

Drexl, Andreas; Jordan, Carsten; Kimms, Alf

Working Paper — Digitized Version

Gruppierungs- und Reihenfolgeprobleme in der Fertigung

Manuskripte aus den Instituten für Betriebswirtschaftslehre der Universität Kiel, No. 447

Provided in Cooperation with:

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

Suggested Citation: Drexl, Andreas; Jordan, Carsten; Kimms, Alf (1997) : Gruppierungs- und Reihenfolgeprobleme in der Fertigung, Manuskripte aus den Instituten für Betriebswirtschaftslehre der Universität Kiel, No. 447, Universität Kiel, Institut für Betriebswirtschaftslehre, Kiel

This Version is available at:

<https://hdl.handle.net/10419/175397>

Standard-Nutzungsbedingungen:

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

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

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

Terms of use:

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

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

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

Manuskripte
aus den
Instituten für Betriebswirtschaftslehre
der Universität Kiel

No. 447

Gruppierungs- und Reihenfolgeprobleme
in der Fertigung

Drexl/Jordan/Kimms

Juni 1997

Wir danken der Deutschen Forschungsgemeinschaft für die gewährte Unterstützung
(Dr 170/4-1).

Prof. Dr. *Andreas Drexl*, Dr. *Alf Kimms*, Lehrstuhl für Produktion und Logistik, Institut für
Betriebswirtschaftslehre, Christian-Albrechts-Universität zu Kiel, Olshausenstr. 40, 24118
Kiel

email: Drexl@bwl.uni-kiel.de
Kimms@bwl.uni-kiel.de
c.jordan@ids-scheer.de

URL: <http://www.wiso.uni-kiel.de/bwlinstitute/Prod>
<ftp://ftp.wiso.uni-kiel.de/pub/operations-research>

Dr. *Carsten Jordan*, Biedersbergweg 98, 66538 Neunkirchen

1 Einleitung

Gruppierungs- und Reihenfolgeprobleme der Fertigung¹ treten in der Praxis im Bereich der Produktionsplanung und -steuerung in vielfältigen Formen auf. Unter Produktionsplanung und -steuerung subsumiert man dabei die räumliche, zeitliche und mengenmäßige Planung, Steuerung und Kontrolle des gesamten Geschehens im Produktionsbereich.² Hierbei zu treffende Entscheidungen sind lang-, mittel- und kurzfristige Ausstattungs-, Programm- und Prozeßentscheidungen.³ *Strategische* Entscheidungen betreffen die Bestimmung der Geschäftsfelder und der zu verfolgenden Produktionsstrategie, während *taktische* Entscheidungen hinsichtlich Breite und Tiefe sowie der grundlegenden Struktur des Produktionsprogramms zu treffen sind. *Operative* Entscheidungen beziehen sich auf das kurzfristige Produktionsprogramm, die bereitzustellenden Produktionsfaktoren sowie den Vollzug der Produktionsprozesse.

Produktionsplanung und -steuerung findet in der Praxis unter Verwendung von PPS-Systemen statt. PPS-Systeme sind *computergestützte* Systeme zur *kurzfristigen* Planung, Steuerung und Kontrolle des Produktionsgeschehens bei vorgegebenen Produktionskapazitäten; damit unterstützen sie die Produktionsplanung und -steuerung im operativen Bereich. Auf der Basis gegebener Produktionspotentiale und mittelfristig fixierter Programm-entscheidungen wird das kurzfristige Produktionsprogramm festgelegt, der Bedarf an Einsatzstoffen abgeleitet sowie der zeitliche und räumliche Ablauf der Produktion bestimmt. Obwohl der inzwischen eingetretene Entwicklungsstand (Datenintegration, Online-Verarbeitung, Leitstandskonzepte, Simulation, etc.) die derzeit verfügbaren informations- und softwaretechnischen Möglichkeiten weitgehend ausschöpft, bleiben grundlegende konzeptionelle Defizite bestehen. Diese Defizite resultieren daraus, daß konventionelle PPS-Systeme ergebnisorientiert vorgehen und folglich (endliche) Produktionskapazitäten nicht (adäquat) berücksichtigt werden.⁴

In der Literatur existiert eine große Anzahl von Modellen und Methoden zur separaten Formulierung und Lösung von Gruppierungs- und Reihenfolgeproblemen. Gruppierungsprobleme sind dabei überwiegend dem Bereich der Lagerhaltung/Losgrößenplanung zuzuordnen. Reihenfolgeprobleme gehören demgegenüber vorwiegend in den Bereich der Maschinenbelegungsplanung. In der vorliegenden Arbeit sollen beide Probleme gemeinsam betrachtet werden. Insbesondere soll ein neues Modell vorgestellt werden, das einerseits stark von der traditionellen Sichtweise der Losgrößen- und Ablaufplanung abweicht und das andererseits die Grundlage für die Entwicklung effizienter Lösungsverfahren bildet.

Die vorliegende Arbeit ist wie folgt aufgebaut: Unterschiedliche Arten von Gruppierungs- und Reihenfolgeproblemen sowie deren Relevanz für verschiedene Produktionssegmente sind Gegenstand von Abschnitt 2. In Abschnitt 3 wird ein neues Gruppierungs- und Reihenfolgemodell formuliert. Abschnitt 4 verdeutlicht das neue Modell mit Hilfe eines Beispiels und stellt ausgewählte Ergebnisse dar. Abschnitt 5 gibt einen Überblick über verallgemeinerte Problemstellungen.

¹Weitere Gruppierungsprobleme, wie sie z.B. in der Clusteranalyse oder bei der Fließbandabstimmung auftreten, schließen wir damit von der Betrachtung aus.

²Vgl. hierzu z.B. auch Domschke et al. (1993), Kistner/Steven (1993), Küpper/Helber (1995) sowie Tempelmeier (1995).

³Vgl. etwa Schneeweiß (1992).

⁴Vgl. zu dieser Kritik vor allem Drexel et al. (1994).

2 Charakteristika von Gruppierungs- und Reihenfolgeproblemen

Gruppierungs- und Reihenfolgeprobleme sind dem Bereich der Produktionsprozessplanung zuzuordnen. In der Literatur werden sie allerdings unter sehr unterschiedlichen Begriffen behandelt. Die in diesem Zusammenhang am häufigsten verwendeten Begriffe sind diejenigen der 'Losgrößenplanung', der 'Durchlauf- und Kapazitätsterminierung', der 'Reihenfolgeplanung' sowie der 'Feinterminierung'.

Im Rahmen der *Losgrößenplanung* ist zu entscheiden, ob und in welchem Ausmaß eine Zusammenfassung von Fertigungsaufträgen zu Losen im Hinblick auf eine bestimmte Zielsetzung (meist Minimierung der Rüst- und Lagerhaltungskosten) sinnvoll ist. Gesucht werden also — unter Einhaltung bestimmter Restriktionen — kostenminimale Losgrößen. Synonym zu Losgrößenplanung werden gelegentlich auch die Begriffe Auftragsgrößenbestimmung, Auftragsbildung oder auch Mengenplanung verwendet.

Unter *Durchlauf- und Kapazitätsterminierung* subsumiert man die Ermittlung frühester und spätester Zeitpunkte für die Bearbeitung von Fertigungsaufträgen im Hinblick auf vereinbarte Liefertermine. Daraus ergibt sich auch die zeitliche Verteilung der Lose innerhalb des betrachteten Planungszeitraums. Die Durchlaufterminierung oder auch Terminplanung bezieht sich dabei ausschließlich auf zeitliche Aspekte; Kapazitätsgesichtspunkte werden also in der Regel zunächst vernachlässigt. Anschließend sorgt die Kapazitätsterminierung (auch als Kapazitätsabgleich bezeichnet) für den erforderlichen Ausgleich bei Über- bzw. Unterdeckungen zwischen Kapazitätsangebot und Kapazitätsnachfrage.

Gegenstand der *Reihenfolgeplanung* ist die Bildung von Reihenfolgen für die Bearbeitung der Fertigungsaufträge. Synonyme für Reihenfolgeplanung sind Ablaufplanung oder auch Maschinenbelegungsplanung.

Aufgabe der *Feinterminierung* ist die kurzfristige, detaillierte Verteilung der Aufträge auf einzelne Maschinen (Betriebsmittel). Unter den Begriffen Maschinenbelegungsplanung oder Ablaufplanung werden gelegentlich sowohl die Reihenfolgeplanung als auch die Feinterminierung zusammengefaßt.

In der Fertigung treten Gruppierungs- und Reihenfolgeprobleme unterschiedlichster Art auf. Probleme der Reihenfolgeplanung betreffen dabei die räumliche und zeitliche Festlegung von Aufträgen und Arbeitsgängen. Hierunter fallen sehr viele verschiedenartige Fragestellungen unterschiedlichen Schwierigkeitsgrades:⁵

- *Räumliche Reihenfolgeprobleme* beziehen sich auf die Folge, in der einzelne Arbeitsgänge die Betriebsmittel (an vorgegebenen innerbetrieblichen Standorten) durchlaufen müssen. Die räumliche Reihenfolge in Form von Arbeitsgangfolgen (Vorrangbeziehungen zwischen Arbeitsgängen) ist meist durch technologische Bedingungen festgelegt.
- *Zeitliche Reihenfolgeprobleme* betreffen die Reihenfolge, in der die Aufträge auf einer einzelnen Maschine zu fertigen sind (Auftragsfolge). Dabei konkurrieren meist mehrere Aufträge gleichzeitig um dieselben Maschinen. Die Bestimmung geeigneter Auftragsfolgen ist Gegenstand der Planung.⁶

⁵Vgl. hierzu vor allem Domschke et al. (1993).

⁶Vgl. hierzu vor allem Błażewicz et al. (1996a), (1996b), Brucker (1995) sowie Domschke et al. (1993).

Probleme der Gruppierung befassen sich mit der geeigneten Zusammenfassung von Subjekten, Betriebsmitteln und Objekten:⁷

- Die *Gruppierung von Subjekten* befaßt sich mit der Zusammensetzung und Stärke von Arbeitsgruppen.
- Bei der *Gruppierung von Betriebsmitteln* sind Entscheidungen über die art- und mengenmäßige Zusammensetzung von Arbeitsmitteln zu treffen (Anordnungstyp der Fertigung).
- Die *Gruppierung von Objekten* ist Inhalt und Gegenstand der Losgrößen- oder Bestellmengenplanung.⁸
- Gegenstand der *Gruppentechnologie* ist die kombinierte Gruppierung von Maschinen und Objekten.

Die in der vorliegenden Arbeit behandelten Gruppierungs- und Reihenfolgeprobleme der Fertigung lassen sich nun wie folgt kennzeichnen: Es geht um die Berücksichtigung von Interdependenzen zwischen *zeitlichen Reihenfolgeproblemen* und der *Gruppierung von Objekten*.⁹ Je nach Repetitionstyp (Einzel-, Serien-, Massenfertigung) und Anordnungstyp (Werkstatt-, Fließfertigung) ergeben sich dabei unterschiedliche Gruppierungs- und Reihenfolgeprobleme, wie sie in *Abbildung 1*¹⁰ dargestellt sind. *Abbildung 1* verdeutlicht folgende Zusammenhänge:

- Von *Einzelfertigung* spricht man bei der in der Regel mehrstufigen Fertigung eines oder mehrerer komplexer Produkte. Meist handelt es sich um Kundenauftragsfertigung — mit großer Bedeutung von Methoden der Netzplantechnik und des Projektmanagements. Bei Einzelfertigung dominieren die Anordnungstypen Werkstatt- und Baustellenfertigung. Die Reihenfolgeplanung und Feinterminierung hat hier eine außerordentlich große Bedeutung. Wegen der niedrigen Produktstandardisierung spielen bei Einzelfertigung Losgrößenprobleme in der Regel eine vernachlässigbare Rolle.
- Bei *Serien- und Sortenfertigung* sind in aller Regel Losgrößenprobleme zu lösen. Häufig sind gleichzeitig Probleme der Durchlauf- und Kapazitätsterminierung, vor allem aber auch der Reihenfolgeplanung zu betrachten. In diesem Segment liegt also das größte Anwendungspotential für die simultane Gruppierungs- und Reihenfolgeplanung.
- Bei *Massenfertigung* liegt der Anordnungstyp der Fließfertigung vor. Vorherrschende Planungsprobleme betreffen damit die zeitliche Einteilung von Arbeitskräften und die Bestimmung von Produktionsintensitäten zur Anpassung der herzustellenden Mengen an das aktuelle Produktionsprogramm.

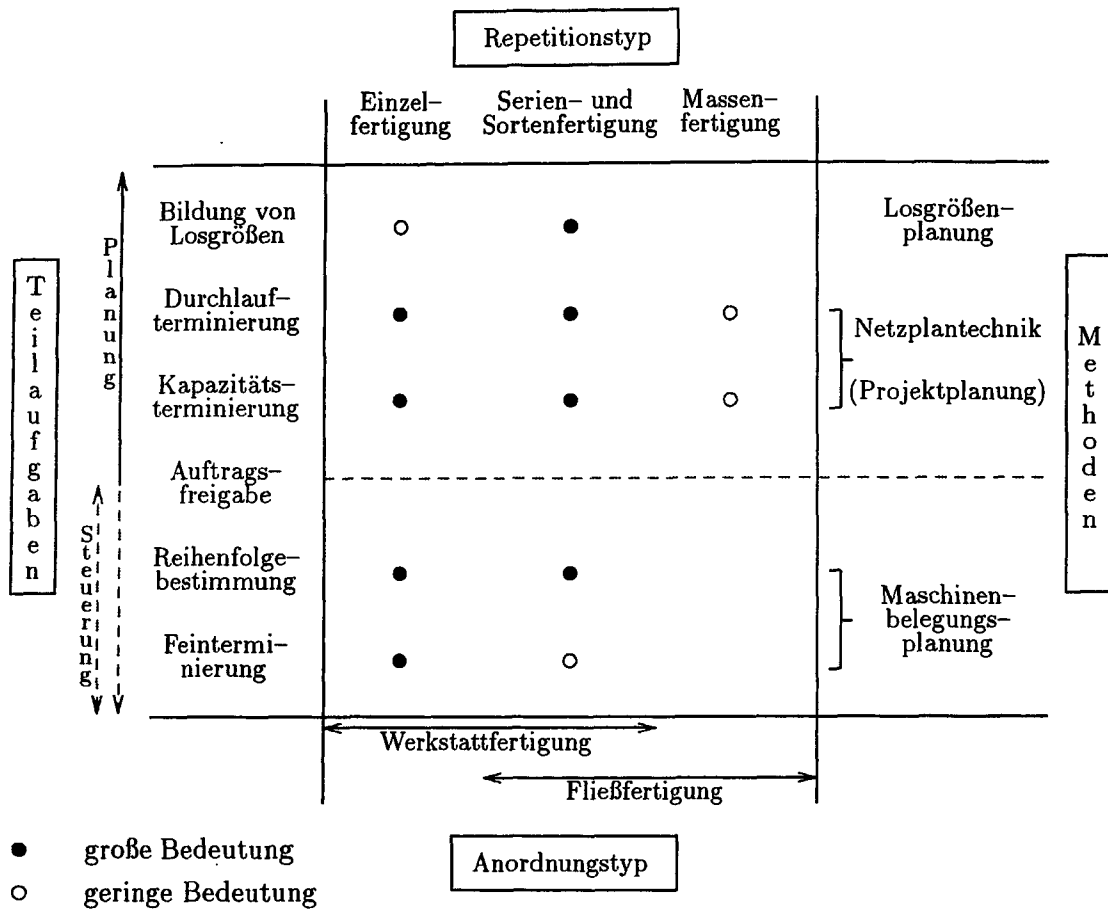
⁷Vgl. hierzu erneut Domschke et al. (1993).

⁸Ein Überblick über klassische, stationäre Modelle zur Losgrößen- und Bestellmengenplanung ist in Erlenkotter (1990) zu finden. Zu dynamischen, einstufigen Einproduktmodellen und effizienten Lösungsverfahren vgl. Aggarwal/Park (1993), Federgruen/Tzur (1991) sowie Wagelmans et al. (1992). Ein- und mehrstufige Mehrproduktmodelle und Lösungsverfahren werden z.B. in Erlenkotter (1978), Eppen/Martin (1987), Helber (1994), Stadtler (1996), Tempelmeier/Derstroff (1996) sowie Tempelmeier/Helber (1994) dargestellt. Mit Fragen der Investition in losgrößenreduzierende Maßnahmen befassen sich z.B. Rieper/Majerus (1991).

⁹Zur Bedeutung von Gruppierungs- und Reihenfolgeproblemen für PPS-Systeme vgl. Drexel et al. (1995).

¹⁰Entnommen aus Domschke et al. (1993), S. 17.

Abbildung 1: Relevanz bzgl. Repetitions- und Anordnungstyp



Zur Bezeichnung der im Zusammenhang mit Gruppierungs- und Reihenfolgeproblemen auftretenden Fragestellungen werden in der Literatur unterschiedliche Begriffe verwendet; als Beispiele seien genannt:

- Losgrößen- und Ablaufplanung¹¹
- Losgrößen- und Reihenfolgeplanung¹²
- Seriengrößen- und Seriensequenzplanung¹³
- Integrierte Losgrößen- und Fertigungsplanung¹⁴
- Kapazitätsorientierte Auftragsbildung¹⁵
- Lossequenzproblem¹⁶

¹¹ Kurbel (1978), Stadtler (1988), Popp (1993)

¹² Rehwinkel (1978), Bliesener (1992)

¹³ Adam (1969), Dellmann (1975)

¹⁴ Strebel/Schulze (1984)

¹⁵ Dangelmeier et al. (1989)

¹⁶ Kiener et al. (1993), S. 150 ff.

- Sortenreihenfolgeproblem¹⁷
- Integrierte Programm-, Seriengrößen- und Maschinenbelegungsplanung¹⁸
- Integrierte Losgrößen- und Maschinenbelegungsplanung in der Serienfertigung¹⁹

Die verwendete Begrifflichkeit ist deswegen problematisch, weil sich teilweise hinter gleichen Begriffen verschiedene Fragestellungen sowie hinter verschiedenen Begriffen identische Problemstellungen verbergen. Ein und dieselbe Begrifflichkeit gibt damit noch keinen sicheren Aufschluß darüber, ob gleiche oder ähnliche Ansätze verfolgt werden. Ein Beispiel für die Verwendung unterschiedlicher Begriffe, mit deren Hilfe identische Problemstellungen bezeichnet werden: *Kurbel*²⁰ subsumiert unter Lossequenzproblem die simultane Betrachtung der Losgrößen-, Reihenfolge- und Terminplanung. Der von *Adam*²¹ verwendete Begriff Seriengrößen- und Sequenzproblem deckt ebenfalls die drei genannten Teilbereiche ab.

Zusammenfassend ist festzustellen, daß die in der Literatur vorzufindende Begrifflichkeit nicht unproblematisch ist. Insbesondere fällt auf, daß anstelle des allgemeineren Begriffs 'Gruppierung' in der Regel die spezielleren Begriffe Losgrößen- oder Seriengrößenplanung verwendet werden.

Im folgenden werden beispielhaft drei aus der Literatur bekannte Modelle zur Beschreibung von Gruppierungs- und Reihenfolgeproblemen skizziert.²²

1. Das Modell von *Adam*²³

Es liefert Antworten auf folgende Fragen. Welche Endprodukte sollen im Planungszeitraum hergestellt und abgesetzt werden? Wie groß sollen die Lose sein? Wie soll der zeitliche Ablauf der Produktion aussehen? Während sich die erste Frage auf das Produktionsprogramm bezieht, haben die Fragen zwei und drei Gruppierungs- und Reihenfolgeprobleme zum Gegenstand.

Das Modell basiert auf einem Detaillierungsgrad, der der Reichweite von der Produktionsprogrammplanung bis hin zur Maschinenbelegungsplanung angemessen ist. Mehrstufige Fertigung ist vorgesehen, wobei die in einer Periode hergestellten Produkte bereits in derselben Periode abgesetzt werden können. Als Zielfunktion wird die Differenz aus dem Erlös der verkauften Produkte und der Summe der variablen Produktionskosten, der Rüstkosten und der Lagerhaltungskosten betrachtet. Rüstvorgänge werden als nicht reihenfolgeabhängig angenommen.

Das Problem wird als gemischt-binäres Optimierungsproblem formuliert. Es deckt wesentliche Teilprobleme der operativen Produktionsplanung und damit von Gruppierungs- und Reihenfolgeproblemen ab. Als einschränkende Annahme muß insbesondere erfüllt sein, daß Rüstzeiten reihenfolgeunabhängig sind und jeweils die Länge einer Periode nicht überschreiten.

¹⁷ *Adam* (1993), S. 332 ff.

¹⁸ *Hoitsch* (1993), S. 552 ff.

¹⁹ *Neumann* (1996), S. 142 ff.

²⁰ *Kurbel* (1978)

²¹ *Adam* (1969)

²² Weitere Modelle finden sich z.B. in *Dinkelbach* (1964), *Pressmar* (1974), *Stadtler* (1988) sowie *Steven* (1994).

²³ Vgl. *Adam* (1969); siehe auch *Zäpfel* (1982), S. 298 ff.

2. Das Modell von Dellmann²⁴

Es ist ein 'heuristisches Entscheidungsmodell zur Seriengrößen- und Seriensequenzbestimmung'. Abweichend von Adam geht Dellmann von der restriktiveren Annahme einstufiger Fertigung aus, allerdings können Rüstvorgänge nunmehr reihenfolgeabhängig sein. Ferner sind Verzugs Mengen erlaubt, wofür Verzugskosten veranschlagt werden müssen. Insbesondere infolge der Berücksichtigung reihenfolgeabhängiger Rüstvorgänge wird das Modell sehr komplex.

3. Das Modell von Fleischmann²⁵

Es beruht auf folgenden Annahmen. Ein Produkt wird, sofern es in einer Periode überhaupt hergestellt werden soll, immer über die volle Periode hergestellt (all or nothing production).²⁶ Die Kapazität ist in allen Perioden identisch. Pro Periode kann höchstens ein Produkt hergestellt werden. Das Modell wird in der englischsprachigen Literatur als *Discrete Lot Sizing and Scheduling Problem (DLSP)* bezeichnet. Rüstzeiten sowie reihenfolgeabhängige Rüstkosten sind nicht vorgesehen. Infolge der — im Vergleich zu Adam und Dellmann — restriktiven Annahmen ist das Modell von Fleischmann vergleichsweise effizient lösbar.

Diese Skizze ausgewählter Gruppierungs- und Reihenfolgemodelle aus der Literatur verdeutlicht exemplarisch die mit der Behandlung der Interdependenzen zwischen beiden Teilbereichen verbundenen Schwierigkeiten. Die Modelle beruhen entweder auf vergleichsweise unrealistischen Annahmen — und sind daher relativ gut lösbar, oder sie decken viele für praktische Anwendungen relevante Aspekte ab — für den Preis mangelnder Lösbarkeit. Wegen dieser Problematik beschränkt man sich häufig darauf, auf sehr abstraktem Niveau die Vor- und Nachteile von Simultan- und Sukzessivplanung einander gegenüberzustellen und schließlich die hierarchische Produktionsplanung als 'Kompromiß' zwischen Wünschenswertem und Machbarem zu empfehlen. Im folgenden wird eine neue Modellformulierung vorgestellt, die beide Aspekte, d.h. wenig restriktive Annahmen und gute Lösbarkeit, in sich vereint.

3 Eine neues Gruppierungs- und Reihenfolgemodell

Das im folgenden dargestellte Modell zur simultanen Bestimmung einer optimalen Gruppierung und Reihenfolge basiert auf folgenden *Prämissen* (vgl. auch die in Tabelle 1 zusammengefaßten Parameter):

- $i = 1, \dots, N$ Produkte werden in einem einstufigen Fertigungsprozeß auf einer Anlage gefertigt.
- Die Nachfrage nach Produkt i ist deterministisch bekannt. Im Gegensatz zu der bei Losgrößenmodellen üblichen Annahme ist die Nachfrage nicht mit Hilfe einer $N \times T$ -Nachfragematrix $(q_{i,t})$ spezifiziert;²⁷ vielmehr ist sie in Form von Tupeln (i, j) , $j =$

²⁴Vgl. Dellmann (1975)

²⁵Vgl. Fleischmann (1990), vgl. auch Fleischmann (1994).

²⁶Verallgemeinerungen finden sich z.B. in Karmarkar/Schrage (1985), Catrysse et al. (1993), Haase (1994), Drexel/Haase (1995), (1996), Kuik et al. (1994), Haase/Kimms (1996), Fleischmann/Meyr (1997), Drexel/Kimms (1997), Salomon (1991), Salomon et al. (1991), (1997) sowie Kimms (1996a), (1996b), (1997a), (1997b), (1997c).

²⁷mit T als Planungshorizont und t als Periodenindex

$1, \dots, n_i$, gegeben, wobei zu jedem Tupel (i, j) eine Bearbeitungszeit $p_{(i,j)}$ und ein Liefertermin $d_{(i,j)}$ gehört. Zur Vereinfachung der Sprechweise bezeichnen wir jedes Tupel (i, j) als Job. Die Jobs (i, j) sind nach monoton steigenden Lieferterminen $d_{(i,j)}$ sortiert.

- Reihenfolgeabhängige Rüstkosten $sc_{g,i}$ fallen immer dann an, wenn Produkt i nach Produkt g gefertigt wird. Reihenfolgeabhängige Rüstzeiten $st_{g,i}$ sind analog zu berücksichtigen.²⁸
- Bezeichnet man die Kosten der Lagerhaltung von Produkt i mit h_i , so gibt $w_{(i,j)} = h_i \cdot p_{(i,j)}$ die Kosten der vorzeitigen Produktion pro Periode für den Fall an, daß Job (i, j) vor dem Liefertermin $d_{(i,j)}$ fertiggestellt wird. Das ‘Gewicht’ $w_{(i,j)}$ ist also proportional zu dem, was man üblicherweise als Lagerhaltungskosten bezeichnet.
- Zur Vereinfachung der Notation ist es sinnvoll, den ‘Leerzustand’ der Anlage mit dem Index $i = 0$ zu kennzeichnen. Entsprechend kommen dann die Parameter $sc_{0,i}$, $st_{0,i}$, $sc_{i,0}$ und $st_{i,0}$ hinzu.

Im Gegensatz zu konventionellen Losgrößenmodellen hat die hier gewählte Darstellung den Vorteil, daß kein in $t = 1, \dots, T$ Perioden gleicher Länge unterteilter Planungshorizont T , auf dem dann die Nachfragematrix $(q_{i,t})$ definiert ist, vorgegeben werden muß. Vorteilhaft ist das deswegen, weil in derartigen Matrizen in der Regel nur wenige Einträge ungleich Null enthalten sind und folglich in Modellen dieses Typs große Redundanz enthalten ist (vgl. auch das Beispiel in Abschnitt 4).

Tabelle 1: Parameter des Modells

Symbol	Bedeutung
N	Anzahl an Produkten
i	Produktindex, $i = 0, \dots, N$
n_i	Anzahl an Jobs für Produkt i
J	Anzahl an Jobs über alle Produkte, $J = \sum_{i=1}^N n_i$
(i, j)	j -ter Job für Produkt i , $i = 1, \dots, N$, $j = 1, \dots, n_i$
$p_{(i,j)}$	Bearbeitungszeit von Job j für Produkt i
$d_{(i,j)}$	Liefertermin von Job j für Produkt i
$w_{(i,j)}$	Lagerhaltungskosten von Job j für Produkt i
$st_{g,i}$	Rüstzeit zwischen den Produkten g und i , $g, i = 0, \dots, N$
$sc_{g,i}$	Rüstkosten zwischen den Produkten g und i , $g, i = 0, \dots, N$
B	große Zahl

Zur Modellierung der Problemstellung verwenden wir die in Tabelle 2 definierten Entscheidungsvariablen. Hierzu einige Bemerkungen: Der Vektor π spezifiziert die Lage der

²⁸In der angloamerikanischen Literatur spricht man auch ‘Family Scheduling’, wenn wie hier nur bei einem Wechsel der Produktfamilie, und nicht bei der Fertigung von Job $(i, j + 1)$ nach Job (i, j) Rüstaufwand anfällt.

Jobs (i, j) mit Hilfe der positionsabhängigen Indexvariablen $(i_{[k]}, j_{[k]})$.²⁹ Gemeinsam mit den Variablen $C_{(i,j)}$ zur Bezeichnung der Fertigstellungszeitpunkte und den Binärvariablen P_k , die angeben, ob zwischen zwei Jobs Leerzeit auf der Anlage eingeplant ist, ermöglichen es die Indexvariablen $(i_{[k]}, j_{[k]})$ auf kompakte Art und Weise, zulässige Lösungen zu charakterisieren. Wir erhalten damit das Optimierungsmodell (1)–(5).

Tabelle 2: Entscheidungsvariablen des Modells

Symbol	Bedeutung
π	Sequenz aller permutierten Jobs $\pi = ((i_{[1]}, j_{[1]}), (i_{[2]}, j_{[2]}), \dots, (i_{[k]}, j_{[k]}), \dots, (i_{[J]}, j_{[J]}))$
$(i_{[k]}, j_{[k]})$	Job an Position k
$C_{(i,j)}$	Fertigstellungszeitpunkt von Job j für Produkt i
P_k	$= 1$, falls Leerzeit zwischen den Jobs $(i_{[k-1]}, j_{[k-1]})$ und $(i_{[k]}, j_{[k]})$ existiert $(= 0, \text{sonst})$

$$\begin{aligned} \text{Minimiere } \sum_{k=1}^J & \left[w_{(i_{[k]}, j_{[k]})} (d_{(i_{[k]}, j_{[k]})} - C_{(i_{[k]}, j_{[k]})}) + \right. \\ & \left. sc_{i_{[k-1]}, i_{[k]}} + P_k (sc_{i_{[k-1]}, 0} + sc_{0, i_{[k]}} - sc_{i_{[k-1]}, i_{[k]}}) + sc_{i_{[J]}, 0} \right] \end{aligned} \quad (1)$$

unter Beachtung der Nebenbedingungen

$$\begin{aligned} C_{(i_{[k-1]}, j_{[k-1]})} \leq \min & \left\{ C_{(i_{[k]}, j_{[k]})} - p_{(i_{[k]}, j_{[k]})} - st_{i_{[k-1]}, i_{[k]}} - \right. \\ & \left. P_k (st_{i_{[k-1]}, 0} + st_{0, i_{[k]}} - st_{i_{[k-1]}, i_{[k]}}), d_{(i_{[k-1]}, j_{[k-1]})} \right\} \quad k = 1, \dots, J \end{aligned} \quad (2)$$

$$B \cdot P_k - (C_{(i_{[k]}, j_{[k]})} - p_{(i_{[k]}, j_{[k]})} - st_{i_{[k-1]}, i_{[k]}} - C_{(i_{[k-1]}, j_{[k-1]})}) \geq 0 \quad k = 1, \dots, J \quad (3)$$

$$P_k \in \{0, 1\} \quad k = 1, \dots, J \quad (4)$$

$$(i_{[0]}, j_{[0]}) = (0, 0), d_{(0,0)} = C_{(0,0)} = 0 \quad (5)$$

In der englischsprachigen Fachliteratur wird ein derartiges Modell auch als *Batch Sequencing Problem (BSP)* bezeichnet. Zur Erläuterung:

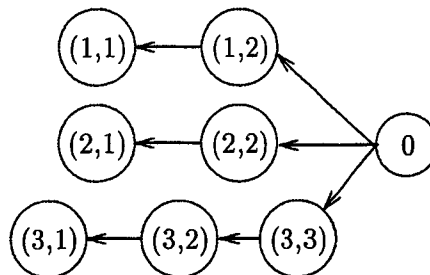
- In der Zielfunktion (1) werden die Rüst- und Lagerhaltungskosten berechnet. Der erste Term multipliziert die Differenz aus tatsächlichem Fertigstellungszeitpunkt von

²⁹Ein Modell, bei dem Variablen als Indices verwendet werden, bezeichnet man auch als ‘konzeptionelles’ Modell, weil hier im Gegensatz zu Modellen der gemischt-ganzzahligen Programmierung die Koeffizientenmatrix nicht ex ante spezifizierbar ist. Ein derartiges konzeptionelles Modell ist wesentlich ‘schlanker’ und kompakter als das entsprechende Modell der gemischt-ganzzahligen Programmierung; vgl. hierzu *Jordan/Drezl (1997)*.

Job (i, j) (der an Position k eingeplant wird) und seinem Liefertermin mit den Lagerhaltungskosten. Der zweite Term erfaßt die reihenfolgeabhängigen Rüstkosten der Sequenz für den Fall, daß zwischen den Jobs an den Positionen $[k - 1]$ und $[k]$ keine Leerzeit vorgesehen ist. Der dritte Term schließlich berücksichtigt die Rüstkosten für den Fall, daß zwischen den Jobs an den Positionen $[k - 1]$ und $[k]$ Leerzeit eingeplant ist.

- Die Restriktionen (2) stellen sicher, daß jeder Job vor seinem Liefertermin fertiggestellt wird. Dabei muß gewährleistet werden, daß zwischen der (sequenzabhängigen) Fertigstellungszeit $C_{(i_{[k-1]}, j_{[k-1]})}$ des Jobs an Position $[k - 1]$ und der Fertigstellungszeit $C_{(i_{[k]}, j_{[k]})}$ des Jobs an Position $[k]$ genügend Kapazität für die erforderliche Bearbeitungszeit, die Rüstzeit und die ggf. vorgesehene Leerzeit vorhanden ist.
- Aufgabe der Ungleichungen (3) ist es, die Variable P_k dann auf 1 zu setzen, wenn die (zeitliche) Differenz von $C_{(i_{[k-1]}, j_{[k-1]})}$ und $C_{(i_{[k]}, j_{[k]})}$ die Bearbeitungs- und Rüstzeit von Job (i, j) übersteigt, also Leerzeit eingeplant ist.
- Die Restriktionen (4) definieren die Variablen P_k als binär.
Die Nebenbedingungen (4) sorgen in Verbindung mit den Restriktionen (3) dafür, daß der Korrekturterm in der Zielfunktion den erforderlichen Wert annimmt.
- Die Gleichungen (5) schließlich initialisieren den Beginn der Sequenz für den fiktiven Startjob.

Abbildung 2: Rückwärtsorientierte Einplanungsstrategie



Das BSP gehört zur Klasse der Optimierungsprobleme, bei denen bereits die Zulässigkeitsvariante (also die Beantwortung der Frage, ob es überhaupt eine zulässige Lösung gibt) NP-schwer ist. Zur Bestimmung einer optimalen Lösung bzw. zur definitiven Klärung der Frage, ob es für eine bestimmte Instanz eine zulässige Lösung gibt oder nicht, ist man also in der Regel auf Branch & Bound-Verfahren angewiesen. Zur Lösung des BSP wurden mehrere exakte und heuristische Verfahren entwickelt.³⁰

1. Exakte Verfahren

Zu den exakten Verfahren zählen Branch & Bound-Verfahren, Verfahren der dynamischen Programmierung sowie KI-basierte Methoden. Branch & Bound-Verfahren

³⁰Details findet der interessierte Leser in *Jordan (1996)*.

enumerieren ‘von hinten’ über zulässige Sequenzen von Jobs. In *Abbildung 2* wird für ein Beispiel mit $N = 3$ Produkten und $J = 7$ Jobs³¹ diese rückwärtsorientierte Einplanungsstrategie verdeutlicht. Beginnend bei einer (fiktiven) Senke ‘0’ des Enumerationsbaumes, werden alle möglichen Sequenzen, die (unter bestimmten Voraussetzungen³²) mit den in der *Abbildung 2* enthaltenen Reihenfolgebeziehungen vereinbar sind, enumeriert. Die Reihenfolgebeziehungen resultieren aus der Sortierung der Liefertermine (in fallender Reihenfolge). Zur Beschränkung des Enumerationsprozesses dienen Bounding- und Dominanzregeln. Branch & Bound-Verfahren sind im Durchschnitt wesentlich effizienter als Verfahren der dynamischen Programmierung sowie KI-basierte Methoden.

2. Heuristische Verfahren

Zu den heuristischen Verfahren zählen Konstruktions- und Verbesserungsverfahren. Konstruktionsverfahren versuchen, eine zulässige Lösung zu generieren. Maßgebend sind dabei Prioritätswerte, die jeweils lokal als Entscheidungskriterium für die Auswahl eines Jobs unter mehreren (die um die knappe Anlagenkapazität konkurrieren) dienen. Verbesserungsverfahren versuchen, ausgehend von einer zulässigen Lösung, durch systematisches Vertauschen von Jobs einer Sequenz, zu verbesserten Sequenzen zu gelangen. Bei der Lösung des BSP hat sich ein genetischer Algorithmus ganz besonders bewährt.³³ Sein Prinzip ist wie folgt: Ein binärer String der Länge $L = \sum_{i=1}^N n_i - J$ dient zur Kodierung der Gruppierungsentscheidung. Eine ‘1’ im genetischen String bedeutet, daß der Job ein ‘Batch’ startet, eine ‘0’ bedeutet das Gegenteil. Nach der Entscheidung über die (Nicht-)Gruppierung der Jobs verbleibt lediglich ein vergleichsweise einfach zu lösendes Ablaufplanungsproblem.

4 Beispiel und numerische Ergebnisse

Wir greifen das im vorhergehenden Abschnitt partiell bereits verwendete Beispiel auf und verdeutlichen daran das Modell.³⁴ Gegeben seien die Rüstzeiten sowie die Rüst- und Lagerhaltungskosten von *Tabelle 3*. Alle weiteren erforderlichen Daten sind in *Tabelle 4* wiedergegeben.

Im mittleren Teil von *Abbildung 3* sind die Jobs (i, j) , ihre Bearbeitungszeit $p_{(i,j)}$ sowie ihre relative zeitliche Lage $d_{(i,j)}$ graphisch veranschaulicht. *Abbildung 3* verdeutlicht ferner im oberen Teil die Beziehungen zum DLSP durch Wiedergabe der zugehörigen Nachfrage-matrix $(q_{i,t})$. Die zahlreichen Nullen in dieser Matrix unterstreichen den obigen Hinweis auf die Redundanz in der Darstellung (und Verarbeitung) von Nachfragen im DLSP. Darüber hinaus zeigt *Abbildung 3* im unteren Bereich das Gantt-Diagramm einer optimalen Lösung (Rüstzeiten mit horizontaler Schraffur dargestellt). Die Werte der zugehörigen Entscheidungsvariablen $C_{(i[k],j[k])}$ gibt *Tabelle 5* wieder.

³¹Das auch in Abschnitt 4 zur Verdeutlichung verwendet wird.

³²Vgl. Jordan (1996).

³³Evaluiert bislang allerdings nur für den Fall reihenfolgeunabhängiger Rüstvorgänge.

³⁴Entnommen aus Jordan/Drexel (1997).

Tabelle 3: Rüstzeiten sowie Rüst- und Lagerhaltungskosten

$st_{g,i}$	0	1	2	3	$sc_{g,i}$	0	1	2	3	h_i
0	0	1	2	1	0	0	5	10	10	
1	0	0	1	1	1	0	0	5	5	1
2	0	0	0	1	2	0	0	0	5	1
3	0	1	2	0	3	0	5	10	0	1

Tabelle 4: Weitere Daten

(i, j)	(1, 1)	(1, 2)	(2, 1)	(2, 2)	(3, 1)	(3, 2)	(3, 3)
$d_{(i,j)}$	8	21	9	20	10	16	21
$p_{(i,j)}$	1	2	1	1	1	2	1
$w_{(i,j)}$	1	2	1	1	1	2	1

Abbildung 3: DLSP, BSP und Gantt-Diagramm

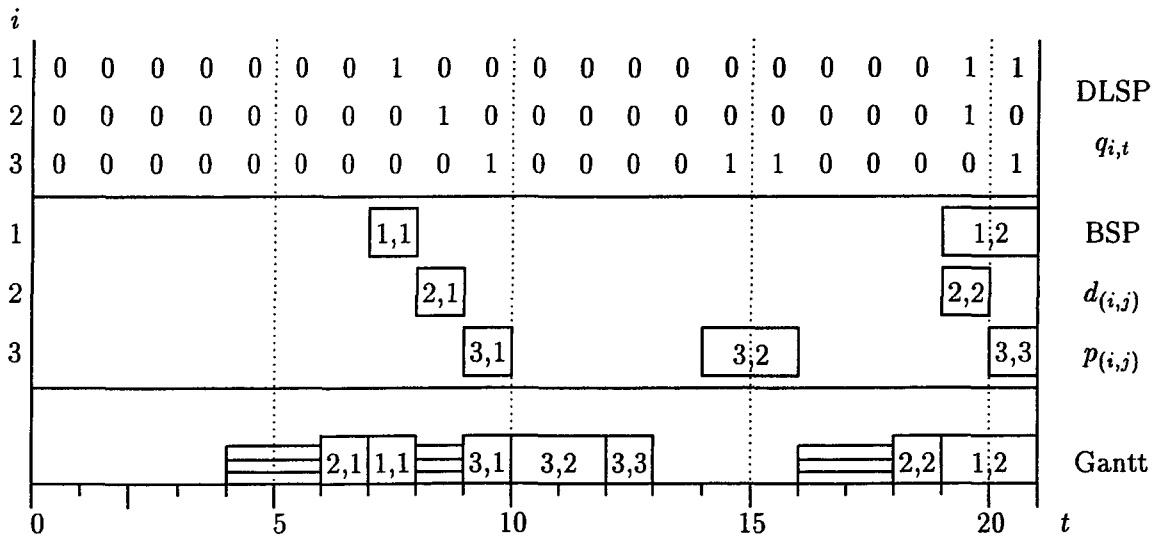


Tabelle 5: Lösung

k	1	2	3	4	5	6	7
$(i_{[k]}, j_{[k]})$	(2, 1)	(1, 1)	(3, 1)	(3, 2)	(3, 3)	(2, 2)	(1, 2)
$C_{(i_{[k]}, j_{[k]})}$	7	8	10	12	13	19	21

Um zu verdeutlichen, daß das vorgeschlagene Modell und das skizzierte Branch & Bound-Verfahren zu kompetitiven Ergebnissen führen, geben wir im folgenden einige ausgewählte Resultate einer numerischen Untersuchung wieder.³⁵

- Das DLSP mit reihenfolgeunabhängigen Rüstkosten und -zeiten

In *Cattrysse et al.*³⁶ werden Verfahren der mathematischen Programmierung (Spalten-generierungsverfahren sowie duale Anstiegsverfahren) zur Lösung des DLSP mit reihenfolgeunabhängigen Rüstkosten und -zeiten vorgeschlagen. Während die Verfahren der mathematischen Programmierung 'nur' untere und obere Schranken für den optimalen Zielfunktionswert liefern, löst das Branch & Bound-Verfahren die Datensätze optimal. Trotzdem erfordert letzteres in den meisten Fällen auch noch wesentlich weniger CPU-Zeit.

- Das DLSP mit reihenfolgeabhängigen Rüstkosten

*Fleischmann*³⁷ präsentiert ein Branch & Bound-Verfahren mit Lagrange-Relaxation zur Bestimmung unterer und oberer Schranken für den optimalen Zielfunktionswert des DLSP mit reihenfolgeabhängigen Rüstkosten (Rüstzeiten können dabei nicht erfaßt werden). Für diese Datensatzklassen ist das Lösungsverhalten des BSP-Verfahrens demjenigen des Verfahrens von *Fleischmann* dann überlegen, wenn die Kapazitätsauslastung relativ hoch ist.

- Das DLSP mit reihenfolgeabhängigen Rüstkosten und -zeiten

*Salomon et al.*³⁸ lösen Probleme vom Typ DLSP mit reihenfolgeabhängigen Rüstkosten und -zeiten mit Hilfe eines Verfahrens der dynamischen Optimierung. Für diese Datensatzklassen gelingt es dem hier vorgestellten Branch & Bound-Verfahren für das BSP in mehreren Fällen auch dann, wenn das Verfahren der dynamischen Optimierung keine Lösung mehr berechnen konnte, eine optimale Lösung zu bestimmen.

Zusammenfassend können wir also feststellen, daß das BSP nicht nur eine sehr kompakte Darstellung des betrachteten Gruppierungs- und Reihenfolgeproblems liefert, sondern darüber hinaus auch zu effizienten Lösungsverfahren führt.

5 Verallgemeinerte Problemstellungen

Das in der vorliegenden Arbeit vorgestellte Gruppierungs- und Reihenfolgemodell deckt bereits eine ganze Reihe von für praktische Anwendungen wichtigen Aspekten ab. Berücksichtigung reihenfolgeabhängiger Rüstkosten und -zeiten sowie Belegung einer Anlage mit (knapper) Kapazität seien hier explizit erwähnt. Darüber hinaus ist es möglich, das Modell zu modifizieren bzw. zu verallgemeinern; als Beispiele seien genannt:³⁹

³⁵Details der untersuchten Datensätze, der zugrundeliegenden Parameterklassen des BSP sowie der C-Implementierung des Branch & Bound-Verfahrens sind in *Jordan (1996)* sowie *Jordan/Drexel (1997)* zu finden.

³⁶*Cattrysse et al. (1993)*

³⁷*Fleischmann (1994)*

³⁸*Salomon et al. (1997)*

³⁹Details zu den hier nur skizzierten Verallgemeinerungen findet der interessierte Leser in *Jordan (1996)*.

1. Geschlossene Produktweitergabe

Das in Abschnitt 3 formulierte Modell deckt den Fall offener Produktweitergabe ab. Demgegenüber ist es in der Praxis häufig erforderlich, von geschlossener Produktweitergabe auszugehen. Während offene Produktweitergabe in der englischsprachigen Fachliteratur als 'Item Availability' bezeichnet wird, spricht man bei geschlossener Produktweitergabe von 'Batch Availability'.

2. Mehrstufige Fertigung

Bei praktischen Anwendungen liegt häufig mehrstufige Fertigung mit einer allgemeinen Erzeugnis- und Produktstruktur vor (gegeben durch einen Gozintographen). In diesem Fall könnte man versuchen, das einstufige BSP 'Stufe für Stufe' einzusetzen. Besser ist es jedoch, eine mehrstufige Verallgemeinerung des BSP und zugehörige Methoden zu verwenden.

3. Mehrere Maschinen

Vor allem bei einstufigen Gruppierungs- und Reihenfolgeproblemen ist der Fall paralleler Maschinen relevant. Über das 'Batching' und das 'Scheduling' hinaus muß dann auch noch eine Allokationsentscheidung gefällt werden. Im mehrstufigen Fall ist vor allem das BSP mit sogenannten multiplen Maschinen, für die a priori bekannt ist, welche Erzeugnisse auf ihnen bearbeitet werden müssen, von großer praktischer Bedeutung.

Zusammenfassung: Gruppierungs- und Reihenfolgeprobleme der Fertigung zählen zu den zentralen Fragestellungen der (operativen) Produktionsplanung. Gruppierung bezeichnet dabei die zu treffenden Entscheidungen über Größe und zeitliche Lage von Fertigungsaufträgen (Losen), während der Reihenfolgeaspekt die Belegung der Anlagen zum Gegenstand hat. Im vorliegenden Beitrag wird ein neues (konzeptionelles) Modell vorgestellt, mit dessen Hilfe Gruppierungs- und Reihenfolgeentscheidungen bei reihenfolgeabhängigen Rüstvorgängen simultan getroffen werden können. Die Relevanz des neuen Ansatzes wird durch ausgewählte kompetitive numerische Ergebnisse untermauert. Schließlich wird diskutiert, wie sich das vorgeschlagene Gruppierungs- und Reihenfolgemodell verallgemeinern läßt.

Summary: Batching and scheduling is one of the central topics in (operational) production planning. Grouping or batching of jobs covers the subject of combining smaller pieces of work into larger units (lot sizes) while scheduling addresses the time-phasing of activities. In this paper we present a new (conceptual) model which addresses both the grouping and the scheduling decision in the presence of sequence-dependent setups. The suitability of the model is illustrated by the use of competitive numerical results. Finally, generalizations of the model are also presented.

Literatur

- [1] ADAM, D. *Produktionsplanung bei Sortenfertigung — Ein Beitrag zur Theorie der Mehrproduktunternehmung*. Gabler, Wiesbaden, 1969.

- [2] ADAM, D. *Produktionsmanagement*. Gabler, Wiesbaden, 7. Aufl., 1993.
- [3] AGGARWAL, A., PARK, J.K. Improved algorithms for economic lot-size problems. *Operations Research*, 41:549–571, 1993.
- [4] BŁAŻEWICZ, J., DOMSCHKE, W., PESCH, E. The job shop scheduling problem: conventional and new solution techniques. *European Journal of Operational Research*, 93:1–33, 1996a.
- [5] BŁAŻEWICZ, J., ECKER, K., PESCH, E., SCHMIDT, G., WĘGLARZ, J. *Scheduling Computer and Manufacturing Processes*. Springer, Berlin, 1996b.
- [6] BLIESENER, M.-M. "Bestandssenkungspotential durch Einsatz moderner Verfahren der dynamischen Materialdisposition im Fertigungsbereich, dargestellt an einem praktischen Beispiel aus der Automobilindustrie". *Betriebswirtschaftliche Forschung und Praxis*, 44:456–472, 1992.
- [7] BRUCKER, P. *Scheduling algorithms*. Springer, Berlin, 1995.
- [8] BRÜGGEMANN, W. *Ausgewählte Probleme der Produktionsplanung — Modellierung, Komplexität und neuere Lösungsmöglichkeiten*. Physica, Heidelberg, 1995.
- [9] CATTRYSSSE, D., SALOMON, M., KUIK, R., VAN WASSENHOVE, L.N. "A dual ascent and column generation heuristic for the discrete lotsizing and scheduling problem with setup-times". *Management Science*, 39:477–486, 1993.
- [10] DANGELMEIER, W., KELLER, A., MUSSBACH-WINTER, U., WIEDEMANN, H. "Kapazitätsorientierte Auftragsbildungsverfahren". *Zeitschrift für wirtschaftliche Fertigung und Automatisierung*, 84:676–680, 1989.
- [11] DELLMANN, K. *Entscheidungsmodelle für die Serienfertigung*. Westdeutscher Verlag, Opladen, 1975.
- [12] DINKELBACH, W. *Zum Problem der Produktionsplanung in Ein- und Mehrproduktunternehmen*. Physica, Würzburg, 1964.
- [13] DOMSCHKE, W., SCHOLL, A., VOSS, S. *Produktionsplanung — Ablauforganisatorische Aspekte*. Springer, Berlin, 1993.
- [14] DREXL, A., FLEISCHMANN, B., GÜNTHER, H.O., STADTLER, H., TEMPELMEIER, H. "Konzeptionelle Grundlagen kapazitätsorientierter PPS-Systeme". *Zeitschrift für betriebswirtschaftliche Forschung*, 46:1022–1045, 1994.
- [15] DREXL, A., HAASE, K. "Proportional lotsizing and scheduling". *International Journal of Production Economics*, 40:73–87, 1995.
- [16] DREXL, A., HAASE, K. "Sequential-analysis based randomized-regret-methods for lot-sizing and scheduling". *Journal of the Operational Research Society*, 47:251–265, 1996.
- [17] DREXL, A., HAASE, K., KIMMS, A. "Losgrößen- und Ablaufplanung in PPS-Systemen auf der Basis randomisierter Opportunitätskosten". *Zeitschrift für Betriebswirtschaft*, 65:267–285, 1995.
- [18] DREXL, A., KIMMS, A. "Lotsizing and scheduling — survey and extensions". *European Journal of Operational Research*, 99:221–235, 1997.
- [19] ELMAGHRABY, S.E. "The economic lot scheduling problem (ELSP): review and extensions". *Management Science*, 24:587–598, 1978.
- [20] EPPEN, G.D., MARTIN, R.K. "Solving multi-item capacitated lot-sizing problems using variable redefinition". *Operations Research*, 35:832–848, 1987.
- [21] ERLINKOTTER, D. "Ford Whitman Harris and the Economic Order Quantity model". *Operations Research*, 38:937–946, 1990.

- [22] FEDERGRUEN, A., TZUR, M. "A simple forward algorithm to solve general dynamic lot sizing models with n periods in $O(n \log n)$ or $O(n)$ time". *Management Science*, 37:909–925, 1991.
- [23] FLEISCHMANN, B. "The discrete lot-sizing and scheduling problem". *European Journal of Operational Research*, 44:337–348, 1990.
- [24] FLEISCHMANN, B. "The discrete lot-sizing and scheduling problem with sequence-dependent setup costs". *European Journal of Operational Research*, 75:395–404, 1994.
- [25] FLEISCHMANN, B., MEYR, H. "The general lotsizing and scheduling problem". *OR Spektrum*, 19:11–21, 1997.
- [26] HAASE, K. *Lotsizing and scheduling for production planning*. Lecture Notes in Economics and Mathematical Systems No. 408. Springer, Berlin, 1994.
- [27] HAASE, K., KIMMS, A. "Lot sizing and scheduling with sequence dependent setup costs and times and efficient rescheduling opportunities". Technical Report 393, Manuskripte aus den Instituten für Betriebswirtschaftslehre der Universität Kiel, 1996.
- [28] HELBER, S. *Kapazitätsorientierte Losgrößenplanung in PPS-Systemen*. M & P-Verlag, Stuttgart, 1994.
- [29] HOITSCH, H.-J. *Produktionswirtschaft*. Verlag Vahlen, München, 2. Aufl. 1993.
- [30] JORDAN, C. *Batching and scheduling — models and methods for several problem classes*. Lecture Notes in Economics and Mathematical Systems No. 437. Springer, Berlin, 1996.
- [31] JORDAN, C., DREXL, A. "A comparison of constraint and mixed-integer programming solvers for batch sequencing with sequence-dependent setups". *ORSA Journal on Computing*, 7:160–165, 1995.
- [32] JORDAN, C., DREXL, A. "Discrete lotsizing and scheduling by batch sequencing". erscheint in *Management Science*, 1997.
- [33] KARMARKAR, U.S., SCHRAGE, L. "The deterministic dynamic product cycling problem". *Operations Research*, 33:326–345, 1985.
- [34] KIENER, S., MEIER-SCHUEBECK, N., WEISS, M. *Produktions-Management*. Oldenbourg, München-Wien, 4. Aufl. 1993.
- [35] KIMMS, A. "Competitive methods for multi-level lot sizing and scheduling: tabu search and randomized regrets". *International Journal of Production Research*, 34:2279–2298, 1996a.
- [36] KIMMS, A. "Multi-level, single-machine lot sizing and scheduling (with initial inventory)". *European Journal of Operational Research*, 89:86–99, 1996b.
- [37] KIMMS, A. *Multi-level lot sizing and scheduling — methods for capacitated, dynamic, and deterministic models*. Physica, Heidelberg, 1997a.
- [38] KIMMS, A. "Demand shuffle — A novel method for multi-level proportional lot sizing and scheduling". *Naval Research Logistics*, 44:319–340, 1997b.
- [39] KIMMS, A. "Modelle der Losgrößenplanung und das MRP II Konzept". *Wirtschaftswissenschaftliches Studium*, 26:227–231, 1997c.
- [40] KISTNER, K.-P., STEVEN, S. *Produktionsplanung*. Physica, Heidelberg, 2. Aufl. 1993.
- [41] KUIK, R., SALOMON, M., VAN Wassenhove, L.N. "Batching decisions: structure and models". *European Journal of Operational Research*, 75:243–263, 1994.
- [42] KÜPPER, H.-U., HELBER, S. *Ablauforganisation in Produktion und Logistik*. Schäffer-Poeschel, Stuttgart, 2. Aufl. 1995.

- [43] KURBEL, K. *Simultane Produktionsplanung bei mehrstufiger Serienfertigung*. Erich Schmidt Verlag, Berlin, 1978.
- [44] NEUMANN, K. *Produktions- und Operations-Management*. Springer, Berlin, 1996.
- [45] POPP, T. *Kapazitätsorientierte dynamische Losgrößen- und Ablaufplanung bei Sortenproduktion*. Verlag Dr. Kovač, Hamburg, 1993.
- [46] POTTS, C.N., VAN WASSENHOVE, L.N. "Integrating scheduling with batching and lot-sizing: a review of algorithms and complexity". *Journal of the Operational Research Society*, 43:395–406, 1992.
- [47] PRESSMAR, D. Evolutorische und stationäre Modelle mit variablen Zeitintervallen zur simultanen Produktions- und Ablaufplanung. In: GESSNER, P. et al. (Hrsg.), *Proceedings in Operations Research*, S. 462–475. Physica, Würzburg, 1974.
- [48] REHWINKEL, G. *Erfolgsorientierte Reihenfolgeplanung — Grundfragen*. Gabler, Wiesbaden, 1978.
- [49] RIEPER, B., MAJERUS, M. "Das Losgrößenproblem unter dem Einfluß von Investitionen in moderne Produktionstechnologien". *Zeitschrift für Betriebswirtschaft*, 61:195–207, 1991.
- [50] SALOMON, M. *Deterministic lotsizing models for production planning*. Lecture Notes in Economics and Mathematical Systems No. 355. Springer, Berlin, 1991.
- [51] SALOMON, M., KROON, L.G., KUIK, R., VAN WASSENHOVE, L.N. "Some extensions of the discrete lotsizing and scheduling problem". *Management Science*, 37:801–812, 1991.
- [52] SALOMON, M., SOLOMON, M.M., VAN WASSENHOVE, L.N., DUMAS, Y.D., DAUZÈRE-PÉRES, S. "Discrete lot sizing and scheduling with sequence dependent setup times and costs". erscheint in *European Journal of Operational Research*, 1997.
- [53] SCHNEEWEISS, C. *Einführung in die Produktionswirtschaft*. Springer, Berlin, 4. Aufl. 1992.
- [54] STADTLER, H. *Hierarchische Produktionsplanung bei losweiser Fertigung*. Physica, Heidelberg, 1988.
- [55] STADTLER, H. "Mixed integer programming model formulations for dynamic multi-item multi-level capacitated lotsizing". *European Journal of Operational Research*, 94:561–581, 1996.
- [56] STEVEN, S. *Hierarchische Produktionsplanung*. Physica, Heidelberg, 2. Aufl. 1994.
- [57] STREBEL, H., SCHULZE, K.-P. "Das Losgrößenproblem im Rahmen der integrierten Fertigungsplanung". *Wirtschaftswissenschaftliches Studium*, 13:20–26, 1984.
- [58] TEMPELMEIER, H. *Material-Logistik — Grundlagen der Bedarfs- und Losgrößenplanung*. Springer, Berlin, 3. Aufl. 1995.
- [59] TEMPELMEIER, H., DERSTROFF, M. "A Lagrangean-based heuristic for dynamic multi-level multi-Item constrained lotsizing with setup times". *Management Science*, 42:738–757, 1996.
- [60] TEMPELMEIER, H., HELBER, S. "A heuristic for dynamic multi-item multi-level capacitated lotsizing for general product structures". *European Journal of Operational Research*, 75:296–311, 1994.
- [61] WAGELMANS, A., VAN HOESSEL, S., KOLEN, A. "Economic lot sizing: an $O(n \log n)$ algorithm that runs in linear time in the Wagner-Whitin case". *Operations Research*, 40:S145–S156, 1992.
- [62] ZÄPFEL, G. *Produktionswirtschaft — Operatives Produktionsmanagement*. de Gruyter-Verlag, Berlin, 1982.