

Diskussionsbeitrag Nr. 2011

BWL/Produktion
Prämierte Diplomarbeiten

**Datenbankgestützte mehrstufige
kapazitätsorientierte Losgrößenplanung**
Christian Ortmann und Ingo Siebeking

Fachbereich Wirtschaftswissenschaften
Universität Osnabrück
Katharinenstraße 3
49069 Osnabrück

Juni 2000

Vorwort

Am Fachgebiet BWL/Produktion der Universität Osnabrück sind in den letzten Jahren viele Diplomarbeiten mit Förderpreisen ausgezeichnet worden. Da es sich bei den Arbeiten um Prüfungsunterlagen handelt, stehen sie leider einem interessierten Publikum nicht zur Verfügung. Daher werden prämierte Arbeiten in verkürzter Form in einer kleinen Reihe veröffentlicht. Christian Ortmann und Ingo Siebeking haben gemeinsam den Förderpreis der Wilhelm Karmann GmbH des akademischen Jahres 1999/2000 erhalten.

Die Autoren haben sich mit dem Thema "Modellierung einer mehrstufigen kapazitätsorientierten Losgrößenplanung" im Rahmen ihrer Diplomarbeiten an eine sehr komplexe Thematik gewagt. Die Literatur zu dem Thema ist ausgezeichnet aufgearbeitet worden. Das Literaturverzeichnis stellt beinahe ein Kompletverzeichnis für die Produktionsplanung dar. In der Losgrößenplanung werden zur Zeit in der Praxis einfach zu handhabende Heuristiken eingesetzt. Die Autoren arbeiten die Schwächen dieser Ansätze sehr anschaulich heraus. Als Ausweg schlagen sie ein Verfahren von HELBER vor. Der HELBER-Ansatz ist im Rahmen einer Dissertation veröffentlicht und mit einer Programmiersprache der 3. Generation umgesetzt worden. Die Autoren haben diesen sehr komplexen Ansatz aufgearbeitet und in das Ausbildungskonzept des Fachgebietes BWL/Produktion integriert. Die Lösung liegt in Form eines Datenbankansatzes vor und kann nun leichter an vorhandene PPS-Systeme angebunden werden. Mehrere Beispielrechnungen zeigen die Überlegenheit des Verfahrens gegenüber herkömmlichen Ansätzen. Das Ergebnis der Arbeiten überzeugt, zumal die Literatur zu dem HELBER-Verfahren sehr spärlich ist.

Der Umfang der Diplomarbeiten erfordert eine Aufteilung. In diesem Beitrag werden die Implementierung des datenbankgestützten mehrstufigen kapazitätsorientierten Ansatzes erörtert. Herkömmliche Verfahren zur Losgrößenplanung werden in einem weiteren Beitrag diskutiert.

Osnabrück, Juni 2000

Prof. Dr. Th. Witte

Inhaltsverzeichnis

Abbildungsverzeichnis	II
Abkürzungsverzeichnis.....	IV
Symbolverzeichnis	VI
1. Einleitung	1
2. Konzeptionelle Grundlagen einer kapazitätsorientierten	
Losgrößenplanung	3
3. Datenmodellierung einer mehrstufigen kapazitätsorientierten	
Losgrößenplanung	9
3.1. Grundlegende Vorgehensweise	9
3.2. Das Entity-Relationship-Modell.....	10
3.2.1. Kalenderdaten	10
3.2.2. Artikeldaten und Erzeugnisstrukturdaten.....	10
3.2.3. Arbeitsgang- und Kapazitätsdaten.....	12
3.2.4. Terminierte Bedarfe	13
3.3. Überführung des Entity-Relationship-Modells in ein relationales	
Datenmodell	13
4. Das heuristische Lösungsverfahren von <i>Helber</i>.....	15
4.1. Ermittlung ressourcenorientierter Dispositionsstufen.....	18
4.2. Ermittlung modifizierter Kostensätze	21
4.3. Stufenübergreifende Zulässigkeitsprüfung und Kapazitätsglättung	
durch Rückwärtseinlastung	29
4.4. Sukzessive Verbesserung der Ausgangslösung.....	37
5. Datenbankgestützte Implementation der Heuristik von <i>Helber</i>	43
6. Kritische Würdigung	46
Literaturverzeichnis	48

Abbildungsverzeichnis

Abb. 1:	Generelle, nichtzyklische Erzeugnis- und Prozeßstruktur	3
Abb. 2:	Beispiel zur Berücksichtigung und Vernachlässigung von Reihenfolge- entscheidungen innerhalb einzelner Perioden	6
Abb. 3:	Grundschema der Datenmodellierung	10
Abb. 4:	Das vollständige ER-Diagramm	11
Abb. 5:	Überführung des ER-Modells in ein RDM	14
Abb. 6:	Grundstruktur der Heuristik von <i>Helber</i>	16
Abb. 7:	Beispiel für die stufenweise Lösung einer Folge von CLSPs	17
Abb. 8:	Folge von Losgrößenproblemen bei materialflußorientierten Dispositionsstufen	18
Abb. 9:	Verfahren zur Erzeugung eines zyklenfreien Graphen von Ressourcenpartitionen	19
Abb. 10:	Beispiel für die Konstruktion eines zyklenfreien Graphen von Ressourcenpartitionen	20
Abb. 11:	Folge von Losgrößenproblemen bei ressourcenorientierten Dispositionsstufen	20
Abb. 12:	Ausgangsdaten des Beispiels	22
Abb. 13:	Grundstruktur der Heuristik von <i>Heinrich</i>	22
Abb. 14:	Durchschnittsbedarfe und marginale Lagerkostensätze für das Beispiel...23	
Abb. 15:	Verfahrensschritte zur Ermittlung einer Lösung mit Kopplung der Losauflagen	24
Abb. 16:	Lösung mit Kopplung der Losauflagen für das Beispiel.....	25
Abb. 17:	Verfahrensschritte zur Verbesserung der Lösung ohne Kopplung der Losauflagen	26
Abb. 18:	Verbesserung der Lösung ohne Kopplung der Losauflagen für das Beispiel.....	27
Abb. 19:	Modifizierte Kostensätze für das Beispiel.....	29
Abb. 20:	Grundstruktur der stufenübergreifenden Zulässigkeitsprüfung.....	30
Abb. 21:	Ausschnitt aus einer Erzeugnis- und Prozeßstruktur	31
Abb. 22:	Abgeschlossene Losgrößenplanung für Ressource A auf Dispositions- stufe 0	32
Abb. 23:	Nettobedarfsmengen für Artikel 2	32
Abb. 24:	Aktuelle Losgrößenplanung für Ressource B auf Dispositionsstufe 0.....	32

Abb. 25: Abgeleitete Nettobedarfsmengen für Artikel 3.....	32
Abb. 26: Vorläufiger zulässiger Losgrößenplan für Artikel 3.....	33
Abb. 27: Kapazitätsglättung durch Rückwärtseinlastung.....	34
Abb. 28: Beispiel für eine Kapazitätsglättung durch Rückwärtseinlastung.....	36
Abb. 29: Grobstruktur der sukzessiven Verbesserung der Ausgangslösung.....	38
Abb. 30: Verfahren zur Lösung einstufiger CLSPs mit Rüstzeiten und vorgelagerten Ressourcen.....	42
Abb. 31: Menü des Programms	43
Abb. 32: Eingabeformular 1	44
Abb. 33: Eingabeformular 2	44
Abb. 34: Ausgabeformular 1	45
Abb. 35: Ausgabeformular 2	45

Abkürzungsverzeichnis

Abb.	Abbildung
Aufl.	Auflage
bearb.	bearbeitet
Bd.	Band
bzw.	beziehungsweise
CLSP	Capacitated-Lotsizing-Problem
d.h.	das heißt
EDV	elektronische Datenverarbeitung
ERM	Entity-Relationship-Modell
erw.	erweitert
etc.	et cetera
f.	folgende
ff.	ferner folgende
ggf.	gegebenenfalls
H.	Heft
Hrsg.	Herausgeber
i.a.	im allgemeinen
i.d.R.	in der Regel
Jg.	Jahrgang
LP	lineare Programmierung
ME	Mengeneinheiten
Nr.	Nummer
o_art_part	Partitionsnummer des Oberartikels
o_art_res	Ressource des Oberartikels
OR	Operations Research
PE	Periodeneinheiten
PPS	Produktionsplanung und –steuerung
Q-z	vorläufiger zulässiger Losgrößenplan
RDM	relationales Datenmodell
RP-Graph	Graph von Ressourcenpartitionen
S.	Seite
Sp.	Spalte
u.a.	unter anderem

u_art_part	Partitionsnummer des Unterartikels
u_art_res	Ressource des Unterartikels
usw.	und so weiter
überarb.	überarbeitet
u.U.	unter Umständen
veränd.	verändert
vgl.	vergleiche
vollst.	vollständig
z.B.	zum Beispiel
ZE	Zeiteinheiten

Symbolverzeichnis

A	Ressource A
a_{iz}	Direktbedarfskoeffizient: Mengeneinheiten des untergeordneten Artikels i, die zur Herstellung einer Mengeneinheit des direkt übergeordneten Artikels z benötigt werden
a_{zi}	Direktbedarfskoeffizient: Mengeneinheiten des untergeordneten Artikels z, die zur Herstellung einer Mengeneinheit des direkt übergeordneten Artikels i benötigt werden
B	Ressource B
b	Basisfaktor (Basisperiode)
b_t	binäre Variable, die den Wert 1 annimmt, wenn in Periode t ein positiver Nettobedarf vorliegt, d.h. $d_t > 0$ ist
b_{it}	binäre Variable, die den Wert 1 annimmt, wenn für den Artikel i in Periode t ein positiver Nettobedarf vorliegt, d.h. $d_{it} > 0$ ist
C	durchschnittliche Gesamtkosten pro Periode
C_{alt}	alte (vorherige) durchschnittliche Gesamtkosten pro Periode
C_{neu}	neue durchschnittliche Gesamtkosten pro Periode
c_{igj}^{Per}	Gesamtkosten pro Bedarfsperiode für ein für Artikel i in Periode γ aufgelegtes Los, das die Nettobedarfe bis einschließlich der Periode j deckt
c_{Li}	Lagerkostensatz von Artikel i
c_{Li}^{mod}	modifizierter Lagerkostensatz von Artikel i
c_{Ri}	Rüstkostensatz von Artikel i
c_{Ri}^{mod}	modifizierter Rüstkostensatz von Artikel i
d_{igj}	marginale Kostenveränderung pro zusätzlich eingesetzter Kapazitätseinheit (Prioritätsziffer der <i>Dixon-Silver</i> Heuristik)
D_i	durchschnittlicher Nettobedarf von Artikel i
DK	Kapazitätsfehlbedarf, der für den vorläufigen zulässigen Losgrößenplan Q-z aus der Periode t+1 in die Periode t verschoben werden muß

DK_{iopt}	Kapazitätsfehlbedarf, der für den vorläufigen zulässigen Losgrößenplan Q-z aus der Periode t+1 in die Periode t verschoben werden muß, wenn die Reichweite des Loses für den Artikel iopt vergrößert würde
d_{it}	Nettobedarf von Artikel i in Periode t
$\Delta c_i(T_i^{probe})$	Kostenveränderung, die mit einer Veränderung des Produktionszyklus von Artikel i einhergeht
ΔC_t	absoluter Kostenanstieg in Periode t
$\Delta Kap_{igj}^{Bedarf}$	zusätzlicher Kapazitätsbedarf, wenn das Los des Artikels i in Periode γ um die Nettobedarfsmenge der Periode j vergrößert wird
e_i	marginaler Lagerkostensatz von Artikel i
g	Periodenindex (Produktions- bzw. Losauflageperiode)
I_{lr}	Menge aller Artikel, die auf der Dispositionsstufe l die Ressource r beanspruchen
i	Artikelindex ($i = 1, 2, \dots, I$)
iopt	Artikel, für den die Vergrößerung des Loses um den nächsten vollständigen Nettobedarf zu der größten marginalen Kostensenkung $\delta_{i \gamma j}$ führt
j	Periodenindex
$Kap_{At}^{Angebot}$	Kapazitätsangebot der Ressource A in Periode t
$Kap_{Bt}^{Angebot}$	Kapazitätsangebot der Ressource B in Periode t
Kap_{rt}	noch verfügbare Kapazität von Ressource r in Periode t
l	Dispositionsstufenindex ($l = 0, 1, \dots, L$)
m_{zi}	Verhältnis der Produktionszyklen der Artikel z und i
h_{zi}	Anteil des übergeordneten Artikel i an der gesamten Nettobedarfsmenge des direkt untergeordneten Artikels z
o_i	Menge der direkten Oberartikel von Artikel i
O_i	Menge der direkten und indirekten Oberartikel von Artikel i
q_{it}	Losgröße von Artikel i in Periode t
$q_{iopt,t}$	Losgröße für den Artikel iopt in Periode t
R_l	Menge aller Ressourcen, die auf der Dispositionsstufe l beansprucht werden
r	Ressourcenindex

s_i	Vorlaufzeit von Artikel i
T	Planungshorizont (Anzahl der Perioden $t = 1, 2, \dots, T$ im Planungszeitraum)
T_i	Produktionszyklus für Artikel i
T_z	Produktionszyklus für Artikel z
T_i^{probe}	probeweiser Produktionszyklus für Artikel i
T_z^{probe}	probeweiser Produktionszyklus für Artikel z
$Tb_{i t}$	Gesamtbearbeitungszeit für Artikel i in Periode t
t	Periodenindex ($t = 1, 2, \dots, T$)
tb_i	Stückbearbeitungszeit für Artikel i
tr_i	Rüstzeit für Artikel i
u_i	Menge der direkten Unterartikel von Artikel i
U_i	Menge der direkten und indirekten Unterartikel von Artikel i
$y_{i t}$	Lagerbestand von Artikel i am Ende von Periode t
z	Artikelindex

1. Einleitung

Die Aufgabe der operativen Produktionsplanung und –steuerung (PPS) besteht darin, aufgrund erwarteter und/oder vorliegender Kundenaufträge den mengenmäßigen und zeitlichen Produktionsablauf unter Berücksichtigung unternehmensrelevanter Restriktionen¹ durch Planvorgaben festzulegen, diese zu veranlassen sowie zu überwachen und bei Abweichungen Maßnahmen zu ergreifen, so daß bestimmte betriebliche Ziele² erreicht werden.³

In der betrieblichen Praxis werden die Aufgaben der PPS i.d.R. EDV-gestützt, d.h. unter Einsatz von computergestützten Produktionsplanungs- und –steuerungssystemen (PPS-Systemen) bearbeitet. Eines der Hauptprobleme der derzeit in der Praxis eingesetzten „konventionellen“ PPS-Systeme besteht darin, daß es bislang nicht gelungen ist, ein praktikables Verfahren zur Lösung des mehrstufigen dynamischen Mehrprodukt-Losgrößenproblems bei mehrfachen beschränkten Kapazitäten und genereller Erzeugnis- und Prozeßstruktur zu entwickeln und dieses in ein sinnvolles Konzept der Produktionsplanung und –steuerung zu integrieren.

So werden für die Losgrößenbildung i.a. Verfahren eingesetzt, die weder die Kapazitätsrestriktionen des Produktionssystems noch die Mehrstufigkeit der Erzeugnisstruktur berücksichtigen.⁴ Als Konsequenz dieser Vorgehensweise ergibt sich, daß die Mengenplanung zeitlich getrennt von der Termin- und Kapazitätsplanung durchgeführt wird. Hieraus ergeben sich regelmäßig undurchführbare Produktionspläne, die sich in unvorhersehbaren Durchlaufzeiten und einem niedrigen Lieferservice niederschlagen.

Mit den heute verfügbaren heuristischen Verfahren zur kapazitätsorientierten Losgrößenplanung haben sich jedoch völlig neue Perspektiven ergeben. Sie eröffnen die Möglichkeit, realisierbare und näherungsweise optimale Losgrößenpläne für realistische Fälle der mehrstufigen Fertigung unter Berücksichtigung von mehrfachen Kapazitätsrestriktionen zu ermitteln. Im Rahmen dieser Arbeit soll demnach aufgezeigt werden, wie sich ein derartiges heuristisches Lösungsverfahren datenbankgestützt implementieren läßt.

¹ Derartige Restriktionen können z.B. aus nur beschränkt verfügbaren produktiven Ressourcen resultieren.

² Zu Zielsetzungen der PPS siehe Zäpfel (1994), S. 72 sowie Kahle (1996), Sp. 2318 ff.

³ Vgl. Zäpfel (1996), S. 56. Zu den Aufgaben des strategischen und taktischen Produktionsmanagement siehe Corsten (1994), S. 7-13.

⁴ Vgl. Ortmann/Siebeking (2000), S. 12 ff.

Hierzu ist es in Kapitel 2 zunächst einmal erforderlich, das diesem Verfahren zugrunde liegende Entscheidungsfeld einer kapazitätsorientierten Losgrößenplanung zu skizzieren, um die Prämissen des Planungsverfahrens deutlich zu machen.

Danach wird in Kapitel 3 aufgezeigt, wie sich das zuvor beschriebene Planungsproblem datenbankgestützt modellieren läßt. Hierzu wird zunächst ein Entity-Relationship-Modell entwickelt und anschließend in ein relationales Datenmodell überführt.

Im 4. Kapitel wird eine von *Helber* vorgeschlagene Heuristik ausführlich beschrieben, die sich sowohl hinsichtlich der Lösungsgüte als auch der Rechenzeit als sehr vielversprechend erwiesen hat.⁵

Im Anschluß daran wird im 5. Kapitel aufgezeigt, wie sich das zuvor beschriebene Lösungsverfahren von *Helber* zur kapazitätsorientierten Losgrößenplanung unter ORACLE 8 datenbankgestützt implementieren läßt.

Den Abschluß dieser Arbeit bildet eine kritische Würdigung des Untersuchungsgegenstandes (Kapitel 6).

⁵ Vgl. dazu Tempelmeier/Derstroff (1993), S. 63 ff., Helber (1994), S. 54 ff., Tempelmeier/Helber (1994), S. 296 ff., Helber (1995), S. 5 ff. sowie Derstroff (1995), S. 64 ff.

2. Konzeptionelle Grundlagen einer kapazitätsorientierten Losgrößenplanung

Zunächst stellt sich die Frage nach dem geeigneten Planungsobjekt einer kapazitätsorientierten Losgrößenplanung. Da die Kapazitätsrestriktionen einzelner Ressourcen bzw. Ressourcengruppen berücksichtigt werden müssen, ist das in den „konventionellen“ PPS-Systemen verwendete Planungsobjekt „Artikel“ zu hoch aggregiert, weil sich ein Artikel bzw. ein artikelbezogener Arbeitsplan regelmäßig aus mehreren Arbeitsgängen zusammensetzt, die normalerweise unterschiedliche Ressourcen in Anspruch nehmen. Eine kapazitätsorientierte Losgrößenplanung kann daher nur für die nach den einzelnen Arbeitsgängen vorliegenden (Zwischen-) Produkte vorgenommen werden, weil sich nur Arbeitsgänge einzelnen Ressourcen bzw. Ressourcengruppen zuordnen lassen.⁶

Dabei wird von einer generellen, nichtzyklischen Erzeugnis- und Prozeßstruktur ausgegangen.⁷ Eine derartige Erzeugnis- und Prozeßstruktur ist in Abb. 1 wiedergegeben.

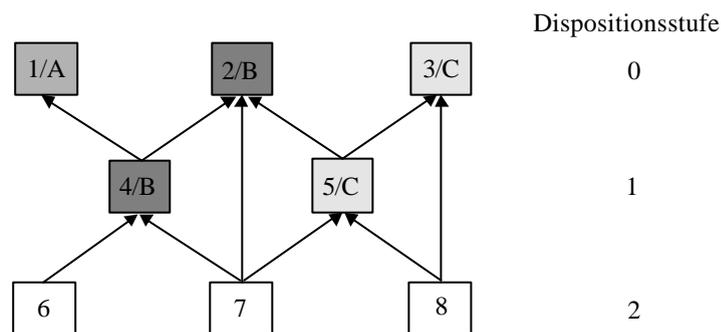


Abb. 1: Generelle, nicht-zyklische Erzeugnis- und Prozeßstruktur

Im Gegensatz zur herkömmlichen materialflußorientierten Darstellung mit Hilfe eines Gozintographen⁸ beschreibt hier jeder grau hinterlegte Knoten einen einzelnen Arbeitsgang, der an einer⁹ bestimmten Ressource durchzuführen ist. Ein Arbeitsgang bzw. der nach einem Arbeitsgang vorliegende Artikel wird jeweils durch eine Ziffer gekennzeichnet, während die Buchstaben jeweils die betreffende Ressource charakterisieren. Wie aus Abb. 1 deutlich hervorgeht, kann dabei durchaus die Situation auftreten, daß eine Ressource durch Arbeitsgänge (Artikel) beansprucht wird, denen in bezug auf die Erzeugnisstruktur unterschiedliche Dispositionsstufen zugeordnet sind

⁶ Vgl. Tempelmeier (1995), S. 200 ff., Helber (1994), S. 15 und S. 18, Derstroff (1995), S. 24 f. sowie Scheer (1995), S. 147 und S. 204 ff. Im folgenden werden Arbeitsgänge und Artikel als synonym betrachtet, d.h. nach jedem Arbeitsgang liegt ein neuer identifizierbarer und lagerfähiger Artikel vor.

⁷ Zu einer Klassifikation mehrstufiger Produktionsstrukturen siehe Küpper (1980), S. 108 ff., Tempelmeier (1995), S. 109 ff. sowie Heinrich (1987), S. 52 ff.

⁸ Siehe hierzu Rieper/Witte (1993), S. 57 f. sowie Tempelmeier (1995), S. 108 f.

(stufenübergreifende Ressourcenkonkurrenz).¹⁰ In dem Beispiel der Abb. 1 ist das für die Ressourcen B und C der Fall. Die weiß hinterlegten Knoten kennzeichnen hingegen Fremdartikel, die keine Ressource in Anspruch nehmen.

Von zentraler Bedeutung ist daneben die Frage nach der Abbildung der Zeit. Um der Variabilität der Nachfrage und der Verfügbarkeit von Ressourcen Rechnung tragen zu können, ist es erforderlich, von einer diskreten Zeitführung auszugehen, d.h. die kapazitätsorientierte Losgrößenplanung wird für einen endlichen Planungszeitraum vorgenommen, der in T diskrete Teilperioden t ($t = 1, 2, \dots, T$) gleicher Länge unterteilt ist.¹¹ Sämtliche Parameter des Planungsproblems (Rüstkostensätze, Lagerkostensätze, Primärbedarfsmengen, Kapazitäten der Ressourcen etc.) innerhalb des Planungszeitraums werden als deterministische Größen betrachtet.¹² Darüber hinaus wird davon ausgegangen, daß keine Anfangs- und Endlagerbestände vorhanden sind.¹³

Das Ziel einer kapazitätsorientierten Losbildung besteht in der Ermittlung von Fertigungsaufträgen $q_{i,t}$ derart, daß die Summe aus Rüst- und Lagerkosten über alle Artikel und Perioden minimiert wird, wobei die vorgegebenen Primärbedarfsmengen periodengerecht zu befriedigen sind und die verfügbare Produktionskapazität der Ressourcen nicht überschritten werden darf.¹⁴ Bei jedem Rüstvorgang fallen Rüstkosten in Höhe von $c_{R,i}$ Geldeinheiten an und es entsteht eine Rüstzeit von tr_i Zeiteinheiten. Für die Produktion einer Mengeneinheit von Artikel i fällt darüber hinaus eine Stückbearbeitungszeit von tb_i Zeiteinheiten je Mengeneinheit an. Lagerkosten in Höhe von $c_{L,i}$ Geldeinheiten je Mengeneinheit und Periode werden jeweils auf den Lagerbestand des Artikels i am Ende einer Teilperiode erhoben.¹⁵

Letztlich ist zu klären, ob simultan mit den Losgrößen auch über die Losreihenfolge entschieden werden soll. Modelle zur simultanen Losgrößen- und Reihenfolgeplanung sind im deutschsprachigen Raum z.B. von *Adam, Dinkelbach, Pressmar, Küpper* sowie

⁹ Es wird davon ausgegangen, daß jeder Arbeitsgang genau einer Ressource zugeordnet ist. Diese kann jedoch für jeden Arbeitsgang beliebig gewählt werden. Vgl. Tempelmeier/Derstroff (1993), S. 64 sowie Helber (1994), S. 33.

¹⁰ Vgl. Tempelmeier/Derstroff (1993), S. 64, Tempelmeier/Helber (1994), S. 298, Helber (1994), S. 21 ff. sowie Derstroff (1995), S. 25.

¹¹ Vgl. Helber (1994), S. 15 und S. 23 sowie Derstroff (1995), S. 25.

¹² Vgl. Hechtfisher (1991), S. 112, Derstroff (1995), S. 25 sowie Helber (1994), S. 23. Für einen Überblick über Möglichkeiten, die Unsicherheit in mehrstufigen Produktionsprozessen zu berücksichtigen, siehe Tempelmeier (1995), S. 341 ff.

¹³ Vgl. Helber (1994), S. 24 sowie Derstroff (1995), S. 25. Die Einbettung der kapazitätsorientierten Losgrößenplanung in ein rollendes Planungskonzept macht es u.U. erforderlich, positive Anfangs- und Endlagerbestände einzuführen. Vgl. dazu Tempelmeier (1995), S. 337 ff. sowie Tempelmeier (1997), S. 456 ff.

¹⁴ Vgl. Derstroff (1995), S. 25 sowie Helber (1994), S. 33.

¹⁵ Vgl. Küpper/Helber (1995), S. 161, Tempelmeier (1997), S. 453 sowie Helber (1995), S. 9.

von *Drexl* und *Haase* entwickelt worden.¹⁶ Sie bieten die Möglichkeit, die Reihenfolgeabhängigkeit von Rüstzeiten und –kosten explizit zu berücksichtigen.¹⁷

In derartigen Modellen wird der Rüstzustand der Ressourcen mit Hilfe eines sehr feinen Periodenrasters über die Periodengrenzen hinweg abgebildet.¹⁸ Ihre Anwendung setzt demnach eine rein deterministische Datenkonstellation voraus. Diese Annahme ist in der Realität jedoch oft “verletzt“, so daß sich der ermittelte Losgrößen- und Reihenfolgeplan bei der Umsetzung infolge unvorhergesehener Störungen (z.B. Maschinenausfälle, Krankheit des Bedienungspersonals, Eilaufträge usw.) als unzulässig erweisen kann.

Eine Maßnahme zur Bewältigung solcher Unsicherheiten ist die gezielte Schaffung von zeitlichen Puffern, indem für jede Ressource und jede Periode ein Teil der Kapazität für spätere Reaktionen auf Datenänderungen reserviert wird.¹⁹ Bei einer simultanen Losgrößen- und Reihenfolgeplanung besteht diese Möglichkeit der Reservierung von Periodenkapazität jedoch nicht, da die Rüstzustände über die Periodengrenzen hinweg abgebildet werden und die Perioden sehr klein sind. Aus diesem Grund muß bei einer simultanen Losgrößen- und Reihenfolgeplanung die Kapazität der Ressourcen stets vollständig eingeplant werden.²⁰

Die Möglichkeiten zur späteren Reaktion auf Datenänderungen sind bei einer simultanen Planung von Losgrößen und Losreihenfolgen daher stark eingeschränkt, so daß Datenänderungen regelmäßig zu einem unzulässigen Losgrößen- und Reihenfolgeplan und damit häufig zu einer vollständigen Neuplanung führen. Im Hinblick auf die Integration der kapazitätsorientierten Losgrößenplanung in ein hierarchisch strukturiertes Gesamtkonzept der Produktionsplanung und –steuerung erscheint es daher angemessener, im Rahmen der kapazitätsorientierten Losgrößenplanung auf die Berücksichtigung von Reihenfolgeentscheidungen innerhalb einzelner Perioden zu verzichten.²¹

Die kapazitätsorientierte Losgrößenplanung baut demnach auf der Annahme auf, daß für jeden Artikel, der in einer Periode hergestellt wird, in dieser Periode genau ein

¹⁶ Vgl. Adam (1963), S. 233 ff., Adam (1969), Pressmar (1974), S. 462 ff., Küpper (1980) sowie Drexl/Haase (1992).

¹⁷ Vgl. Helber (1994), S. 15 f.

¹⁸ Vgl. Drexl/Haase (1992), S. 1 ff., Helber (1994), S. 34 ff. sowie Derstroff (1995), S. 33.

¹⁹ Vgl. Derstroff (1995), S. 33, Helber (1994), S. 39 sowie Helber (1995), S. 7 f.

²⁰ Vgl. Helber (1994), S. 16 und S. 38 f., Helber (1995), S. 7 f. sowie Derstroff (1995), S. 33 f.

²¹ Vgl. Derstroff (1995), S. 34 sowie Helber (1994), S. 40. Zu weiteren Gründen, die gegen eine simultane Losgrößen- und Reihenfolgeplanung sprechen, siehe Helber (1994), S. 16 und S. 38 ff., Derstroff (1995), S. 32 ff. sowie Heinrich (1987), S. 26 ff. Da keine Reihenfolgeentscheidungen innerhalb einzelner Perioden getroffen werden, können reihenfolgeabhängige Rüstzeiten- und Rüstkosten nicht abgebildet werden.

Rüstvorgang erforderlich ist.²² Diese Annahme führt nur dann nicht zu einem erheblichen Abbildungsfehler, wenn in einer Periode regelmäßig mehrere Artikel an einer Ressource bearbeitet werden und relativ wenig Zeit für Rüstvorgänge erforderlich ist, d.h. die Perioden im Vergleich zur simultanen Losgrößen- und Reihenfolgeplanung also relativ "groß" sind.²³

Da die Reihenfolgeentscheidungen innerhalb einzelner Perioden vernachlässigt werden, wird davon ausgegangen, daß die innerhalb einer Periode hergestellten Mengen eines Artikels erst am Ende der Periode geschlossen zur nächsten Produktionsstufe weitergegeben werden.²⁴ Wird von geschlossener Losweitergabe am Ende der Produktionsperiode ausgegangen, dann muß, damit der ermittelte Losgrößenplan stets in einen zulässigen Reihenfolgeplan umgesetzt werden kann, für jeden Artikel eine ganzzahlige Vorlaufverschiebung von mindestens einer Periode eingeplant werden.²⁵ Dies kann zu erheblichen Warte- und Leerzeiten führen, wie das folgende Beispiel zeigt.²⁶

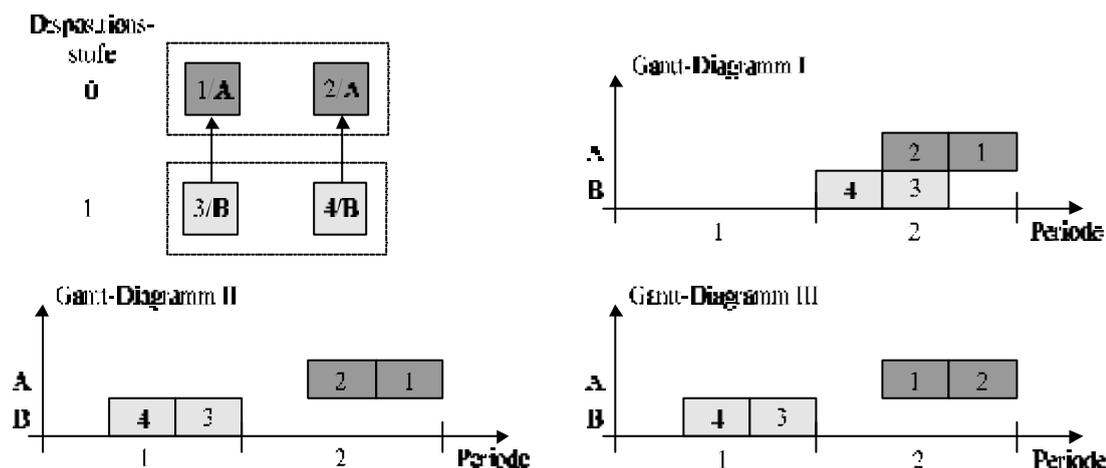


Abb. 2: Beispiel zur Berücksichtigung und Vernachlässigung von Reihenfolgeentscheidungen innerhalb einzelner Perioden

Die beiden Enderzeugnisse 1 und 2 werden auf der Ressource A und die untergeordneten Artikel 3 und 4 auf der Ressource B hergestellt. Die Direktbedarfskoeffizienten sind gleich Eins. Weiterhin wird angenommen, daß für die beiden Enderzeugnisse am Ende der Periode 2 ein Nettobedarf von je einer Mengeneinheit bestehe, d.h. $d_{1,2} = d_{2,2} = 1$ [ME]. Die Stückbearbeitungszeit beträgt jeweils eine Zeiteinheit je Mengeneinheit ($tb_1 = tb_2 = tb_3 = tb_4 = 1$ [ZE/ME]). Die Dauer einer Periode beträgt jeweils drei Zeiteinheiten, wobei die Periodenlänge der verfügbaren

²² Vgl. Drexl/Haase (1992), S. 2, Derstroff (1995), S. 26 sowie Helber (1994), S. 31.

²³ Vgl. Helber (1994), S. 31 und S. 34.

²⁴ Vgl. Küpper/Helber (1995), S. 161 sowie Helber (1994), S. 24.

²⁵ Vgl. Derstroff (1995), S. 27 f.

²⁶ Das folgende Zahlenbeispiel wurde erstellt in Anlehnung an Helber (1994), S. 16 ff.

Kapazität der betrachteten Ressourcen A und B entspricht.

Wenn keine Rüstzeiten berücksichtigt werden ($tr_1 = tr_2 = tr_3 = tr_4 = 0$ [ZE]), dann ist im Hinblick auf eine minimale Durchlaufzeit die in Gantt-Diagramm I dargestellte Reihenfolge erstrebenswert. Es wird deutlich, daß hinsichtlich der Kapazitätsrestriktionen alle Produktionsmengen der Periode 2 zugeordnet werden können, sofern innerhalb der Periode 2 bestimmte Reihenfolgen eingehalten werden.

Wird auf die Berücksichtigung von Reihenfolgeentscheidungen innerhalb einzelner Perioden verzichtet, so muß für jeden Artikel eine ganzzahlige Vorlaufverschiebung von mindestens einer Periode vorgesehen werden. Beträgt diese Vorlaufverschiebung z.B. jeweils eine Periode, dann sind die Produktionsmengen der untergeordneten Artikel 3 und 4 der Periode 1 zuzuordnen. Ein Beispiel für einen sich daraus möglicherweise ergebenden Reihenfolgeplan ist in Abb. 2 im Gantt-Diagramm II abgebildet. Wie zu erkennen ist, führt die Abstraktion von Reihenfolgeentscheidungen innerhalb einzelner Perioden einerseits zu einer höheren Durchlaufzeit, da in diesem Fall mit der Herstellung der Artikel 3 und 4 früher begonnen werden muß, als dies im Gantt-Diagramm I erforderlich ist.

Vergleicht man die Gantt-Diagramme II und III, so wird andererseits deutlich, daß aufgrund der Vorlaufverschiebung über die Losreihenfolge der Artikel 1 und 2 in Periode 2 isoliert entschieden werden kann, ohne daß dies die Reihenfolge der Lose für die Artikel 3 und 4 in Periode 1 betrifft.²⁷ Dies stellt einen Freiheitsgrad dar, der z.B. in dem Produktionsplan in Gantt-Diagramm I nicht enthalten ist. Dieser Freiheitsgrad wird jedoch durch planungsinduzierte Warte- und Leerzeiten "erkauft", deren Ausmaß von der Periodendauer abhängt. Es wird deutlich, daß geringe planungsinduzierte Warte- und Leerzeiten möglichst geringe Periodendauern erfordern.

Wird die Losgrößenplanung auf der Ebene von Arbeitsgängen vorgenommen, dann muß demnach mit einem erheblich feineren Periodenraster geplant werden, als dies üblicherweise bei der Losgrößenplanung auf der Ebene von Artikeln erfolgt. Damit steigt die Anzahl der Planungsobjekte über die Berücksichtigung von Arbeitsgängen und vergleichsweise kleineren Perioden erheblich an. Eine solche Vorgehensweise setzt somit die Existenz leistungsfähiger Planungsverfahren für eine kapazitätsorientierte

²⁷ Die Reihenfolgeentscheidungen für eine bestimmte Ressource innerhalb einer bestimmten Periode können in einer nachgelagerten Reihenfolgeplanung aufgrund der Vorlaufverschiebung somit grundsätzlich unabhängig von den Reihenfolgeentscheidungen anderer Ressourcen und Perioden getroffen werden. Auf dieser untersten Planungsebene kann dann auch die Reihenfolge-abhängigkeit von Rüstzeiten und -kosten berücksichtigt werden. Entscheidend ist, daß die Fertigungslose auch tatsächlich innerhalb derjenigen Periode produziert werden, der sie durch die kapazitätsorientierte Losgrößenplanung zugeordnet worden sind, da ansonsten der Produktionsplan u.U. nicht realisiert werden kann. Vgl. Helber (1994), S. 19.

Losgrößenplanung voraus. Dabei steht zunächst die Erzeugung kapazitätsmäßig zulässiger Losgrößenpläne im Vordergrund. Darüber hinaus sollten bei der Losgrößenplanung die sich aus der Mehrstufigkeit der Erzeugnisstruktur ergebenden kostenmäßigen Interdependenzen beachtet werden. Diese Anforderungen werden von dem im Kapitel 4 ausführlich beschriebenen heuristischen Lösungsverfahren erfüllt.

3. Datenmodellierung einer mehrstufigen kapazitätsorientierten Losgrößenplanung

Im folgenden wird für das zuvor skizzierte Planungsproblem einer mehrstufigen kapazitätsorientierten Losgrößenplanung eine Datenmodellierung herausgearbeitet. Hierzu ist es jedoch zunächst einmal erforderlich, die grundlegende Vorgehensweise einer Datenmodellierung zu skizzieren.

3.1. Grundlegende Vorgehensweise

„Ergebnis einer Datenmodellierung ist ein konzeptuelles bzw. logisches Datenschema, das Art und Struktur der zu speichernden Daten festlegt“.²⁸ Demnach erfolgt die Modellierung in zwei Schritten:

In einem ersten Schritt wird das konkrete Problem der Realität in ein konzeptuelles Datenmodell abgebildet. Hierbei wird eine Abstraktion der realen Verhältnisse vorgenommen. Es sollen nur die Sachverhalte abgebildet werden, die zur Problembehandlung von Interesse sind.²⁹ Auf der konzeptuellen Ebene wird zur Darstellung der Datenstrukturen zumeist ein semantisches Datenmodell eingesetzt, das unabhängig vom verwendeten Datenbanksystem ist. Im Rahmen dieser Arbeit wird als semantisches Datenmodell das 1976 von *Chen*³⁰ entwickelte und mittlerweile weit verbreitete Entity-Relationship-Modell (ERM) herangezogen. Als Vorteil dieser Modellierungstechnik ist vor allem die Möglichkeit einer übersichtlichen Darstellung der Beziehungen zwischen Datenobjekten anhand sogenannter ER-Diagramme zu nennen.³¹

In einem zweiten Schritt wird das semantische Modell in das vom Datenbanksystem konkret verwendete logische Datenmodell (hierarchisches Datenmodell, Netzwerk-Datenmodell oder relationales Datenmodell³²) überführt.³³ Als logisches Datenmodell wird im folgenden das von den meisten Datenbanksystemen (auch von ORACLE 8) zur Verfügung gestellte relationale Datenmodell (RDM) herangezogen, das 1970 von *Codd*³⁴ vorgestellt wurde.³⁵ Das Grundschema der Datenmodellierung ist in Abb. 3 nochmals veranschaulicht.

²⁸ Knolmayer/Myrach (1990), S. 90.

²⁹ Vgl. Rieper/Witte (1993), S. 2.

³⁰ Vgl. Chen (1976), S. 9 ff.

³¹ Im Laufe der Jahre hat das ERM zahlreiche Erweiterungen erfahren, wobei sich keine einheitliche Darstellung herauskristallisiert hat. Einen Überblick über ER-Modelle und ihre Erweiterungen liefern Sinz (1990), S. 17 ff., Stickel (1991), S. 74 ff., Jackson (1989), S. 72 ff. sowie Meier (1992), S. 11 ff.

³² Zu einer Übersicht über diese Datenmodelle vgl. Stahlknecht/Hasenkamp (1997), S. 209 ff.

³³ Vgl. Lockemann/Radermacher (1990), S. 5.

³⁴ Vgl. Codd (1970), S. 377 ff.

³⁵ Zur Umsetzung des ER-Modells in das hierarchische Datenmodell und das Netzwerk-Datenmodell vgl. Stickel (1991), S. 89 ff.

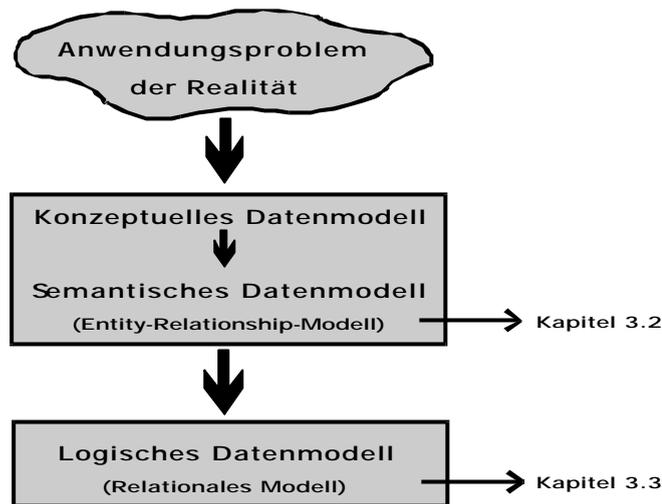


Abb. 3: Grundschemata der Datenmodellierung

3.2. Das Entity-Relationship-Modell

Im folgenden werden die Datenstrukturen herausgearbeitet, die für die Implementation einer kapazitätsorientierten Losgrößenplanung von Bedeutung sind. In Abb. 4 ist ein vollständiges ER-Diagramm dargestellt, daß in den folgenden Abschnitten detailliert erläutert wird.

3.2.1. Kalenderdaten

Um der Tatsache Rechnung zu tragen, daß das Losgrößenproblem einen dynamischen Charakter aufweist, wird zunächst der Entitytyp Werkskalender eingeführt. Neben dem Primärschlüsselattribut Periode erhält dieser das Attribut Stunden zugewiesen. Die Arbeitsstunden je Periode werden zur Berechnung des Kapazitätsangebots benötigt.

Des weiteren wird zur Festlegung des Planungszeitraums der Beziehungstyp Planung in das ERM aufgenommen. Es handelt sich hierbei um eine Beziehung des Werkskalenders mit sich selbst. Eine Planung wird durch den Planungsbeginn und das Planungsende eindeutig identifiziert.

3.2.2. Artikeldaten und Erzeugnisstrukturdaten

Den zentralen Entitytyp stellt der Artikel dar, für den die Losgrößen zu planen sind. Er wird als Oberbegriff für Enderzeugnisse, Baugruppen, Rohmaterialien usw. verwendet.³⁶ Für die Losgrößenplanung muß insbesondere zwischen Eigenartikeln und Fremdartikeln unterschieden werden. Während für die Eigenartikel eine mehrstufige kapazitätsorientierte Losgrößenplanung erforderlich ist, kann für die

³⁶ Vgl. Witte (1995), S. 26 f.

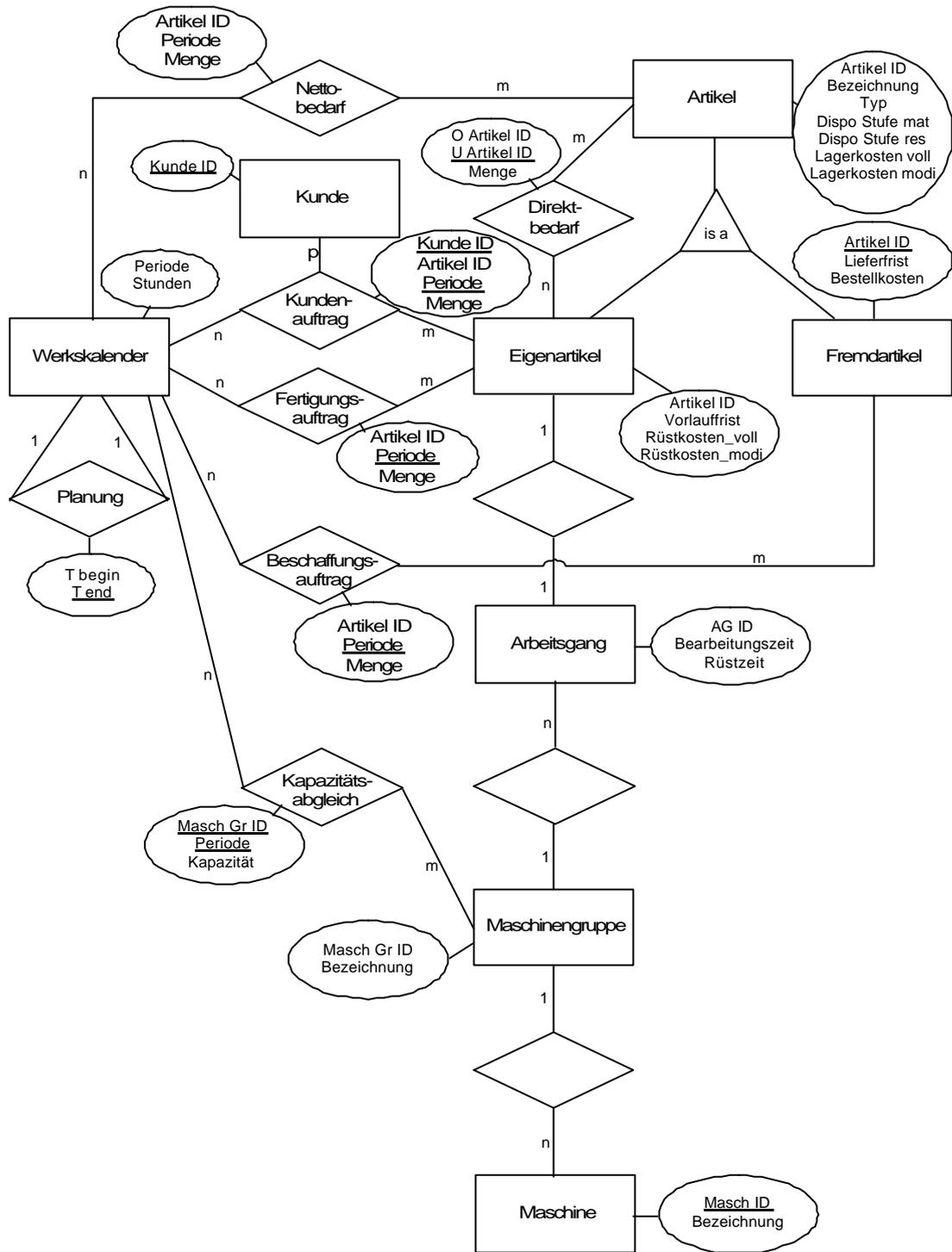


Abb. 4: Das vollständige ER-Diagramm

Fremdartikel eine isolierte Planung mit Hilfe von einstufigen unkapazitierten Verfahren vorgenommen werden.

Aufgrund dieser Tatsache weisen Eigenartikel und Fremdartikel zum Teil unterschiedliche Eigenschaften auf. Die gemeinsamen Attribute (Bezeichnung, Typ, Dispositionsstufe und Lagerkostensatz) werden dem generalisierten Entitytyp Artikel zugeordnet. Der Entitytyp Eigenartikel bekommt als eigene Attribute die Vorlaufzeit und den Rüstkostensatz zugeordnet, wohingegen die Attribute Lieferfrist und Bestellkostensatz dem Fremdartikel zugeordnet werden.

Darüber hinaus müssen Stücklisten verwaltet werden, um die Erzeugnisstruktur abzubilden. „Eine Stückliste ist ein Verzeichnis aller Materialien, Teile oder Baugruppen, die für die Herstellung eines Gutes benötigt werden. Eine Baukastenstückliste enthält dabei nur diejenigen Gegenstände, die unmittelbar in das Gut eingehen“.³⁷ Da nur Eigenartikel eine Stückliste haben, werden die Informationen einer Baukastenstückliste im ERM durch den Beziehungstyp Direktbedarf zwischen den Entitytypen Artikel und Eigenartikel erfaßt. Da dem Losgrößenverfahren eine generelle Erzeugnisstruktur zugrunde liegt, handelt es sich um eine n:m-Beziehung. Als zusätzliches Attribut wird die Menge angegeben. Damit sind die gesamten Informationen verdatet, die in einem Gozintographen zum Ausdruck kommen.

3.2.3. Arbeitsgang- und Kapazitätsdaten

Da die Kapazitätsrestriktionen berücksichtigt werden, müssen Daten über die vorhandenen Ressourcen und die durchzuführenden Arbeitsgänge geführt werden. In Kapitel 2 wurde erläutert, daß eine kapazitätsorientierte Losgrößenplanung auf der Basis von Arbeitsgängen erfolgen muß, so daß nach jedem Arbeitsgang ein neuer Artikel entsteht. Im ERM wird dieser Sachverhalt durch eine 1:1-Beziehung zwischen den Entitytypen Eigenartikel und Arbeitsgang modelliert. Neben der Arbeitsgangsnummer als Primärschlüssel werden dem Arbeitsgang noch die Attribute Bearbeitungszeit und Rüstzeit zugewiesen.

Darüber hinaus ist es erforderlich, die Ressourcendaten in dem ERM abzubilden. Hierzu wird der Entitytyp Maschine eingeführt. Da im Rahmen einer kapazitätsorientierten Losgrößenplanung von Reihenfolgeentscheidungen abstrahiert wird, ist die konkrete Zuordnung eines Arbeitsganges zu einer bestimmten Maschine nicht erforderlich. Somit können gleichartige Maschinen zu einer Maschinengruppe zusammengefaßt werden. Die einzelnen Arbeitsgänge werden dann den Maschinengruppen zugeordnet. Diese Beziehung ist vom Typ 1:n, da jeder Arbeitsgang eine bestimmte Maschinengruppe beansprucht, wohingegen von einer Maschinengruppe verschiedene Arbeitsgänge durchgeführt werden können.

Um zu prüfen, ob ein Losgrößenplan kapazitätsmäßig zulässig ist, muß ein sogenannter Kapazitätsabgleich durchgeführt werden, der die noch verfügbare Kapazität einer Ressourcengruppe in einer Periode angibt. Der Kapazitätsabgleich ergibt sich aus der Differenz zwischen Kapazitätsangebot und -nachfrage. Im ERM wird der Kapazitätsabgleich als n:m-Beziehung zwischen den Entitytypen Werkskalender und Maschinengruppe modelliert.

³⁷ Witte (1995), S. 24.

3.2.4. Terminierte Bedarfe

Ein terminierter Bedarf ist gekennzeichnet durch einen Artikel in einer bestimmten Menge zu einem bestimmten Datum. Somit sind terminierte Bedarfe über eine n:m-Beziehung zwischen den Entitytypen Artikel und Werkskalender abzubilden. Diesem Beziehungstyp wird als zusätzliches Attribut die Menge zugewiesen.³⁸

Zu verwalten sind die terminierten Bedarfe der Kundenaufträge, Nettobedarfe, Fertigungsaufträge und Beschaffungsaufträge. Da der Nettobedarf für alle Artikel berechnet wird, stellt dieser einen Beziehungstyp zwischen Artikel und Werkskalender dar. Bei den Fertigungs- und Beschaffungsaufträgen ist dies nicht der Fall. Fertigungsaufträge sind nur für Eigenartikel und Beschaffungsaufträge nur für Fremdartikel zu planen. Deshalb stehen diese Bedarfe mit den spezialisierten Entitytypen in Verbindung.

Bei Kundenaufträgen verhält es sich ähnlich. Da davon ausgegangen wird, daß nur die eigengefertigten Artikel verkauft werden, bilden Kundenaufträge ebenso wie die Fertigungsaufträge eine Beziehung zwischen den Entitytypen Werkskalender und Eigenartikel. Sie stehen jedoch zusätzlich noch mit dem Entitytyp Kunde in Beziehung, dessen Kundennummer als zusätzlicher Fremdschlüssel hinzutritt. Der Primärbedarf kann berechnet werden, indem die Auftragsmengen für einen Artikel in einer Periode über alle Kunden summiert werden.

3.3. Überführung des Entity-Relationship-Modells in ein relationales Datenmodell

Nachdem die semantische Datenmodellierung abgeschlossen ist, gilt es im folgenden, das Entity-Relationship-Modell in ein relationales Datenmodell zu über-führen. Die große Beliebtheit des RDM als logisches Datenmodell hängt vor allem mit seiner Einfachheit und Flexibilität zusammen. Das Grundkonstrukt im relationalen Datenmodell bildet die Tabelle oder Relation, in der die im ERM enthaltenen Informationen abgebildet werden müssen.³⁹ Der Transformationsvorgang ist in Abb. 5 dargestellt.

³⁸ Vgl. Witte (1995), S. 39.

³⁹ Vgl. Kurbel (1995), S. 58.

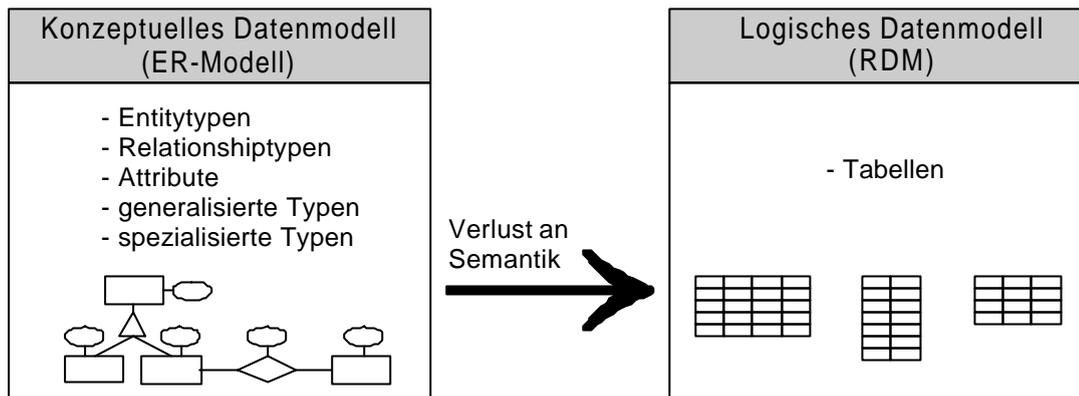


Abb. 5: Überführung des ER-Modells in ein RDM

Während im ERM vielfältige semantische Abhängigkeiten abgebildet werden können, beinhaltet die Tabellenform fast keine Semantik. Zur Überführung des ERM in ein RDM stehen Abbildungsregeln zur Verfügung, die mehr oder weniger mechanisch angewendet werden können.⁴⁰ Gewisse Entscheidungsräume bleiben für den Modellierer allerdings bestehen.⁴¹

Unter Anwendung der Abbildungsregeln läßt sich das in Abb. 4 wiedergegebene ERM z.B. in das folgende RDM transformieren.

WERKSKALENDER (Periode, Stunden)

PLANUNG (Tbegin, Tend)

ARTIKEL (Art_ID, Bezeichnung, Typ, Dispo_St_mat, Dispo_St_res, Lagerkosten_voll, Lagerkosten_modi)

EIGENARTIKEL (Art_ID, Vorlauffrist, Rüstkosten_voll, Rüstkosten_modi)

FREMDARTIKEL (Art_ID, Lieferfrist, Bestellkosten)

ARBEITSGANG (AG_ID, Bearbeitungszeit, Rüstzeit, Masch_Gr_ID)

DIREKTBEDARF (O.Art_ID, U.Art_ID, Menge)

MASCHINENGRUPPE (Masch_Gr_ID, Bezeichnung)

MASCHINE (Masch_ID, Bezeichnung, Masch_Gr_ID)

KAPAZITAETSABGLEICH (Masch_Gr_ID, Periode, Kapazität)

KUNDENAUFTRAG (Kunde_ID, Art_ID, Periode, Menge)

NETTOBEDARF (Art_ID, Periode, Menge)

FERTIGUNGSaufTRAG (Art_ID, Periode, Menge)

BESCHAFFUNGSaufTRAG (Art_ID, Periode, Menge)

Der Einsatz eines derartigen Modells scheiterte bislang daran, daß weder exakte noch heuristische Verfahren zur Lösung existierten. In den letzten Jahren sind jedoch einige

⁴⁰ Siehe dazu Vossen (1994), S.134 ff., Stickel (1991), S. 74 ff., Jackson (1989), S. 86 ff. sowie Meier (1992), S. 22 ff.

⁴¹ Vgl. Lockemann/Radermacher (1990), S. 6.

vielversprechende heuristische Lösungsverfahren entwickelt worden, so daß derartige Planungsverfahren grundsätzlich als Modul von PPS-Systemen geeignet erscheinen.

4. Das heuristische Lösungsverfahren von *Helber*

Im folgenden wird eines dieser Lösungsverfahren vorgestellt. Das Grundprinzip dieser von *Helber*⁴² entwickelten Heuristik besteht darin, das mehrstufige dynamische Mehrprodukt-Losgrößenproblem mit mehrfachen Kapazitätsrestriktionen (mehrstufiges CLSP⁴³) heuristisch in eine Folge von einstufigen dynamischen Mehrprodukt-Losgrößenproblemen mit jeweils einer beschränkten Ressource (einstufige CLSPs) zu zerlegen, die aufeinander aufbauen und nacheinander gelöst werden.⁴⁴ Zur Lösung dieser einstufigen CLSPs greift *Helber* auf ein heuristisches Verfahren zurück, das von *Dixon* und *Silver*⁴⁵ vorgeschlagen wurde⁴⁶ und i.d.R. zu guten Ergebnissen führt.⁴⁷ Die Losgrößenplanung wird mithin – beginnend bei den Enderzeugnissen – dispositionsstufenweise für die gesamte Erzeugnis- und Prozeßstruktur vorgenommen, d.h. es wird jeweils für alle Artikel einer Dispositionsstufe, die dieselbe Ressource beanspruchen, ein einstufiges CLSP in Anlehnung an die Heuristik von *Dixon* und *Silver* gelöst.⁴⁸

Diese Zerlegung des mehrstufigen Losgrößenproblems in eine Folge von einfacher zu lösenden einstufigen Losgrößenproblemen entspricht zwar grundsätzlich dem dispositionsstufenweise sukzessiven Ansatz der „konventionellen“ PPS-Systeme.⁴⁹ Im Gegensatz zu der üblichen Vorgehensweise in „konventionellen“ PPS-Systemen werden jedoch sowohl die Kapazitätsrestriktionen der gerade betrachteten als auch die der vorgelagerten Ressourcen berücksichtigt. Dadurch wird eine Integration der Planungsmodule „Mengenplanung“ und „Termin- und Kapazitätsplanung“ erreicht. Durch die Verwendung modifizierter Kostensätze wird darüber hinaus zumindest ansatzweise den aus der Mehrstufigkeit der Erzeugnisstruktur resultierenden kostenmäßigen Interdependenzen Rechnung getragen.⁵⁰ Die Grundstruktur dieses Dekompositionsverfahrens ist in Abb. 6 wiedergegeben.

⁴² Vgl. *Helber* (1994), S. 57 ff., *Tempelmeier/Helber* (1994), S. 296 ff. sowie *Helber* (1995), S. 5 ff.

⁴³ Zu einer mathematisch exakten Formulierung des mehrstufigen **Capacitated-Lotsizing-Problem** siehe *Tempelmeier/Derstroff* (1993), S. 64 f., *Helber* (1994), S. 32 ff., *Helber* (1995), S. 9 f., *Derstroff* (1995), S. 26 ff., *Tempelmeier* (1995), S. 202 ff. sowie *Tempelmeier* (1997), S. 453 f.

⁴⁴ Vgl. *Tempelmeier/Helber* (1994), S. 301 sowie *Helber* (1995), S. 11.

⁴⁵ Vgl. *Dixon/Silver* (1981), S. 23 ff.

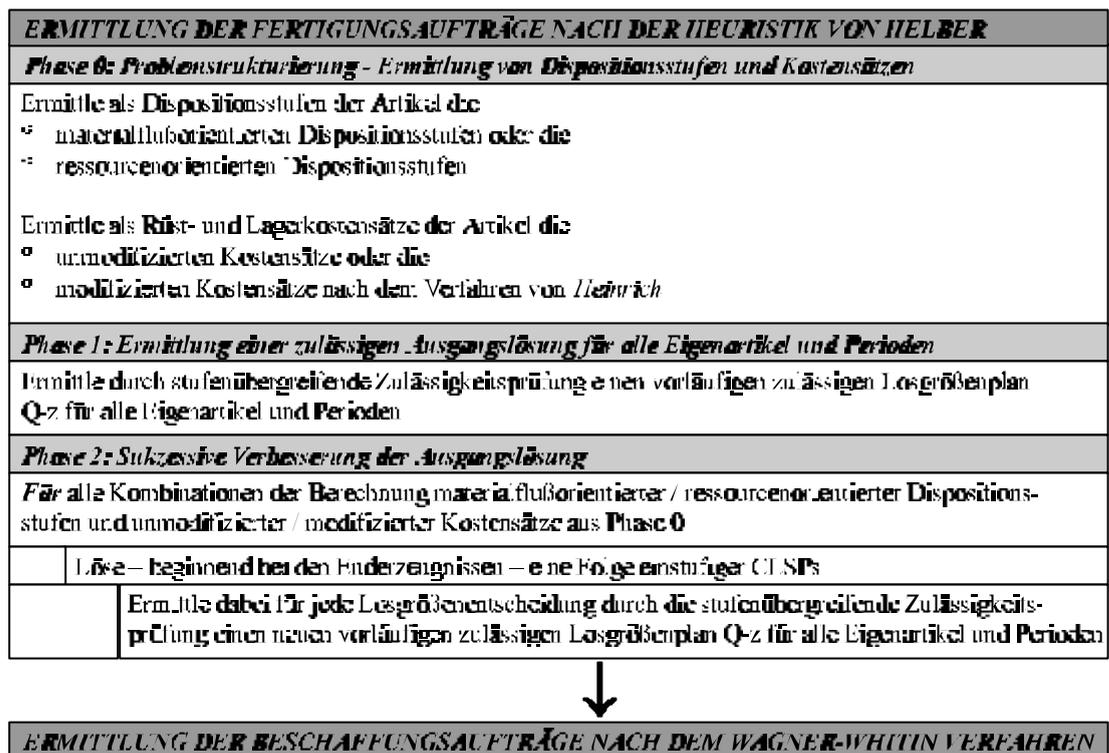
⁴⁶ Vgl. *Helber* (1994), S. 56 und S. 79, *Tempelmeier/Helber* (1994), S. 300 sowie *Helber* (1995), S. 11.

⁴⁷ Vgl. *Bahl/Ritzman/Gupta* (1987), S. 334.

⁴⁸ Vgl. *Helber* (1994), S. 57 sowie *Helber* (1995), S. 11.

⁴⁹ Zum Aufbau „konventioneller“ PPS-Systeme siehe *Ortmann/Siebeking* (2000), S. 2 ff. und der dort angegebenen Literatur. Zu einer datenbankgestützten Implementation der gängigsten Losgrößenverfahren siehe *Ortmann* (1998) sowie *Siebeking* (1998).

⁵⁰ Vgl. *Helber* (1994), S. 57, *Tempelmeier/Helber* (1994), S. 300, *Helber* (1995), S. 12 sowie *Ortmann/Siebeking* (2000), S. 12 ff.

Abb. 6: Grundstruktur der Heuristik von Helber⁵¹

Das Verfahren besteht aus drei Phasen. Die Phase 0 stellt einen Vorlauf dar, in dem die Problemdaten aufbereitet werden. Sie ist lediglich bei Veränderung der Nachfragedaten und/oder der Kostenparameter erforderlich und muß daher u.U. nicht für jede einzelne Planung durchlaufen werden.⁵² Zunächst erfolgt eine Sortierung der Erzeugnis- und Prozeßstruktur. Hierbei kann alternativ auf die materialflußorientierte Sortierung nach Dispositionsstufen oder aber auf eine Strukturierung zurückgegriffen werden, die auch die Reihenfolge der Ressourcenbelegung durch die einzelnen Artikel (Arbeitsgänge) berücksichtigt (modifizierte Dispositionsstufen).⁵³ Außerdem ist eine Entscheidung darüber zu treffen, welche Kostensätze bei der Losgrößenplanung eingesetzt werden sollen. Hier bieten sich als Alternativen die Verwendung unmodifizierter Kostensätze oder der Einsatz von modifizierten Kostensätzen an, mit deren Hilfe die aus der Mehrstufigkeit der Erzeugnisstruktur resultierenden kostenmäßigen Interdependenzen auch bei sukzessiver Anwendung einstufiger Losgrößenverfahren berücksichtigt werden können.⁵⁴

Die in Phase I durchzuführende stufenübergreifende Zulässigkeitsprüfung stellt eine zentrale Komponente des Verfahrens dar. Mit ihrer Hilfe wird vor der eigentlichen Losgrößenplanung zunächst einmal der Versuch unternommen, einen vorläufigen

⁵¹ Erstellt in Anlehnung an Helber (1994), S. 58.

⁵² Z.B. dann nicht, wenn die Losgrößenplanung lediglich für ein verändertes Kapazitätsangebot vorgenommen werden soll.

⁵³ Vgl. Helber (1994), S. 64 ff., Tempelmeier/Helber (1994), S. 300 f. sowie Helber (1995), S. 12.

⁵⁴ Vgl. Hahn (1998), S. 109 ff. und S. 132 ff., Helber (1994), S. 59 ff. sowie Helber (1995), S. 12.

zulässigen Losgrößenplan Q-z für alle Artikel und Perioden zu ermitteln. Wenn dies nicht gelingt, kann mit dem heuristischen Verfahren von *Helber* keine Lösung ermittelt werden, und das Verfahren ist beendet.⁵⁵

Anderenfalls wird in Phase II mit der eigentlichen Losgrößenplanung begonnen. Hier werden einstufige CLSPs unter Berücksichtigung unterschiedlicher Artikel, Ressourcen und Restkapazitäten in Anlehnung an das heuristische Verfahren von *Dixon* und *Silver* gelöst.⁵⁶ Dabei wird für jede in Betracht gezogene Losgrößenentscheidung erneut eine stufenübergreifende Zulässigkeitsprüfung durchgeführt und so überprüft, ob ein neuer zulässiger Losgrößenplan Q-z für alle Artikel und Perioden erzeugt werden kann.⁵⁷ Hierdurch wird sichergestellt, daß jede der sukzessiv durchgeführten Losgrößenentscheidungen zu einem zulässigen Losgrößenplan führt. Die grundsätzliche Vorgehensweise in Phase II wird im folgenden an einem Beispiel verdeutlicht. Hierzu wird die Erzeugnis- und Prozeßstruktur in Abb. 7 betrachtet, in der die Artikel 1 und 2 auf der Dispositionsstufe 0 die Ressource A beanspruchen.

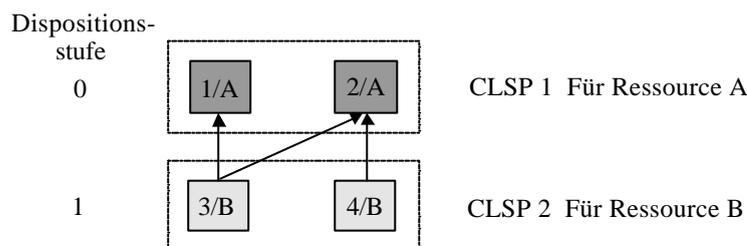


Abb. 7: Beispiel für die stufenweise Lösung einer Folge von CLSPs

Zunächst wird für die Artikel 1 und 2 ein CLSP hinsichtlich der Ressource A gelöst. Als Ergebnis erhält man die Fertigungsauftragsgrößen dieser beiden Artikel. Hieraus lassen sich die Bedarfsmengen für die Artikel 3 und 4 auf der Dispositionsstufe 1 ableiten. Anschließend wird für diese Artikel ein zweites CLSP hinsichtlich der Ressource B gelöst.

Das von *Helber* vorgeschlagene Lösungsverfahren bezieht sich ausschließlich auf Eigenartikel. Wie aus Abb. 6 ersichtlich ist, werden in dieser Arbeit auch die programmgesteuerten Fremdartikel betrachtet, für die ebenfalls eine Losgrößenplanung durchzuführen ist. Da Fremdartikel keine Kapazitäten beanspruchen und keine Unterartikel haben, können die Beschaffungsaufträge im Anschluß an die Planung der Fertigungsaufträge über ein einstufiges unkapazitiertes Losgrößenverfahren bestimmt werden. Hierzu wird der optimierende *Wagner-Whitin* Algorithmus⁵⁸ eingesetzt.

⁵⁵ Vgl. Helber (1994), S. 70.

⁵⁶ Vgl. Tempelmeier/Helber (1994), S. 300 sowie Helber (1995), S. 11.

⁵⁷ Vgl. Helber (1994), S. 58 und S. 70 sowie Helber (1995), S. 12.

⁵⁸ Vgl. Wagner/Whitin (1958), S. 89 ff.

In den folgenden Abschnitten wird zunächst auf die Ermittlung ressourcenorientierter Dispositionsstufen und modifizierter Kostensätze eingegangen. Danach wird gezeigt, wie im Rahmen der stufenübergreifenden Zulässigkeitsprüfung ein vorläufiger zulässiger Losgrößenplan Q-z für alle Artikel und Perioden erzeugt werden kann. Abschließend wird die sukzessive Verbesserung dieses vorläufigen Losgrößenplans dargestellt.

4.1. Ermittlung ressourcenorientierter Dispositionsstufen

Das zuvor betrachtete Beispiel ist bewußt einfach gehalten. So werden lediglich zwei Ressourcen betrachtet, und es wird angenommen, daß diese jeweils nur durch Artikel derselben Dispositionsstufe in Anspruch genommen werden. Es kann jedoch auch der Fall eintreten, daß eine Ressource durch Artikel beansprucht wird, denen in bezug auf die Erzeugnis- und Prozeßstruktur unterschiedliche materialflußorientierte Dispositionsstufen zugeordnet sind.⁵⁹ In Abb. 8 ist eine derartige Erzeugnis- und Prozeßstruktur mit stufenübergreifender Ressourcenkonkurrenz abgebildet.

materialflußorientierter Gozintograph	Dispositionsstufe	CLSP Nr.	einbezogene Artikel	Ressourcen- gruppe	verfügbare Kapazität
	0	1	1	B	Gesamtkapazität
	0	2	2	A	Gesamtkapazität
	1	3	3	A	Restkapazität
	1	4	4	B	Restkapazität

Abb. 8: Folge von Losgrößenproblemen bei materialflußorientierten Dispositionsstufen

Dies würde dazu führen, daß bei der Lösung eines Losgrößenproblems vom Typ CLSP eine simultane Betrachtung aller Artikel, welche die betreffende Ressource in Anspruch nehmen, nicht mehr möglich ist und Entscheidungen über die Nutzung dieser Ressource auf mehrere nacheinander zu bearbeitende Losgrößenprobleme verteilt werden.⁶⁰ So muß bei einer Sortierung nach materialflußorientierten Dispositionsstufen in dem obigen Beispiel für jeden Artikel isoliert ein eigenes CLSP gelöst werden.

Zur Lösung dieses Problems schlägt *Helber* ein Verfahren vor, mit dem es möglich ist, den Artikeln derart (ressourcenorientierte) Dispositionsstufen zuzuordnen, daß einerseits die aus der Sicht der mengenbezogenen Materialbedarfsplanung erforderliche materialflußorientierte Dispositionsstufenordnung nicht zerstört wird und andererseits auch die Reihenfolgebeziehungen zwischen den Ressourcen berücksichtigt werden.⁶¹ Dies soll im folgenden erläutert werden.

⁵⁹ Vgl. Helber (1994), S. 64 sowie Tempelmeier (1995), S. 307.

⁶⁰ Vgl. Helber (1994), S. 64 sowie Tempelmeier/Helber (1994), S. 301.

Zunächst muß ein zyklensfreier Graph von Ressourcenpartitionen (RP-Graph) erstellt werden, der die Materialflüsse zwischen den Ressourcengruppen abbildet. Der Algorithmus zur Entwicklung eines zyklensfreien RP-Graphen ist in Abb. 9 dargestellt.

Konstruktion zyklensfreier RP-Graphen	
a)	Führe für jede Ressource der Erzeugnis- und Prozeßstruktur einen Knoten im RP-Graphen mit der Partitionsnummer 1 ein
b)	Weise jedem Artikel der Erzeugnis- und Prozeßstruktur die Ressourcenpartitionsnummer 1 zu
c)	Für alle Artikel i der Erzeugnis- und Prozeßstruktur in der Reihenfolge aufsteigender materialfluß-orientierter Dispositionsstufen (und aufsteigender Artikelnummern)
d)	Ermittle die Menge o aller direkten Oberartikel des Artikels i
e)	Für alle Oberartikel $z \in o$ (in der Reihenfolge aufsteigender Artikelnummern)
f)	Ermittle die Ressource (o_art_res) und die Partitionsnummer (o_art_part) des direkten Oberartikels z
g)	Ermittle die Ressource (u_art_res) und die Partitionsnummer (u_art_part) des Unterartikels i
h)	Falls in dem RP-Graphen noch kein Pfeil vom Startknoten (u_art_res/u_art_part) zum Zielknoten (o_art_res/o_art_part) existiert, dann: Überprüfe, ob ein solcher Pfeil einen Zyklus im RP-Graphen verursachen würde Falls dies nicht der Fall ist, dann: Füge den Pfeil in den RP-Graphen ein und betrachte den nächsten direkten Oberartikel z des Artikels i sonst: Erhöhe die Ressourcenpartitionsnummer des Unterartikels i (u_art_part) um Eins, führe ggf. einen neuen Knoten im RP-Graphen ein und gehe zu Schritt h) sonst: Betrachte den nächsten direkten Oberartikel z des Artikels i

Abb. 9: Verfahren zur Erzeugung eines zyklensfreien Graphen von Ressourcenpartitionen⁶²

Die Anwendung dieses Verfahrens auf die in Abb. 8 dargestellte Erzeugnis- und Prozeßstruktur ist in Abb. 10 zusammengefaßt. Dem materialflußorientierten Gozintographen wird jeweils der schrittweise entwickelte zyklensfreie RP-Graph gegenübergestellt. Alle Direktbedarfsbeziehungen sind nacheinander abzuarbeiten, wobei die aktuell betrachtete Direktbedarfsbeziehung durch einen gestrichelten Pfeil hervorgehoben wird.

Die Direktbedarfsbeziehung zwischen den Artikeln 1 und 4 müßte im RP-Graphen durch einen Pfeil von der Ressourcengruppe B zu sich selbst abgetragen werden. Dieser Eintrag würde jedoch einen Zyklus verursachen. Die Existenz von Zyklen ist allerdings nicht erlaubt, da den Artikeln dann keine eindeutigen Dispositionsstufen zugewiesen werden können.⁶³ Aus diesem Grund wird für Ressourcengruppe B ein weiterer Knoten

⁶¹ Vgl. dazu Helber (1994), S. 64 ff., Tempelmeier/Helber (1994), S. 301 und Tempelmeier (1995), S. 309 ff.

⁶² Erstellt in Anlehnung an Helber (1994), S. 67. Bei der Durchführung des Verfahrens bestehen zwei Freiheitsgrade: zum einen die Reihenfolge, in der die Artikel einer Dispositionsstufe betrachtet werden [c)] und zum anderen die Reihenfolge, in der die direkten Oberartikel abgearbeitet werden [e)]. Helber macht hierzu keine Angaben. Da unterschiedliche Reihenfolgen jedoch zu unterschiedlichen RP-Graphen und damit auch zu unterschiedlichen ressourcen-orientierten Dispositionsstufen führen können, wird hier jeweils in der Reihenfolge aufsteigender Artikelnummern vorgegangen. Allerdings ist eine ex ante Angabe eines solchen Reihenfolge-kriteriums nur willkürlich möglich.

⁶³ Vgl. Helber (1994), S. 66.

eingefügt und die Partitionsnummer um Eins erhöht, d.h. es muß ein zweites CLSP für diese Ressourcengruppe gelöst werden.

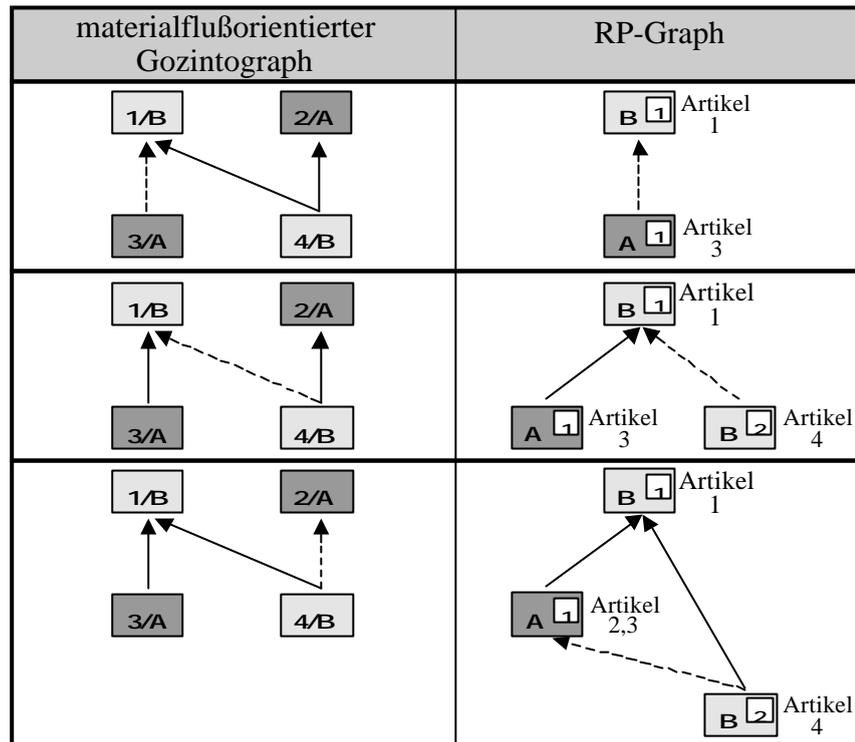


Abb. 10: Beispiel für die Konstruktion eines zyklenfreien Graphen von Ressourcenpartitionen

Da zu jedem Knoten des RP-Graphen bestimmte Artikel korrespondieren, lassen sich nun in einem zweiten Schritt allen Artikeln ressourcenorientierte Dispositionsstufen zuordnen. Als Ergebnis resultiert die in Abb. 11 wiedergegebene modifizierte Erzeugnis- und Prozeßstruktur, deren Analyse zeigt, daß nunmehr weniger (jedoch größere) Losgrößenprobleme vom Typ CLSP entstanden sind.⁶⁴

ressourcenorientierter Gozintograph	Dispositionsstufe	CLSP Nr.	einbezogene Artikel	Ressourcengruppe	verfügbare Kapazität
	0	1	1	B	Gesamtkapazität
	1	2	2, 3	A	Gesamtkapazität
	2	3	4	B	Restkapazität

Abb. 11: Folge von Losgrößenproblemen bei ressourcenorientierten Dispositionsstufen

Durch die zusätzliche Berücksichtigung der Reihenfolgebeziehungen zwischen den Ressourcen bei der Ermittlung der ressourcenorientierten Dispositionsstufen kann demnach ein höherer Grad an "Simultanität" der resultierenden Losgrößenprobleme erreicht werden.⁶⁵ Dies ist jedoch keine Garantie dafür, daß die Problemstrukturierung

⁶⁴ So können die Artikel 2 und 3 im Rahmen eines Losgrößenproblems betrachtet werden.

⁶⁵ Vgl. Helber (1994), S. 69, Helber (1995), S. 12 sowie Tempelmeier (1995), S. 313.

unter Verwendung von ressourcenorientierten Dispositionsstufen stets auch zu einer besseren Lösungsqualität führt als die Problemstrukturierung unter Verwendung von materialflußorientierten Dispositionsstufen.⁶⁶

4.2. Ermittlung modifizierter Kostensätze

Das Grundprinzip des von *Helber* entwickelten Verfahrens besteht somit darin, das mehrstufige Mehrprodukt-Losgrößenproblem mit beschränkten Kapazitäten heuristisch in eine Folge von einstufigen Losgrößenproblemen vom Typ CLSP zu zerlegen, die aufeinander aufbauen und nacheinander gelöst werden. Eine solche dispositionsstufenweise Dekomposition wirft allerdings die Frage auf, wie die aus der Mehrstufigkeit der Erzeugnisstruktur resultierenden kostenmäßigen Interdependenzen zumindest ansatzweise in die Losgrößenplanung für einen übergeordneten Artikel integriert werden können.

Eine besonders leicht zu implementierende Möglichkeit stellt die Anpassung der Kostenparameter dar, weil sie lediglich eine Veränderung der Eingabedaten bewirkt, wobei die Verfahrensstruktur unverändert bleibt.⁶⁷ Mit Hilfe der modifizierten Kostensätze soll im Prinzip abgeschätzt werden, in welchem Ausmaß sich die Rüst- und Lagerkosten der untergeordneten Artikel verändern, wenn für einen übergeordneten Artikel die Losgröße erhöht wird, so daß sie als statische Lenkpreise interpretiert werden können.⁶⁸

Zur Ermittlung der modifizierten Kostensätze greift *Helber* auf ein heuristisches Verfahren von *Heinrich*⁶⁹ zurück, das dieser zur Lösung des dynamischen unkapazitierten Losgrößenproblems bei genereller Erzeugnisstruktur entwickelt hat. Die Grundstruktur dieser Heuristik ist in Abb. 12 wiedergegeben.

Zur Verdeutlichung der Vorgehensweise wird ein Beispiel herangezogen, das auf der in Abb. 8 wiedergegebenen Erzeugnisstruktur basiert, wobei sämtliche Direktbedarfskoeffizienten Eins betragen.⁷⁰ Die Datensituation kann der folgenden Abbildung entnommen werden:

	Kostensätze		Primärbedarfe				
Artikel i	c_{Li}	c_{Ri}	d_{i1}	d_{i2}	d_{i3}	d_{i4}	d_{i5}

⁶⁶ Vgl. Tempelmeier/Helber (1994), S. 304 ff. sowie Tempelmeier (1995), S. 317.

⁶⁷ Die Idee der Kostenparameteranpassung geht auf *Brown* zurück. Vgl. Brown (1967).

⁶⁸ Vgl. Blackburn/Millen (1982), S. 44 ff.

⁶⁹ Zum Verfahren von *Heinrich* vgl. Heinrich/Schneeweiß (1986), S. 150 ff. sowie Heinrich (1987), S. 104 ff.

⁷⁰ Erstellt in Anlehnung an Heinrich (1987), S. 165 ff.

1	6	400	60	60	90	100	90
2	2	800	10	15	30	25	20
3	3	1000	-	-	-	-	-
4	1	100	-	-	-	-	-

Abb. 12: Ausgangsdaten des Beispiels

Das Verfahren kann grob in zwei Phasen unterteilt werden. In Phase I wird aus dem mehrstufigen dynamischen Losgrößenproblem ein mehrstufiges statisches Problem abgeleitet, dessen Entscheidungsvariablen Produktionszyklen T_i für alle Artikel i sind. Diese Produktionszyklen werden heuristisch ermittelt und können dann in Phase II des Verfahrens zur Bestimmung der modifizierten Kostensätze herangezogen werden.

Phase I: Lösung eines statischen unkapazitierten Losgrößenproblems mit genereller Erzeugnisstruktur	
	Bestimmung der durchschnittlichen Periodenbedarfsmengen D_i
	Ermittlung der marginalen Lagerkostensätze e_i
Stufe 1: Ermittlung einer Lösung mit Kopplung der Losauflagen	
	Schritt 1: Bestimmung einer zulässigen Ausgangslösung (Los-für-Los-Politik)
	Schritt 2: Verlängerung der Produktionszyklen
	Schritt 3: Verkürzung der Produktionszyklen
Stufe 2: Verbesserung der Lösung ohne Kopplung der Losauflagen	
Phase II: Bestimmung der modifizierten Kostensätze	

Abb. 13: Grundstruktur der Heuristik von Heinrich⁷¹

Ausgangspunkt der ersten Stufe der Phase I bildet das folgende statische Entscheidungsmodell:

Minimiere die durchschnittlichen Periodenkosten C

$$C = \sum_{i=1}^I \left(\frac{c_{Ri}}{T_i} + \frac{(T_i - 1) * D_i * e_i}{2} \right) \tag{1}$$

unter den Nebenbedingungen

$$\frac{T_i}{T_z} \geq 1 \text{ und ganzzahlig} \quad i = 1, 2, \dots, I; z \in o_i \tag{2}$$

$$T_i \in \{2^k \mid k \in \mathbb{N}_0\} = \{1, 2, 4, 8, 16, 32, \dots\} \quad i = 1, 2, \dots, I.^{72} \tag{3}$$

Die Zielfunktion (1) umfaßt die Rüst- und Lagerkosten pro Periode, die zu minimieren sind. Da es sich um ein statisches Modell handelt, wird für jeden Artikel i ein zeitkonstanter Bedarf D_i unterstellt. Die zeitvarianten Periodenbedarfe der Artikel $d_{i,t}$ müssen demnach zunächst einmal wie folgt in zeitkonstante Bedarfe D_i transformiert werden:⁷³

⁷¹ Erstellt in Anlehnung an Tempelmeier (1995), S. 249.

⁷² Vgl. Heinrich (1987), S. 134 sowie Heinrich/Schneeweiß (1986), S. 158.

⁷³ Vgl. Tempelmeier (1995), S. 251 f.

$$D_i = \begin{cases} \frac{1}{T} \sum_{t=1}^T d_{i,t} & \text{für alle Artikel } i \mid o_i = \emptyset \\ \sum_{z \in o_i} a_{z,i} * D_z & \text{für alle Artikel } i \mid o_i \neq \emptyset \end{cases} \quad (4)$$

Des Weiteren wird angenommen, daß sämtliche Bedarfsmengen jeweils zu Beginn einer Periode vom Lager entnommen werden. Der durchschnittliche systemweite Lagerbestand für Artikel i beträgt mithin $(T_i - 1)D_i / 2$. Zur Bewertung dieses Lagerbestands wird nun der marginale Lagerkostensatz⁷⁴ e_i des Artikels i herangezogen, der sich wie folgt aus dem "vollen" Lagerkostensatz $c_{L,i}$ berechnen läßt:

$$e_i = c_{L,i} - \sum_{z \in u_i} a_{z,i} * c_{L,z} \quad i = 1, 2, \dots, I. \quad (5)$$

Für das obige Beispiel ergeben sich somit die folgenden Durchschnittsbedarfe und marginalen Lagerkostensätze:

Artikel i	D_i	e_i
1	80	2
2	20	1
3	80	3
4	100	1

Abb. 14: Durchschnittsbedarfe und marginale Lagerkostensätze für das Beispiel

Die Nebenbedingung (2) sorgt dafür, daß der Produktionszyklus T_i eines untergeordneten Artikels i nicht kleiner sein darf als die Produktionszyklen T_z seiner direkten Oberartikel z . Auf diese Weise werden nur gekoppelte Losauflagen (nested schedules) zugelassen, so daß die Losauflage für einen untergeordneten Artikel i immer mit der Produktion aller seiner direkten und indirekten Oberartikel einhergeht. Die Nebenbedingung (3) dient lediglich zur Komplexitätsreduktion. Sie besagt, daß als Produktionszyklen T_i lediglich die Glieder einer geometrischen Folge mit der Basis 2 zugelassen sind.⁷⁶

Dieses stationäre Ersatzmodell wird nun heuristisch gelöst. Hierzu sind die in Abb. 15 detailliert beschriebenen Verfahrensschritte zu durchlaufen. Das Ergebnis ist ein Vektor von Produktionszyklen $\mathbf{T} = (T_1, T_2, \dots, T_I)$.

⁷⁴ In der englischsprachigen Literatur ist dafür der Begriff "echelon holding costs" geläufig. Zum Echelon-Lagerkonzept, das erstmals von Clark und Scarf verwendet wurde siehe Clark/Scarf (1960), S. 475 ff, Heinrich (1987), S. 111 ff. sowie Tempelmeier (1995), S. 205 ff.

⁷⁵ Vgl. Tempelmeier (1995), S. 206 sowie Helber (1994), S. 61.

⁷⁶ Heinrich läßt als Basisfaktor b zunächst die Werte $b = 2, 3, 4, \dots$ zu. In seiner Untersuchung hat sich die Basis $b = 2$ jedoch in fast allen Fällen als überlegen gezeigt. Vgl. Heinrich (1987), S. 187 f. Aus diesem Grund werden hier nur Produktionszyklen mit der gemeinsamen Basis $b = 2$ betrachtet.

Phase I - Stufe 1: Ermittlung einer Lösung mit Kopplung der Losauflagen	
Schritt 1: Bestimmung einer zulässigen Ausgangslösung (Los-für-Los-Politik) setze: $T_i := 1 \quad i = 1, 2, \dots, I$ $C_{alt} := \sum_{i=1}^I c_{Ri}$	
Schritt 2: Verlängerung der Produktionszyklen Für alle Artikel i in der Reihenfolge aufsteigender materialflußorientierter Dispositionsstufen	
a) Verlängere probeweise den Produktionszyklus T_i des Artikels i um den Faktor 2, wobei für alle anderen Artikel z die Produktionszyklen unverändert bleiben: setze: $T_i^{probe} := T_i * 2 ; \quad T_z^{probe} := T_z ; \quad z = 1, 2, \dots, I ; \quad z \neq i$	
b) Ermittle die Menge U_i aller direkten und indirekten Unterartikel von Artikel i Für alle Artikel $z \in U_i$	
	Ermittle den Produktionszyklus T_z von Artikel z Falls $T_z < T_i^{probe}$, dann passe den Produktionszyklus wie folgt an: $T_z^{probe} := T_i^{probe}$
c) Berechne die durchschnittlichen Kosten pro Periode für diesen neuen Lösungsvorschlag: $C_{neu} := \sum_{i=1}^I \left(\frac{c_{Ri}}{T_i^{probe}} + \frac{(T_i^{probe} - 1) * D_i * e_i}{2} \right)$ Falls $C_{neu} < C_{alt}$, dann setze: $C_{alt} := C_{neu}; T_i := T_i^{probe}; T_z := T_z^{probe}$ und gehe zu Schritt 2a) sonst betrachte den nächsten Artikel i	
Schritt 3: Verkürzung der Produktionszyklen Für alle Artikel i in der Reihenfolge aufsteigender materialflußorientierter Dispositionsstufen	
a) Ermittle den Produktionszyklus T_i von Artikel i Falls $T_i > 1$, dann verkürze i probeweise um den Faktor 2, wobei für alle anderen Artikel z die Produktionszyklen unverändert bleiben: setze: $T_i^{probe} := T_i / 2 ; \quad T_z^{probe} := T_z ; \quad z = 1, 2, \dots, I ; \quad z \neq i$ sonst betrachte den nächsten Artikel i	
b) Ermittle die Menge O_i aller direkten und indirekten Oberartikel von Artikel i Für alle Artikel $z \in O_i$	
	Ermittle den Produktionszyklus T_z von Artikel z Falls $T_z > T_i^{probe}$, dann passe den Produktionszyklus wie folgt an: $T_z^{probe} := T_i^{probe}$
c) Berechne die durchschnittlichen Kosten pro Periode für diesen neuen Lösungsvorschlag: $C_{neu} := \sum_{i=1}^I \left(\frac{c_{Ri}}{T_i^{probe}} + \frac{(T_i^{probe} - 1) * D_i * e_i}{2} \right)$ Falls $C_{neu} < C_{alt}$, dann setze: $C_{alt} := C_{neu}; T_i := T_i^{probe}; T_z := T_z^{probe}$ und gehe zu Schritt 3a) sonst betrachte den nächsten Artikel i	

Abb. 15: Verfahrensschritte zur Ermittlung einer Lösung mit Kopplung der Losauflagen⁷⁷

Wie der Abb. 16 zu entnehmen ist, führt die Anwendung der Verfahrensschritte auf das Zahlenbeispiel zu den Produktionszyklen $T_1=2, T_2=4, T_3=4$ und $T_4=4$.

⁷⁷ Erstellt in Anlehnung an Tempelmeier (1995), S. 252 ff.

Schritt	Artikel i	Beste Lösung					Versuchsweise Zyklusänderung				
		T ₁	T ₂	T ₃	T ₄	Kosten	T ₁	T ₂	T ₃	T ₄	Kosten
A		1	1	1	1	2300					
B	1	1	1	1	1	2300	2	1	2*	2*	1800
	1	2	1	2	2	1800	4	1	4*	4*	1925
	2	2	1	2	2	1800	2	2	2	2	1410
	2	2	2	2	2	1410	2	4	2	4*	1305
	2	2	4	2	4	1305	2	8	2	8*	1433
	3	2	4	2	4	1305	2	4	4	4	1295
	3	2	4	4	4	1295	2	4	8	4	1650
4	2	4	4	4	1295	2	4	4	8	1483	
C	1	2	4	4	4	1295	1	4	4	4	1415
	2	2	4	4	4	1295	2	2	4	4	1475
	3	2	4	4	4	1295	2	4	2	4	1305
	4	2	4	4	4	1295	2	2	4	2	1400

* Veränderung aufgrund der Einschränkung auf gekoppelte Losauflagen

Abb. 16: Lösung mit Kopplung der Losauflagen für das Beispiel

In der zweiten Stufe der Phase I wird anschließend versucht, diese Lösung dahingehend zu verbessern, daß optimale Losgrößenpläne bei generellen Erzeugnis-strukturen nicht notwendigerweise gekoppelt sein müssen.⁷⁸ Die Restriktion (2) wird somit aufgehoben. Die Produktionszyklen müssen aber nach wie vor Potenzen zur Basis von 2 sein, d.h. Nebenbedingung (3) muß weiterhin beachtet werden.

Zur Beurteilung der Vorteilhaftigkeit einer Verlängerung ($T_i^{\text{probe}} := T_i * 2$) oder einer Verkürzung ($T_i^{\text{probe}} := T_i / 2$) des in Stufe 1 ermittelten Produktionszyklus T_i eines Artikels i werden allerdings nicht, wie zuvor in Stufe 1, die exakten Gesamtkosten berechnet, sondern es wird lediglich eine Abschätzung derjenigen Kostenveränderung vorgenommen, die mit einer Veränderung des Produktionszyklus T_i einhergeht. Hierzu wird die folgende Berechnungsvorschrift herangezogen:⁷⁹

$$\begin{aligned}
\Delta c_i(T_i^{\text{probe}}) &= \frac{c_{Ri}}{T_i} - \frac{c_{Ri}}{T_i^{\text{probe}}} \\
&+ \sum_{z \in O_i} \max\{T_i - T_z; 0\} * a_{iz} * D_z * c_{Lz} / 2 - \sum_{z \in O_i} \max\{T_i^{\text{probe}} - T_z; 0\} * a_{iz} * D_z * c_{Lz} / 2 \\
&+ \sum_{z \in U_i} \max\{T_z - T_i; 0\} * a_{zi} * D_i * c_{Lz} / 2 - \sum_{z \in U_i} \max\{T_z - T_i^{\text{probe}}; 0\} * a_{zi} * D_i * c_{Lz} / 2 \quad (6)
\end{aligned}$$

Die ersten beiden Terme beschreiben die Veränderung der Rüstkosten pro Periode. Der dritte und vierte Term geben die Veränderung der Lagerkosten für Artikel i an, die mit der Veränderung des Produktionszyklus verbunden ist. Für Artikel i , die keine direkten

⁷⁸ In konvergierenden Erzeugnisstrukturen, d.h. wenn jeder Artikel höchstens einen direkten Oberartikel hat, ist die Einhaltung der Kopplungsbedingung dagegen Voraussetzung einer optimalen Lösung. Vgl. Tempelmeier (1995), S. 259.

⁷⁹ Vgl. Tempelmeier (1995), S. 260 sowie Heinrich (1987), S. 152. Bei den auf diese Weise quantifizierten Kostenveränderungen handelt es sich lediglich um Schätzwerte, da bei der Berechnung der Kostenveränderungen lediglich die direkten Ober- und Unterartikel betrachtet werden. Für eine exakte Bestimmung müßten jedoch sämtliche, d.h. direkte und indirekte Ober- und Unterartikel berücksichtigt werden. Vgl. Heinrich (1987), S. 153.

Oberartikel besitzen (Endprodukte), ergibt sich allerdings immer ein Wert von Null. Wird der Produktionszyklus eines Endprodukts i ($o_i \in \emptyset$) verändert, dann verändern sich die Lagerkosten jedoch um

$$(T_i - T_i^{\text{probe}}) * D_i * c_{Li} / 2 \quad \forall i \mid o_i \in \emptyset \quad (7)$$

Wenn die kostenmäßigen Konsequenzen der Veränderung des Produktionszyklus eines Endprodukts abgeschätzt werden sollen, muß die Gleichung (6) demnach stets um die in Beziehung (7) beschriebene Komponente erweitert werden.⁸⁰ Durch die letzten beiden Terme wird schließlich die Lagerkostenveränderung bei den direkten Unterartikeln erfaßt.

Die Vorgehensweise der zweiten Stufe der Phase I kann nun wie folgt beschrieben werden. Ausgehend von der in Stufe 1 ermittelten Lösung ist zunächst für jeden Artikel i sowohl die mit einer Verlängerung als auch die mit einer Verkürzung⁸¹ des Produktionszyklus T_i verbundene Kostenveränderung zu berechnen.⁸² Anschließend wird die maximale Kostenveränderung ermittelt. Falls diese einen positiven Wert annimmt, d.h. noch eine Kostenersparnis erzielt werden kann, wird die Veränderung desjenigen Produktionszyklus realisiert, die zu der maximalen Kostenveränderung geführt hat. Diese Vorgehensweise ist nun so lange zu wiederholen, bis keine Kostenersparnis mehr möglich ist. Die einzelnen Verfahrensschritte der zweiten Stufe der Phase I können mithin wie folgt dargestellt werden:

Phase I - Stufe 2: Verbesserung der Lösung ohne Kopplung der Losauflagen	
Schritt 1: Ermittlung der Kostenveränderungen bei Veränderung der Produktionszyklen Für alle Artikel $i = 1, 2, \dots, I$	
	a) Verlängere probeweise den Produktionszyklus T_i von Artikel i : $T_i^{\text{probe}} := T_i * 2$ und berechne die geschätzte Kostenveränderung $\Delta c_i(T_i^{\text{probe}})$
	b) Ermittle den Produktionszyklus T_i von Artikel i Falls $T_i > 1$, dann verkürze probeweise den Produktionszyklus T_i von Artikel i : $T_i^{\text{probe}} := T_i / 2$ und berechne die geschätzte Kostenveränderung $\Delta c_i(T_i^{\text{probe}})$ sonst betrachte den nächsten Artikel i
Schritt 2: Überprüfung der Vorteilhaftigkeit Ermittle den Artikel i und die Veränderung T_i^{probe} mit der maximalen Kostenveränderung: $T_k^{\text{probe}} = T_i^{\text{probe}} \mid \max \{ \Delta c_i(T_i^{\text{probe}}) \}$ Falls $\Delta c_k(T_k^{\text{probe}}) > 0$, dann setze: $T_k := T_k^{\text{probe}}$ und gehe zu Schritt 1 sonst Abbruch der Stufe 2	

Abb. 17: Verfahrensschritte zur Verbesserung der Lösung ohne Kopplung der Losauflagen⁸³

Wie der Abb. 18 zu entnehmen ist, führt die Anwendung der Verfahrensschritte auf das

⁸⁰ Vgl. Heinrich (1987), S. 152 f. sowie Tempelmeier (1995), S. 260 f.

⁸¹ Eine Verkürzung eines Produktionszyklus ist natürlich nur zugelassen, wenn der bisherige Produktionszyklus T_i größer als eins ist, d.h. falls $T_i > 1$ gilt.

⁸² Im Extremfall ($T_i > 1 \forall i \in \{1, 2, \dots, I\}$) müssen demnach insgesamt $2 * I$ Kostenveränderungen approximiert werden.

⁸³ Erstellt in Anlehnung an Tempelmeier (1995), S. 261.

Zahlenbeispiel zu den Produktionszyklen $T_1=2$, $T_2=8$, $T_3=4$ und $T_4=2$.

Iterations-schritt	Artikel i	T_i	Kostenersparnis bei Verdopplung von T_i	Kostenersparnis bei Halbierung von T_i	geänderter Produktionszyklus
1	1	2	-60	-120	$T_4 = 2$
	2	4	20	-180	
	3	4	-355	-10	
	4	4	-188	55	
2	1	2	-140	-120	$T_2 = 8$
	2	4	20	-160	
	3	4	-355	-10	
	4	2	-55	-50	
3	1	2	-140	-120	keine weitere Kostenersparnis
	2	8	-110	-20	
	3	4	-355	-10	
	4	2	-55	-50	

Abb. 18: Verbesserung der Lösung ohne Kopplung der Losauflagen für das Beispiel

In Phase II des Verfahrens von Heinrich können die so ermittelten Produktionszyklen anschließend zur Ermittlung der modifizierten Kostensätze herangezogen werden. Hierbei werden die Rüst- und Lagerkosten untergeordneter Artikel den Kostensätzen übergeordneter Artikel (Verursacher dieser Kosten) hinzugeschlüsselt. Die Schlüsselung richtet sich dabei u.a. nach dem Verhältnis

$$m_{zi} = \frac{T_z}{T_i} \quad i = 1, 2, \dots, I; z \in u_i \quad (8)$$

der in Phase I ermittelten Produktionszyklen der Artikel.

Die modifizierten Lagerkostensätze c_{Li}^{mod} werden nun sukzessive, beginnend mit den Artikeln auf der numerisch höchsten Dispositionsstufe, anhand von Gleichung (9) ermittelt:⁸⁴

$$c_{Li}^{\text{mod}} = e_i + \sum_{\substack{z \in u_i \\ m_{zi} \geq 1}} c_{Lz}^{\text{mod}} * a_{zi} * m_{zi} + \sum_{\substack{z \in u_i \\ m_{zi} < 1}} c_{Lz} * a_{zi} \quad (9)$$

Für Artikel i , die keine direkten Unterartikel haben ($u_i = \emptyset$), ist der modifizierte Lagerkostensatz c_{Li}^{mod} identisch mit dem marginalen Lagerkostensatz e_i sowie dem vollen Lagerkostensatz c_{Li} , da eine Losauflage für diese Artikel keine Bedarfe an untergeordneten Artikeln und daher auch keine weiteren Kosten verursacht.

Für alle anderen Artikel i (mit $u_i \neq \emptyset$) gilt hingegen:

Ist der Produktionszyklus eines untergeordneten Artikels z größer oder gleich dem Produktionszyklus des direkt übergeordneten Artikels i (gekoppelte Losauflagen), dann wird davon ausgegangen, daß die Lagerung einer zusätzlichen Mengeneinheit von Artikel i ebenfalls eine Erhöhung des Lagerbestands bei Artikel z nach sich zieht. Infolgedessen sind die Lagerkosten solcher Unterartikel z (mit $m_{zi} \geq 1$) auf den

⁸⁴ Vgl. Heinrich/Schneeweiß (1986), S. 164 sowie Helber (1994), S. 63.

Lagerkostensatz des direkten Oberartikels (Verursacher der Lagerkosten) zu überwälzen. c_{Lz}^{mod} gibt dabei diejenigen Lagerkosten an, die für den Artikel z sowie alle seine direkt und indirekt untergeordneten Artikel zusätzlich entstehen, wenn eine Mengeneinheit von Artikel z eine Periode lang gelagert werden muß. Da jedoch letztlich der Lagerkostensatz des Artikels i ermittelt werden soll, muß dieser Kostensatz noch mit dem Direktbedarfskoeffizienten a_{zi} und dem Verhältnis der Produktionszyklen m_{zi} multipliziert werden.⁸⁵

Ist der Produktionszyklus eines untergeordneten Artikels z hingegen kleiner als der des unmittelbar übergeordneten Artikels i (entkoppelte Losauflagen), dann kann davon ausgegangen werden, daß die Lagerentscheidung für den übergeordneten Artikel i nicht auch zu einer Lagerentscheidung für den direkt untergeordneten Artikel z führt. Es entstehen daher auch keine induzierten Lagerkosten. *Heinrich* berücksichtigt im letzten Summanden der Gleichung (9) für derartige Unterartikel z (mit $m_{zi} < 1$) somit nur den vollen Lagerkostensatz c_{Lz} .

Bei der Ermittlung der modifizierten Rüstkostensätze ergibt sich das Problem, daß bei Vorliegen einer generellen Erzeugnisstruktur nicht eindeutig bestimmt werden kann, durch welchen Oberartikel eine Losauflage ausgelöst wird, so daß eine verursachungsgerechte Zuordnung der Rüstkosten nicht möglich ist. *Heinrich* schlägt daher u.a. vor, die Rüstkosten eines Unterartikels z im Verhältnis der Bedarfsmengen

$$h_{zi} = \frac{a_{zi} * D_i}{\sum_{k \in o_z} a_{zk} * D_k} \quad z = 1, 2, \dots, I; i \in o_z \quad (10)$$

auf die direkt übergeordneten Artikel (Verursacher des Rüstvorgangs) zu verteilen,⁸⁶ so daß sich die modifizierten Rüstkostensätze c_{Ri}^{mod} schrittweise, beginnend mit den Artikeln auf der numerisch höchsten Dispositionsstufe, wie folgt berechnen lassen:⁸⁷

$$c_{Ri}^{\text{mod}} = c_{Ri} + \sum_{\substack{z \in u_i \\ m_{zi} \geq 1}} c_{Rz}^{\text{mod}} * \frac{h_{zi}}{m_{zi}} \quad i = 1, 2, \dots, I \quad (11)$$

Hierbei ist allerdings zu beachten, daß die Rüstkosten nur von solchen Unterartikeln z überwälzt werden, deren Produktionszyklus T_z größer oder gleich dem Produk-

⁸⁵ Die Multiplikation mit m_{zi} ist erforderlich, da bei einer durch Artikel i induzierten Losauflage für Artikel z jeweils das (T_z / T_i) -fache der Losgröße des Artikels i produziert wird, und demnach auch entsprechend höhere Lagerkosten anfallen. Vgl. *Heinrich* (1987), S. 160.

⁸⁶ Eine andere Möglichkeit besteht darin, die Rüstkosten eines Unterartikels z proportional zur Anzahl der direkt übergeordneten Artikel umzulegen. Vgl. *Heinrich/Schneeweiß* (1986), S. 164 ff. sowie *Heinrich* (1987), S. 161 ff.

⁸⁷ Vgl. *Heinrich/Schneeweiß* (1986), S. 164 f., *Heinrich* (1987), S. 161 f. sowie *Tempelmeier* (1995), S. 266.

tionszyklus T_i des direkt übergeordneten Artikels i ist (gekoppelte Losauflagen).⁸⁸

Für das Beispiel ergeben sich somit die folgenden modifizierten Kostensätze:

Artikel i	C_{Li}^{mod}	C_{Ri}^{mod}
1	9	1000
2	2	800
3	3	1000
4	1	100

Abb. 19: Modifizierte Kostensätze für das Beispiel

Zur Lösung des ursprünglich dynamischen unkapazitierten Losgrößenproblems mit genereller Erzeugnisstruktur schlägt *Heinrich* nun vor, die in Phase II ermittelten modifizierten Kostensätze in Lösungsverfahren für das einstufige unkapazitierte Einprodukt-Losgrößenproblem einzusetzen, mit denen die Losgrößenbildung dann dispositionstufenweise vorgenommen wird.

Diese Idee wird von *Helber* auf das mehrstufige CLSP übertragen, indem er die modifizierten Kostensätze in das von ihm weiterentwickelte Verfahren von *Dixon* und *Silver* einsetzt, das zur Lösung einstufiger CLSPs herangezogen werden kann. Durch stufenweise sukzessiven Einsatz dieses Verfahrens wird dann das mehrstufige CLSP gelöst.

4.3. Stufenübergreifende Zulässigkeitsprüfung und Kapazitätsglättung durch Rückwärtseinlastung

Die zentrale Schwierigkeit einer sukzessiven Losgrößenplanung für eine generelle Erzeugnisstruktur mit mehrfachen Kapazitätsrestriktionen und stufenübergreifender Ressourcenkonkurrenz besteht darin, daß die einzelnen Losgrößenentscheidungen auf einer höheren Dispositionsstufe nicht nur im Hinblick auf die verfügbare Kapazität der aktuell betrachteten Ressource zulässig sein müssen, sondern gleichzeitig auch noch darauf zu achten ist, daß die gewählte Losgrößenpolitik nicht zu einer unzulässig hohen Kapazitätsbelastung bei Ressourcen führt, die zur Herstellung von direkten und indirekten Unterartikeln der gerade einzuplanenden Artikel benötigt werden.⁸⁹

Wie *Maes*, *McClain* und *Van Wassenhove* gezeigt haben, kann eine solche stufenübergreifende Zulässigkeitsprüfung prinzipiell über die Lösung eines linearen Programms erfolgen.⁹⁰ Bedenkt man jedoch, daß die Zulässigkeitsprüfung bei jeder Entscheidung darüber, ob ein bestimmter Nettobedarf in ein Los aufzunehmen ist,

⁸⁸ Für Unterartikel z , deren Produktionszyklus T_z kleiner als der Produktionszyklus T_i des direkten Oberartikels i ist (entkoppelte Losauflagen), kann davon ausgegangen werden, daß eine Losauflage für den übergeordneten Artikel i nicht auch zu einer Losauflage für den direkt untergeordneten Artikel z führt. In diesem Fall ($m_{zi} < 1$) kann mithin auf eine Überwälzung der Rüstkosten verzichtet werden. Vgl. *Heinrich* (1987), S. 161.

⁸⁹ Vgl. *Helber* (1994), S. 56 und S. 69, *Tempelmeier* (1995), S. 313 sowie *Hahn* (1998), S. 109.

⁹⁰ Vgl. *Maes/McClain/Van Wassenhove* (1991), S. 131 ff.

durchgeführt werden muß,⁹¹ dann ist offensichtlich, daß der LP-Ansatz aufgrund des zu hohen Rechenzeitbedarfs ausscheidet.⁹²

Aus diesem Grund schlägt *Helber* ein heuristisches Verfahren zur Überprüfung der Zulässigkeit vor, mit dem zunächst vor der eigentlichen Losgrößenplanung der Versuch unternommen wird, einen vorläufigen zulässigen Losgrößenplan Q-z für alle Artikel und Perioden zu ermitteln. Wenn dies nicht gelingt, kann mit der Losgrößenheuristik von *Helber* keine Lösung ermittelt werden.⁹³ Andernfalls wird für jede in Betracht gezogene Losgrößenentscheidung erneut versucht, einen neuen vorläufigen zulässigen Losgrößenplan Q-z für alle Artikel und Perioden zu ermitteln. Sofern dies gelingt, wird die gerade betrachtete Losgrößenentscheidung als zulässig angesehen.⁹⁴ In Abb. 20 ist die Grundstruktur dieses Verfahrens wiedergegeben.

Stufenübergreifende Zulässigkeitsprüfung	
Für alle Dispositionsstufen $l = 0, 1, 2, \dots, L$, deren Losgrößenplanung noch nicht abgeschlossen ist	
	Ermittle die Menge R_l aller Ressourcen, die auf der Dispositionsstufe l beansprucht werden Für alle Ressourcen $r \in R_l$, deren Losgrößenplanung noch nicht abgeschlossen ist
	Ermittle die Menge I_{lr} aller Artikel, die auf der Dispositionsstufe l die Ressource r in Anspruch nehmen Für alle Artikel $i \in I_{lr}$
	Ermittle die terminierten Nettobedarfe d_{it} Ermittle die Fertigungsaufträge q_{it} , wobei für die noch nicht verbindlich eingeplanten, d.h. noch keinem Fertigungslos zugeordneten Nettobedarfe zunächst eine bedarfssynchrone Produktion (Los-für-Los-Politik) unterstellt wird
	Ermittle das gesamte Kapazitätsangebot der Ressource r
	Ermittle den Kapazitätsbedarf der Ressource r , der durch Fertigungsaufträge für Artikel verursacht wird, die auf einer Dispositionsstufe $\leq l$ die Ressource r beanspruchen
	Führe einen Kapazitätsabgleich durch, d.h. reduziere das insgesamt zur Verfügung stehende Kapazitätsangebot der Ressource r um den zuvor ermittelten Kapazitätsbedarf
	Kapazitätsglättung durch Rückwärtseinlastung: Falls l der bei der Losgrößenplanung aktuell betrachteten Dispositionsstufe und r der bei der Losgrößenplanung aktuell betrachteten Ressource entspricht, dann: $\hat{t} :=$ aktuelle Planungsperiode sonst: $\hat{t} := 1$ (Beginn des Planungszeitraums) Für alle Periode $t = T, T-1, T-2, \dots, \hat{t}-1$, deren Losgrößenplanung noch nicht abgeschlossen ist
	Ermittle die noch verfügbare Kapazität Kap_{rt} von Ressource r in Periode t
	Solange $Kap_{rt} < 0$ verschiebe Nettobedarfsmengen aus Periode t nach Periode $t-1$
	Ermittle die noch verfügbare Kapazität $Kap_{r\hat{t}}$ von Ressource r in Periode \hat{t} Falls $Kap_{r\hat{t}} \geq 0$, dann betrachte die nächste Ressource die auf der Dispositionsstufe l in Anspruch genommen wird sonst kann kein zulässiger Produktionsplan konstruiert werden; Abbruch der Zulässigkeitsprüfung

Abb. 20: Grundstruktur der stufenübergreifenden Zulässigkeitsprüfung⁹⁵

Wie aus der Abb. 20 deutlich hervorgeht, wird die Zulässigkeitsprüfung ausschließlich

⁹¹ Vgl. Helber (1994), S. 70, Tempelmeier/Helber (1994), S. 303 sowie Helber (1995), S. 12.

⁹² Vgl. Helber (1994), S. 70, Tempelmeier (1995), S. 315 sowie Hahn (1998), S. 137.

⁹³ Daraus folgt jedoch nicht, daß das betrachtete Losgrößenproblem keine Lösung besitzt. Vgl. Helber (1994), S. 70 sowie Helber (1995), S. 12.

⁹⁴ Vgl. Helber (1994), S. 70, Tempelmeier (1995), S. 315 f., sowie Helber (1995), S. 12.

⁹⁵ Erstellt in Anlehnung an Helber (1994), S. 71.

für die noch nicht verbindlich eingeplanten Produktionsmengen vorgenommen. Hierzu ist es zuerst einmal erforderlich, den Kapazitätsbedarf der aktuell betrachteten Ressource zu ermitteln, der durch Fertigungsaufträge für Artikel verursacht wird, die diese Ressource auf einer Dispositionsstufe in Anspruch nehmen, die kleiner oder gleich der gerade betrachteten Dispositionsstufe l ist. Dabei wird für die noch nicht verbindlich eingeplanten, d.h. bisher noch keinem Fertigungsauftrag zugeordneten Nettobedarfe zunächst eine bedarfssynchrone Produktion (Los-für-Los-Politik) angenommen.

Anschließend werden, beginnend mit der letzten Periode, in der die Kapazität der aktuell betrachteten Ressource überlastet ist, Kapazitätsnachfrageüberhänge durch Vorverlagerung von Produktionsmengen in davor liegende Perioden abgebaut (Kapazitätsglättung durch Rückwärtseinlastung).

Sollte sich am Ende herausstellen, daß die Kapazität der aktuell betrachteten Ressource in Periode \hat{t} überlastet ist, so wird angenommen, daß kein vorläufiger zulässiger Losgrößenplan Q-z für alle Artikel und Perioden konstruiert werden kann, und die Zulässigkeitsprozedur wird abgebrochen. Ansonsten wird die Zulässigkeitsprüfung in der zuvor beschriebenen Art und Weise zunächst für alle noch nicht geplanten Ressourcen, die auf der gleichen Dispositionsstufe liegen, anschließend für alle Ressourcen, die auf der nächst tieferen Dispositionsstufe liegen usw. fortgesetzt. Dabei werden jeweils die im Rahmen der Zulässigkeitsprüfung bislang ermittelten vorläufigen Fertigungslose und die hierdurch ausgelösten Sekundärbedarfe einbezogen.

Die prinzipielle Vorgehensweise dieser heuristischen Zulässigkeitsprüfung wird im folgenden anhand eines kleinen Zahlenbeispiels veranschaulicht. Hierzu wird der in Abb. 21 wiedergegebene Ausschnitt aus einer Erzeugnis- und Prozeßstruktur betrachtet.

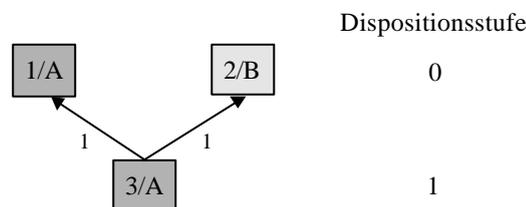


Abb. 21: Ausschnitt aus einer Erzeugnis- und Prozeßstruktur

Die Artikel 1 und 3 werden auf der Ressource A und der Artikel 2 auf der Ressource B bearbeitet. Der Planungszeitraum beträgt vier Perioden. Alle Stückbearbeitungszeiten tb_i und Direktbedarfskoeffizienten a_{iz} sind gleich Eins, die Vorlaufverschiebungen s_i und die Rüstzeiten tr_i sind gleich Null. Das Kapazitätsangebot der Ressource A beträgt in allen Perioden t $Kap_{A_t}^{Angebot} = 45$ [ZE/PE], das der Ressource B $Kap_{B_t}^{Angebot} = 30$ [ZE/PE].

Weiterhin wird angenommen, daß die Losgrößenplanung für die Ressource A auf der Dispositionsstufe 0 bereits abgeschlossen ist und zu dem in Abb. 22 angegebenen Produktionsplan geführt hat.

Periode t	1	2	3	4
q_{1t}	10	10	10	10

Abb. 22: Abgeschlossene Losgrößenplanung für Ressource A auf Dispositionsstufe 0

Für den Artikel 2 mögen die in Abb. 23 aufgeführten Nettobedarfsmengen gelten.

Periode t	1	2	3	4
d_{2t}	20	15	15	20

Abb. 23: Nettobedarfsmengen für Artikel 2

Bei der Losgrößenplanung für die Ressource B auf der Dispositionsstufe 0 hat sich in Periode 2 nun herausgestellt, daß es unter Kostengesichtspunkten sinnvoll ist, die Nettobedarfe des Artikels 2 aus den Perioden 2 und 3 zusammen in Periode 2 zu produzieren, so daß sich für Artikel 2 der folgende vorläufige Losgrößenplan ergibt.

Periode t	1	2	3	4
q_{2t}	20	30	-	20

Abb. 24: Aktuelle Losgrößenplanung für Ressource B auf Dispositionsstufe 0

Diese in Periode 2 in Betracht gezogene Losgrößenentscheidung ist nun zunächst auf ihre Zulässigkeit hinsichtlich der Ressource B zu überprüfen. Da das Kapazitätsangebot der Ressource B in jeder Periode des Planungszeitraums den Kapazitätsbedarf, der sich aus dem vorläufigen Produktionsplan des Artikels 2 ergibt, übersteigt, ist die aktuell betrachtete Losgrößenentscheidung für Artikel 2 im Hinblick auf die Ressource B zulässig.

Die für Artikel 2 in Periode 2 in Erwägung gezogene Losgrößenentscheidung muß nun allerdings auch noch auf ihre Zulässigkeit hinsichtlich der über Artikel 3 vorgelagerten Ressource A überprüft werden. Hierzu ist es zunächst einmal erforderlich, die Nettobedarfe des untergeordneten Artikels 3 aus den Fertigungsaufträgen seiner direkten Oberartikel 1 und 2 abzuleiten. Der bereits fest eingeplante Produktionsplan für Artikel 1 führt zusammen mit dem vorläufigen Produktionsplan für Artikel 2 zu den in Abb. 25 wiedergegebenen Nettobedarfen für Artikel 3.

Periode t	1	2	3	4
d_{3t}	30	40	10	30

Abb. 25: Abgeleitete Nettobedarfsmengen für Artikel 3

Diese Nettobedarfsmengen lassen sich nicht unmittelbar in einen zulässigen Losgrößenplan umsetzen, da die verbleibende Restkapazität der Ressource A nach Berücksichtigung der Produktion des Artikels 1 nur noch 35 Zeiteinheiten pro Periode beträgt. Es besteht jedoch die Möglichkeit, 5 Mengeneinheiten von Artikel 3 aus der überlasteten Periode 2 bereits in der vorgelagerten Periode 1 zu produzieren, so daß sich

für Artikel 3 der folgende vorläufige Losgrößenplan ergibt.

Periode t	1	2	3	4
q_{3t}	35	35	10	30

Abb. 26: Vorläufiger zulässiger Losgrößenplan für Artikel 3

Damit liegt nun ein vorläufiger Losgrößenplan Q - z für alle Artikel und Perioden vor, der sich mit den zur Verfügung stehenden Kapazitäten der Ressourcen realisieren läßt, so daß festgestellt werden kann, daß die aktuell in Betracht gezogene Losgrößenentscheidung für Artikel 2 auch im Hinblick auf die über Artikel 3 vorgelagerte Ressource A zulässig ist.

Da die Verlagerung von Produktionsmengen aus überlasteten Perioden in vorgelagerte Perioden (Kapazitätsglättung durch Rückwärtseinlastung) einen wesentlichen Bestandteil der stufenübergreifenden Zulässigkeitsprüfung darstellt, wird diese Verfahrenskomponente im folgenden ausführlicher erläutert. Die prinzipielle Vorgehensweise ist in Abb. 27 zusammengefaßt.

Die Verlagerung von Produktionsmengen aus einer überlasteten Periode t in die vorgelagerte Periode $t-1$ ⁹⁶ wird in vier Phasen vorgenommen. Dabei wird angestrebt, die überlastete Periode t möglichst nicht "zu stark" zu entlasten, da dies i.d.R. zu Lasten der vorherigen Periode $t-1$ gehen würde. Außerdem sollen durch die Verlagerung nach Möglichkeit keine zusätzlichen Rüstvorgänge induziert werden, da diese die Kapazitätsnachfrage erhöhen und damit den Lösungsraum für später zu treffende Entscheidungen einengen.⁹⁷

In Phase I wird daher zunächst einmal versucht, durch vollständiges Verschieben von Produktionsmengen Rüstvorgänge in den Perioden $t-1$ und t zusammenzufassen, ohne daß dadurch freie Kapazität in Periode t entsteht. Dies ist nur für solche Artikel möglich, für die sowohl in der Periode t als auch in der Periode $t-1$ ein Fertigungsauftrag (vorläufig) eingeplant ist.⁹⁸

Sollte die Periode t nach Abschluß der Phase I immer noch überlastet sein, wird in Phase II versucht, durch vollständiges Verschieben von Produktionsmengen Rüstvorgänge aus der überlasteten Periode t in die Vorperiode $t-1$ zu verlagern, ohne daß dadurch freie Kapazität in Periode t entsteht. Dies ist nur für solche Artikel möglich, für die zwar in der Periode t ein Fertigungslos (vorläufig) eingeplant ist, nicht jedoch in der Periode $t-1$.⁹⁹

⁹⁶ Die Periode $t-1$ kann selbst auch überlastet sein.

⁹⁷ Vgl. Helber (1994), S. 73 f.

⁹⁸ Vgl. Helber (1994), S. 74.

⁹⁹ Vgl. Helber (1994), S. 74.

Kapazitätsglättung durch Rückwärtseinlastung	
Für alle Periode $t = T, T-1, T-2, \dots, \hat{t}-1$, deren Losgrößenplanung noch nicht abgeschlossen ist	
	Ermittle die noch verfügbare Kapazität Kap_t von Ressourcen in Periode t
	Falls $(Kap_t \geq 0)$, dann: Betrachte die vorherige Periode $t-1$ sonst: Phase I – Zusammenfassung von Rüstvorgängen in t und $t-1$ Für alle Artikel $i \in I_T$, für die in Periode t ein Fertigungslas (vorläufig) eingeplant ist ($q_{it} > 0$) in der Reihenfolge aufsteigender Artikelnummern
	Falls $(q_{i,t} > 0)$ und $(th_i * q_{i,t} + tr_i > Kap_t)$, dann: $q_{i,t-1} := q_{i,t} + th_i * q_{i,t} - q_{i,t} = 0$; $Kap_{t-1} := Kap_{t-1} - th_i * q_{i,t}$; $Kap_{t,t} := Kap_{t,t} + th_i * q_{i,t} + tr_i$; sonst: Betrachte den nächsten Artikel
	Falls $(Kap_t = 0)$, dann: Betrachte die vorherige Periode $t-1$ sonst: Phase II – Verlagerung von Rüstvorgängen aus der Periode t nach $t-1$ Für alle Artikel $i \in I_T$, für die in Periode t ein Fertigungslas (vorläufig) eingeplant ist ($q_{it} > 0$) in der Reihenfolge aufsteigender Artikelnummern
	Falls $(q_{i,t} = 0)$ und $(th_i * q_{i,t} + tr_i \leq -Kap_t)$, dann: $q_{i,t-1} := q_{i,t} - q_{i,t} = 0$; $Kap_{t-1,t} := Kap_{t-1,t} - th_i * q_{i,t} - tr_i$; $Kap_{t,t} := Kap_{t,t} + th_i * q_{i,t} + tr_i$; sonst: Betrachte den nächsten Artikel
	Falls $(Kap_t = 0)$, dann: Betrachte die vorherige Periode $t-1$ sonst: Phase III – Verschiebung der Produktionsmenge eines weiteren Artikels k aus Periode t nach $t-1$ Ermittle den Artikel k und die korrespondierende Produktionsmenge q^{nh} , deren Verschiebung aus der Periode t in die Periode $t-1$ zum geringsten Anstieg der Kapazitätsbelastung in Periode $t-1$ führt bei gleichem Kapazitätsanstieg in Periode $t-1$ wähle die Produktionsmenge desjenigen Artikels, die zu der größten Kapazitätsentlastung in Periode t führt und die Kapazitätsüberlastung in Periode t beseitigt
	Falls $(c^{nh} < q_{k,t})$, dann: Überprüfe, ob in der Vorperiode $t-1$ ein Fertigungsauftrag (vorläufig) eingeplant ist Falls $(q_{k,t-1} = 0)$, dann: $q_{k,t-1} := q^{nh}$; $q_{k,t} := q_{k,t} - c^{nh}$; $Kap_{t-1,t} := Kap_{t-1,t} - th_k * q^{nh} - tr_k$; $Kap_{t,t} := Kap_{t,t} + th_k * q^{nh}$; sonst: $q_{k,t-1} := q_{k,t-1} + c^{nh}$; $q_{k,t} := q_{k,t} - q^{nh}$; $Kap_{t-1,t} := Kap_{t-1,t} - th_k * q^{nh}$; $Kap_{t,t} := Kap_{t,t} + th_k * q^{nh}$; sonst: Überprüfe, ob in der Vorperiode $t-1$ ein Fertigungsauftrag (vorläufig) eingeplant ist Falls $(q_{k,t-1} = 0)$, dann: $q_{k,t-1} := q_{k,t}$; $q_{k,t} := 0$; $Kap_{t-1,t} := Kap_{t-1,t} - th_k * q_{k,t} - tr_k$; $Kap_{t,t} := Kap_{t,t} + th_k * q_{k,t} + tr_k$; sonst: $q_{k,t-1} := q_{k,t-1} + q_{k,t}$; $q_{k,t} := 0$; $Kap_{t-1,t} := Kap_{t-1,t} - th_k * q_{k,t}$; $Kap_{t,t} := Kap_{t,t} + th_k * q_{k,t} + tr_k$
	Falls $(Kap_t = 0)$, dann: Betrachte die vorherige Periode $t-1$ sonst: Phase IV – Verlagerungen aus den Phasen I und II rückgängig machen Mache die Schritte aus den Phasen I und II in der Reihenfolge abnehmender Kapazitätsentlastung für die Periode $t-1$ wieder rückgängig, sofern die Periode t dadurch nicht wieder überlastet wird

Abb. 27: Kapazitätsglättung durch Rückwärtseinlastung¹⁰⁰

Ist die Periode t danach immer noch überlastet, wird in Phase III entweder durch vollständiges oder teilweises Verlagern der Produktionsmenge eines weiteren Artikels auf jeden Fall eine zulässige Kapazitätsbelastung für die Periode t herbeigeführt. Hierzu werden der Artikel und die korrespondierende Produktionsmenge ausgewählt, deren Verschiebung aus Periode t in die Periode $t-1$ zu der geringsten zusätzlichen

¹⁰⁰ Erstellt in Anlehnung an Helber (1994), S. 75.

Kapazitätsbelastung für die Periode $t-1$ führt.¹⁰¹ Sollte der Fall auftreten, daß für mehrere Artikel das Verschieben der entsprechenden Produktionsmenge aus der Periode t in die Periode $t-1$ zum gleichen Kapazitätsanstieg in der Periode $t+1$ führt, dann wird die Produktionsmenge desjenigen Artikels gewählt, die zu der größten Kapazitätsentlastung in Periode t führt.¹⁰²

Nach Abschluß der Phase III ist die Kapazitätsüberlastung der Periode t beseitigt. Es kann jedoch der Fall auftreten, daß in der Periode t nun freie Kapazität vorliegt. Dies widerspricht dem Bestreben, den Lösungsraum für später zu treffende Entscheidungen möglichst wenig einzuengen. Sollte dieser Fall auftreten, wird daher in Phase IV versucht, die Schritte aus den Phasen I und II derart wieder rückgängig zu machen, daß die Periode $t-1$ möglichst stark entlastet wird, ohne jedoch die Periode t wieder zu überlasten.¹⁰³

Die Vorgehensweise bei der Kapazitätsglättung durch Rückwärtseinlastung wird im folgenden anhand des in Abb. 28 beschriebenen Beispiels mit vier Artikeln und zwei Perioden veranschaulicht. Die hellen Balken stellen die Gesamtbearbeitungszeiten der jeweiligen Fertigungsaufträge dar, die Balken der korrespondierenden Rüstzeiten sind dunkel unterlegt. Die Kapazitätsgrenze wird durch die gestrichelte Linie abgebildet.

In der Ausgangssituation ist die Periode 2 überlastet ($Kap_{r,2} = -30$), während in Periode 1 noch freie Kapazität zur Verfügung steht ($Kap_{r,1} = 15$). Zunächst wird in Phase I die Produktionsmenge q_{22} von Artikel 2 aus Periode 2 vollständig in die Periode 1 verschoben, da auf diese Weise ein Rüstvorgang "eingespart" werden kann, ohne daß dadurch freie Kapazität in Periode 2 entsteht. Nach der Verlagerung der Produktionsmenge q_{22} aus der überlasteten Periode 2 in die vorherige Periode 1 ist es nun nicht mehr möglich, Rüstvorgänge in den Perioden 1 und 2 zusammenzufassen, ohne daß dadurch freie Kapazität in Periode 2 entsteht.¹⁰⁴ Mithin ergibt sich das in Abb.28 dargestellte Ergebnis der Phase I.

¹⁰¹ Vgl. Helber (1994), S. 74.

¹⁰² Dies stellt eine Verbesserung gegenüber der Vorgehensweise von Helber dar, der die Artikel in der Phase III genauso wie in den Phasen I und II in der Reihenfolge aufsteigender Artikelnummern betrachtet. Vgl. Helber (1994), S. 74. Denn je stärker die Kapazität der Periode t (bei gleichem Kapazitätsanstieg in der Periode $t+1$) entlastet wird, desto stärker kann die Periode $t-1$ in der sich anschließenden Phase IV wieder entlastet werden und umso eher kann ein vorläufiger zulässiger Losgrößenplan $Q-z$ für alle Artikel und Perioden ermittelt werden. Vgl. dazu das Zahlenbeispiel in Abb. 28.

¹⁰³ Vgl. Helber (1994), S. 77 f.

¹⁰⁴ Wenn man die Artikel nicht in der Reihenfolge aufsteigender Artikelnummern betrachten würde, wäre es denkbar, zunächst die Produktionsmenge q_{42} von Artikel 4 aus Periode 2 vollständig in die Periode 1 zu verschieben. Damit wäre die Kapazitätsüberlastung der Periode 2 bereits am Ende der Phase I beseitigt, so daß keine weitere Phase mehr durchlaufen werden müßte.

Artikel i	Stückbearbeitungszeit tb_i [ZE/ME]	Rüstzeit tr_i [ZE]	Artikel i	Periode t	Losgröße q_{it} [ME]	Gesamtbearbeitungszeit $Tb_{it} = q_{it} * tb_i$ [ZE]
1	1	5	1	2	10	10
2	1	5	2	1	10	10
3	1	5	2	2	5	5
4	1	25	3	1	5	5
			3	2	70	70
			4	1	35	35
			4	2	5	5

Kapazitätsangebot
in Periode 1 und 2: 100 [%]

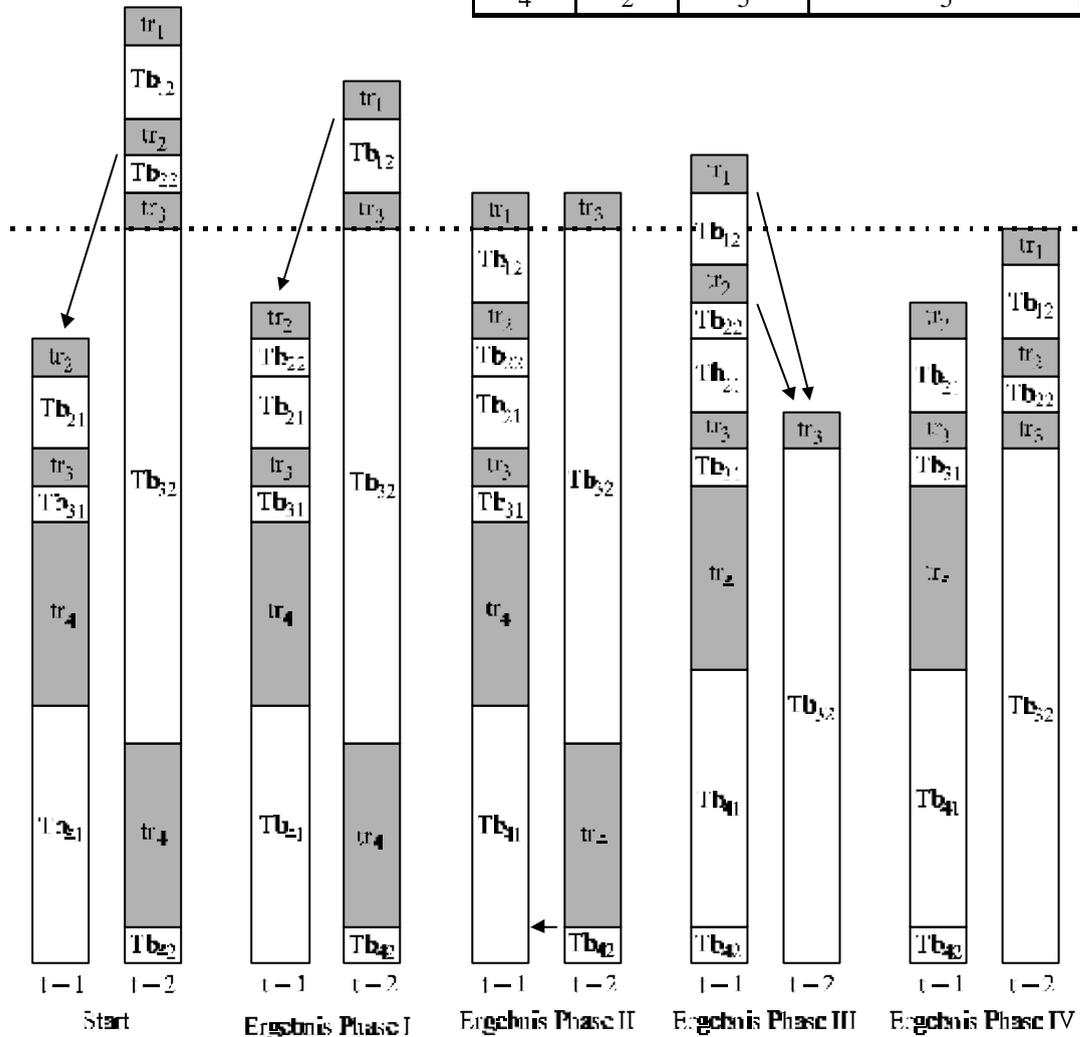


Abb. 28: Beispiel für eine Kapazitätsglättung durch Rückwärtseinlastung

Da die Periode 2 jedoch immer noch überlastet ist ($Kap_{r,2} = -20$), wird in Phase II versucht, vollständige Produktionsmengen für solche Artikel aus der Periode 2 in die Periode 1 zu verlagern, für die in Periode 1 kein Fertigungsauftrag (Rüstvorgang) eingeplant ist. Dabei ist allerdings wiederum zu beachten, daß durch die Verlagerung keine freie Kapazität in Periode 2 entstehen darf. Dies ist in dem Beispiel nur für den Artikel 1 möglich, so daß sich das in Abb. 28 wiedergegebene Ergebnis der Phase II ergibt.

Da die Periode 2 nach Abschluß der Phase II immer noch überlastet ist ($Kap_{r,2} = -5$), wird in Phase III entweder durch vollständiges oder teilweises Verlagern der Produktionsmenge eines weiteren Artikels auf jeden Fall eine zulässige Kapazitäts-

belastung für die Periode 2 hergestellt. In dem Beispiel wird die gesamte Produktionsmenge q_{42} von Artikel 4 aus Periode 2 in die Periode 1 geschoben. Die teilweise Verlagerung der Produktionsmenge q_{32} (5 ME von den 70 ME) von Artikel 3 aus Periode 2 in die Periode 1 würde zwar zum gleichen Kapazitätsanstieg in Periode 1 führen (5 ZE), allerdings würde die Kapazität in Periode 2 dadurch weniger entlastet (5 ZE statt 30 ZE).¹⁰⁵ Damit ergibt sich das in Abb. 28 dargestellte Ergebnis der Phase III.

Nach Abschluß der Phase III ist die Periode 2 jedoch nicht mehr voll ausgelastet ($Kap_{r,2} = 25$). Dies widerspricht dem Bestreben, möglichst geringe Produktionsmengen im Rahmen der Kapazitätsglättung zeitlich vorzuverlagern. Aus diesem Grund wird in Phase IV abschließend der Versuch unternommen, einzelne Schritte der Phasen I und II derart wieder rückgängig zu machen, daß die Periode 1 möglichst stark entlastet und gleichzeitig die Periode 2 nicht wieder überlastet wird. In dem Beispiel können die beiden Schritte der Phasen I und II wieder rückgängig gemacht werden. Als Ergebnis der Phase IV ergibt sich damit die in Abb. 28 dargestellte Situation, die offensichtlich kapazitätsmäßig zulässig ist.

4.4. Sukzessive Verbesserung der Ausgangslösung

Im folgenden Abschnitt wird nun beschrieben, wie die in Phase I des Verfahrens erzeugte zulässige Ausgangslösung für alle Artikel und Perioden sukzessiv verbessert werden kann. Hierzu wird eine Folge von einstufigen CLSPs betrachtet, die durch eine Modifikation des heuristischen Verfahrens von *Dixon* und *Silver*¹⁰⁶ gelöst werden.¹⁰⁷ In Abb. 29 ist die Grobstruktur dieses Verbesserungsverfahrens dargestellt.

Die grundsätzliche Vorgehensweise des heuristischen Verfahrens von *Dixon* und *Silver* besteht darin, daß der Losgrößenplan zeitlich nach Produktionsperioden geordnet aufgebaut wird, wobei als Produktionsmengen $q_{i,t}$ zunächst die Nettobedarfsmengen $d_{i,t}$ der einzelnen Perioden festgelegt werden.¹⁰⁸ Anschließend werden in aufsteigender Folge alle Perioden t von 1 bis $T-1$ betrachtet. In jeder Periode t werden die Losgrößen $q_{i,t}$ der Artikel $i \in I_{1,t}$ so lange um die Nettobedarfsmengen künftiger Perioden $\tau > t$ erhöht, wie dadurch die relevanten Kosten gesenkt werden können oder eine Kapazitätsüberlastung der verbleibenden Perioden $t+1$ bis T beseitigt wird.¹⁰⁹

¹⁰⁵ Infolgedessen wäre es nun nicht mehr möglich, die Kapazitätsüberlastung der Periode 1 ($Kap_{r,1} = 10$) in der sich anschließenden Phase IV wieder zu beseitigen, so daß es bei teilweiser Verschiebung der Produktionsmenge q_{32} von Artikel 3 nicht mehr möglich wäre, einen vorläufigen zulässigen Losgrößenplan für alle Artikel und Perioden zu ermitteln.

¹⁰⁶ Vgl. dazu *Dixon/Silver* (1981), S. 23 ff.

¹⁰⁷ Das Verfahren von *Dixon* und *Silver* ist ursprünglich für einstufige CLSPs ohne Rüstzeiten konzipiert. Die Modifikationen erlauben es, mehrstufige CLSPs mit Rüstzeiten zu lösen.

¹⁰⁸ Damit wird u.U. von einem unzulässigen Losgrößenplan ausgegangen.

¹⁰⁹ Vgl. *Dixon/Silver* (1981), S. 24 ff.

<i>Sukzessive Verbesserung der Ausgangslösung</i>	
Für alle Kombinationen von Kostensätzen und Dispositionsstufen aus Phase 0	
	Für alle Dispositionsstufen $l = 0, 1, 2, \dots, L$
	Ermittle die Menge R_l aller Ressourcen, die auf der Dispositionsstufe l beansprucht werden Für alle Ressourcen $r \in R_l$
	Ermittle die Menge $I_{l,r}$ aller Artikel, die auf der Dispositionsstufe l die Ressource r in Anspruch nehmen Für alle Artikel $i \in I_{l,r}$
	Ermittle die terminierten Nettobedarfe d_{it} Setze die Fertigungsaufträge q_{it} gleich den terminierten Nettobedarfen d_{it} $q_{it} := d_{it} \quad \forall t = 1, 2, \dots, T$ (<i>Los-für-Los-Politik</i>)
	Löse für die Artikel $i \in I_{l,r}$ ein CLSP mit Rüstzeiten in Anlehnung an das heuristische Verfahren von <i>Dixon</i> und <i>Silver</i> unter Berücksichtigung der Kapazitätsrestriktionen vorgelagerter Ressourcen

Abb. 29: Grobstruktur der sukzessiven Verbesserung der Ausgangslösung¹¹⁰

Um zu prüfen, ob die relevanten Kosten gesenkt werden können, wenn die Reichweite eines Loses erhöht wird, und um festzulegen, in welcher Reihenfolge die Lose der einzelnen Artikel $i \in I_{l,r}$ zu vergrößern sind, führen *Dixon* und *Silver* ein Kriterium ein, das als Kostensenkungspotential interpretiert werden kann. Als Ausgangspunkt für die Herleitung dieser Prioritätsziffer wird das *Silver-Meal*-Kriterium herangezogen, bei dem die gesamten Kosten eines Loses auf die Anzahl der durch dieses Los versorgten Perioden bezogen werden.¹¹¹ Wird für Artikel i in Periode γ ein Los aufgelegt, das die Nettobedarfe bis einschließlich der Periode j deckt, verursacht dies Kosten pro versorgter Periode $C_{i\gamma j}^{Per}$ in Höhe von:

$$C_{i\gamma j}^{Per} = \frac{C_{R_i} + C_{L_i} * \sum_{t=\gamma}^j (t - \gamma) * d_{it}}{\sum_{t=\gamma}^j b_{it}} \quad \text{mit } b_{it} = \begin{cases} 1, & \text{falls } d_{it} > 0 \\ 0, & \text{falls } d_{it} = 0 \end{cases} \quad \gamma \leq j. \quad (12)$$

Sind keine Kapazitätsbeschränkungen zu berücksichtigen, dann ist die Losgröße eines für Artikel i in Periode γ aufgelegten Loses so lange um zeitlich aufeinanderfolgende Nettobedarfsmengen zu vergrößern, wie dadurch die Kosten je versorgter Periode sinken oder gleich bleiben, d.h. so lange

$$(C_{i\gamma, j-1}^{Per} - C_{i\gamma j}^{Per}) \geq 0 \quad (13)$$

gilt.

¹¹⁰ Erstellt in Anlehnung an Helber (1994), S. 80.

¹¹¹ Vgl. Silver/Meal (1973), S. 64 ff. An dieser Stelle könnten allerdings auch andere Kriterien herangezogen werden. Zu weiteren Kriterien siehe Ortman/Siebeking (2000).

Ist die Kapazität einer Ressource beschränkt, dann kann es zu Konflikten kommen, wenn mehrere Artikel in derselben Periode auf dieser Ressource bearbeitet werden sollen. In einer derartigen Situation besteht die Möglichkeit, daß nicht für jeden Artikel $i \in I_{1T}$ der Produktionsplan realisiert werden kann, für den die Kosten pro versorgter Periode ihr Minimum annehmen.¹¹² Um der Konkurrenz um die knappe Ressource Rechnung zu tragen, beziehen *Dixon* und *Silver* die Veränderung der Kosten je versorgter Periode bei Vergrößerung des Loses $q_{i\gamma}$ um die Nettobedarfsmenge d_{ij} auf die damit verbundene Erhöhung der Inanspruchnahme der knappen Ressource (zusätzlicher Kapazitätsbedarf):¹¹³

$$d_{i\gamma j} = \frac{C_{i\gamma, j-1}^{\text{Per}} - C_{i\gamma j}^{\text{Per}}}{\Delta \text{Kap}_{i\gamma j}^{\text{Bedarf}}} \quad \text{mit} \quad \Delta \text{Kap}_{i\gamma j}^{\text{Bedarf}} = \begin{cases} \text{tb}_i * d_{ij} + \text{tr}_i, & \text{falls } q_{i\gamma} = 0 \\ \text{tb}_i * d_{ij}, & \text{falls } q_{i\gamma} > 0 \end{cases} \quad (14)$$

Mithin bezeichnet $\delta_{i\gamma j}$ die marginale Kostenveränderung pro zusätzlich eingesetzter Kapazitätseinheit. Ist diese Größe positiv, dann sinken die Kosten pro versorgter Periode bei Verwendung der nächsten Kapazitätseinheit zur Produktion des Artikels i , d.h. die Vergrößerung des Loses $q_{i\gamma}$ um den Nettobedarf d_{ij} ist vorteilhaft. Es wird demnach jeweils die Losgröße $q_{i\gamma}$ desjenigen Artikels $i \in I_{1T}$ um einen vollständigen künftigen Nettobedarf vergrößert, für den die Prioritätsziffer $\delta_{i\gamma j}$ den größten positiven Wert annimmt.¹¹⁴

Um sicherzustellen, daß die einzelnen Losgrößenentscheidungen nicht zu einer unzulässig hohen Kapazitätsbelastung der Ressourcen führen, wird für jede in Betracht gezogene Losgrößenentscheidung allerdings zunächst einmal versucht, im Rahmen der stufenübergreifenden Zulässigkeitsprüfung einen vorläufigen zulässigen Losgrößenplan Q-z für alle Artikel und Perioden zu ermitteln. Sollte dies nicht gelingen, wird die betrachtete Losgrößenentscheidung als unzulässig angesehen und kann dementsprechend nicht realisiert werden. Andernfalls wird die betrachtete Losgrößenentscheidung verbindlich eingeplant und der zu ihrer Überprüfung erzeugte vollständige zulässige Losgrößenplan Q-z als neuer vorläufiger Plan Q-z gespeichert. Er stellt damit die Ausgangslösung der weiteren Schritte dar.¹¹⁵

Die Losgrößenplanung für eine Periode t wird beendet, wenn die beiden folgenden

¹¹² Vgl. Dixon/Silver (1981), S. 24.

¹¹³ Vgl. Dixon/Silver (1981), S. 24 f. Die Gleichung (14) wurde gegenüber der ursprünglichen Fassung etwas abgewandelt, da *Dixon* und *Silver* keine Rüstzeiten zulassen. Vgl. Helber (1994), S. 81.

¹¹⁴ Vgl. Dixon/Silver (1981), S. 25, Kistner/Steven (1993), S. 82 ff., Helber (1994), S. 81 sowie Tempelmeier (1995), S. 188 ff.

Bedingungen erfüllt sind: zum einen lassen sich durch Vergrößern von Fertigungsaufträgen $q_{i,t}$ in Periode t keine Kostenersparnisse mehr realisieren, ohne daß die Planung gemäß der stufenübergreifenden Zulässigkeitsprüfung unzulässig wird, und zum anderen erfordert auch der zur Zulässigkeitsüberprüfung der zuletzt realisierten Losgrößenentscheidung erzeugte vorläufige zulässige Losgrößenplan $Q-z$ keine Verschiebung von Produktionsmengen aus der Periode $t+1$ in die Periode t .¹¹⁶

Wenn die zweite Bedingung nicht erfüllt ist, kann die Losgrößenbildung in Periode t noch nicht abgeschlossen werden, da sonst für die verbleibenden Perioden $t+1$ bis T keine zulässige Lösung mehr ermittelt werden könnte. In diesem Fall muß die Kapazität der Periode t zur Einlastung weiterer künftiger Nettobedarfsmengen eingesetzt werden, auch wenn dadurch keine Kostensenkung mehr erreicht werden kann und sogar höhere Kosten in Kauf genommen werden müssen. Dies geschieht so lange, bis die Lösbarkeit für die verbleibenden Perioden $t+1$ bis T sichergestellt ist. Dies ist genau dann der Fall, wenn es im Rahmen der für die zuletzt realisierte Losgrößenentscheidung durchgeführten Zulässigkeitsprüfung nicht notwendig war, Produktionsmengen aus der Periode $t+1$ in die Periode t zu verlagern.¹¹⁷

Zur Herstellung der Lösbarkeit für die verbleibenden Perioden $t+1$ bis T kann es zunächst einmal erforderlich sein, die Losgrößen $q_{i,t}$ in Periode t um weitere vollständige Nettobedarfsmengen zu erhöhen. Dabei wird stets die Losgröße $q_{i,t}$ desjenigen Artikels $i \in I_{1,t}$ ausgewählt, für den der marginale Anstieg¹¹⁸ der Kosten pro zusätzlich eingesetzter Kapazitätseinheit gemäß Beziehung (14) am geringsten ist.¹¹⁹

Wenn es entweder für keinen Artikel $i \in I_{1,t}$ gemäß der stufenübergreifenden Zulässigkeitsprüfung mehr zulässig ist, die Losgröße $q_{i,t}$ in Periode t um einen vollständigen künftigen Nettobedarf zu vergrößern oder das Vorziehen eines vollständigen künftigen Periodenbedarfs die Zulässigkeit für die verbleibenden Perioden $t+1$ bis T herbeiführen würde, wird geprüft, ob die Zulässigkeit für die Perioden $t+1$ bis T (auch) durch das teilweise Vorziehen eines künftigen Nettobedarfs erreicht werden kann.¹²⁰

Falls sich für mindestens einen Artikel $i \in I_{1,t}$ gemäß der stufenübergreifenden Zulässigkeitsprüfung eine künftige Nettobedarfsmenge $d_{i,j}$ entweder vollständig ($d^{\min} = d_{i,j}$) und/ oder teilweise ($d^{\min} < d_{i,j}$) vorziehen läßt, so daß danach die Lösbarkeit für die

¹¹⁵ Vgl. Helber (1994), S. 81.

¹¹⁶ Vgl. Helber (1994), S. 81.

¹¹⁷ Vgl. Helber (1994), S. 82.

¹¹⁸ Die Erhöhung der Reichweite eines Loses kann an dieser Stelle nur noch zu Kostenerhöhungen führen.

¹¹⁹ Vgl. Helber (1994), S. 82.

Perioden $t+1$ bis T hergestellt ist, wird diejenige Möglichkeit realisiert, die zu dem geringsten absoluten Kostenanstieg in Periode t

$$\Delta C_t = \begin{cases} d^{\min} * c_{Li} * (j-t) & , \text{ falls } q_{it} > 0 \\ d^{\min} * c_{Li} * (j-t) + c_{Ri} & , \text{ falls } q_{it} = 0 \end{cases} \quad (15)$$

führt.¹²¹

Für Probleme mit Rüstzeiten kann aufgrund des heuristischen Verfahrens zur stufenübergreifenden Zulässigkeitsprüfung der Fall auftreten, daß kein Artikel $i \in I_l$ gefunden werden kann, für den die Losgröße q_{it} in Periode t gemäß der stufenübergreifenden Zulässigkeitsprüfung derart um eine vollständige künftige Nettobedarfsmenge oder eines Teils davon vergrößert werden kann, daß danach die Lösbarkeit für die verbleibenden Perioden $t+1$ bis T hergestellt ist. In diesem Fall werden in Periode t die Losgrößen q_{it} des zur Zulässigkeitsüberprüfung der zuletzt realisierten Losgrößenentscheidung erzeugten Losgrößenplans Q - z realisiert.¹²²

Damit ist die Losgrößenplanung für die Periode t abgeschlossen, und es wird die nächste Periode $t+1$ betrachtet. In Abb. 30 ist die Vorgehensweise des soeben beschriebenen heuristischen Verfahrens zur Lösung einstufiger CLSPs mit Rüstzeiten und vorgelagerten Ressourcen nochmals anschaulich zusammengefaßt.

Kombiniert man die beiden Aspekte der Sortierung der Erzeugnis- und Prozeßstruktur mit den beiden Berechnungsmöglichkeiten für die Kostenparameter, dann lassen sich vier verschiedene Varianten des heuristischen Lösungsverfahrens von *Helber* definieren.¹²³ *Helber* und *Tempelmeier/Helber* haben in numerischen Experimenten festgestellt, daß keine dieser Verfahrensvarianten die anderen in der Weise dominiert, daß sie immer die beste heuristische Lösung findet.¹²⁴ Da es demnach nicht möglich ist, im voraus zu sagen, welche Verfahrensvariante für eine gegebene Problemstellung zu dem besten Ergebnis führt, schlägt *Helber* vor, stets alle vier Varianten des Verfahrens einzusetzen und die insgesamt beste Lösung zu ermitteln. Diese Lösungsstrategie ist angesichts des relativ geringen Rechenaufwands problemlos realisierbar.¹²⁵

¹²⁰ Vgl. *Helber* (1994), S. 82.

¹²¹ Vgl. *Helber* (1994), S. 82.

¹²² Vgl. *Helber* (1994), S. 82.

¹²³ Materialflußorientierte Dispositionsstufen/unmodifizierte Kostensätze, materialflußorientierte Dispositionsstufen/modifizierte Kostensätze, ressourcenorientierte Dispositionsstufen/unmodifizierte Kostensätze, ressourcenorientierte Dispositionsstufen/modifizierte Kostensätze.

¹²⁴ Vgl. *Helber* (1994), S. 116 f. sowie *Tempelmeier/Helber* (1994), S. 304 ff.

¹²⁵ Vgl. *Helber* (1994), S. 138 sowie *Tempelmeier/Helber* (1994), S. 305 f. sowie S. 310.

<i>Lösung eines CLSPs mit Rüstzeiten in Anlehnung an das Verfahren von Dixon und Silver</i>	
Für alle Perioden $t = 1, 2, \dots, T-1$	
<p>Schritt 1: Vorziehen vollständiger künftiger Nettobedarfsmengen Ermittle den Kapazitätsfehler DK_t, der für den vorläufigen zulässigen Lösungsplan Q^z aus der Periode $t+1$ in die Periode t verschoben wird.</p> <p>Betrachte die Artikel $i \in I_{t+1}$, deren Lösgrößen $q_{i,t}$ in Periode t gemäß der stufenübergreifenden Zulässigkeitsprüfung um einen vollständigen künftigen Nettobedarf vergrößert werden können:</p> <ul style="list-style-type: none"> 1. Ermittle den Artikel i_{opt}, für den die Vergrößerung des Loses $q_{i_{opt},t}$ in Periode t um den nächsten vollständigen Nettobedarf $d_{i_{opt}}$ zu der größten marginalen Kostenersparnis $\delta_{opt,t}$ führt 2. Ermittle den Kapazitätsfehler $DK_{opt,t}$, der für den vorläufigen zulässigen Lösungsplan Q^z aus der Periode $t+1$ in die Periode t verschoben werden muß, wenn die Reichweite des Loses für den Artikel i_{opt} vergrößert würde. <p>Falls $(\delta_{opt,t} \geq 0)$ oder $[(\delta_{opt,t} < 0) \text{ und } (DK_{opt,t} > 0) \text{ und } (DK_t > 0)]$, dann</p> <ul style="list-style-type: none"> 1. vergrößere das Los $q_{i_{opt},t}$ um den nächsten vollständigen Nettobedarf $d_{i_{opt}}$, 2. speichere den zur Zulässigkeitsüberprüfung dieser Lösgrößenentscheidung erzeugten vollständigen zulässigen Lösungsplan Q^z als neuen vorläufigen Plan Q^z 3. und gehe zu Schritt 1 <p>Falls kein solcher Artikel existiert oder $[(\delta_{opt,t} < 0) \text{ und } (DK_{opt,t} = 0)]$, dann gehe zu Schritt 2</p>	<p>Schritt 2: Lösbarkeit für die Perioden $t+1$ bis T sicherstellen Falls $(DK_t = 0)$, dann betrachte die nächste Periode $t+1$ sonst betrachte die Artikel $i \in I_{t+1}$, deren Lösgrößen $q_{i,t}$ in Periode t gemäß der stufenübergreifenden Zulässigkeitsprüfung um einen vollständigen künftigen Nettobedarf ($d_i^{(t)} = d_i$) und oder eines Teils davon ($d_i^{(t)} < d_i$) vergrößert werden können, so daß danach die Lösbarkeit für die Perioden $t+1$ bis T hergestellt ist:</p> <ul style="list-style-type: none"> 1. Ermittle den Artikel i_{opt} und die korrespondierende Bedarfsmenge $d_i^{(t)}$, deren Aufnahme in das Los $Q_{opt,t}$ in der Periode t zu dem geringsten absoluten Kostenanstieg in Periode t führt und die Kapazitätsüberlastung der Periode t beseitigt <p>Falls ein solcher Artikel existiert, dann</p> <ul style="list-style-type: none"> 1. vergrößere das Los $q_{i_{opt},t}$ um die entsprechende Bedarfsmenge $d_i^{(t)}$, 2. speichere den zur Zulässigkeitsüberprüfung dieser Lösgrößenentscheidung erzeugten vollständigen zulässigen Lösungsplan Q^z als neuen vorläufigen Plan Q^z 3. und betrachte die nächste Periode $t+1$ <p>sonst realisiere in Periode t die Lösgrößen $q_{i,t}$ des letzten zulässigen Lösungsplans Q^z und betrachte die nächste Periode $t+1$</p>

Abb. 30: Verfahren zur Lösung einstufiger CLSPs mit Rüstzeiten und vorgelagerten Ressourcen¹²⁶¹²⁶ Erstellt in Anlehnung an Helber (1994), S. 83.

5. Datenbankgestützte Implementation der Heuristik von *Helber*

Zur datenbankgestützten Implementation einer kapazitätsorientierten Losgrößenplanung ist es zunächst einmal erforderlich, das in Kapitel 3.3 entwickelte relationale Datenmodell anzulegen. Hierzu werden die Relationen unter Verwendung von SQL-Befehlen¹²⁷ in der ORACLE-Datenbank erzeugt.¹²⁸ Um das Planungsproblem mit Hilfe der Heuristik von *Helber* einer Lösung zugänglich zu machen, sind darüber hinaus die in Kapitel 4 ausführlich beschriebenen Algorithmen in PL/SQL-Prozeduren zu überführen.¹²⁹

Die Programmsteuerung erfolgt über eine grafische Benutzeroberfläche, die unter MS-ACCESS entwickelt wurde. Der Datentransfer wird über einen ODBC-Treiber realisiert. Abb. 31 zeigt das Menü des Programms, das die Möglichkeit bietet, Lösungsverfahren auszuwählen¹³⁰, weitere Formulare zu aktivieren und Prozeduren anzustoßen.

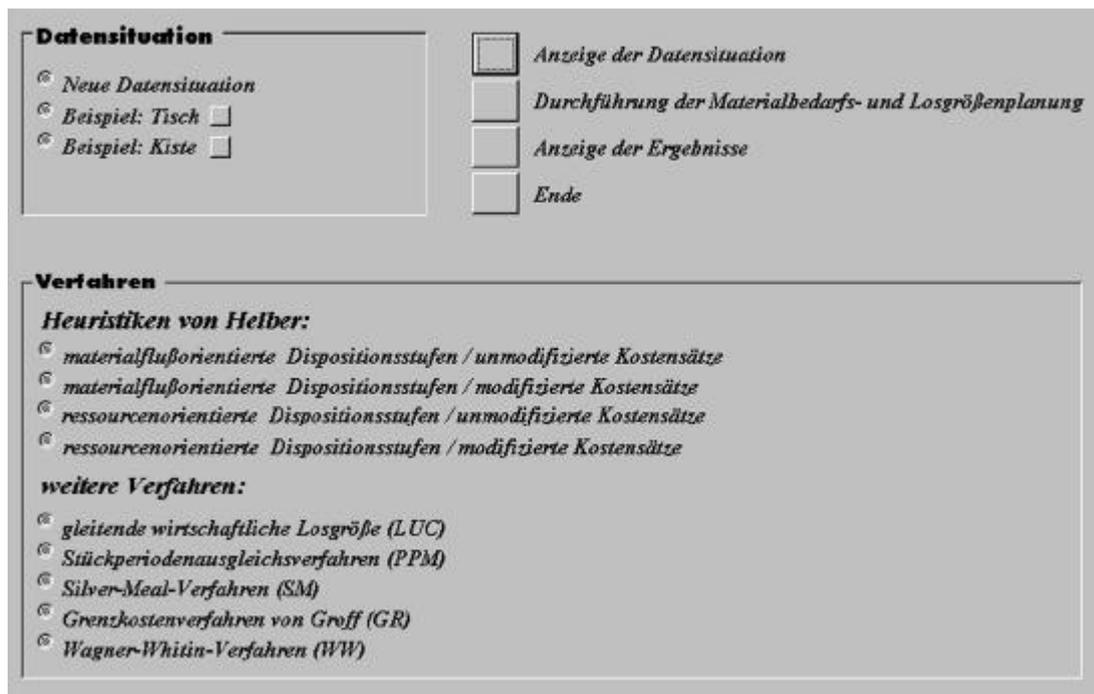


Abb. 31: Menü des Programms

Zunächst muß entweder eine der vorgegebenen Beispielsituationen ausgewählt oder eine neue Datensituation angelegt werden. Die jeweilige Datensituation wird durch zwei Eingabeformulare reflektiert (Abb. 32 und Abb. 33).

¹²⁷ Siehe hierzu Marsch/Fritze (1995).

¹²⁸ Zu den einzelnen SQL-Befehlen siehe Ortman (1998), Anhang sowie Siebeking (1998), Anhang.

¹²⁹ Zu den einzelnen PL/SQL-Prozeduren siehe Ortman (1998), Anhang sowie Siebeking (1998), Anhang.

¹³⁰ Neben den vier Verfahrensvarianten von *Helber* kann auch eine der am häufigsten eingesetzten einstufigen unkapazitierten Losgrößenheuristiken oder der Wagner-Whitin-Algorithmus gewählt werden.

Eigenartikel

Artikel ID:

Bezeichnung:

Vorlaufzeit: Typ:

Maschinengruppen ID:

Arbeitsgang:

Bearbeitungszeit: Rüstzeit:

Lagerkosten: Rüstkosten:

Datensatz: von 4

Fremdartikel

Artikel ID:

Bezeichnung:

Lieferfrist: Typ:

Lagerkosten: Bestellkosten:

Datensatz: von 1

Direktbedarf

	Ober Art ID	Unter Art ID	Menge
▶	1	1	0,5
4	2		3
3	1		0,25
4	3		2
5	3		5
*			

Kundenauftrag

	Auftrag_ID	Art_ID	Menge	Datum
▶	2	4	30	5
3	5		10	5
4	4		30	5
5	4		20	7
5	5		50	7
6	5		20	7
7	4		60	8
*				

Abb. 32: Eingabeformular 1

Maschine

	Maschine ID	Bezeichnung	Masch_Gr_ID
▶	1	Montageplatz_1	A
2		Saage_1	B
*			

Maschinengruppe

	Masch_Gr_ID	Bezeichnung
▶	A	Montieren
B		Saegen
*		

Kalender

	Datum	Stunden
▶	2	8
3		8
4		8
5		6
1		8
6		8
7		8
8		8
9		8
*		

Planung

Planungsbeginn

Planungsende

Abb. 33: Eingabeformular 2

Nach der Auswahl eines Lösungsverfahrens und der Durchführung der Berechnungen können die Ergebnisse den beiden folgenden Ausgabeformularen entnommen werden¹³¹.

¹³¹ Interessenten können die PL/SQL-Prozeduren sowie die MS Access-Oberfläche unter folgender Internet-Adresse beziehen: <http://nts1.oec.uni-osnabrueck.de>.

Nettobedarf			
Artikel ID	Menge	Datum	
1	213,5	3	
1	72,5	7	
1	44	1	
1	44	4	
1	59	5	
1	59	6	
1	37,5	8	
2	6	3	
2	174	4	
2	60	5	
2	100	7	

zurück weiter

Reichweite			
Artikel ID	Datum	Reichweite	Menge
1	3	1	44
3	2	1	176
5	4	1	10
3	3	3	45
4	4	1	2
4	6	1	20
2	4	3	180
3	4	2	26
5	7	1	26
4	9	1	30
2	5	1	176

Beschaffungsauftrag			
Artikel ID	Menge	Datum	
1	257,5	3	
1	110	7	
1	44	1	
1	60,5	2	
1	59	5	
1	59	6	
*			

Fertigungsauftrag			
Artikel ID	Menge	Datum	
2	6	3	
2	414	4	
2	90	8	
3	230	3	
3	236	6	
3	236	7	
3	110	8	
3	150	9	
3	176	2	
2	100	7	

Abb. 34: Ausgabeformular 1

Kapazitätsabgleich			
Masch_Gr_ID	Datum	Kapazität	
A	2	480	
A	1	480	
A	3	480	
A	4	286	
A	5	2	
A	6	360	
A	7	84	
A	8	2	
A	9	238	
A	10	228	
B	1	480	
B	2	121	
B	3	0	
B	4	0	
B	5	1	
B	6	1	
B	7	1	
B	8	156	
B	9	173	
B	10	360	
*			

Kosten		
Artikel ID	Rustkosten	Lagerkosten
1	600	163
2	360	2400
3	960	782
4	1250	1040
5	1000	252
*		

Gesamtkosten:

zurück Menü

Mitteilung:

Abb. 35: Ausgabeformular 2

6. Kritische Würdigung

Wie einleitend bereits erwähnt, besteht eines der Hauptprobleme der derzeit gängigen PPS-Systeme darin, daß für die Losgrößenplanung Verfahren herangezogen werden, die weder die Kapazitätsrestriktionen der Ressourcen noch die Mehrstufigkeit der Erzeugnisstruktur berücksichtigen. Hierdurch ergeben sich i.a. undurchführbare und suboptimale Lösungen.

Die Überlegungen in der vorliegenden Arbeit haben gezeigt, daß die heute verfügbaren heuristischen Verfahren zur kapazitätsorientierten Losgrößenplanung die Möglichkeit eröffnen, realisierbare und näherungsweise optimale Losgrößenpläne für realistische Fälle der mehrstufigen Fertigung unter Berücksichtigung von mehrfachen Kapazitätsrestriktionen zu ermitteln. In der Terminologie der PPS-Systeme wird also eine Integration der Planungsmodule „Mengenplanung“ und „Termin- und Kapazitätsplanung“ erreicht.

Aber selbst bei einer derartigen simultanen Planung kann letztlich nicht sichergestellt werden, daß die zur Verfügung stehende Kapazität ausreicht. Wie bereits erwähnt, hängt die Realisierbarkeit der fixierten Losgrößenpläne entscheidend davon ab, daß die Fertigungslose auch tatsächlich innerhalb derjenigen Periode produziert werden, der sie durch die kapazitätsorientierte Losgrößenplanung zugeordnet wurden.¹³² Praktische Erfahrungen zeigen jedoch, daß durch die verwendeten Vorlauf- bzw. Plan-Durchlaufzeiten das reale Geschehen in der Fertigung nur unzureichend erfaßt wird. Eilaufträge, Maschinenausfälle, Personalausfall und/oder falsch geschätzte Bearbeitungs- und Übergangszeiten führen dazu, daß einzelne Arbeitsgänge u.U. in anderen als den geplanten Perioden durchgeführt werden müssen, so daß die geplanten Kapazitätsbelastungsprofile wenig realistisch sind.¹³³

Ein weiterer Grund dafür, daß die im Rahmen einer kapazitätsorientierten Losgrößenplanung ermittelten Produktionspläne u.U. nicht realisiert werden können liegt darin, daß auf dieser Planungsebene auf die Berücksichtigung von Reihenfolgeentscheidungen innerhalb einzelner Perioden verzichtet wird. Daher können in der Realität auftretende reihenfolgeabhängige Rüstzeiten nicht berücksichtigt werden. Bei Vorliegen stark reihenfolgeabhängiger Rüstzeiten kann somit der Fall auftreten, daß eine ungünstige Reihenfolge der verschiedenen Fertigungslose an einer Ressource in einer Periode zu einer größeren Rüstzeit führt, als durch die Annahme einer mittleren Rüstzeit in der kapazitätsorientierten Losgrößenplanung vorgesehen worden ist. Bei

¹³² Vgl. Kapitel 2.

¹³³ Vgl. Adam (1992), S. 16 sowie Adam (1997), S. 622 f.

einer ungünstigen Losreihenfolge kann die geplante Zuordnung der Fertigungsaufträge zu den einzelnen Perioden des Planungszeitraums demnach u.U. nicht realisiert werden, was wiederum zu einem inkonsistenten Produktionsplan führen würde.

Ein weiterer Kritikpunkt resultiert aus der Tatsache, daß die Losgrößenplanung – beginnend bei den Enderzeugnissen – dispositionsstufenweise für die gesamte Erzeugnis- und Prozeßstruktur vorgenommen wird. Wenn, wie bei dem hier betrachteten Entscheidungsfeld, eine Ressource mehreren Dispositionsstufen zugeordnet sein kann (stufenübergreifende Ressourcenkonkurrenz), ist bei der Zuteilung der Ressource eine simultane Betrachtung aller Artikel, welche diese Ressource beanspruchen, nicht mehr möglich. Zur Lösung dieses Problems schlägt *Helber* vor, auf der obersten Dispositionsstufe, der eine Ressource zugeordnet wird, im Rahmen des CLSPs die vollständige Kapazität zu berücksichtigen, auf der nächsten Stufe, der die jeweilige Ressource zugeordnet ist, nur noch die verbleibende Restkapazität usw. Nachteilig bei dieser Vorgehensweise ist, daß offensichtlich Artikel auf höheren Dispositionsstufen bevorzugt werden. Ob alleine die Verwendung modifizierter Kostensätze dieser Problematik ausreichend Rechnung trägt, darf bezweifelt werden.

Darüber hinaus geht die kapazitätsorientierte Losgrößenplanung von der Annahme aus, daß jedem Arbeitsgang genau eine knappe Ressource zugeordnet ist. Sind zur Durchführung eines Arbeitsgangs jedoch gleichzeitig mehrere Engpaßressourcen erforderlich, dann ist diese Annahme nur gerechtfertigt, wenn eine der Ressourcen stärker beschränkt ist als die andere. So kann die Einsatzzeit des Bedienungspersonals z.B. immer die stärkste Beschränkung darstellen, wenn die erforderlichen Maschinen, Werkzeuge, Arbeitsplätze etc. jederzeit verfügbar sind. Wenn jedoch nicht eindeutig entschieden werden kann, welche von den gleichzeitig benötigten Ressourcen die stärkste Beschränkung darstellt, dann ist die Modellierung mehrerer paralleler Kapazitätsbeschränkungen erforderlich.¹³⁴

Trotz der zuvor skizzierten Schwächen kann abschließend festgehalten werden, daß mit dem in dieser Arbeit vorgestellten Konzept einer kapazitätsorientierten Losgrößenplanung ein Instrumentarium bereitsteht, durch das die operative Produktionsplanung und -steuerung wesentlich verbessert werden kann, so daß die hierzu entwickelten Lösungsverfahren in künftige Generationen von ressourcenorientierten PPS-Systemen integriert werden sollten.

¹³⁴ Vgl. hierzu Derstroff (1995), S. 31 f.

Literaturverzeichnis

- Adam, D. (1963):** Simultane Ablauf- und Programmplanung bei Sortenfertigung mit ganzzahliger linearer Programmierung, in: Zeitschrift für Betriebswirtschaft, 33. Jg. (1963), S. 233-245.
- Adam, D. (1969):** Produktionsplanung bei Serienfertigung – Ein Beitrag zur Theorie der Mehrproduktunternehmung, Wiesbaden 1969.
- Bahl, H. C./Ritzman, L. P./Gupta, J. N. D. (1987):** Determining Lot Sizes and Resource Requirements: A Review, in: Operations Research, 35. Jg. (1987), H. 3, S. 329-345.
- Blackburn, J. D./Millen, R. A. (1982):** Improved Heuristics for Multi-Stage Requirements Planning Systems, in: Management Science, 28. Jg. (1982), H. 1, S. 44-56.
- Brown, R. G. (1967):** Decision Rules for Inventory Management, Hinsdale 1967.
- Chen, P. P.-S. (1976):** The Entity-Relationship Model: Toward a Unified View of Data, in: ACM Transactions on Database Systems, 1 (1976) 1, S. 9-36.
- Clark, A. J./ Scarf, H. (1960):** Optimal Policies for a Multi-Echelon Inventory Problem, in: Management Science, 6. Jg. (1960), S. 475-490.
- Codd, E.F. (1970):** A Relational Model for Large Shared Data Banks, in: Communications of the ACM, 13 (1970) 6, S. 377-387.
- Corsten, H. (1994):** Gestaltungsbereiche des Produktionsmanagement, in: Corsten, H. (Hrsg.): Handbuch Produktionsmanagement, Wiesbaden 1994, S. 5-21.
- Derstroff, M. C. (1995):** Mehrstufige Losgrößenplanung mit Kapazitätsbeschränkungen, Heidelberg 1995.
- Dinkelbach, W. (1964):** Zum Problem der Produktionsplanung in Ein- und Mehrproduktunternehmen, Würzburg 1964.
- Dixon, P. S./Silver, E. (1981):** A Heuristic Solution Procedure for the Multi-Item, Single-Level, Limited Capacity, Lot-Sizing Problem, in: Journal of Operations Management, Vol. 2 (1981), S. 23-39.
- Drexler, A./Haase, K. (1992):** A New Type of Model for Multi-Item Capacitated Dynamic Lotsizing and Scheduling, Arbeitspapier des Instituts für Betriebswirtschaftslehre der Christian-Albrechts-Universität zu Kiel, Nr. 286, Kiel 1992.
- Hahn, F. (1998):** Knappe Kapazitäten in der Losgrößenplanung, Wiesbaden 1998.
- Hechfischer, R. (1991):** Kapazitätsorientierte Verfahren der Losgrößenplanung, Wiesbaden 1991.

- Heinrich, C. E. (1987):** Mehrstufige Losgrößenplanung in hierarchisch strukturierten Produktionsplanungssystemen, Berlin 1987.
- Heinrich, C. E./Schneeweiß, C. (1986):** Multi-Stage Lot-Sizing for General Production Systems, in: Axsäter, S./Schneeweiß, C./Silver, E. (Hrsg.): Multi-Stage Production Planning and Inventory Control, Berlin 1986, S. 150-181.
- Helber, S. (1994):** Kapazitätsorientierte Losgrößenplanung in PPS-Systemen, Stuttgart 1994.
- Helber, S. (1995):** Lot Sizing in Capacitated Production Planning and Control Systems, in: OR Spektrum, 17. Jg. (1995), S. 5-18.
- Jackson, G. A. (1989):** Entwurf relationaler Datenbanken: mit dBASE-Anwendungsbeispielen, München u. a. 1989.
- Kahle, E. (1996):** Ziele, produktionswirtschaftliche, in: Kern, W. (Hrsg.): Handwörterbuch der Produktionswirtschaft, 2., völlig neu gestaltete Aufl., Stuttgart 1996, Sp. 2315-2324.
- Kistner, K.-P./Steven, M. (1993):** Produktionsplanung, 2. Aufl., Heidelberg 1993.
- Knolmayer, G./Myrach, T. (1990):** Anforderungen an Tools zur Darstellung und Analyse von Datenmodellen, in: HMD 152 (1990), S. 90-102.
- Küpper, H. U. (1980):** Interdependenzen zwischen Produktionstheorie und der Organisation des Produktionsprozesses, Berlin 1980.
- Küpper, H. U./Helber, S. (1995):** Ablauforganisation in Produktion und Logistik, 2., völlig neu bearb. und erw. Aufl., Stuttgart 1995.
- Kurbel, K. (1995):** Produktionsplanung und -steuerung. Methodische Grundlagen von PPS-Systemen und Erweiterungen, Handbuch der Informatik, Bd. 13.2, 2., aktualisierte Aufl., München 1995.
- Lockemann, P. C./Radermacher, K. (1990):** Konzepte, Methoden und Modelle zur Datenmodellierung, in: HMD 152 (1990), S. 3-16.
- Marsch, J./Fritze, J. (1995):** SQL: eine praxisorientierte Einführung, 3. Aufl., Braunschweig, Wiesbaden, Vieweg.
- Maes, J./McClain, J. O./Van Wassenhove, L. N. (1991):** Multilevel capacitated lotsizing complexity and LP-based heuristics, in: European Journal of Operational Research, 53. Jg. (1991), S. 131-148.
- Meier, A. (1992):** Relationale Datenbanken: eine Einführung für die Praxis, Berlin u.a. 1992.

- Ortmann, Ch. (1998):** Datenbankgestützte Modellierung einer mehrstufigen kapazitätsorientierten Losgrößenplanung, unveröffentlichte Diplomarbeit, Institut für Informationsmanagement und Unternehmensführung, Fachgebiet Produktion, Universität Osnabrück, Osnabrück 1998.
- Ortmann, Ch./Siebeking, I. (2000):** Heuristiken zur Losgrößenplanung in PPS-Systemen, Diskussionsbeiträge des Fachbereichs Wirtschaftswissenschaften der Universität Osnabrück, Nr. ????, Osnabrück 2000.
- Pressmar, D. B. (1974):** Evolutorische und stationäre Modelle mit variablen Zeitintervallen zur simultanen Produktions- und Ablaufplanung, in: Gessner, P./Henn, R./Steinecke, V./Todt, H.: Proceedings in Operations Research 3, Würzburg 1974, S. 462-475.
- Rieper, B./Witte, Th. (1993):** Grundwissen Produktion: Produktions- und Kostentheorie, Schriften zur Produktion, Bd. 5, 2., veränd. Aufl. 1993.
- Scheer, A. W. (1995):** Wirtschaftsinformatik. Referenzmodelle für industrielle Geschäftsprozesse, 6., durchgesehene Aufl., Heidelberg 1995.
- Siebeking, I. (1998):** Mehrstufige Losgrößenplanung mit Kapazitätsrestriktionen in PPS-Systemen – Datenbankgestützte Implementation der Heuristik von *HELBER*, unveröffentlichte Diplomarbeit, Institut für Informationsmanagement und Unternehmensführung, Fachgebiet Produktion, Universität Osnabrück, Osnabrück 1998.
- Silver, E. A./Meal, H. C. (1973):** A Heuristic for Selecting Lot Size Quantities for the Case of a Deterministic Time-Varying Demand and Discrete Opportunities for Replenishment, in: Production and Inventory Management, 14. Jg. (1973), H. 2, S. 64-74.
- Sinz, E. J. (1990):** Das Entity-Relationship-Modell (ERM) und seine Erweiterungen, in: HMD 152 (1990), S. 17-29.
- Stahlknecht, P./Hasenkamp, U. (1997):** Einführung in die Wirtschaftsinformatik. 8. Aufl., Berlin u. a.
- Stickel, E. (1991):** Datenbankdesign: Methoden und Übungen, Wiesbaden 1991.
- Tempelmeier, H. (1995):** Material-Logistik - Grundlagen der Bedarfs- und Losgrößenplanung in PPS-Systemen, 3., vollst. überarb. und erw. Aufl., Berlin 1995.
- Tempelmeier, H. (1997):** Resource-constrained materials requirements planning – MRP rc, in: Production Planning & Control, Vol. 8 (1997), S. 451-461.

- Tempelmeier, H./Derstroff, M. (1993):** Mehrstufige Mehrprodukt-Losgrößenplanung bei beschränkten Ressourcen und genereller Erzeugnisstruktur, in: OR Spektrum, 15. Jg. (1993), S. 63-73.
- Tempelmeier, H./Helber, S. (1994):** A Heuristic for Dynamic Multi-Item Multi-Level Capacitated Lotsizing for General Product Structures, in: European Journal of Operational Research, Vol. 75 (1994), S. 296-311.
- Vossen, G. (1994):** Datenmodelle, Datenbanksprachen und Datenbank-Management-Systeme, 2. Aufl., Bonn u.a. 1994.
- Wagner, H. M./Whitin, T. M. (1958):** Dynamic Version of the Economic Lot Size Model, in: Management Science, 5. Jg. (1958), H. 1, S. 89-96.
- Witte, Th. (1995):** Die Lernfabrik I. Datenbankgestützte Materialbereitstellungs- und Kapazitätsplanung, Diskussionsbeiträge des Fachbereichs Wirtschaftswissenschaften der Universität Osnabrück, Nr. 9515, Osnabrück 1995.
- Zäpfel, G. (1994):** Entwicklungsstand und -tendenzen von PPS-Systemen, in: Corsten, H. (Hrsg.): Handbuch Produktionsmanagement, Wiesbaden 1994, S. 719-745.
- Zäpfel, G. (1996):** Grundzüge des Produktions- und Logistikmanagement, Berlin 1996.