhand der Testergebnisse deutlich werden wird, liefert diese Version etwas schlechtere Ergebnisse als standard, benötigt aber deutlich weniger Laufzeit.

(3) fez:

Zur Bestimmung der jeweiligen Engpaßmaschine werden nicht für alle noch zu belegenden Maschinen die entsprechenden Ein-Maschinen-Probleme gelöst, sondern es wird diejenige Maschine mit dem Algorithmus von Carlier eingeplant, auf der die Operation (i,j) mit maximalem FEZ_{ij} bearbeitet wird, wobei FEZ_{ij} der frühest mögliche Endzeitpunkt der Operation (i,j) ist. Der Reoptimierungszyklus entspricht dem der Standardversion.

(4) fez, no reoptimization:

Wie fez, jedoch ohne Reoptimierungszyklen.

(5) sst:

Sei der Schlupf s_{ij} einer Operation (i,j) definiert als $d_j - FEZ_{ij}$. Der Schlupf einer Maschine i berechne sich dann als $\min\{s_{ij} \mid (i,j) \in O\}$. Als Engpaß wird nun diejenige Maschine identifiziert, deren Schlupf minimal ist. Falls noch keine Maschine belegt wurde, werden auf der Engpaßmaschine die Operationen in der Reihenfolge aufsteigender Schlupfwerte eingeplant. Ansonsten kommt der Algorithmus von Carlier zum Einsatz.²⁰

²⁰ Würde man auch dann Maschinen in der Reihenfolge aufsteigender Schlupfwerte einplanen, wenn bereits Selektionen im Disjunktivgraphen bestimmt worden sind, würden sich im Konjunktivgraphen i.a. Zyklen ergeben, die generierte Lösung wäre mithin unzulässig.

Im Reoptimierungsschritt werden entsprechend dem Engpaßprinzip nach dem ersten Durchlauf die Ein-Maschinen-Belegungspläne so erstellt, daß zuerst die Maschine mit dem kleinsten Schlupf, dann die mit dem zweitkleinsten Schlupf usw. belegt wird.

(6) sst, no reoptimization:

Wie sst, jedoch ohne Reoptimierungszyklen.

Da das sst-Verfahren ohne Reoptimierungszyklus von den beiden anderen Varianten ohne Reoptimierung bezüglich Laufzeit und Ergebnissen dominiert wurde, ist diese Variante nicht in die Testläufe einbezogen worden.

2.5 Vergleichende Beurteilung

Die Versionen der Heuristik von Giffler und Thompson und des permutierenden Engpaßverfahrens wurden durch zahlreiche Simulationen getestet und in bezug auf unterschiedliche Optimalitätskriterien miteinander verglichen. Abschnitt 2.5.1 behandelt eine vergleichende Analyse verschiedener Prioritätsregeln in der Heuristik von Giffler und Thompson, während Abschnitt 2.5.2 vom Vergleich dieser einfachen Heuristik mit dem aufwendigeren permutierenden Engpaßverfahren handelt.

In beiden Kapiteln werden die Verfahren anhand einer Reihe von Kriterien beurteilt, die nachfolgend aufgelistet werden:

lfd. Nr.	Kriterium	Definition
1	Zykluszeit C_{\max}	$\max_j \{C_j^p\} = \max_i \{C_i^m\}$
2	mittlere Durchlaufzeit \bar{C}^p	$\frac{\sum_{j=1}^n C_j^p}{n}$
3	mittlere Belegungszeit \bar{C}^m	$\frac{\sum_{i=1}^m C_i^m}{m}$
4	maximale Terminüberschreitung T_{\max}	$\max_j \{ \max\{0; C_j^p - d_j\} \}$
5	mittlere Terminüberschreitung \bar{T}	$\frac{\sum_{j=1}^n \max\{0; C_j^p - d_j\}}{n}$
6	Anzahl der Aufträge, die zu spät fertig werden	$\#\{j C_j^p > d_j\}$

Tab. 2.3: Ausgewertete Optimalitätskriterien

In der nächsten Tabelle sind die Wertebereiche der für die Generierung der Ablaufplanungsprobleme entscheidenden Größen angegeben. $density(m)$ ist hierbei der Parameter zur Vorgabe der Belegungsdichte (vgl. Abschnitt 1.4).

Größe	Verteilung
Bearbeitungszeit einer Operation pro ME ohne Rüstzeit	$\sim GL[0.1;8.0]$
Rüstzeit auf einer Maschine	$\sim GL[1.6;4.0]$
Losgröße	$\sim GL[1;5]$
Liefertermin	$\sim GL[0.0;12 \cdot n \cdot m \cdot density(m)]$

Tab. 2.4: Parameter der generierten Zufallsprobleme

Aus diesen Daten wird ersichtlich, daß wie schon bei der Losgrößenplanung auch Probleme, deren Maschinenpark und Auftragsbestand gleich groß sind, sehr stark voneinander abweichen können. Dies bedeutet, daß die in den nächsten Abschnitten getroffenen Aussagen eine gewisse Allgemeingültigkeit besitzen und nicht nur für ganz bestimmte Planungssituationen gelten.

2.5.1 Beurteilung von Prioritätsregeln in der Heuristik von Giffler und Thompson

In einer ersten Untersuchung wurde die Eignung der acht in Tabelle 2.1 definierten Prioritätsregeln im Verfahren von Giffler und Thompson untersucht. Die Auswertung von Simulationsergebnissen sollte spezifische Aussagen über die Leistungsfähigkeit der verschiedenen Varianten bezüglich der in Tabelle 2.3 aufgelisteten Zielkriterien ermöglichen. Untersucht wurden folgende Problemstellungen: Für jede Planungssituation mit zwischen 3 und 10 Maschinen und 5, 10, 15, 20 oder 25 Aufträgen wurden 100 Probleme erzeugt, die jeweils von allen Varianten zu lösen waren. Insgesamt wurden also 32000 Maschinenbelegungspläne erzeugt und ausgewertet. Die Belegungsdichte der Maschinen betrug jeweils 1.0.

Die nächste Tabelle gibt für die in Abschnitt 2.5 definierten Größen und die Laufzeit die von den verschiedenen Prioritätsregeln erreichten Mittelwerte und (fettgedruckt) den Rang der entsprechenden Regel an.

Optimalitätskriterium	SPT	MWR	SST	FCFS	LPT	SRST	FIS	RND
Zykluszeit	462.081 8	340.199 3	441.825 7	321.367 1	429.664 6	389.040 4	323.289 2	403.975 5
mittlere Durchlaufzeit	227.423 1	295.457 7	275.620 5	244.671 2	325.817 8	281.541 6	253.379 3	270.550 4
mittlere Belegungszeit	405.336 8	315.758 3	396.726 7	279.109 1	392.822 6	350.795 4	282.728 2	355.933 5
maximale Verspätung	218.052 5	218.803 7	60.909 2	173.894 3	268.478 8	60.665 1	180.809 4	218.746 6
mittlere Verspätung	26.284 5	33.694 7	10.103 2	24.252 3	42.332 8	9.911 1	25.592 4	30.519 6
Anzahl verspäteter Aufträge	2.501 3	3.267 7	1.736 2	2.754 4	3.617 8	1.729 1	2.844 5	2.968 6
Laufzeit in msec	3838.3 2	5711.4 6	6259.0 7	4048.3 5	4027.2 4	6627.4 8	3941.5 3	3787.2 1

Tab. 2.5: Mittelwerte und Ränge für verschiedene Optimalitätskriterien der Ablaufplanung

Die wichtigsten Ergebnisse lassen sich wie folgt zusammenfassen:

- (1) Keine Regel kann für alle untersuchten Größen befriedigende Ergebnisse vorweisen. Der Einsatz einer ungeeigneten Regel führt sogar zu schlechteren Ergebnissen als die zufällige Auswahl (RND).
- (2) Die FCFS-Regel eignet sich generell zur Minimierung regulärer Kriterien, in die keine Liefertermine eingehen, während die SPT-Regel nur zur Minimierung der Durchlaufzeit eingesetzt werden sollte.
- (3) Spielen Liefertermine bei der Beurteilung eines Belegungsplans eine Rolle, so müssen sie bei der verwendeten Regel auch berücksichtigt werden. Abgesehen vom Kriterium der mittleren Durchlaufzeit dominiert die SRST- die klassische SST-Regel. Die bevorzugte Bearbeitung von Aufträgen mit einer großen Restbearbeitungsdauer trägt zu einer Verminderung der Myopik bei, wodurch sehr lange Wartezeiten von Aufträgen mit ungünstiger Priorität vermieden werden.

Wie später noch auszuführen sein wird (vgl. Abschnitt 2.5.3), gelten diese Aussagen nur für den Fall, daß mit der Heuristik von Giffler und Thompson aktive Belegungspläne erzeugt werden. Bei der Beschränkung auf unverzögerte Ablaufpläne verändern sich die Eigenschaften der einzelnen Regeln (mit Ausnahme der FCFS-Regel, deren Verwendung automatisch zur Generierung unverzögerter Pläne führt).

Wie bei der Losgrößenplanung soll nun die Eignungscharakteristik der Regeln untersucht werden: für welche Zielsetzungen konnten besonders häufig beste Pläne erzeugt werden? Bezüglich welcher Kriterien erweisen sich die Regeln als ungeeignet, weil sie oft vergleichsweise schlechte Ergebnisse hervorbringen? Die Bedeutung der Schraffuren und Symbole ist die gleiche wie in Abschnitt 1.4.

Kriterium	SPT	MWR	SST	FCFS	LPT	SRST	FIS	RND
Zykluszeit	↘	↗	↘	↗	↘		↗	
mittl. Durchlaufzeit				↗	↘			
mittl. Belegungszeit	↘		↘	↗	↘		↗	
mittl. Terminüberschreitung	↘		↗		↘	↗		

Tab. 2.6: Häufigkeit bester Ergebnisse

Kriterium	SPT	MWR	SST	FCFS	LPT	SRST	FIS	RND
Zykluszeit	↘	↗	↘	↗	↘		↗	
mittl. Durchlaufzeit	↗			↗	↘			
mittl. Belegungszeit	↘		↘	↗	↘		↗	
mittl. Terminüberschreitung	↘		↗		↘	↗		

Tab. 2.7: Häufigkeit schlechtester Ergebnisse

Die hellere Schraffierung im Feld [mittl. Terminüberschreitung, RND] bedeutet, daß hier keine signifikante Aussage über seltenes bzw. häufiges Versagen getroffen werden kann.

2.5.2 Vergleich der Heuristik von Giffler und Thompson mit verschiedenen Varianten des permutierenden Engpaßverfahrens

In einer zweiten Testreihe wurden die Leistungen der Heuristik von Giffler und Thompson mit denen des sehr viel aufwendigeren und fast 30 Jahre später entwickelten permutierenden Engpaßverfahrens verglichen. Die generierten Zufallsprobleme - diesmal mit dem Parameter 0.5 für die Belegungsichte, um eine größtmögliche Allgemeingültigkeit der Ergebnisse zu garantieren - wurden von allen acht Versionen des Prioritätsregelverfahrens bzw. den fünf untersuchten Varianten der Heuristik von Adams, Balas und Zawack gelöst. Um die Ergebnisse kompakter präsentieren zu können, sollen lediglich Werte für die drei Prioritätsregeln vorgestellt werden, deren Einsatz sich im vorigen Abschnitt als vielversprechend erwiesen hat: SPT, FCFS und SRST. Jede dieser drei Regeln hat mindestens für ein Kriterium einen ersten Rang belegt.

Aufgrund der wesentlich höheren Laufzeiten des permutierenden Engpaßverfahrens wurden für diese Vergleichsanalyse kleinere Problemstellungen gelöst. Die Anzahl der Maschinen lag zwischen 4 und 10, während sich das Auftragsvolumen zwischen 5 und 10 Aufträgen bewegte. Zusätzlich wurden drei Planungssituationen simuliert, die den tatsächlichen Verhältnissen in einem Betrieb schon etwas näher kommen: Jeweils 20 Aufträge wurden auf fünf, sechs oder sieben Maschinen bearbeitet. Für die insgesamt 45 Konstellationen wurden jeweils 100 Probleme generiert.

Zunächst seien die Simulationsergebnisse wieder in Form von Mittelwerten zusammengefaßt:

Optimalitätskriterium	Giffler SPT	Giffler FCFS	Giffler SRST	standard reop.	sst reop.	fez reop.	standard no reop.	fez no reop.
Zykluszeit	173.436 8	141.111 6	155.045 7	126.608 1	129.271 4	127.477 2	129.163 3	131.152 5
mittlere Durchlaufzeit	82.927 1	83.810 2	98.370 8	86.458 3	87.035 5	85.959 4	87.691 6	88.450 7
mittlere Belegungszeit	119.985 8	100.183 6	112.516 7	94.593 1	96.464 4	95.121 2	95.470 3	96.957 5
maximale Verspätung	70.177 8	59.025 6	64.493 1	57.436 4	54.715 2	57.225 3	58.370 5	59.698 7
mittlere Verspätung	12.376 8	11.056 4	7.773 1	11.099 5	10.617 2	10.897 3	11.320 6	11.450 8
Anzahl verspäteter Aufträge	1.65154 2	1.69036 3	1.53685 1	1.72615 6	1.69857 4	1.72371 5	1.75593 7	1.76865 8
Laufzeit in msec	1104.5 2	954.0 1	1360.5 3	399840 8	347212 7	303416 6	160592 5	71295 4

Tab. 2.8: Mittelwerte und Ränge für verschiedene Optimalitätskriterien der Ablaufplanung

Anhand der Simulationsergebnisse lassen sich folgende Aussagen treffen:

- (1) In 94 % bzw. 85 % aller Fälle liefert eine der Varianten des permutierenden Engpaßverfahrens ein bestes Ergebnis bezüglich der Kriterien Zykluszeit resp. mittlere Belegungszeit. Diese Überlegenheit im Vergleich zur besten Variante der Heuristik von Giffler und Thompson (Regel FCFS) nimmt mit wachsender Anzahl an Aufträgen prozentual immer weiter zu. Eine an die Daten durch Regression angepaßte Funktion läßt bei einem Bestimmtheitsmaß von über 97 % vermuten, daß diese Überlegenheit für praxisrelevante Auftragsbestände ($n \geq 50$) etwa 18 % bei der Zykluszeit und etwa 10 % bei der mittleren Belegungszeit betragen wird.
- (2) Die besten Ergebnisse des permutierenden Engpaßverfahrens bringt erwartungsgemäß die Standardversion hervor. Die Leistungsunterschiede zwischen den einzelnen Varianten halten sich jedoch in Grenzen.
- (3) Abgesehen von den beiden Größen Zykluszeit und mittlerer Belegungszeit kann das aufwendige Permutationsverfahren jedoch nicht überzeugen. Bei der mittleren Durchlaufzeit müssen die beiden Varianten FCFS und insbesondere SPT der Heuristik von Giffler und Thompson als besser geeignet gelten, wobei sich die Ergebnisse der Verfahrens von Adams et al. noch im Rahmen bewegen (zwischen 4 % und 7 % Abweichung). Bei den terminspezifischen Kriterien jedoch erweist sich der Einsatz der einfachen Heuristik mit der Prioritätsregel SRST als zwingend. Der Versuch, das permutierende Engpaßverfahren durch die Berücksichtigung von Lieferterminen an diese Kriterien anzupassen (Variante sst-reop.), ist insbesondere für realistische Auftragsbestände eindeutig gescheitert, wenn die durchschnittliche Terminüberschreitung von Aufträgen im Vergleich zur Originalversion auch um über 5 % gesenkt werden konnte.

- (4) Die von den beiden Verfahren benötigten Laufzeiten sind sehr unterschiedlich. Während die Heuristik von Giffler und Thompson im Mittel etwa eine Sekunde zur Generierung eines Ablaufplans benötigte, nahm die Standardversion des Permutationsverfahrens hierfür über sechs Minuten in Anspruch. Durch den Verzicht auf die aufwendige Reoptimierungsprozedur kann die Laufzeit gerade bei einer größeren Anzahl an Maschinen deutlich reduziert werden. Angesichts der Kurzfristigkeit und der notwendigen Flexibilität bei der Ablaufplanung stellt diese Tatsache ein nicht zu unterschätzendes Kriterium bei der Verfahrenswahl dar.

Abschließend soll mit den beiden folgenden Diagrammen wieder die relative Eignung der getesteten Verfahrensvarianten veranschaulicht werden.

Kriterium	Giffler SPT	Giffler FCFS	Giffler SRST	standard reop.	sst reop.	fez reop.	standard no reop.	fez no reop.
Zykluszeit	↘			↗	↗	↗	↗	
mittlere Durchlaufzeit		↗	↘					
mittlere Belegungszeit	↘			↗	↗	↗	↗	
mittl. Terminüberschr.	↘		↗					

Tab. 2.9: Häufigkeit bester Ergebnisse

Kriterium	Giffler SPT	Giffler FCFS	Giffler SRST	standard reop.	sst reop.	fez reop.	standard no reop.	fez no reop.
Zykluszeit	↘			↗	↗	↗	↗	
mittlere Durchlaufzeit		↗	↘					
mittlere Belegungszeit	↘			↗	↗	↗	↗	
mittl. Terminüberschr.	↘		↗					

Tab. 2.10: Häufigkeit schlechtesten Ergebnisse

Wie schon bei der Untersuchung der Prioritätsregeln zeigt sich, daß Verfahren, die signifikant oft versagen, nicht signifikant oft beste Ergebnisse generieren können, die Umkehrung jedoch nicht gilt. So kommt es durchaus vor, daß Verfahren mit seltenen Bestleistungen auch selten versagen, sie also zuverlässiges Mittelmaß verkörpern.

2.5.3 Weitere Verbesserung der Heuristik von Giffler und Thompson durch Beschränkung auf unverzögerte Ablaufpläne

Die 1960 vorgestellte Originalversion des Algorithmus von Giffler und Thompson stellt ein Verfahren zur Generierung aller aktiven Belegungspläne dar, unter denen sich bekanntlicherweise immer mindestens ein bezüglich eines beliebigen regulären Kriteriums optimaler Ablaufplan befindet.

Die bei Baker (1974) und Neumann, Morlock (1993) vorgestellte heuristische Variante berechnet unter Einsatz von Prioritätsregeln einen *aktiven* Belegungsplan. Da hierbei auf die Optimalität der generierten Lösung verzichtet wird, kann jedoch, wie bei Baker

bereits vorgeschlagen, die Suche auf die *unverzögerten* Belegungspläne beschränkt werden, die im Mittel bessere Ergebnisse erzielen als die aktiven. Tabelle 2.11 zeigt für die sechs untersuchten Kriterien die hierdurch erreichte prozentuale Verbesserung (erste Zeile einer Zelle), den Rang des entsprechenden Prioritätsindex beim Einsatz zur Generierung unverzögerter Pläne (fettgedruckt, zweite Zeile einer Zelle), die prozentuale Abweichung vom besten Mittelwert²¹ aller 16 (aktiven und unverzögerten) Varianten (kursiv gesetzt, dritte Zeile einer Zelle) und die zugehörige geeignetste Regel (schraffiertes Feld; im Falle einer Verschlechterung ist die entsprechende aktive Variante am besten geeignet), die sich aus der Auswertung von 900 Simulationen (10, 15,..., 50 Aufträge, 5 Maschinen) ergaben:

Kriterium	SPT	MWR	SST	FCFS	LPT	SRST	FIS	RND
Zykluszeit	13.89% 7 6.27%	3.52% 1 0%	10.56% 5 5.59%	0.00% 4 3.51%	8.86% 8 7.94%	7.34% 2 0.95%	0.24% 3 3.44%	5.89% 6 6.08%
mittlere Durchlaufzeit	12.47% 1 0%	7.22% 8 40.78%	12.54% 2 23.66%	0.00% 4 27.63%	11.14% 7 37.38%	11.13% 6 28.50%	0.46% 5 27.82%	6.05% 3 24.66%
mittlere Belegungszeit	14.42% 5 6.49%	4.25% 2 2.89%	11.16% 7 10.29%	0.00% 4 4.45%	9.07% 8 14.82%	8.90% 1 0%	0.26% 3 4.37%	6.10% 6 9.53%
max. Terminüberschreitung	20.04% 3 81.71%	5.92% 7 85.91%	-19.5% 1 18.31%	0.00% 5 84.16%	12.23% 8 86.42%	-23.9% 2 19.29%	0.52% 6 84.16%	8.93% 4 84.13%
mittl. Terminüberschreitung	25.35% 3 75.38%	12.12% 8 88.17%	3.54% 1 0%	0.00% 5 83.99%	20.14% 7 87.73%	-0.81% 2 1.35%	0.93% 6 84.06%	12.01% 4 83.27%
Anzahl verspäteter Aufträge	11.89% 3 48.08%	7.01% 8 69.80%	6.48% 1 0%	0.00% 5 62.95%	10.69% 7 68.12%	5.56% 2 1.54%	0.57% 6 63.08%	5.96% 4 61.56%

Tab. 2.11: Verbesserungen durch die Erzeugung unverzögerter Belegungspläne

2.6 Fazit

Die wichtigsten Ergebnisse der Untersuchung der verschiedenen Verfahren zur Ablaufplanung lassen sich in sechs Punkten zusammenfassen:

- (1) Bezüglich der Kriterien Zykluszeit und mittlerer Belegungszeit ist das Verfahren von Adams, Balas und Zawack eindeutig am besten geeignet. Alle Versionen erreichen bessere Ergebnisse als die beste der Varianten der Heuristik von Giffler und Thompson.
- (2) Ein anderes Bild bietet sich bei den übrigen ausgewerteten Optimalitätskriterien. Die Fertigstellungszeitpunkte der Produkte lassen sich am besten mit der Kürzesten-Operationszeit-Regel des Giffler/Thompson-Verfahrens minimieren. Bei Vorgabe von Lieferterminen ist der Einsatz einer Schlupfzeitregel zwingend. Hierbei ist die SRST-Regel der einfachen SST-Regel vorzuziehen, da sie die negativen Effekte der Schlupfzeitregeln auf andere Größen, insbesondere bei der Zy-

²¹ Mittelwert über 900 Simulationen.

kluszeit, der mittleren Belegungszeit und der Maschinenauslastung deutlich mildern kann.

- (3) Die Laufzeiten des permutierenden Engpaßverfahrens sind um ein Vielfaches höher als die der Heuristik von Giffler und Thompson. Für realistische Problemgrößen $n \geq 50$, $m \geq 10\%$ wachsen sie so stark an, daß ein erfolgreicher Einsatz im betrieblichen Alltag angezweifelt werden muß, da die guten Ergebnisse zu Lasten der Flexibilität erkaufte werden müßten.
- (4) Angesichts der Tatsache, daß Termintreue und kurze Durchlaufzeiten von betrieblicher Seite als die wichtigsten Eigenschaften eines Belegungsplans genannt werden (Corten, 1990), ist die Heuristik von Giffler und Thompson eindeutig zu präferieren. Hinzu kommt, daß man durch eine sehr einfache Modifikation des Verfahrens die Suche auf unverzögerte Belegungspläne beschränken kann, was hinsichtlich der meisten Kriterien eine Verbesserung der erzielten Ergebnisse bewirkt.
- (5) Ein weiterer Vorteil der Heuristik von Giffler und Thompson dürfte sein, daß ihre Vorgehensweise leicht nachvollzogen werden und mittels des Steuerungsinstruments der Prioritätsregeln auf verschiedene Zielsetzungen hin ausgerichtet werden kann. In der Literatur ist im Laufe der letzten 30 Jahre eine große Anzahl von Beiträgen über die verschiedensten Regeln erschienen, mit deren Hilfe die Wahl eines geeigneten Auswahlverfahrens auf individuelle Gegebenheiten eingestellt werden kann. Das Permutationsverfahren kann, wie auch diese Untersuchung zeigte, nur sehr bedingt andere Optimalitätskriterien als die Zykluszeit verfolgen, da seine Konzeption speziell auf diese Zielsetzung ausgerichtet ist.
- (6) Vom Standpunkt der Scheduling-Theorie aus betrachtet ist der Ansatz von Adams, Balas und Zawack nichtsdestotrotz bemerkenswert. Wie aktuelle Arbeiten zeigen, kann es auch sechs Jahre nach seiner Veröffentlichung noch als eines der effizientesten Verfahren zur Minimierung der Zykluszeit betrachtet werden.

3. Integrierte Seriengrößen- und Ablaufplanung

3.1 Problemdefinition

Die beiden reinen Fertigungstypen Einzel- und Massenfertigung sind in der Praxis relativ selten anzutreffen, da in der Regel selbst bei der Herstellung von Einzelstücken, wie sie im Maschinenbau üblich ist, bestimmte Baugruppen, die in mehreren Enderzeugnissen Verwendung finden, in Losen zusammengefaßt werden. Andererseits werden auch Massengüter meist in mehreren Varianten produziert, die sich beispielsweise in puncto Farbe, Ausstattung etc. unterscheiden.

Die typische Organisationsform bei Serien- und Sortenfertigung ist die Werkstattfertigung, bei der alle gleichartigen Arbeitsvorgänge in einer speziellen Werkstatt (Dreherei, Fräserei, Schleiferei etc.) zusammengefaßt werden. Die Erzeugnisse werden auf Mehrzweckmaschinen gefertigt, die sie im Gegensatz zur Reihen- bzw. Fließfertigung von Produkt zu Produkt in unterschiedlicher Reihenfolge durchlaufen können (Job-Shop-Fertigung).

Sowohl bei Sorten- als auch bei Serienfertigung müssen bei der Fertigungssteuerung Entscheidungen über die Seriengrößen²² und die Seriensequenzen auf den einzelnen Maschinen getroffen werden.

Die Seriengrößen und Auftragsfolgen auf den einzelnen Maschinen müssen dann abhängig voneinander bestimmt werden. Hierbei tritt folgende Problematik zu Tage: Die Ermittlung der Belegungspläne kann natürlich erst erfolgen, wenn die Losgrößenplanung die einzelnen Aufträge bestimmt hat. Andererseits kann eine endgültige Festlegung der Seriengröße erst dann geschehen, wenn feststeht, wie groß die bei der Reihenfolgeplanung entstehenden Leerzeiten auf den einzelnen Maschinen sind.

Dieses Dilemma kann durch zwei unterschiedliche Ansätze zur Koordination von Seriengrößen- und Seriensequenzplanung umgangen werden: Formuliert man die gesamte Planungsaufgabe als gemischt ganzzahliges lineares Programm, so können optimale Seriengrößen und -sequenzen simultan bestimmt werden. Zerlegt man die Aufgabe in zwei Teilprobleme, die durch die Formulierung von Partialmodellen zunächst unabhängig voneinander gelöst und dann iterativ aufeinander abgestimmt werden, so spricht man von Sukzessivplanung. Eine solche Vorgehensweise führt allerdings in der Regel dazu, daß suboptimale Lösungen generiert werden. Andererseits muß der Ansatz der Simultanplanung für realistische Problemgrößen an der exponentiellen Laufzeitkomplexität entsprechender Lösungsverfahren scheitern. Insbesondere die Unstetigkeit der Kostenfunktion (bedingt durch die Rüstkosten) und der Nebenbedingungen (bedingt durch Rüstzeiten und Reihenfolgebedingungen) erzwingt den Einsatz heuristischer Verfahren. Eine solche Methode soll im nächsten Abschnitt vorgestellt werden.

²² Wir wollen im folgenden die Begriffe Losgröße und Seriengröße (als der Losgröße bei Serienfertigung) synonym verwenden.

3.2 Die Heuristik von Lambrecht und Vanderveken

Die Heuristik von Lambrecht und Vanderveken (1979) ist ein Verfahren zur sukzessiven Lösung des Losgrößen- und Ablaufplanungsproblems. Die Zielsetzung ist hierbei, Produktionslose für alle Produkte und Perioden zu ermitteln, sowie in jeder Periode einen Ablaufplan für alle Maschinen zu erstellen, so daß die Einrichte- und Lagerhaltungskosten minimiert und sämtliche Nebenbedingungen bezüglich der Absatzmengen und -termine, der Kapazitätsbeschränkungen und der Bearbeitungsreihenfolgen der Produkte eingehalten werden.

In Abbildung 3.1 ist der Programmablaufplan des implementierten Verfahrens dargestellt.

Für alle Maschinen, deren Kapazität bei der Ablaufplanung überschritten wurde, paßt man die verfügbare Kapazität so an, daß im nächsten Schritt mindestens eine Nachfrage weniger in die Produktion der aktuellen Periode r eingeplant wird. Dies geschieht so oft, bis entweder für r ein zulässiger Losgrößen- und Ablaufplan erstellt werden konnte, oder die verbleibende Kapazität nicht ausreicht, um die Nachfrage der aktuellen Periode zu fertigen.

Die implementierte Variante unterscheidet sich in zwei Punkten von der Originalversion:

- (1) Da die Heuristik von Dixon und Silver dazu neigt, bei der vorausschauenden Engpaßvermeidung Kapazitäten vollständig auszulasten, wurde es notwendig, diesem Verfahren einen Schritt vorzuschalten, der die verfügbare Maschinenkapazität um einen prognostizierten Leerzeitanteil verringert. Die Abschätzung dieses Anteils geschieht durch die Auswertung einer von der Anzahl der Aufträge und der Maschinen sowie des eingesetzten Verfahrens zur Ablaufplanung abhängigen Funktion, die unter der Maßgabe, nur in einem Prozent aller Fälle dürfe eine Maschine bei der Losgrößenplanung zu hoch ausgelastet werden, durch Regression an die Daten der Simulationsstudien aus Abschnitt 2 angepaßt wurde (zu Einzelheiten vgl. Schwindt, 1993).
- (2) Wurde im Anpassungsschritt die verfügbare Kapazität so weit herabgesetzt, daß die Nettonachfrage der laufenden Periode für irgendein Produkt nicht befriedigt werden kann, so bricht das Verfahren nicht sofort ab, sondern versucht durch die ausschließliche Einlastung der verbleibenden Nachfragen aller Produkte der laufenden Periode noch einen zulässigen Ablaufplan zu generieren.

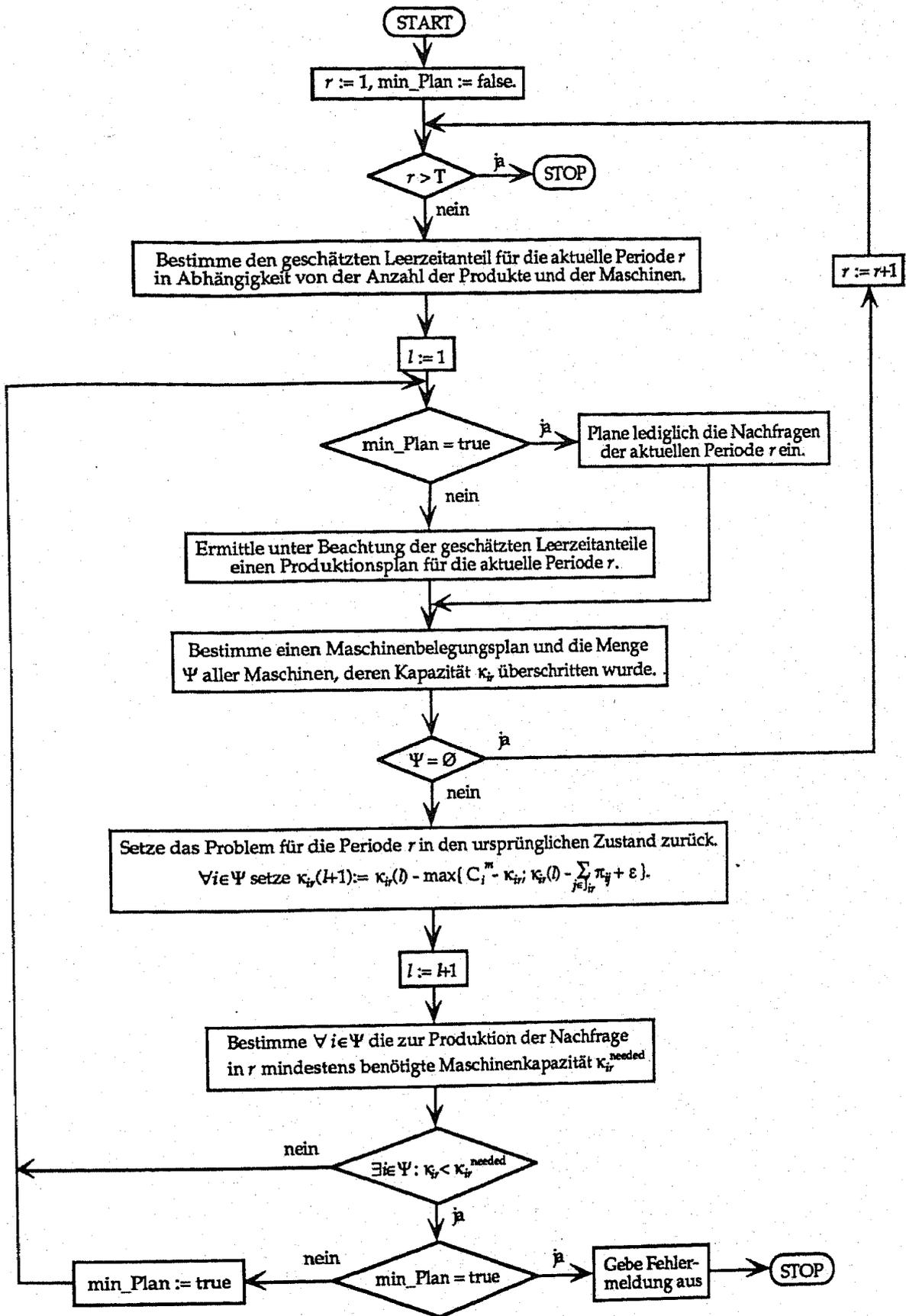


Abb. 3.1: Programmablaufplan der Heuristik von Lambrecht und Vanderveken

3.3 Vergleichende Beurteilung

Im Rahmen dieser Arbeit sind folgende Kombinationen von Losgrößen- und Ablaufplanungsverfahren untersucht worden:

Losgrößenplanung	Dixon ²²	Mod. Dixon ²³	Eisenhut ²⁴	Dixon	Mod. Dixon	Eisenhut
Ablaufplanung	Adams- no reop. ²⁵	Adams- no reop.	Adams- no reop.	Giffler- FCFS ²⁶	Giffler- FCFS	Giffler- FCFS

Tab. 3.1: Untersuchte Kombinationen von Losgrößen- und Ablaufplanungsverfahren in der Heuristik von Lambrecht und Vanderveken.

Bezüglich der Varianten des Verfahrens von Dixon und Silver ("Dixon" und "Mod. Dixon") ist anzumerken, daß mit der periodischen Vorgehensweise der Heuristik von Lambrecht und Vanderveken die Notwendigkeit verbunden ist, die Produktionslose Periode für Periode und in einem Durchlauf zu erstellen. Deshalb entfällt die Möglichkeit, durch zusätzliche Optimierungsschritte, wie sie für die Heuristik von Dixon und Silver implementiert wurden, die im Eröffnungsverfahren bestimmte Lösung noch zu verbessern. Angesichts der Tatsache, daß insbesondere die Prozedur zur Loseliminierung erheblich zur Reduktion der Rüstkosten beitragen konnte, muß dieser Umstand bei der Interpretation der Ergebnisse berücksichtigt werden.

Die von Lambrecht und Vanderveken vorgeschlagene Formulierung des integrierten Problems zielt auf die Minimierung der Aufwands der Losgrößenplanung ab. Für diesen Ansatz sprechen im wesentliche zwei Gründe: erstens werden in der Regel die Rüst- und die Lagerhaltungskosten höher anzusetzen sein als die Aufwendungen, die von der Planung der Maschinenbelegung beeinflusst werden können. Zweitens zeigt die Diskussion der Optimalitätskriterien bei der Ablaufplanung, daß diese nur sehr schwer oder aber unkorrekt monetär zu bewerten sind.

Dennoch ist es natürlich möglich, auch die Ergebnisse der kurzfristigen Feinterminierung stärker zu berücksichtigen, indem man z.B. kombinierte Größen als Bewertungsgrundlage heranzieht, zumal die Ablaufplanung sich weit aufwendiger gestaltet als die Bestimmung der Seriengrößen.

Im Rahmen dieser Untersuchung sind für jede generierte Lösung u.a. die folgenden Größen ausgewertet worden, die als Ganzes ein recht objektives Bild über die Güte der Planung vermitteln können. Sie werden in Tabelle 3.2 definiert:

-
- ²² Das Verfahren von Dixon und Silver in der auf den Fall einer seriellen Produktionsstruktur erweiterten Fassung.
 - ²³ Wie "Dixon", jedoch mit dem Auswahlmechanismus der Heuristik von Eisenhut zur Bestimmung desjenigen Produktes, dessen Reichweite als nächstes erhöht werden sollte.
 - ²⁴ Die Erweiterung der Heuristik von Eisenhut zur Lösung von Losgrößenproblemen bei serieller Produktionsstruktur.
 - ²⁵ Das permutierende Verfahren von Adams, Balas und Zawack mit der Bestimmung der Engpaßmaschinen über die Lösung von Ein-Maschinen-Problemen, aber ohne Reoptimierungszyklen.
 - ²⁶ Die Heuristik von Giffler und Thompson mit der Prioritätsregel FCFS.

lfd. Nr.	Kriterium	Definition
1	Summe aus Rüst- und Lagerhaltungskosten	$\sum_{r=1}^T \sum_{j=1}^n \left(h_j \cdot \left(\sum_{t=1}^r x_{jt} - \sum_{t=1}^r d_{jt} \right) + \sum_{i=1}^m s_{ij} \cdot \delta(x_{jr}) \right),$ <p>wobei $\delta(x_{jt}) := \begin{cases} 1, & \text{falls } x_{jt} > 0 \\ 0, & \text{sonst} \end{cases}$</p>
2	durchschnittliche Kapitalbindungs- und Maschinenkosten ²⁷	$\frac{1}{n} \sum_{r=1}^T \sum_{j=1}^n C_j^{p,r} + \sum_{r=1}^T C_{\max}^r$
3	Verzugskosten	$\sum_{r=1}^T \sum_{j=1}^n \max\{C_j^{p,r} - d_j^r; 0\}$

Tab. 3.2: Mögliche Optimalitätskriterien der integrierten Losgrößen- und Ablaufplanung

Die folgende Tabelle gibt Verteilungen und Erwartungswerte der Bestimmungsgrößen der erzeugten Probleme an. Die Belegungsdichte $\text{density}(m)$ betrug wiederum 0,5, während im Gegensatz zur Untersuchung der Losgrößenheuristiken für alle Produkte in jeder Periode eine positive Nachfragemenge gegeben war ($\text{density}(d) = 1.0$).

Größe	Verteilung	Mittelwert
Bearbeitungszeit p_{ij}	$\sim\text{GL}[1.0;8.0]$	4.5
Rüstzeit δ_{ij}	$\sim\text{GL}[0.1;1.0]$	0.55
Rüstkosten s_{ij}	$\sim\text{GL}[15.0 \cdot \text{density}(d); 18.75 \cdot T \cdot \text{density}(d)]$	$\text{density}(d) \cdot (7.5 + 9.375 \cdot T)$
Lagerkostensatz h_j	$\sim\text{GL}[5.0;25.0]$	15.0
Nachfragemenge d_{jt}	$\sim\text{GL}[1;5]$	3
Maschinenkapazität κ_{it}	$\sim\text{GL}[24 \cdot \text{density}(m) \cdot n \cdot \text{density}(d); 24 \cdot \text{density}(m) \cdot n \cdot T \cdot \text{density}(d)]$	$12 \cdot \text{density}(m) \cdot n \cdot \text{density}(d) \cdot (T+1)$
Liefertermin d_j^t	$\sim\text{GL}[0; 24 \cdot \text{density}(m) \cdot n \cdot T \cdot \text{density}(d)]$	$12 \cdot \text{density}(m) \cdot n \cdot T \cdot \text{density}(d)$

Tab. 3.3: Parameter der generierten Zufallsprobleme

Folgende Problemgrößen wurden untersucht: $(n, m, T) \in \{5,6,7,8,9,10,15,20,25,30\} \times \{5\} \times \{6\}$. Für $n = 5-10, 15$ und 20 wurden jeweils 100, für die beiden übrigen Konstellationen jeweils 10 Probleme zufällig generiert und durch die in Tabelle 3.1 aufgeführten Varianten der Heuristik von Lambrecht und Vanderveken gelöst. Insgesamt wur-

²⁷ Bei der statischen Ablaufplanung steht eine Maschine erst wieder zur Verfügung, wenn der gesamte Auftragsbestand *vollständig* bearbeitet worden ist. Deshalb wurde als Maß für die Maschinenkosten die Zykluszeit und nicht die durchschnittliche Belegungszeit gewählt.

den so über 4200 Losgrößenpläne und mehr als 25000 Maschinenbelegungspläne erstellt.²⁹

In der folgenden Tabelle werden zunächst die Ergebnisse für alle erfaßten Zielkriterien in Form von Mittelwerten und Rängen zusammengefaßt.

Kriterium	Eisenhut Giffler	Eisenhut Adams	Dixon Giffler	Dixon Adams	Mod. Dixon Giffler	Mod. Dixon Adams
Rüst- und Lagerhaltungskosten	8028.88 5	7890.05 2	7942.15 4	7835.78 1	8061.20 6	7927.75 3
Kapitalbindungs- und Maschinenkosten	8728.34 6	8674.85 4	8637.71 2	8520.37 1	8710.58 5	8656.48 3
Verzugskosten	3150.79 4	3394.95 5	2906.82 1	3079.83 2	3146.19 3	3400.40 6
Anz. abgebrochener Lösungsversuche	14.8% 6	11.5% 3	12.8% 4	8.7% 1	13.7% 5	9.3% 2
Laufzeit in msec	7470 1	220758 4	12178 3	179107 6	10118 2	220951 5

Tab. 3.4: Mittelwerte und Ränge für verschiedene Bewertungskriterien der integrierten Planung

Um diese Mittelwerte besser einordnen zu können, wollen wir uns wieder mit den Ergebnisse eines direkten Vergleichs der Verfahren bezüglich der drei wichtigsten Kriterien befassen. Mit x als dem prozentualen Anteil aller besten bzw. schlechtesten Ergebnisse entsprechen den Schraffuren folgende Werte:

$x \in$ (in %)	[0,13.23)	[13.23,14.24)	[14.24;19.09)	[19.09;20.1)	[20.1;100]
Bedeutung	selten ³⁰	seltener ³¹	?? ³²	häufiger ³³	oft ³⁴
gute Ergebnisse					
schlechte Ergebnisse					

Nach unten weisende Pfeile signalisieren wieder die vergleichsweise mangelnde Eignung eines bestimmten Verfahrens für die entsprechende Zielsetzung, ein nach oben gerichteter Pfeil entsprechend die gute Eignung.

²⁹ Zur Lösung der 820 generierten Probleme wurden durch die sechs Verfahren insgesamt 4212 Produktionspläne erstellt, in 708 (von 4920) Fällen konnte keine zulässige Lösung gefunden werden. Bei einem Planungszeitraum von sechs Perioden ergibt dies eine Summe von über 25000 berechneten Ablaufplänen.

³⁰ Der Anteil liegt signifikant zu einem Signifikanzniveau von 1 % unter dem Mittel.

³¹ Der Anteil liegt signifikant zu einem Signifikanzniveau von 5 % unter dem Mittel.

³² Der Anteil liegt weder signifikant unter noch signifikant über dem Mittel.

³³ Der Anteil liegt signifikant zu einem Signifikanzniveau von 5 % über dem Mittel.

³⁴ Der Anteil liegt signifikant zu einem Signifikanzniveau von 1 % über dem Mittel.

gute Ergebnisse	Eisenhut	Eisenhut	Dixon	Dixon	Mod. Dixon	Mod. Dixon
Kriterium	Giffler	Adams	Giffler	Adams	Giffler	Adams
Rüst- und Lagerhaltungskosten		↗	↘			
Kapitalbindungs- und Maschinenkosten	↘			↗		
Verzugskosten						

Tab. 3.5: Häufigkeit bester Ergebnisse

schlechte Ergebnisse	Eisenhut	Eisenhut	Dixon	Dixon	Mod. Dixon	Mod. Dixon
Kriterium	Giffler	Adams	Giffler	Adams	Giffler	Adams
Rüst- und Lagerhaltungskosten		↗	↘			
Kapitalbindungs- und Maschinenkosten	↘			↗		
Verzugskosten						

Tab. 3.6: Häufigkeit schlechtesten Ergebnisse

Die Ergebnisse aus Tabelle 3.4 sollen nun in den nächsten Abschnitten näher untersucht werden.

3.3.1 Rüst- und Lagerhaltungskosten

Die erste Tabelle zeigt die Entwicklung der Kosten, die von der Losgrößenplanung beeinflusst werden können, in Abhängigkeit von der Anzahl der Produkte. Angegeben sind die Mittelwerte über alle gelösten Probleme einer Konstellation. Der beste Wert ist jeweils grau unterlegt.

n	Eisenhut Giffler	Eisenhut Adams	Dixon Giffler	Dixon Adams	Mod. Dixon Giffler	Mod. Dixon Adams
5	2926.03	2849.67	3222.82	3189.27	3016.61	2954.66
6	3428.96	3406.78	3488.88	3516.94	3473.93	3459.27
7	4035.15	3952.12	4065.23	4068.99	4065.36	4006.68
8	4919.72	4820.07	4973.36	4906.00	4969.79	4871.33
9	5357.43	5248.33	5341.78	5269.17	5372.85	5283.88
10	5840.20	5803.18	5909.80	5859.29	5864.20	5824.94
15	8838.80	8659.77	8731.35	8489.82	8874.69	8683.66
20	11761.30	11593.50	11555.30	11405.90	11793.40	11626.00
25	16514.20	16031.30	15652.80	15379.30	16514.20	16031.30
30	16667.00	16535.80	16480.20	16279.10	16667.00	16535.80

Tab. 3.7: Mittelwerte der Rüst- und Lagerhaltungskosten in Abhängigkeit von der Anzahl der Produkte n

Die Ergebnisse führen zu mehreren Schlußfolgerungen:

- (1) Das beste Verfahren ist immer eines, das im Ablaufplanungsschritt die Heuristik von Adams, Balas und Zawack verwendet.
- (2) Bei Planungsproblemen mit kleinem Auftragsbestand ($n < 8$) sind in Varianten, die bei der Bestimmung der Seriengrößen Kapazitäten als Planungsgrundlage verwenden, die um einen geschätzten Leerzeitanteil vermindert wurden, die Heuristik von Giffler und Thompson und das permutierende Engpaßverfahren etwa gleich gut geeignet.
- (3) Für eine kleine Anzahl an Produkten wird das Verfahren von Dixon und Silver recht deutlich von der Losgrößenplanung mittels der Heuristik von Eisenhut dominiert. Diese Überlegenheit nimmt jedoch mit einer wachsenden Anzahl an Produkten immer weiter ab und verkehrt sich ab einem Auftragsbestand von $n = 10$ in ihr Gegenteil.
- (4) Das Verfahren von Dixon und Silver mit dem Mechanismus der Reichweiten-erhöhung der Heuristik von Eisenhut erreicht für keine Problemgröße ein bestes Ergebnis und nähert sich bei wachsender Auftragszahl n immer mehr der Heuristik von Eisenhut an.

3.3.2 Kapitalbindungs- und Maschinenkosten

Das nächste Kriterium wird aus dem Mittelwert der durchschnittlichen Durchlauf- und somit Kapitalbindungszeit eines Erzeugnisses in der Produktion und der Zykluszeit als Maß für die Inanspruchnahme des Maschinenparks zur Bearbeitung des Auftragsbestandes gebildet. Es wird im Gegensatz zum ersten untersuchten Kriterium hauptsächlich von der Ablaufplanung beeinflusst.

Die folgende Tabelle listet für alle Kombinationen die Mittelwerte dieser kombinierten Größe in Abhängigkeit von der Anzahl der Produkte auf:

n	Eisenhut Giffler	Eisenhut Adams	Dixon Giffler	Dixon Adams	Mod. Dixon Giffler	Mod. Dixon Adams
5	4470.85	4447.32	4339.06	4256.81	4398.75	4374.62
6	5129.99	5044.84	5021.79	4853.00	5085.32	5012.63
7	5526.02	5410.85	5454.97	5274.66	5514.80	5374.62
8	6246.79	6076.67	6067.19	5985.89	6237.66	6061.02
9	6609.69	6504.58	6497.79	6370.23	6622.78	6491.62
10	7018.45	6836.96	6876.76	6767.78	6995.63	6840.70
15	9907.19	9859.82	9800.98	9677.02	9891.13	9843.26
20	12091.90	11980.40	12041.70	11869.50	12077.20	11979.20
25	14909.20	14854.40	14893.80	14590.30	14909.20	14854.40
30	15373.30	15732.70	15383.10	15558.20	15373.30	15732.70

Tab. 3.8: Mittelwerte der Kapitalbindungs- und Maschinenkosten in Abhängigkeit von der Anzahl der Produkte n

Bei der Analyse der Planungsergebnisse der verschiedenen Verfahren zur Maschinenbelegungsplanung hatten wir festgestellt, daß (1) das Verfahren von Adams et al. bezüglich der Zykluszeit der Heuristik von Giffler und Thompson deutlich überlegen war, während diese bei der Verwendung der FCFS-Regel Belegungspläne lieferte, die kürzere Durchlaufzeiten aufweisen konnten. Für kleine Auftragsbestände ist das permutierende Engpaßverfahren aufgrund seiner Überlegenheit hinsichtlich der Zykluszeit im Vorteil. Bei wachsendem n jedoch verringert sich der Abstand immer weiter, bis schließlich die Heuristik von Giffler und Thompson aufgrund ihrer guten Eigenschaften hinsichtlich der mittleren Durchlaufzeit dominiert.

3.3.3 Verzugskosten

Termintreue ist das von den Betrieben bei der Produktionssteuerung primär verfolgte Ziel (vgl. Abschnitt 2.1). Deshalb wollen wir auch bei der Heuristik von Lambrecht und Vanderveken diesem Kriterium unsere Aufmerksamkeit schenken.

Bei der Ermittlung der Verzugskosten sind zwei Fälle voneinander zu unterscheiden:

- (1) Im Los x_{jt} sind zumindest Teile der Nachfrage d_{jt} enthalten. Dann bestimmt der Liefertermin für d_{jt} den Zeitpunkt, zu dem die Fertigung des ganzen Loses beendet sein muß.
- (2) Im Los x_{jt} sind lediglich Nachfragen zukünftiger Perioden enthalten. Dann werden, sofern ein zulässiger Maschinenbelegungsplan für t bestimmt werden kann, alle Nachfragen rechtzeitig ausgeliefert, und die Verzugskosten sind null, unabhängig von der Durchlaufzeit des Auftrags.

Tabelle 3.9 zeigt die Mittelwerte der Gesamtterminüberschreitung der auf die Maschinen eingelasteten Fertigungsaufträge:

n	Eisenhut Giffler	Eisenhut Adams	Dixon Giffler	Dixon Adams	Mod. Dixon Giffler	Mod. Dixon Adams
5	2618.99	2613.44	2311.51	2237.77	2593.35	2704.73
6	2323.04	2351.36	2119.91	2097.32	2351.40	2298.81
7	2435.51	2636.49	2315.75	2200.20	2387.87	2535.40
8	2466.04	2605.91	2283.01	2392.66	2464.32	2600.12
9	2348.74	2336.10	2255.54	2269.55	2374.68	2394.76
10	2806.96	2759.81	2449.69	2669.31	2812.67	2830.58
15	3342.23	3529.68	3250.88	3279.15	3328.48	3536.26
20	3932.32	4577.89	3631.66	4176.27	3915.05	4564.56
25	4730.24	4861.75	3888.26	4436.18	4730.24	4861.75
30	4503.82	5677.02	4561.94	5039.90	4503.82	5677.02

Tab. 3.9: Mittelwerte der Verzugskosten in Abhängigkeit von der Anzahl der Produkte n

Wie ist zu erklären, daß die Varianten, die die Heuristik von Dixon und Silver einsetzen, oft besser abschneiden als die anderen? Der durchschnittliche Lagerbestand wird vergleichsweise klein, wenn man die Reichweiten so erhöht, wie dies von Dixon und Silver vorgeschlagen wird. In Abschnitt 1.4.3 hatten wir noch konstatiert, daß die Heu-

ristik von Eisenhut deutliche Vorteile bei den Lagerhaltungskosten hat, doch kam hier im Verfahren von Dixon und Silver noch die anschließende Prozedur zur Loselimination zum Einsatz.

Kleine Lagerbestände sind gleichbedeutend mit kleinen Losgrößen und diese mit kürzeren Durchlaufzeiten. Frühe Fertigstellungstermine führen aber zu weniger und kleineren Terminüberschreitungen, womit wir die Überlegenheit des Verfahrens von Dixon und Silver bezüglich der Termintreue erklärt hätten.

Die Tendenz, daß sich die FCFS-Regel bei wachsender Anzahl an Produkten verglichen mit den Varianten des Verfahrens von Adams et al. zunehmend besser zur Minimierung der Terminüberschreitungen eignet, kann man bereits den Daten entnehmen, die sich bei der Untersuchung der isolierten Ablaufplanung ergaben.

3.3.4 Zuverlässigkeit

Eine sehr wichtige Eigenschaft eines Verfahrens ist die Fähigkeit, zu einem lösbaren Problem mit einer angemessen hohen Wahrscheinlichkeit eine zulässige Lösung generieren zu können.

Tabelle 3.10 zeigt nach Kombinationen gegliedert auf, wieviel Probleme hierbei jeweils nicht gelöst wurden. Es ist anzunehmen, daß ein relativ hoher Prozentsatz der Fälle, in denen kein Verfahren eine Lösung finden konnte, nicht lösbar war. Zudem ist zu berücksichtigen, daß die Maschinenkapazitäten gegenüber den Untersuchungen der Losgrößenverfahren unverändert blieben, obwohl die anschließende Ablaufplanung die Belegungszeiten noch signifikant erhöhen kann.

n	Eisenhut Giffler	Eisenhut Adams	Dixon Giffler	Dixon Adams	Mod. Dixon Giffler	Mod. Dixon Adams	Anz. Simu- lationen
5	37	33	30	24	33	28	100
6	33	33	30	24	30	23	100
7	21	15	17	12	17	13	100
8	9	6	9	2	10	5	100
9	13	7	11	7	12	4	100
10	13	5	11	3	12	4	100
15	8	6	7	5	9	6	100
20	14	10	13	10	14	10	100
25	0	0	0	0	0	0	10
30	0	0	0	0	0	0	10
	148	115	128	87	137	93	820
in %	18.05	14.02	15.61	10.61	16.71	11.34	100

Tab. 3.10: Anzahl abgebrochener Lösungsversuche

Tatsächlich erweist sich die aufwendigste Verbindung - die Heuristik von Dixon und Silver in Kombination mit dem permutierenden Engpaßverfahren - auch als die Variante, die am ehesten geeignet ist, selbst bei sehr knappen Kapazitäten noch angemessen oft zulässige Planungen zu erzeugen.

Sowohl die Seriengrößen als auch die Ablaufplanung scheinen maßgeblich für die Anzahl der Versagensfälle zu sein, wie die folgende Abbildung verdeutlicht:

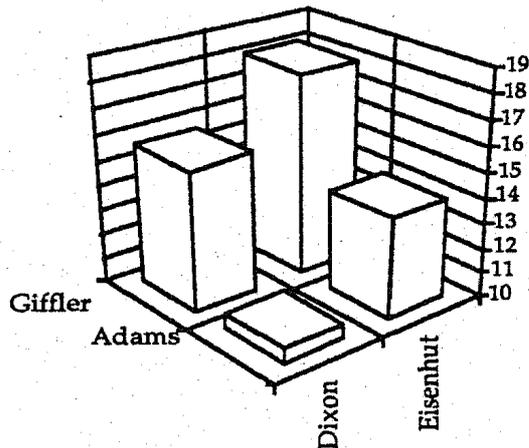


Abb. 3.2: Anteile nicht gelöster Probleme in %

3.4 Fazit

Die Ergebnisse der Untersuchungen der Heuristik von Lambrecht und Vanderveken lassen abschließend folgende zwei Schlussfolgerungen zu:

- (1) Dem Verfahren von Dixon und Silver sollte vor allem aus zwei Gründen Vorrang eingeräumt werden: zum einen liefert es bezüglich der Mehrzahl der Optimalitätskriterien gute Ergebnisse. Zum anderen wird durch seinen Einsatz die Wahrscheinlichkeit des Versagens der Heuristik deutlich herabgesetzt. Gleichzeitig liegt die Laufzeit dieses Verfahrens im Rahmen der Zeitkomplexitäten der anderen untersuchten Heuristiken zur Losgrößenplanung.
- (2) Bezüglich der Auswahl der Methode zur Ablaufplanung muß differenziert werden. Sollen Planungsprobleme mit einer überschaubaren Anzahl an Produkten und einem kleinen Maschinenpark gelöst werden, so spricht nichts gegen den Einsatz des permutierenden Engpaßverfahrens, das dem von Giffler und Thompson recht eindeutig überlegen ist. Da die Vorteile zumindest auf manchen Gebieten jedoch mit der Größe des Auftragsbestandes immer weiter abnehmen und für Planungssituationen mit $n \geq 50$, $m \geq 10$ der Rechenaufwand auch auf leistungsfähigeren Rechnern und für Implementierungen in effizienteren Programmierprachen prohibitiv anwachsen dürfte, empfiehlt sich ab einer individuell festzulegenden Problemgröße der Einsatz der Heuristik von Giffler und Thompson. Schon für relativ kleine Probleme beträgt ihre Laufzeit lediglich einen Bruchteil derer des permutierenden Engpaßverfahrens. Gerade im Falle einer feinen Zeitrasterung, wie man sie in der Fertigungssteuerung anstreben sollte, um flexibel auf Störgrößen reagieren zu können, kann der Einsatz eines schnellen Verfahrens beträchtliche Vorteile bieten.

Literaturverzeichnis

Abkürzungen:

AIIE	American Institute of Industrial Engineers
<i>European J. Oper. Res.</i>	European Journal of Operational Reserach
<i>Internat. J. Prod. Res.</i>	International Journal of Production Reserach
<i>J. Oper. Managem.</i>	Journal of Operations Management
<i>Managem. Sci.</i>	Management Science
<i>Oper. Res.</i>	Operations Research
WISU	Das Wirtschaftsstudium

ADAMS, J., E. BALAS, UND D. ZAWAK (1988):
The Shifting Bottleneck Procedure for Job Shop Scheduling.
Managem. Sci. 34, (3), 391-401.

BAKER, K.R. (1974):
Introduction to sequencing and scheduling. X
New York: John Wiley & Sons

BLACKSTONE, J.H., D.T. PHILLIPS UND G.L. HOGG (1982):
A state-of-the-art survey of dispatching rules for manufacturing job shop operations.
Internat. J. Prod. Res. 20, (1), 27-45.

CARLIER, J. (1982):
The one-machine sequencing problem.
European J. Oper. Res. 11, 42-47.

CORSTEN, H. (1990):
Produktionswirtschaft: Einführung in das industrielle Produktionsmanagement.
Wien: R. Oldenbourg

DIXON, P.S. UND E.A. SILVER (1981):
A Heuristic Solution for the Multi-Item, Single-Level, Limited Capacity, Lot-Sizing
Problem.
J. Oper. Managem. 2, (1), 23-39.

DOMSCHKE, W., A. SCHOLL UND S. VOSS (1993):
Produktionsplanung - Ablauforganisatorische Aspekte.
Berlin: Springer.

EISENHUT, P.S. (1975):
A Dynamic Lot Sizing Algorithm with Capacity Constraints.
AIIE Transactions 7, (2), 170-176.

FLORIAN, M., J.K. LENSTRA UND A.H.G. RINNOOY KAN (1980):
Deterministic Production Planning: Algorithms and Complexity.
Managem. Sci. 26, (7), 669-679.

GERE, W.S. (1966):
Heuristics for Job Shop Scheduling.
Managem. Sci. 13, (3), 167-190.

GIFFLER, B. UND G.L. THOMPSON (1960):
Algorithms for Solving Production-Scheduling Problems.
Oper. Res. 8, 487-503.

HARRIS, F. (1913):
How Many Parts to Make at Once.
Factory, The Magazine of Management 10, 135-136 und 152.

HAUPT, R. (1989):
A Survey of Priority Rule-Based Scheduling. X
OR-Spektrum 11, 3-16.

LAMBRECHT, M.R. UND H. VANDERVEKEN (1979):
Production Scheduling and Sequencing for Multi-Stage Production Systems.
OR-Spektrum 1, (2), 103-114.

MAES, J. UND L. VAN WASSENHOVE (1988):
Multi-Item Single-Level Capacitated Lot-Sizing Heuristics: A General Review.
Oper. Res. 39, (11), 991-1004.

NEUMANN, K., MORLOCK, M. (1993):
Operations Research.
München: Carl Hanser.

PANWALKER, S. UND W. ISKANDER (1977):
A Survey of Scheduling Rules.
Oper. Res. 25, (1), 45-61.

SCHWINDT, C. (1993):
Vergleichende Bewertung mehrerer Varianten der Heuristik von Lambrecht und
Vanderveken zur sukzessiven Lösung des Losgrößensequenzproblems.
Karlsruhe: Diplomarbeit am Institut für Wirtschaftstheorie und Operations Research
der Universität Karlsruhe (TH).

SEELBACH, H. (1975):
Ablaufplanung.
Würzburg: Physica.

SIEGEL, T. (1974):

Optimale Maschinenbelegungsplanung - Zweckmäßigkeit der Zielkriterien und Verfahren zur Lösung des Reihenfolgeproblems. X
Berlin: Erich Schmidt.

WAGNER, H.M. UND T.H. WHITIN (1958):

Dynamic version of the economic lot size model.
Managem. Sci. 5, (1), 89-96.

ZÄPFEL, G. (1982):

Produktionswirtschaft, Operatives Produktions-Management.
Berlin: de Gruyter.

ZÄPFEL, G. UND J. ATTMANN (1978):

Losgrößenplanung: Problemstellung und Problemklassen. X
WISU, 11, 529-532.

DISCUSSION PAPERS DES INSTITUTS FÜR WIRTSCHAFTSTHEORIE
UND OPERATIONS RESEARCH

275. Neumann, K.: Einführung in das Operations Research I. Korrigierter Nachdruck. Dezember 1986.
276. Neumann, K.: Einführung in das Operations Research I I. Juli 1986.
277. Hofmann, H. und A. Lamatsch: Programmsystem Projektplanung - Vorstufe eines Expertensystems. Juli 1986.
278. Pfingsten, A.: New Concepts of Lorenz Domination and Risk Aversion. März 1986, *erscheint in: Methods of Operations Research.*
279. Pfingsten, A.: Generalized Concepts of Tax Progression and Inequality Reduction. März 1986.
280. Neumann, K.: Stochastic Project Networks I. Mai 1986.
281. Neumann, K.: Stochastic Project Networks I I. Juli 1986.
282. Lamatsch, A.: Einsatz des Savingverfahrens zur Wagenumlaufplanung im öffentlichen Personennahverkehr. April 1986.
283. Buhl, H. U.: Besprechung zu " Stochastische Optimierung bei partieller Information", Autor: P. Abel; *erschienen in: Journal of Economics / Zeitschrift für Nationalökonomie 1986.*
284. Buhl, H. U.: Generalization and Applications of a Class of Dynamic Programming Problems, *EJOR 31 (1987).*
285. Bossert, W. und A. Pfingsten: The Circular and Time Reversal Tests Reconsidered in Economic Price Index Theory. 1986; *erschienen in: Statistical Papers 28 (1987), 271-284.*
286. Neumann, K. und A. Lamatsch: Mehrgüterflüsse in Graphen zur Beschreibung des Verkehrsablaufs auf einer Strecke bei Verkehrsmischung. Oktober 1986.
287. Pfingsten, A.: Progressive Taxation and Redistributive Taxation: Different Labels for the Same Product? *Erschienen in: Social Choice and Welfare 5, 1988, 235-246, und in Gaertner, W. und P. K. Pattanaik (Hrsg.), Distributive Justice and Inequality, Springer- Verlag, 1988, 147-158.*
288. Neumann, K.: Klausuraufgaben OR I + I I mit Lösungen. Neuauflage Mai 1989.
289. Bossert, W.: A Note on Intermediate Inequality Indices which are Quasilinear Means. 1986.
290. Buhl, H. U.: Theorie und Anwendungen zur Optimierung von Verschrottungserscheinungen; *erschienen in: Isermann et al. (Hrsg.): Tagungsband der 15. DGOR Jahrestagung. OR- Proceeding of the 15. DGOR Conference 1986. Springer- Verlag, Berlin 1987.*
291. Buhl, H. U. und A. Pfingsten: On the Distribution of Public Funds.

292. Fuchs- Seliger, S.: Applications of Income Compensation Functions to Social Welfare Theory.
293. Buhl, H. U.: Optimization of Scrapping Decisions: Theory and Applications; *erschienen in: ZOR B*, 1988; *erscheint in: Radermacher, F. J. (Hrsg.), Methods of Operations Research*, Athenäum- Hein, Meisenheim 1989.
294. Lamatsch, A., M. Morlock, K. Neumann und Th. Rubach: SCHEDULE - An Expert System for Scheduling. *Oktober 1986*.
295. Egle, K. und S. Fenyi: Zweistufige Disaggregation und baryzentrisches Kalkül.
296. Eichhorn, W.: On a Class of Inequality Measures; *erschienen in: Social Choice and Welfare*, 5 (1988), 171-177.
297. Lamatsch, A.: Progammbibliothek Operations Research für die Rechner HP 1000 - Siemens 7881. *Februar 1987*.
298. Buhl, H. U.: Optimale Verschrottungsentscheidungen in der Lagerhaltung; *erschienen in: Schmalenbachs Zeitschrift für betriebswirtschaftliche Forschung*, 5 (1987).
299. Buhl, H. U. und W. Bossert: More on Sufficiency Conditions for Interior Location in the Triangle Space. 1987; *erschienen in: Journal of Regional Science* (1988).
300. Buhl, H. U.: Ein finanzwissenschaftlich-methodischer Diskussionsbeitrag zur Neuordnung des Länderfinanzausgleichs in der Bundesrepublik Deutschland; *erschienen in: Finanzarchiv*, N. F. 44 (1986)3.
301. Fuchs- Seliger, S.: A note on non-inferior demand functions.
302. Eichhorn, W. und F. Stehling: Eine Bemerkung zur Verteilungsneutralität der produktivitätsorientierten Lohnpolitik. *Dezember 1986*; *erschienen in: O. Opitz, R. Rauhut (Hrsg.): Ökonomie und Mathematik. Springer- Verlag, Berlin- Heidelberg 1987*, 523-532.
303. Pfingsten, A.: Incentives to Forecast Honestly; *erschienen in: Agency Theory, Information, and Incentives. G. Bamberg, K. Spremann et al. (eds.). Springer-Verlag, Heidelberg 1987*, 117-134.
304. Bossert, W. und A. Pfingsten: Relations between the true cost of living index and statistical price index numbers: A survey and some extensions, 1986.
305. Fuchs- Seliger, S.: Money- Metric Utility Functions in the Theory of Revealed Preference; *erschienen in: Mathematical Social Sciences*.
306. Eichhorn, W. und M. Hellwig: Versicherungsmärkte: Theorie A. Versicherungsmärkte mit vollständiger Information; *erschienen in: Handwörterbuch der Versicherung, HdV, herausgegeben von D. Farny, E. Helten, P. Koch und R. Schmidt, Verlag Versicherungswirtschaft, Karlsruhe 1988*, 1055-1064.
307. Eichhorn, W. (editor in cooperation with W. E. Diewert, S. Fuchs- Seliger, W. Gehrig, A. Pfingsten, K. Spremann, F. Stehling and J. Voeller): Measurement in Economics. Theory and Applications of Economic Indices. Physica- Verlag, Heidelberg 1988, 830 Seiten.

308. Eichhorn, W.: Mikroelektronik - Wurzel der dritten industriellen Revolution; *erschienen in: WÜBA- Gazette, Jubiläumsausgabe WÜBA, 150 Jahre Dienst am Kunden, 1837-1987. Heilbronn 1987, 47-51.*
309. Fuchs- Seliger, S.: Measuring by Money- Metric Utility Functions.
310. Pfingsten, A.: Scaling Income Distributions.
311. Bossert, W.: The Impossibility of an Intermediate Solution in a One-dimensional Location Model: A General Result. 1987; *erscheint in: Regional Science and Urban Economics.*
312. Weinhardt, C.: On inequality measurement when population sizes differ; *erschienen in: Henn et al. (Hrsg.): Methods of Operations Research, 59, Athenäum Verlag (1989), S.111-124*
313. Eichhorn, W. und Gleissner, W.: The Equation of Measurement; *erschienen in: vgl. Discussion Paper No. 307, 19-27.*
314. Eichhorn, W. und Gleissner W.: The Solution of Important Special Cases of the Equation of Measurement; *erschienen in: vgl. Discussion Paper No. 307, 29-37.*
315. Bossert, W. und A. Pfingsten: Intermediate Inequality: Concepts, Indices, and Welfare Implications. 1987, *erschienen in: Mathematical Social Sciences.*
316. Fuchs- Seliger, S.: Non-inferior Demand Functions Revisted.
317. Buhl, H. U. und A. Pfingsten: 10 Gebote für Finanzausgleichsverfahren und deren Implikationen. *September 1987.*
318. Buhl, H. U.: Die " Zitronen- Kette". *Oktober 1987.*
319. Buhl, H. U.: Axiomatic Considerations in Multi- Objective Location Theory. *Oktober 1987; erschienen in: European Journal of Operations Research, 1988.*
320. Fuchs- Seliger, S. und M. Krtscha: An Alternative Approach to Joint Continuity in Economics.
321. Wenzelburger, D.: Vergleich verschiedener umweltpolitischer Instrumentarien anhand eines Optimiermodells.
322. Neumann, K.: Die Netzwerk- Simplexmethode zur Lösung des Umlade- und des Transportproblems. *Dezember 1987.*
323. Neumann, K.: Kürzeste Wege und Matchings. *Januar 1988.*
324. Buhl, H. U.: Besprechung zu: Anders/ Borglin " Optimality in Infinite Horizon Models"; *erschienen in: Journal of Institutional and Theoretical Economics / Zeitschrift für die gesamte Staatswissenschaft, 1988.*
325. Buhl, H. U.: Dauerarbeitslosigkeit: Wachstumstheoretische und Verteilungstheoretische Aspekte.
326. Eichhorn, W.: Risiko und Versicherung; *erschienen in: Das Risiko und seine Akzeptanz, Hoechst-Gespräch 1988, herausgegeben von der Hoechst AG, Schütze Verlag, Bonn-Frankfurt 1989, 95-120.*
327. Morlock, M.: Wissensbasierte Systeme im ORI (Heuristiken). *März 1988.*
328. Pfingsten, A.: Empirical Investigation of Inequality Concepts: A Method and First Results.

329. Neumann, K.: Das Briefträgerproblem in Graphen, Digraphen und gemischten Graphen. *März 1988.*
330. Neumann, K.: Handlungsreisendenproblem und Tourenplanung. *Juni 1988.*
331. Egle K. und S. Fenyi: Lösung des D/W Input- Output- Systems durch stochastische Inversion.
332. Pfingsten, A.: Surplus Sharing Methods.
333. Schnelle, M.: Kundenzeitschranken in der Tourenplanung. *September 1988.*
334. Zhan, J.: Kalendrierung der Terminplanung in MPM-Netzplänen. *Januar 1988.*
335. Ott, V. und J. Weber: Entscheidungsmethoden für Umwelttechnik.
336. Eichhorn, W.: Unabhängigkeit der Shephardschen Axiome; *erschienen in: Statistik, Informatik und Ökonomie, W. Janko (Hrsg.), Springer-Verlag, Berlin-Heidelberg 1988, 49-54.*
337. Fuchs- Seliger, S.: An Axiomatic Approach to Compensated Demand; *erscheint in: Journal of Economic Theory.*
338. Bossert, W.: Social Evaluation with Variable Population Size: An Alternative Concept.
339. Bossert, W.: On the Extension of Preferences over a Set to the Power Set: An Axiomatic Characterization of a Quasi- Ordering (Revised Version); *erscheint in: Journal of Economic Theory.*
340. Eichhorn, W. und U. Leopold: Logical Aspects Concerning Shephard's Axioms of Production Theory.
341. Bossert, W.: Rawlsian Welfare Orderings with Variable Population Size; *erscheint als: " Maximin Welfare Orderings with Variable Population Size" in Social Choice and Welfare.*
342. Fuchs- Seliger, S.: On the Continuity of Income Compensation Functions.
343. Bossert, W.: Generalized Gini Social Evaluation Functions and Low Income Group Aggregation; *erscheint als: " An Axiomatization of the single-series Ginis" in Journal of Economic Theory.*
344. Weinhardt, C.: Currency-Independence of Inequality Measures; *erschienen in: Henn et al. (Hrsg.): Methods of Operations Research, 60, Anton Hain Verlag, (1990), S.525-536.*
345. Eichhorn, W.: Vom magischen Viereck zum ökolomagischen Neuneck.
346. Buhl, H. U.: Eine Finanzanalyse des Hersteller- Leasings; *erschienen in: Zeitschrift für Betriebswirtschaft, 4, 1989.*
347. Bossert, W.: The Location of a Monopolistic Firm.
348. Bossert, W.: Population Replications and Ethical Poverty Measurement.
349. Fuchs- Seliger, S.: Non- Saturated Preferences and Compensated Demand.
350. Pfingsten, A.: Der Einsatz von monetären Anreizsystemen in der Planung.

351. Buhl, H. U.: Ein Finanzierungs- Expertensystem zur Unterstützung der Unternehmens-Strategischen Vorteile des Hersteller-Leasings; *erschienen in: Spremann, K. (Hrsg.): Informationstechnologie und strategische Führung, Gabler, Wiesbaden 1989.*
352. Pfingsten, A.: Sparten gut, alles gut? - Zur Notwendigkeit ergänzender zentraler Steuerung; *erschienen in: Die Bank, 1989, 139-141.*
353. Bossert, W. und A. Pfingsten: Nonhomothetic Preferences and Exact Price Index Numbers.
354. Hofmann, H., A. Lamatsch und M. Bücken: Programmbibliothek. *April 1988.*
355. Eichhorn, W.: Inequalities in the Theory of Economic Inequality.
356. Fuchs- Seliger, S.: Dual Models in the Theory of Demand.
357. Eichhorn, W.: Generalized Convexity in Economics: Some Examples.
358. Fuchs- Seliger, S.: Compensated and Direct Demand without Transitive and Complete Preferences.
359. Stehling, F.: Umweltschutz in der wirtschaftswissenschaftlichen Ausbildung.
360. Stehling, F.: Ökonomische Aspekte des Umweltschutzes: Ökonomie und Ökologie im Konflikt ?
361. Bücken, M. und K. Neumann: Stochastic Single-Machine Scheduling to Minimize the Weighted Expected Flow Time and Maximum Expected Lateness Subject to Precedence Constraints Given by an OR Network. *März 1989.*
362. Pfingsten, A.: Fiscal Competition and Equalization of Public Funds.
363. Geidel, J.: Richtlinien zur Dokumentation und Archivierung von Software. *März 1989*
364. Bossert, W und F. Stehling: On the Uniqueness of Cardinaly Interpreted Utility Functions.
365. Eichhorn, W. und H. Funke: Prices Before and After the Vertical Merging of Firms.
366. Weinhardt, C: The Trade Off between Real Equity and Real Efficiency in Welfare Measurement Theory. Vortragsmanuskript zur Tagung der GMÖR, Ulm 1989.
367. Buhl, H. U.: Much Ado About Leasing? *Erschienen in: Zeitschrift für Betriebswirtschaft, 8, 1989.*
368. Derr, Ph.: Bericht über das Praktikum OR auf Kleinrechnern im WS 87/88, SS 88. *Juni 1989*
369. Eichhorn, W. und A. Vogt: Gemeinsames bei der Messung von Ungleichheit, Streuung, Risiko und Information.
370. Eichhorn, W.: Volkswirtschaftliche Auswirkungen der Mikroelektronik; *erschienen in: Informationstechnologie und strategische Führung, Klaus Spremann und Eberhard Zur (Hrsg.), Gabler, Wiesbaden 1989, 367-377.*
371. Eichhorn, W.: Equations and Inequalities in the Theory of Measurement.
372. Buhl, H. U. und G. Satzger: " Principals" und " Agents" in der Unternehmensplanung.

373. Buhl, H. U. und N. Erhard: Steuerlich linearisiertes Leasing: Kalkulation und Steuerparadoxon.
374. Geidel, J., Hoffmann D. und M. Lachmann: Teachware in Operations Research. *Dezember 1989*
375. Fuchs- Seliger, S.: Reformulation of the Theory of Demand by Compensated Demand Functions.
376. Chakravarty, S. R. und W. Eichhorn: The Optimum Size Distribution of Income.
377. Chakravarty, S. R. und W. Eichhorn: An Axiomatic Characterization of a Generalized Index of Concentration.
378. Eichhorn, W.: How not to Lie with Statistics in Regional Analysis.
379. Chakravarty, S. R.: The Optimum Size Distribution of Firms.
380. Chakravarty, S. R.: On Quasi-Orderings of Income Profiles.
381. Chakravarty, S. R.: Ethical Social Index Numbers; *erschienen als Buch: Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, New York, London, Paris, Tokyo, Hong Kong, (1990).*
382. Chakravarty, S. R. and B. Dutta: Migration and Welfare.
383. Chakravarty, S. R. and A. Majumder: Personal Income Distribution: Development of a New Model and Its Application to U. S. Income Data.
384. Pfingsten, A.: Profit-Based Payment Schemes in the Banking Sector.
385. Derr, Ph.: Projektplanungssoftware. *Januar 1990.*
386. Weinhardt, C.: The Central Role of Efficiency in Inequality and Welfare Measurement Theory.
387. Weinhardt, C.: The Efficiency of Price Income Situations, the Real Average Income - A Characterization -.
388. Eichhorn, W.: Das magische Neuneck. Umwelt und Sicherheit in einer Volkswirtschaft.
389. Bossert, W. und A. Pfingsten: Ordinal Utility and Economic Price Indices.
390. Bossert, W. und F. Stehling: Admissible Transformations for Interpersonally Comparable Utilities : A Rigorous Derivation.
391. Bossert, W. und F. Stehling: Social Preferences as Optimal Compromises.
392. Foulds, L. R., Hoffmann D. und K. Neumann: Stochastic Identical Parallel Machine Scheduling with OR Precedence Constraints. *March 1990.*
393. Fuchs- Seliger, S.: Non-Saturated Preferences and Compensated Demand - A Reexamination.
394. Geidel, J. und M. Lachmann: Projekt" Entscheidungsunterstützung in der Projektplanung" - Zwischenbericht. *Mai 1990.*
395. Brinkmann, K.: Bericht über das Praktikum OR auf Kleinrechnern im WS 88/89, SS 89. *Mai 1990.*
396. Weinhardt, C.: How to measure Price Progression
397. Morlock, M.: Dynamic Programming

398. Neumann, K.: Einführung in die Maschinenbelegungsplanung. *Juli 1990.*
399. Christmann, A. und W. Jorasz: Verfahren zur Aufteilung von Fertigungsgemeinkosten bei Verwendung der Bezugsgrößen Fertigungslohn und Maschinenzeiten
400. Christmann, A.: Synergetics in Kaldor's Business Cycle Model
401. Christmann, A.: Synergetik in der Ökonomie
402. Chakravarty, S. R. and W. Eichhorn: Measurement of Income Inequalities : True versus Observed Data
403. Fuchs- Seliger, S.: A Reconsideration of Income Compensation
404. Beck, T.: Integrated Capacity and Lot Size Planning in Decentralized Production Planning. *Dezember 1990.*
405. Pfingsten, A. und J. Schneider: Retrieving Inequality Concepts and Progressivity Objectives From Tax Functions via Approximations
406. Geidel, J.: Praktikum " OR auf Kleinrechnern" im WS 89/90, SS 90. *Januar 1991.*
407. Lachmann, M.: Programmbibliothek Operations Research. *Januar 1991.*
408. Bücker, M., Neumann, K., Rubach, T.: Algorithms for Single-Machine Scheduling with Stochastic Outtree Precedence Relations to Minimize Expected Weighted Flow Time or Maximum Expected Lateness. *February 1991.*
409. Geidel, J., Lachmann, M.: Konzept eines modellbasierten Entscheidungsunterstützungssystems. *Februar 1991.*
410. Eichhorn, W.: Uneasy Polygons: Environment and Security Within the System of Aims of an Economy.
411. Eichhorn, W.: Produktionskorrespondenzen
412. Fuchs- Seliger: On the Evaluation of Budget Situations
413. Lachmann, M.: Begriffsgraphen. *April 1991.*
414. Bol, Morlock, Neumann, Pallaschke, Waldmann: Operations Research studieren an der Universität Karlsruhe. *September 1991.*
415. Lachmann, M.: Modelle und Verfahren in entscheidungsunterstützenden Systemen. *Dezember 1991.*
416. Bücker, M., Neumann, K.: Algorithms for Single-Machine Scheduling with Stochastic Outtree Precedence Relations to Minimize Expected Weighted Flow Time or Maximum Expected Lateness. *February 1991.*
417. Egle, K., Fenyi, S.: Eigenvalue Estimations in Input-Output and Growth Models by Monte Carlo Techniques
418. Gerhards, T.: Purchasing Power Parity and Cointegration
419. Bücker, M.: Ein Programmpaket zur Folgeplanung mit stochastischen Anordnungsbeziehungen. *Juli 1992.*
420. Fuchs- Seliger: Order Extensions and Budget Correspondences
421. Lachmann, M., Neumann, K.: A Heuristic for Multi-Product, Multi-Period, Single-Level Batch Production. *September 1992.*

422. Bücken, M.: Object Oriented Operations Research. *October 1992.*
423. Lachmann, M.: Genetische Algorithmen in der Optimierung, Bericht zum Rechnerpraktikum 1990/91. *Oktober 1992.*
424. Neumann, K.: Dynamic Programming - Basic Concepts and Applications. *October 1992.*
425. Neumann, K.: Production and Operations Management. *November 1992.*
426. Geidel, J., Lachmann, M., Präger, R. : Modellierung und Methodenauswahl in Entscheidungsunterstützungssystemen. *März 1993.*
427. Neumann, K.: Produktions- und Operations-Management I. *September 1993.*
428. Neumann, K.: Produktions- und Operations-Management II, 2. Auflage. *April 1994.*
429. Eichhorn, W., Krtscha, M.: Informationsmessung und Beziehungen zur Messung von Steuerung, Risiko, Entropie, Konzentration und Ungleichheit, erschienen in: Walter Frisch und Alfred Taudes (Hrsg.): Informationswirtschaft - Aktuelle Entwicklungen und Perspektiven, Physica-Verlag, Heidelberg 1993, 3-20.
430. Gerhards, T.: Strukturelle Wechselkursbeziehungen auf den Internationalen Devisenmärkten. 1993.
431. Gerhards, T.: Zwanzig Jahre Flexible Wechselkurse - Eine Empirische Bewertung des Monetären Modells. 1993.
432. Fuchs-Seliger, S.: On Competitive Equilibria in Models of Consumer Behaviour. 1994.
433. LS Neumann, K.: Klausuraufgaben OR I + II mit Lösungen, *September 1994.*
434. LS Neumann, K.: Klausuraufgaben POM I + II mit Lösungen. *Juni 1994.*
435. LS Neumann, K.: Klausuraufgaben Graphen und Netzwerke I + II mit Lösungen. *Juni 1994.*
436. Schneider, W.G.: Programmbibliothek Operations Research. *April 1994.*
437. Schwindt, C.: Vergleichende Beurteilung mehrerer Varianten der Heuristik von Lambrecht & Vanderveken zur sukzessiven Lösung des integrierten Losgrößen- und Ablaufplanungsproblems. *Mai 1994.*