

Salewski, Frank; Bartsch, Thomas; Pesch, Erwin

Working Paper — Digitized Version

Auftragsterminierung für die taktisch-operative Personaleinsatzplanung in Wirtschaftsprüfungsgesellschaften

Manuskripte aus den Instituten für Betriebswirtschaftslehre der Universität Kiel, No. 327

Provided in Cooperation with:

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

Suggested Citation: Salewski, Frank; Bartsch, Thomas; Pesch, Erwin (1993) : Auftragsterminierung für die taktisch-operative Personaleinsatzplanung in Wirtschaftsprüfungsgesellschaften, Manuskripte aus den Instituten für Betriebswirtschaftslehre der Universität Kiel, No. 327, Universität Kiel, Institut für Betriebswirtschaftslehre, Kiel

This Version is available at:

<https://hdl.handle.net/10419/155406>

Standard-Nutzungsbedingungen:

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

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

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

Terms of use:

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

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

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

Nr. 327

**Auftragsterminierung für
die taktisch-operative
Personaleinsatzplanung in
Wirtschaftsprüfungsgesellschaften**

Salewski / Bartsch / Pesch

September 1993

Dipl.-Inform. *Frank Salewski*, cand. sc. pol. *Thomas Bartsch*, Institut für Betriebswirtschaftslehre, Christian-Albrechts-Universität zu Kiel, Assistant Professor Dr. *Erwin Pesch*, Rijksuniversiteit Limburg, Maastricht.

1. Einleitung

Im Rahmen der Prüfungsplanung¹ müssen neben der Bildung von Prüferteams und deren Zuordnung zu Aufträgen u. a. Entscheidungen über die Terminierung von Auftragsbearbeitungen getroffen werden. Darüber hinaus ist festzulegen, in welchem Umfang und zu welchen Zeitpunkten bestimmte Prüfungshandlungen erfolgen sollen. Gleichzeitig sind z. B. aus dem Stufengesetz der Prüfung resultierende Reihenfolgebeziehungen, durch beschränkte personelle Ressourcen, bedingte Kapazitätsrestriktionen sowie Reisezeiten zwischen der Bearbeitung verschiedener Aufträge zu berücksichtigen.

Die derzeit bekannten Ansätze zur Personaleinsatzplanung basieren auf (mehr oder weniger) gravierenden Vereinfachungen und entsprechen nicht der aus Anwendersicht erforderlichen Abbildung des Problems.² Zur Überwindung dieses Defizits wurde - basierend auf einer Umfrage unter den 200 größten Wirtschaftsprüfungsgesellschaften in der Bundesrepublik Deutschland - ein Ansatz konzipiert, der einen taktischen, einen taktisch-operativen und einen operativen Planungsbereich unterscheidet und hierarchisch strukturiert ist.³

Im vorliegenden Beitrag wird die taktisch-operative Planung vorgestellt, die unter Berücksichtigung der Planungsergebnisse der übergeordneten taktischen Planung für alle Prüfer je Woche die Abfolge und Zeiträume der Auftragsbearbeitungen auf Basis von (Halb-) Schichten (Perioden mit einer Länge von vier Stunden) bestimmt.⁴

Dazu wird zunächst eine Einordnung des taktisch-operativen Bereichs in das zugrundeliegende hierarchische Planungskonzept vorgenommen. Anschließend werden die Modellprämissen und das Modell dargestellt. Danach folgt die Beschreibung eines speziell an die Problemstruktur angepaßten heuristischen Verfahrensschemas. Anhand einer umfangreichen experimentellen Untersuchung wird dann gezeigt, daß dieses Verfahrensschema für praxisrelevante Problemstellungen gute Näherungslösungen in vernachlässigbarer Rechenzeit liefert. Eine kurze Bewertung sowie Hinweise auf weiterführende Forschungsarbeiten beschließen den Beitrag.

2. Hierarchisches Planungskonzept

Ausgehend von der Überlegung, daß sich ein praxisrelevantes Planungssystem an den Bedürfnissen der potentiellen Anwender orientieren muß, wurde eine Umfrage unter den 200 (bezogen auf die Zahl der beschäftigten Wirtschaftsprüfer) größten Prüfungsgesellschaften in

¹ Zu den Möglichkeiten einer effizienten Prüfungsdurchführung siehe z. B. Drexl / Salewski (1991).

² Zu einer detaillierten Diskussion der mangelnden Praxisrelevanz bisheriger Ansätze vgl. Salewski / Drexl (1993).

³ Aufbau und Auswertung der Umfrage mit konzeptionellem Ansatz sind in Salewski / Drexl (1993) dargestellt.

⁴ Zu den übrigen Planungsbereichen siehe Salewski / Schirmer / Drexl (1993) und Salewski / Böttcher / Drexl (1993).

der Bundesrepublik Deutschland durchgeführt. Zielsetzung dieser Untersuchung war es, detaillierte Informationen über den Planungsprozeß zu gewinnen, um zunächst bekannte Ansätze anhand der daraus ableitbaren Anforderungen beurteilen und dann - aufbauend auf dieser Beurteilung - eine realitätsnähere Problembeschreibung vornehmen zu können.

Aus der Umfrage wurden zwei wesentliche Ergebnisse gewonnen. Zum einen zeigte sich, daß - neben Ansätzen wie z. B. denen von Bolenz / Frank⁵ oder Rohde⁶, die bereits in ihrer Modellformulierung Einschränkungen im Hinblick auf Lösungsverfahren aufweisen - auch problemspezifischere Ansätze wie die von Balachandran / Zoltners⁷, Chan / Dodin⁸ und Drexl⁹ den Anforderungen der Prüfungspraxis nicht oder nur eingeschränkt gerecht werden. Zum anderen wurde festgestellt, daß die Personaleinsatzplanung meist in mehreren, aufeinanderfolgenden Stufen vorgenommen wird. Dabei lassen sich insgesamt drei Ebenen, nämlich eine taktische, eine taktisch-operative und eine operative Ebene identifizieren, die durch unterschiedliche Planungshorizonte, Periodenlängen, Entscheidungsträger, Planungsprobleme, -gegenstände und -ziele sowie ein schrittweise abnehmendes Aggregationsniveau charakterisiert werden¹⁰. Dieser Unterteilung folgend wurde ein dreistufiger Ansatz mit hierarchischer Struktur¹¹ konzipiert, dessen Annahmen und Modellformulierungen in wesentlichen Zügen auf aus der Erhebung gewonnenen Daten basieren. Der Ansatz untergliedert sich wie folgt:

- Die taktische Planung ordnet den Aufträgen Prüferteams zu und nimmt - auf Wochenbasis - die Terminierung der Aufträge sowie die Festsetzung der erforderlichen Bearbeitungsdauern je Prüfer für einen Zeitraum von drei bis zwölf Monaten vor.
- Die taktisch-operative Planung bestimmt - auf Basis von (Halb-) Schichten - für alle Prüfer je Woche die Abfolge und Zeiträume der Auftragsbearbeitungen.
- Die operative Planung dient - auf Stundenbasis - der Zuordnung von Prüfern zu Prüffeldern sowie der Terminierung der Prüffelder. Sie wird je Auftrag und Woche separat durchgeführt.

3. Präzisierung der Problemstellung für die taktisch-operative Planung

Üblicherweise kommen zur ordnungsgemäßen Durchführung der Prüfungstätigkeiten, die in einer bestimmten Woche an den zur Bearbeitung vorgesehenen Aufträgen zu erledigen sind, nicht nur eine bestimmte Abfolge und Terminierung der Auftragsbearbeitungen in Betracht,

⁵ Bolenz / Frank (1977).

⁶ Rohde (1978).

⁷ Balachandran / Zoltners (1981).

⁸ Chan / Dodin (1986); s. a. Dodin / Chan (1991).

⁹ Drexl (1989a) und Drexl (1990); s. a. Drexl (1989b) und Drexl (1991).

¹⁰ Zu einer detaillierten Diskussion siehe Salewski / Drexl (1993).

¹¹ Zur hierarchischen (Produktions-) Planung siehe z. B. Hax / Candea (1984), Kistner / Steven (1991), Stadler (1988), Switalski (1989).

sondern es können - unter Berücksichtigung der Grundsätze ordnungsmäßiger Abschlußprüfung (GoA)¹² - mehrere verschiedene Einplanungsvarianten in Erwägung gezogen werden. Insbesondere gilt es dabei, die Interdependenzen zwischen verschiedenen Aufträgen, die sich aus der Einplanung derselben Prüfer zur Bearbeitung mehrerer Aufträge ergeben, zu berücksichtigen. Die taktisch-operative Planung, für die die Prüfungsleiter der in der betreffenden Woche einzuplanenden Aufträge einer Prüfungsgesellschaft verantwortlich zeichnen, hat die Minimierung der Kosten, die durch Einplanungen von Prüfern zu "ungünstigen" Zeiten anfallen, unter Beachtung bestimmter Restriktionen zum Ziel. Zur Operationalisierung dieser Zielvorschrift und der Nebenbedingungen sind einige Annahmen erforderlich.

3.1 Prämissen

- a) Die Prüfungsgesellschaft nimmt die Planung für einen Zeitraum von $t = 1, \dots, T$ Perioden vor. Eine einzelne Periode umfaßt dabei üblicherweise eine (Halb-) Schicht mit einer Dauer von 4 Stunden; der Planungszeitraum stimmt mit der Länge einer Periode der übergeordneten taktischen Planung überein und beträgt somit in der Regel eine Woche.
- b) Dem Prüfungsorgan stehen $a = 1, \dots, A$ Prüfer (Assistenten, Prüfungsleiter u. ä.) für Prüfungstätigkeiten zur Verfügung. Die Prüfer können je Periode t höchstens C_{at} Zeiteinheiten lang eingesetzt werden.¹³
- c) Innerhalb des Planungszeitraums sind - als ein Ergebnis der taktischen Planung - $e = 1, \dots, E$ Prüfungsaufträge durchzuführen. Die Prüfungsaufträge können je Periode t höchstens D_{et} Zeiteinheiten lang bearbeitet werden.¹⁴
- d) Prüfer a muß - als ein weiteres Ergebnis der taktischen Planung - an Auftrag e im Planungszeitraum $s = 1, \dots, S_{ea}$ Jobs bearbeiten.¹⁵ Die Bearbeitung von Job (e, a, s) des Auftrags e durch Prüfer a dauert genau eine Periode und beansprucht dessen gesamte Periodenkapazität mit k_{eas} Zeiteinheiten.¹⁶
- e) Bearbeitet ein Prüfer a im Planungszeitraum Jobs (e, a, s) und (e', a, s') , die zu unterschiedlichen Aufträgen e und e' gehören, dann müssen nach der Beendigung von (e, a, s) und vor

¹² Institut der Wirtschaftsprüfer (1989). Die wichtigsten GoA sind das Wirtschaftlichkeitsprinzip und die Forderung nach möglichst hoher Urteilssicherheit.

¹³ Die Zahl der (Halb-) Schichten (Zeiteinheiten), in denen ein Prüfer nicht verfügbar ist, wird durch die entsprechende Kapazitätsverfügbarkeit des taktischen Bereichs determiniert. Ist ein Prüfer dagegen in einer (Halb-) Schicht verfügbar, so kann er in dieser (Halb-) Schicht - als Vorgabe der taktischen Planung - ohne Einschränkungen, d. h. während der gesamten Periodendauer, eingesetzt werden.

¹⁴ Die Zahl der (Halb-)Schichten (Zeiteinheiten), in denen ein Auftrag nicht bearbeitet werden kann, korrespondiert zu ggf. in der taktischen Planung berücksichtigten Einschränkungen für den betreffenden Auftrag in der entsprechenden Woche.

¹⁵ Ein Job (in der angelsächsischen Literatur auch als activity bezeichnet) besteht aus einer Menge von (Prüfungs-) Tätigkeiten, die sachlich eng zusammengehören; vgl. Hax / Candea (1984, S. 259 u. S. 326).

¹⁶ Wird z. B. $C_{at} \in \{0, 1\}$ gewählt, so folgt daraus $k_{eas} = 1$. Weiterhin muß dann $D_{et} \in \{0, A\}$ gelten, um zu erreichen, daß ein Auftrag e in einer Periode t mit $D_{et} = 0$ nicht bzw. mit $D_{et} = A$ durch beliebig viele Prüfer bearbeitet werden darf.

dem Beginn von (e', a, s') als Reisezeit (Rüstzeit) mindestens $\sigma_{ee'}$ Perioden liegen.

- f) Reihenfolgebeziehungen zwischen Jobs eines Auftrags sind durch Mengen \mathcal{V}_{eas} spezifiziert, die die unmittelbaren Vorgänger eines Jobs (e, a, s) enthalten. Für die unmittelbaren Vorgänger $(e, a', s') \in \mathcal{V}_{eas}$ sind Mindestabstände $q_{ea's'as}$ einzuhalten.¹⁷
- g) Bearbeitet Prüfer a in Periode t einen Job (e, a, s) , so fallen dafür periodenabhängige Kosten von c_t Geldeinheiten an.¹⁸ Damit können insbesondere auch durch Überstunden verursachte Kosten berücksichtigt werden.

3.2 Beispiel

Der Planungszeitraum einer Wirtschaftsprüfungsgesellschaft beträgt zwei Tage mit jeweils vier (Halb-) Schichten (z. B. von 8.00 - 12.00 Uhr, 12.00 - 16.00 Uhr, 16.00 - 20.00 Uhr und 20.00 - 24.00 Uhr).¹⁹ Sofern keine Überstunden zu leisten sind, endet der achtstündige Arbeitstag um 16.00 Uhr, so daß Kosten nur in den ab 16.00 Uhr beginnenden (Halb-) Schichten $t = 3, 7$ in Höhe von $c_t = 300$ und in $t = 4, 8$ von $c_t = 900$ Geldeinheiten anfallen. Während der insgesamt acht Perioden sind von den drei Prüfern $a = 1, 2, 3$ der Wirtschaftsprüfungsgesellschaft Prüfungstätigkeiten an zwei Prüfungsaufträgen $e = 1, 2$ durchzuführen. Die Prüfer 1 und 3 stehen in allen Perioden zur Verfügung, Prüfer 2 dagegen ist wegen Urlaub in der Periode 1 nicht einsetzbar. Für die Auftragsbearbeitungen besteht lediglich die Einschränkung, daß Auftrag 2 wegen Quartalabschlußarbeiten in der Periode 2 nicht bearbeitet werden darf. Als Reisezeit ist zwischen den Aufträgen 1 (Hamburg) und 2 (Köln) eine Periode zu berücksichtigen. Als Ergebnis der taktischen Planung ist determiniert, daß

- ein Job von Prüfer 1 und zwei Jobs von Prüfer 3 an Auftrag 1 sowie
- zwei Jobs von Prüfer 1, drei Jobs von Prüfer 2 und ein Job von Prüfer 3 an Auftrag 2 durchzuführen sind.

Unter der Annahme, daß die Jobs, die ein Prüfer an einem Auftrag bearbeitet, in aufsteigender Reihenfolge ausgeführt werden müssen (also z. B. Job $(1, 3, 1)$ von Prüfer 3 an Auftrag 1 vor Job $(1, 3, 2)$), sollen die folgenden Jobs zeitgleich eingeplant werden:

- Bei Auftrag 1 muß der Job $(1, 1, 1)$ des Prüfers 1 (Prüfungsleiter) zur Kontrolle des Prüfers 3 (Assistent) zeitgleich zu dessen Job $(1, 3, 2)$ liegen.

¹⁷ Damit kann einerseits eine eindeutige Reihenfolge der Durchführung der Jobs (e, a, s) , die Prüfer a an Auftrag e bearbeitet, durch $(e, a, s) \in \mathcal{V}_{e,a,s+1}$ und $q_{e,a,s,a,s+1} = 0$ mit $s = 1, \dots, S_{ea}-1$ gewährleistet werden. Andererseits lassen sich diejenigen Jobs (e, a, s) eines Prüfers a an einem Auftrag e , die z. B. zur wechselseitigen Abstimmung gleichzeitig mit den Jobs (e, a', s') eines anderen Prüfers a' eingeplant werden müssen, durch $(e, a, s) \in \mathcal{V}_{ea's'}$ mit $q_{easa's'} = -1$ und $(e, a', s') \in \mathcal{V}_{eas}$ mit $q_{ea's'as} = -1$ berücksichtigen.

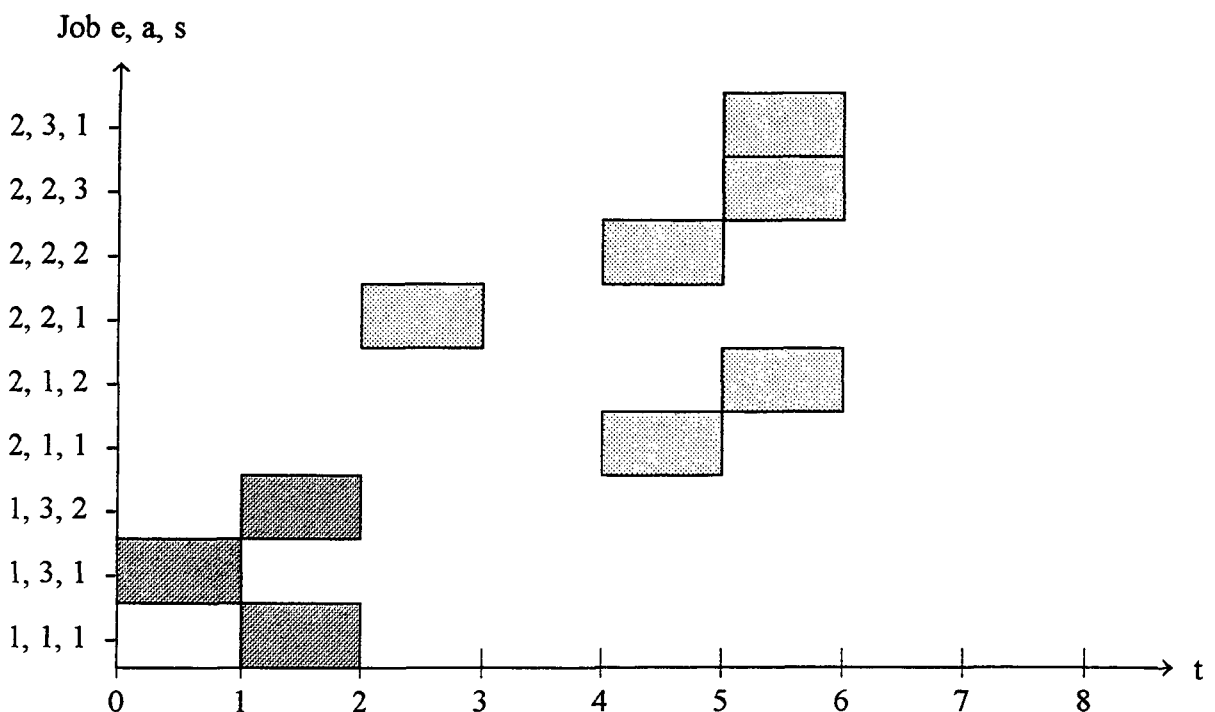
¹⁸ Prinzipiell ist über periodenabhängige Kosten hinaus auch eine Modifikation zu prüfer- und / oder auftragsabhängigen Kosten denkbar, die hier jedoch aus Vereinfachungsgründen nicht vorgenommen wird.

¹⁹ Einige Parameter wie etwa die Länge des Planungszeitraums, die Anzahl der Prüfer und der Aufträge sind in diesem Beispiel aus Gründen der Nachvollziehbarkeit unrealistisch klein gewählt.

- Bei Auftrag 2 muß zur Information des Prüfers 1 über die zwischenzeitlich erzielten Prüfungsergebnisse dessen Job (2, 1, 2) parallel zum Job (2, 2, 3) des Prüfers 2 (angehender Prüfungsleiter) und zum Job (2, 3, 1) des Prüfers 3 eingeplant werden.

Ein optimaler Ablaufplan ist ein Plan, der nicht nur zulässig ist, also Reihenfolge-, Kapazitäts- und Terminrestriktionen berücksichtigt, sondern darüber hinaus das Zielkriterium optimiert. Das der taktisch-operativen Planung zugrundeliegende Zielkriterium der Vermeidung von Prüferinplanungen zu "ungünstigen" Zeiten kann dabei durch die Minimierung der Summe der periodenabhängigen Kosten über alle Jobeinplanungen operationalisiert werden. Der für das Beispiel optimale Ablaufplan (Job-Gantt-Diagramm) ist in Abbildung 1 wiedergegeben.

Abbildung 1: Optimaler Ablaufplan



Am Beispiel der von den drei Prüfern an Auftrag 2 zeitgleich durchzuführenden Jobs (2, 1, 2), (2, 2, 3) und (2, 3, 1), die in der sechsten Periode eingeplant werden, läßt sich Abbildung 1 unmittelbar nachvollziehen. Darüber hinaus ist erkennbar, daß

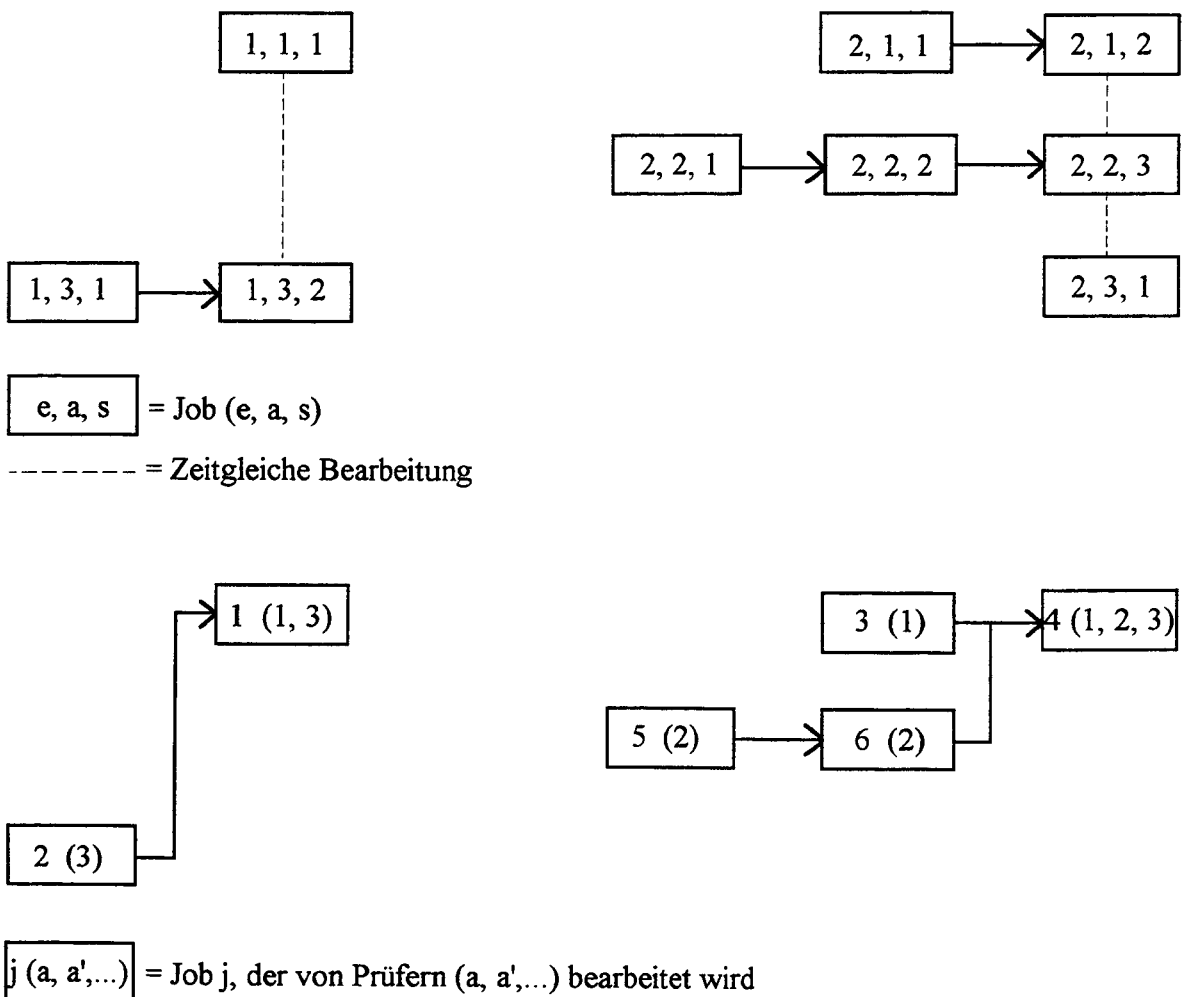
- alle Jobs bearbeitet werden,
- Reihenfolgebeziehungen bzw. zeitgleiche Bearbeitungen eingehalten werden,
- auftragspezifische Bearbeitungsbeschränkungen wie das Bearbeitungsverbot von Auftrag 2 in der Periode 2 berücksichtigt werden,
- Kapazitätsbeschränkungen der Prüfer wie das Einplanungsverbot des Prüfers 2 in der Periode 1 nicht verletzt werden und
- Reisezeiten wie im Beispiel zwischen Auftrag 1 und 2 beachtet werden.

Der Zielfunktionswert als Summe der Kosten für die Einplanung von Prüfern zu "ungünstigen" Zeiten beträgt 300 Geldeinheiten (Einplanung des Prüfers 2 in der Periode 3 zu Kosten von 300 Geldeinheiten).

3.3 Vorbereitende Berechnungen

Zur Vereinfachung der mathematischen Problemformulierung werden zunächst die Indizes e , a und s durch einen einzigen Index j ersetzt. Dabei ist zu beachten, daß zwei (oder mehr) Jobs (e, a, s) und (e, a', s') , die zeitgleich bearbeitet werden müssen, zu einem einzigen Job j zusammengefaßt werden können. An der Durchführung dieses Jobs j sind dann dementsprechend sowohl der Prüfer a als auch der Prüfer a' beteiligt. Die prinzipielle Vorgehensweise, die u. a. eine Einsparung von Variablen zur Folge hat, wird anhand des Beispiels aus Abschnitt 3.2 in Abbildung 2 veranschaulicht.²⁰

Abbildung 2: Transformation der Jobindizes (e, a, s) auf j



²⁰ Zu einer detaillierten (mathematischen) Diskussion s. Bartsch (1993, S. 26 ff.).

Beispielsweise werden die zeitgleich zu bearbeitenden Jobs (2, 1, 2), (2, 2, 3) und (2, 3, 1) auf den Job $j = 4$ abgebildet. An Stelle von Parametern \mathcal{V}_{eas} , k_{eas} und q_{easa} 's erhält man damit Parameter \mathcal{V}_j , k_{ja} und q_{jj} .

f_e bezeichne dann den Job eines Auftrags e mit dem kleinsten und l_e den mit dem größten Jobindex. Des weiteren werden frühest- und spätestmögliche Endtermine EF_j und LF_j berechnet.²¹ Schließlich sind in der Menge $\mathcal{J}_a = \{ j \mid k_{ja} > 0 \}$ diejenigen Jobs enthalten, die von Prüfer a zu bearbeiten sind, und in der Menge $\mathcal{H}_t = \{ j \mid EF_j \leq t \leq LF_j \}$ diejenigen Jobs, die in t beendet werden können.

3.4 Modellformulierung

Definiert man Binärvariablen x_{jt} mit der Bedeutung

$$x_{jt} = \begin{cases} 1, & \text{falls Job } j \text{ zum Zeitpunkt } t \text{ beendet wird,} \\ 0, & \text{sonst,} \end{cases}$$

so kann die Problemstellung durch folgendes binäre Optimierungsproblem beschrieben werden:

$$\text{Minimiere } Z(x) = \sum_{a=1}^A \sum_{j \in \mathcal{J}_a} \sum_{t=EF_j}^{LF_j} c_t x_{jt} \quad (1)$$

unter den Nebenbedingungen

$$\sum_{t=EF_j}^{LF_j} x_{jt} = 1 \quad (1 \leq j \leq J) \quad (2)$$

$$\sum_{t=EF_{j'}}^{LF_{j'}} (t + q_{j'j}) x_{j't} \leq \sum_{t=EF_j}^{LF_j} (t-1) x_{jt} \quad (1 \leq j' \leq J; 1 \leq j \leq J; j' \in \mathcal{V}_j) \quad (3)$$

$$\sum_{\substack{j=f_e \\ j \in \mathcal{H}_t}}^{l_e} \sum_{a=1}^A k_{ja} x_{jt} \leq D_{et} \quad (1 \leq e \leq E; 1 \leq t \leq T) \quad (4)$$

$$\sum_{\substack{j \in \mathcal{J}_a \\ j \in \mathcal{H}_t}} k_{ja} x_{jt} \leq C_{at} \quad (1 \leq a \leq A; 1 \leq t \leq T) \quad (5)$$

²¹ Vgl. z. B. Domschke / Drexl (1991, S. 87 f.).

$$x_{jt} + \sum_{\substack{t'=\underline{t} \\ t' \in \{EF_j, \dots, LF_j\}}}^{t+\sigma_{ee'}} x_{j't'} \leq 1 \quad (1 \leq a \leq A; 1 \leq e \leq E; 1 \leq e' \leq E; e \neq e';$$

$$f_e \leq j \leq l_e; f_{e'} \leq j' \leq l_{e'}; j, j' \in \mathcal{J}_a; EF_j \leq t \leq LF_j) \quad (6)$$

$$x_{jt} \in \{0, 1\} \quad (1 \leq j \leq J; EF_j \leq t \leq LF_j) \quad (7)$$

In (1) stellt x den Vektor aller Binärvariablen dar; $Z(x)$ ist der Zielfunktionswert für jeden zulässigen Vektor x , der die Nebenbedingungen (2) - (7) erfüllt. (1) summiert über alle Prüfer die periodenabhängigen Kosten c_t , die durch Einplanung der Jobs j , an deren Bearbeitung Prüfer a beteiligt ist, in Periode t anfallen. Dazu ist jedes c_t mit x_{jt} zu multiplizieren, wobei diese Multiplikation auf die jeweiligen Beendigungszeitpunkte t mit $EF_j \leq t \leq LF_j$ beschränkt werden kann.

(2) erzwingt, daß jeder Job genau einmal bearbeitet und im Zeitfenster $[EF_j, LF_j]$ beendet wird. Dazu muß x_{jt} genau einmal den Wert 1 annehmen.

(3) stellt sicher, daß zwischen allen Paaren von Jobs, die in einer unmittelbaren Vorgänger-Nachfolger-Beziehung stehen, Mindestabstände beachtet werden.

(4) sorgt für die Einhaltung auftragsspezifischer Bearbeitungsbeschränkungen, während (5) die Prüferkapazität je Periode berücksichtigt. In diesem Sinne stellen sowohl Aufträge als auch Prüfer erneuerbare Ressourcen dar.²²

(6) garantiert, daß zwischen Jobs j und j' , die zu unterschiedlichen Aufträgen e und e' gehören und von demselben Prüfer a bearbeitet werden, Rüstzeiten $\sigma_{ee'}$ eingehalten werden. Dies wird dadurch erreicht, daß im Zeitfenster $[t, t+\sigma_{ee'}]$ höchstens einer der beiden Jobs j oder j' eingeplant werden kann. Für den Fall, daß j zum Zeitpunkt t beendet wird, nimmt x_{jt} den Wert 1 an und erzwingt damit, daß die im zweiten Term vorgenommene Summation über das Zeitfenster $[t, t+\sigma_{ee'}]$ den Wert 0 hat bzw. Job j' nicht eingeplant wird.

(7) gewährleistet die Binarität der Variablen x_{jt} .

4. Verfahren

Klassische Methoden sind nicht in der Lage, das in Abschnitt 3 dargestellte Problem befriedigend zu lösen. Erstens ist es durch die Einordnung des Zulässigkeitsproblems als NP-vollständig bzw. des Optimierungsproblems als NP-hart²³ unwahrscheinlich, daß ein exaktes

²² Zu Varianten, die im Kontext von Arbeitszeitflexibilisierungen denkbar sind, siehe z. B. Günther (1989), Kossbiel (1992), Schneeweiß (1992).

²³ Schirmer (1993, S. 42 ff.) zeigt, daß ein derartiges Ablaufplanungsproblem mit mindestens zwei Perioden und einer erneuerbaren Ressource NP-vollständig bzw. NP-hart ist.

Verfahren für praxisrelevante Probleme mit bis zu 200 000 Binärvariablen²⁴ in "angemessener" Zeit zulässige bzw. optimale Lösungen liefert. Zweitens kann das Problem nicht mittels traditioneller heuristischer Methoden zur Ablaufplanung gelöst werden, da die gewählte Modellformulierung einen in der Literatur bislang nicht diskutierten Zielfunktionstyp sowie Rüstzeiten beinhaltet.²⁵

Es wurde daher ein heuristisches Verfahrensschema konzipiert, das - unter Berücksichtigung der Problemstruktur - auf der Verwendung von Prioritätswerten basiert. Um jedoch die bekannten konzeptionellen Schwächen deterministischer Heuristiken zu überwinden, arbeitet das Verfahrensschema randomisiert,²⁶ d. h. die Auswahl und die Einplanung eines von mehreren Jobs erfolgt zufällig, jedoch mit Wahrscheinlichkeiten, die zu den Prioritätswerten proportional sind. Wegen dieses Nichtdeterminismus liefert ein randomisiertes Verfahren bei mehrfacher Anwendung auf dieselbe Instanz eines Problems mehrere unterschiedliche Lösungen, unter denen sich üblicherweise mindestens eine befindet, die besser als die von einer deterministischen Heuristik gefundene Lösung ist.

4.1 Algorithmisches Grundschema

Das im folgenden vorgestellte Verfahrensschema unterscheidet drei Phasen: In der ersten Phase wird das Gesamtproblem in disjunkte Teilprobleme zerlegt, die in der zweiten Phase separat gelöst werden. In der zweiten Phase wird - anhand von Prioritätswerten - zunächst ein einplanbarer Job ausgewählt. Auf Basis weiterer Prioritätswerte wird anschließend entschieden, ob der ausgewählte Job in den zu konstruierenden Ablaufplan aufgenommen wird. Sobald jedes Teilproblem gelöst wurde, erhält man in der dritten Phase die Lösung des Gesamtproblems durch die Vereinigung der Teillösungen. Dieses Grundschema stellt dabei ein "Gerüst" dar, das für die zweite Phase die Einbindung verschiedener Regeln zur Bestimmung der Prioritätswerte gestattet.

4.1.1 Zerlegung in Teilprobleme (Phase 1)

In der ersten Phase wird das Gesamtproblem in disjunkte Teilprobleme zerlegt. Im Rahmen dieser Zerlegung wird jeder Prüfer genau einer sogenannten Prüfergruppe zugeordnet. In jeweils einer Gruppe befinden sich alle Prüfer, deren Einplanung unabhängig von den Prüfern anderer Gruppen durchgeführt werden kann.²⁷ Beispielsweise ist ein Prüfer, der mit keinem anderen Prüfer zeitgleich einzuplanen ist, einziges Element in einer Gruppe. Ein Teilproblem besteht nun darin, für alle Jobs, die von den Prüfern einer Prüfergruppe zu bearbeiten sind, einen zulässigen bzw. optimalen (Teil-) Ablaufplan zu konstruieren. Durch diese Vorgehens-

²⁴ Vgl. Bartsch (1993, S. 179).

²⁵ In den traditionellen Modellen wird i. allg. die Durchlaufzeit minimiert.

²⁶ Zu den Nachteilen deterministischer gegenüber randomisierten Verfahren vgl. z. B. Drexl (1990, S. 190 f.).

²⁷ Zu einer mathematischen Darstellung siehe Bartsch (1993, S. 65).

weise erhält man i.a. mehrere kleinere Probleme, die einfacher zu lösen sind, als ein großes Problem.²⁸ Da die Teilprobleme unabhängig voneinander sind, bleibt die Optimalität des Gesamtproblems auch dann erhalten, wenn jedes Teilproblem separat optimal gelöst wird.

4.1.2 Einplanung der Jobs (Phase 2)

Das Vorgehen der zweiten Phase läßt sich in Form eines randomisierten parallelen Verfahrens²⁹ beschreiben. Ein Ablaufplan wird konstruiert, indem die Perioden des Planungshorizontes in chronologischer Reihenfolge betrachtet werden. Alternativ wurden auch ein serielles Verfahren und ein genetischer Algorithmus³⁰ getestet. Beide Verfahrenstypen erzielen jedoch deutlich schlechtere Ergebnisse als das im folgenden erläuterte parallele Verfahren und werden deshalb in diesem Beitrag nicht weiter betrachtet.

In jeder Periode wird die Menge EJ aller Jobs des gerade zu lösenden Teilproblems bestimmt, die zum aktuellen Zeitpunkt ohne Verletzung der Restriktionen eingeplant werden können. Sofern mehr als ein einplanbarer Job vorliegt, erfolgt diese Auswahl zufallsgesteuert. Dabei haben jedoch nicht alle Jobs der Menge EJ die gleiche Wahrscheinlichkeit, ausgewählt zu werden. Die Entscheidung orientiert sich an Prioritätswerten³¹ $\bar{\omega}_j$, die durch Regeln ω festgelegt werden können. Um sicherzustellen, daß alle einplanbaren Jobs, also auch die am wenigsten präferierten, eine Auswahlwahrscheinlichkeit größer als Null erhalten, und um außerdem ein höheres Maß an Flexibilität bei der Auswahl zu erreichen, werden diese Werte durch

$$\bar{\omega}_j = (\bar{\omega}_j + \varepsilon)^\alpha \quad (j \in EJ) \quad (8)$$

modifiziert, wobei es sich bei ε und α um nichtnegative reellwertige Parameter handelt.³² Die Wahrscheinlichkeit $\tilde{\omega}_j$, daß ein Job j ausgewählt wird, beträgt dann

$$\tilde{\omega}_j = \bar{\omega}_j / \left(\sum_{j' \in EJ} \bar{\omega}_{j'} \right) \quad (j \in EJ) \quad (9)$$

Der Einfluß des Kontrollparameters α auf den Auswahlprozeß läßt sich wie folgt verdeutlichen: für $\alpha = 0$ haben alle Jobs identische Prioritätswerte $\bar{\omega}_j$ und damit dieselbe Auswahlwahrscheinlichkeit; für α signifikant größer als Eins dominiert der größte $\bar{\omega}_j$ -Wert, der zugehörige $\bar{\omega}_j$ -Wert geht gegen unendlich und damit die betreffende Auswahlwahrscheinlichkeit $\tilde{\omega}_j$ gegen Eins.

²⁸ Bei NP-harten Problemen steigt der Lösungsaufwand (der bekannten) exakten Verfahren bereits dann exponentiell an, falls sich die Binärvariablenzahl nur linear erhöht.

²⁹ Zur Unterscheidung zwischen seriellen und parallelen Verfahren siehe Kelley (1963, S. 352 ff.).

³⁰ Zu genetischen Algorithmen allgemein siehe z. B. Goldberg (1989); vgl. insbesondere Dorndorf / Pesch (1992) und zur Implementierung Bartsch (1993, S. 91 ff. u. S. 336 ff.).

³¹ Prioritätswerte werden zur Lösung von Auswahlkonflikten in unterschiedlichen Anwendungsbereichen verwendet; vgl. z. B. Dienstdorf (1972), Küpper (1982), Kurtulus / Narula (1985), Russell (1986). Verschiedene Prioritätsregeln zur Berechnung dieser Werte werden in Abschnitt 4.2 vorgestellt.

³² In dieser Untersuchung wurde $\varepsilon = 1$ gesetzt. Die Frage, welche Werte für α gewählt werden sollten, wird in Abschnitt 5.3 behandelt.

Üblicherweise, d. h. bei den traditionellen Heuristiken zur Ablaufplanung, wird der ausgewählte Job zum aktuellen Zeitpunkt in den Ablaufplan aufgenommen. Da bei der vorliegenden Modellformulierung die periodenabhängigen Kosten zu minimieren sind, ist es jedoch unter Umständen sinnvoll, eine Einplanung eines ausgewählten Jobs zunächst nicht vorzunehmen, sondern erst zu einem späteren Zeitpunkt mit dann möglicherweise günstigeren Kosten.

Die Entscheidung, ob der ausgewählte Job in der gerade betrachteten Periode einzuplanen ist, wird mit Hilfe von Ereigniswahrscheinlichkeiten $\tilde{\pi}_r$, zu deren Berechnung spezielle Regeln π entwickelt wurden, ebenfalls randomisiert getroffen.³³ In Analogie zur obigen Vorgehensweise lassen sich für die Ereignisse *Nichteinplanung* ($r = 0$) und *Einplanung* ($r = 1$) des ausgewählten Jobs Prioritätswerte $\bar{\pi}_r$ berechnen und die zugehörigen Modifikationen

$$\bar{\pi}_r = (\bar{\pi}_r + \varepsilon)^\beta \quad (0 \leq r \leq 1) \quad (10)$$

bestimmen,³⁴ aus denen sich dann die Ereigniswahrscheinlichkeiten

$$\tilde{\pi}_r = \bar{\pi}_r / \sum_{r'=0}^1 \bar{\pi}_{r'} \quad (0 \leq r \leq 1) \quad (11)$$

für Job j berechnen lassen.

Ist die Ereigniswahrscheinlichkeit $\tilde{\pi}_1 = 1$, so wird der ausgewählte Job in den Ablaufplan aufgenommen, bei einer Wahrscheinlichkeit $\tilde{\pi}_1$ von Null wird keine Einplanung durchgeführt, ansonsten wird zufällig unter Berücksichtigung der berechneten Wahrscheinlichkeiten über die Einplanung bzw. Nichteinplanung entschieden.

4.1.3 Generierung des Ablaufplans (Phase 3)

Nachdem die Teilprobleme separat gelöst worden sind, erhält man die Lösung für das ursprüngliche Problem durch eine Vereinigung der Teillösungen. Gleichzeitig wird dabei der Zielfunktionswert für das gesamte Problem bestimmt, indem die zuvor ermittelten Zielfunktionswerte der Teillösungen addiert werden. Sofern bei mindestens einem Teilproblem keine zulässige Lösung generiert werden konnte, ist auch die Lösung des Gesamtproblems unzulässig.

4.2 Prioritätsregeln

Für die Auswahl der Jobs und die Entscheidung über die Einplanung eines ausgewählten Jobs in Phase 2 können alternativ verschiedene Prioritätsregeln ω und π verwendet werden.

4.2.1 Regeln zur Jobauswahl

Sämtliche Regeln zur Jobauswahl sind dynamisch implementiert, da dadurch bei jeder Auswahl

³³ Prinzipiell könnte die Auswahl und (Nicht-) Einplanung eines Jobs auch in einem Schritt erfolgen.

³⁴ In dieser Untersuchung wurden $\varepsilon = 0$ und $\beta = 1$ gesetzt.

eines Jobs aktuellere Informationen als mit statischen Regeln berücksichtigt werden.³⁵ Im folgenden werden die im Rahmen der experimentellen Untersuchung verwendeten Regeln vorgestellt, wobei die in der Literatur als besonders geeignet geltenden Regeln ausgewählt wurden.³⁶

Die ersten beiden Regeln verwenden die Ergebnisse der klassischen Zeitplanung³⁷, die für die Bearbeitung der Jobs frühest- und spätestmögliche Endtermine bestimmt. Die dritte Regel bewertet Jobs anhand des durch ihre Bearbeitung verursachten Ressourcengebrauchs.

- MINimum Latest Finishing Time (MIN LFT)

Man kann den spätesten Endtermin LF_j eines Jobs als ein Maß für dessen Dringlichkeit auffassen, weil seine Bearbeitung spätestens zu diesem Zeitpunkt abgeschlossen sein muß. Die Regel MIN LFT ordnet dementsprechend hohe Prioritätswerte den am dringendsten einzuplanenden Jobs zu; dem Job j mit dem spätesten Endtermin LF_j wird ein Prioritätswert von Null zugewiesen. Mit

$$LF^{\max} = \max \{LF_j \mid j \in EJ\} \quad (12)$$

berechnen sich die Prioritätswerte zu

$$\bar{\omega}_j = LF^{\max} - LF_j \quad (j \in EJ) \quad (13)$$

- MINimum SLack (MIN SLK)

Der zeitliche Puffer³⁸ eines Jobs ist als Zeitraum zwischen seinem frühesten und spätesten Endtermin definiert. Die Regel MIN SLK bevorzugt Jobs mit kleinerem Puffer, weil diese in bezug auf Verzögerungen besonders kritisch sind. Bezeichnet man mit

$$SLK^{\max} = \max \{LF_j - EF_j \mid j \in EJ\} \quad (14)$$

den maximalen zeitlichen Puffer aller auswählbaren Jobs, dann können die Prioritätswerte wie folgt berechnet werden:

$$\bar{\omega}_j = SLK^{\max} - (LF_j - EF_j) \quad (j \in EJ) \quad (15)$$

- MAXimum Resource Usage (MAX RU)

Diese Regel plant diejenigen Jobs bevorzugt ein, durch deren Bearbeitung die Prüfer besonders stark nachgefragt werden. Mit RU^{\min} wird der minimale Ressourcengebrauch bestimmt, also

³⁵ Zur Unterscheidung zwischen statischen und dynamischen Regeln siehe z. B. Drexl / Kolisch (1993).

³⁶ Vgl. z. B. Alvarez-Valdéz / Tamarit (1989).

³⁷ In der angelsächsischen Literatur meist als "critical-path analysis" bezeichnet; vgl. z. B. Levy / Thompson / Wiest (1963).

³⁸ In der angelsächsischen Literatur als "slack" bezeichnet; vgl. z. B. Alvarez-Valdéz / Tamarit (1989).

$$RU^{\min} = \min \left\{ \sum_{a=1}^A k_{ja} \mid j \in EJ \right\}, \quad (16)$$

dann berechnen sich die Prioritätswerte zu

$$\bar{\omega}_j = \sum_{a=1}^A k_{ja} - RU^{\min} \quad (j \in EJ) \quad (17)$$

4.2.2 Regeln zur Entscheidung über die Jobeinplanung

Um die Wahrscheinlichkeit für das Ereignis "Einplanung des ausgewählten Jobs j " zu bestimmen, werden verschiedene Regeln π , die auf einem Vergleich der Kosten für eine Einplanung in der gerade betrachteten Periode t und in späteren Perioden basieren, vorgestellt. Zunächst werden dazu grundlegende Definitionen vorgenommen, die der anschließenden Einführung verschiedener Kriterien dienen. Die Regeln π lassen sich dann aus diesen Kriterien herleiten.³⁹

Seien zunächst in der Menge \mathcal{A}_j mit

$$\mathcal{A}_j = \{a \mid k_{ja} > 0\} \quad (18)$$

alle Prüfer enthalten, die an der Bearbeitung von Job j mitwirken. Ferner bezeichne

$$c^{\min} = \min \{c_t \mid 1 \leq t \leq T\} \quad (19)$$

die Kosten der günstigsten Periode im Planungszeitraum. In der Menge

$$\mathcal{E} = \{t' \mid t \leq t' \leq T \wedge c^{\min} < c_{t'} \leq c_t\} \quad (20)$$

sind alle nachfolgenden Perioden enthalten, in denen Kosten anfallen, die höher als in der günstigsten Periode sind und die gleichzeitig die der aktuellen Periode nicht übersteigen, während die Menge

$$\mathcal{L} = \{t' \mid t \leq t' \leq T \wedge c^{\min} < c_{t'} < c_t\} \quad (21)$$

aus den nachfolgenden Perioden besteht, in denen eine Einplanung nicht zu den günstigsten Kosten durchgeführt werden kann und in denen gleichzeitig geringere Kosten als in t entstehen.

Darüber hinaus sei u die Anzahl der noch einzuplanenden Jobs auf dem längsten Weg⁴⁰, auf dem Job j liegt, die in einer Periode t' mit $t' \geq t$ und $c_{t'} > c^{\min}$ eingeplant werden müssen.

Ferner ist der Parameter v gleich Eins, wenn die Kosten in der aktuellen Periode t "relativ" niedrig sind und u. a. Reisezeiten zu anderen Jobs anfallen;⁴¹ sonst ist $v = 0$.

Definiert man w_a als Anzahl der noch nicht eingeplanten Jobs des Prüfers a , die in einer

³⁹ Zur (umfangreichen) formalen Darstellung siehe Bartsch (1993, S. 72 ff.).

⁴⁰ Zur Definition des "längsten Weges" siehe z. B. Domschke / Drexl (1991, S. 93).

⁴¹ Eine Aufstellung weiterer einfließender Kriterien, deren Bedeutung jedoch gering ist, findet sich in Bartsch (1993, S. 83).

Periode t' mit $t' \geq t$ und $c_{t'} > c^{\min}$ durchgeführt werden müssen, dann ist

$$w^{\max} = \max \{w_a \mid a \in \mathcal{A}_j\} \quad (22)$$

die größte Anzahl an nicht kostengünstig einzuplanenden Jobs eines Prüfers.

Mit Hilfe der Definitionen werden drei Kriterien formuliert. Bei jedem der Kriterien wird ein Wert im Intervall $[0, 1]$ ermittelt. Diese Normierung wird durchgeführt, um später die Wahrscheinlichkeit für das Ereignis Einplanung einfacher bestimmen zu können. Je größer der Wert des Kriteriums ist, desto dringender ist die Einplanung des Jobs j vorzunehmen. Bei jedem der drei Kriterien ist der Wert Eins, wenn es sich um eine Periode t mit $c_t = c^{\min}$ handelt.^{42, 43}

Der Jobstatus JST_j von Job j mit

$$JST_j = \begin{cases} 1, & \text{wenn } c_t = c^{\min} \vee u \geq |\mathcal{E}|, \\ \frac{1}{|\mathcal{A}_j| * (|\mathcal{E}| - |\mathcal{L}|)}, & \text{wenn } |\mathcal{E}| > u > |\mathcal{L}|, \\ 0, & \text{sonst,} \end{cases} \quad (23)$$

ist um so größer, je mehr Nachfolger des Jobs j in einer nicht kostengünstigen Periode eingeplant werden müssen.⁴⁴ Sofern $u \geq |\mathcal{E}|$ gilt, ist der Wert des Kriteriums Eins, d. h. eine Einplanung ist in jedem Fall vorzunehmen, da man sonst i. allg. eine Lösung mit deutlich höheren Kosten bzw. keine zulässige Lösung erhalten würde. Liegt u im Intervall $[|\mathcal{L}|, |\mathcal{E}|]$, dann ist die Einplanung des Jobs j nicht zwingend erforderlich. Dies ergibt sich daraus, daß in $|\mathcal{E}| - |\mathcal{L}|$ Perioden noch Einplanungen zu gleichen Kosten wie in der aktuellen Periode vorgenommen werden können und diese Periodenzahl größer ist als die Anzahl der in diesen Perioden noch einzuplanenden Jobs. Damit Jobs, an denen mehr als ein Prüfer arbeitet und die nicht unbedingt bereits in der aktuellen Periode t in den Ablaufplan aufgenommen werden müssen, möglichst in einer der kostengünstigeren Perioden eingeplant werden, wird bei der Berechnung des Jobstatus durch die Anzahl der Prüfer $|\mathcal{A}_j|$, die Job j bearbeiten, dividiert.

Definiert man den Prüferstatus AST_j von Job j mit

$$AST_j = \begin{cases} 1, & \text{wenn } c_t = c^{\min} \vee w^{\max} \geq |\mathcal{E}|, \\ \frac{1}{|\mathcal{A}_j| * (|\mathcal{E}| - |\mathcal{L}|)}, & \text{wenn } |\mathcal{E}| > w^{\max} > |\mathcal{L}|, \\ 0, & \text{sonst,} \end{cases} \quad (24)$$

⁴² In Verbindung mit dem Eingang dieser Kriterien in Prioritätsregeln, die nachfolgend in diesem Abschnitt dargestellt werden, hat dies zur Folge, daß das Ereignis Einplanung des Jobs j eine Wahrscheinlichkeit von Eins besitzt.

⁴³ In einem weiteren Versuch wurde ein Wert kleiner als Eins getestet, d. h. die Wahrscheinlichkeit für das Ereignis Einplanung ist ebenfalls kleiner Eins, wenn $c_t = c^{\min}$ in der Periode t gilt. Damit lassen sich jedoch keine besseren Ergebnisse erzielen.

⁴⁴ Die Korrektheit der Fallunterscheidungen basiert auf der uniformen Jobdauer von einer Periode; vgl. dazu Abschnitt 3.1. Weiterhin gilt nach (20) und (21) $|\mathcal{E}| \geq |\mathcal{L}|$.

dann wird die Dringlichkeit der Einplanung für den ausgewählten Job j anhand der Anzahl der noch einzuplanenden Jobs eines Prüfers festgestellt. Für die Fallunterscheidung in (24) kann die Argumentation analog zum ersten Kriterium vorgenommen werden.

Der Wert des Rüstzeitstatus SST_j von Job j mit

$$SST_j = \begin{cases} 1, & \text{wenn } c_t = c^{\min}, \\ \frac{0.9}{|\mathcal{J}_j|}, & \text{wenn } c_t > c^{\min} \wedge v = 1, \\ 0, & \text{sonst,} \end{cases} \quad (25)$$

ist größer als Null, wenn u. a. Reisezeiten zwischen dem ausgewählten Job j und den noch einzuplanenden Jobs anfallen können.⁴⁵

Eine Regel π läßt sich nun formulieren, indem mindestens eines der obigen Kriterien in die Berechnung des Prioritätswertes $\bar{\pi}_1$ für das Ereignis Einplanung einfließt. Damit ergeben sich die folgenden Regeln:⁴⁶

- Job STatus (JST)

$$\bar{\pi}_1 = JST_j \quad (26)$$

- Auditor STatus (AST)

$$\bar{\pi}_1 = AST_j \quad (27)$$

- Setup STatus (SST)

$$\bar{\pi}_1 = SST_j \quad (28)$$

- Job Auditor STatus (JAST)

$$\bar{\pi}_1 = 1 - (1 - JST_j) * (1 - AST_j) \quad (29)$$

Sofern mehr als ein Kriterium in eine Regel einfließt, wird Formel (29) verwendet, damit sich ein hoher Prioritätswert $\bar{\pi}_1$ auch dann ergibt, wenn ein Job j nur aufgrund eines einzigen Kriteriums dringend in den Ablaufplan aufzunehmen ist.

- Job Setup STatus (JSST)

$$\bar{\pi}_1 = 1 - (1 - JST_j) * (1 - SST_j) \quad (30)$$

- Auditor Setup STatus (ASST)

$$\bar{\pi}_1 = 1 - (1 - AST_j) * (1 - SST_j) \quad (31)$$

- Job Auditor Setup STatus (JASST)

$$\bar{\pi}_1 = 1 - (1 - JST_j) * (1 - AST_j) * (1 - SST_j) \quad (32)$$

⁴⁵ Sofern z. B. nur ein Prüfer Job j bearbeitet, beträgt die Wahrscheinlichkeit für die Einplanung dieses Jobs 0.9. Dieser Wert hat sich nach Testläufen als am besten geeignet erwiesen.

⁴⁶ Die Prioritätswerte $\bar{\pi}_0$ ergeben sich jeweils zu $1 - \bar{\pi}_1$.

5. Experimentelle Untersuchung

Um die Leistungsfähigkeit der entwickelten Verfahren bei der Bearbeitung konkreter Fragestellungen aus der Prüfungspraxis beurteilen zu können, wurde eine experimentelle Studie durchgeführt, in deren Rahmen das Verfahrensschema an einer Reihe von praxisnahen Datensätzen getestet wurde.

5.1 Erzeugung von Testdatensätzen

Um eine systematische und konsistente Erzeugung der Testdatensätze zu gewährleisten, wurden für jeden Modellparameter ein Wertebereich und eine Verteilungsfunktion auf diesem Wertebereich definiert. Bei der Generierung eines Datensatzes wurden dann für die einzelnen Modellparameter - entsprechend der jeweiligen Definition - zufällige Werte erzeugt.⁴⁷ Um sicherzustellen, daß die der Untersuchung zugrunde gelegten Datensätze praktische Planungssituationen möglichst realistisch widerspiegeln, berücksichtigen die Definitionen so weit wie möglich die Ergebnisse der eingangs erwähnten Umfrage. Durch das Generierungsverfahren wird außerdem sichergestellt, daß mindestens eine zulässige Lösung existiert.

Zwei datensatzbezogene Faktoren sind von besonderem Interesse für die Leistungsfähigkeit von Lösungsmethoden: zum einen die Größe eines Datensatzes (z. B. Länge des Planungszeitraums, Anzahl der Jobs), zum anderen die Anzahl der existierenden zulässigen Lösungen als Merkmal für den Schwierigkeitsgrad.

Im Rahmen dieser Studie werden die Datensätze ihrer Größe nach in drei Klassen unterteilt, die mit Planungsproblemen korrespondieren, wie sie in *kleinen*, *mittelgroßen* und *großen* Wirtschaftsprüfungsgesellschaften üblicherweise vorkommen. Bei *kleinen* Datensätzen sind 10 - 30 Prüfer (mit bis zu 250 einzuplanenden Jobs), bei *mittelgroßen* Datensätzen bis zu 55 Prüfer (mit bis zu 500 Jobs) und bei *großen* Datensätzen bis zu 125 Prüfer (mit bis zu 2000 Jobs) einzuplanen. Darüber hinaus wurden *sehr kleine* Datensätze (mit bis zu 6 Prüfern und mit bis zu 30 einzuplanenden Jobs) erzeugt. Diese entsprechen zwar keinen realen Planungsproblemen, sind dafür aber mit Standardsoftware wie OSL und LINDO lösbar und können daher der Erzeugung von Referenzlösungen dienen.

Der Schwierigkeitsgrad eines Datensatzes gibt an, wie leicht oder schwer der betreffende Datensatz zu lösen ist. In dieser Studie wird dafür die Anzahl der zeitgleich durchzuführenden Bearbeitungen aller Prüfer als einzig entscheidend angesehen: Je mehr Jobs zeitgleich einzuplanen sind, desto schwerer lösbar ist der entsprechende Datensatz, weil sich dadurch bei sonst identischen Parameterinstanzierungen die Anzahl der zulässigen Lösungen reduziert. Bezüglich des Schwierigkeitsgrades werden *leichte*, *mittlere* und *schwere* Datensätze unterschieden.

⁴⁷ Zu einer detaillierten Darstellung siehe Bartsch (1993, S. 42 ff.).

5.2 Statistisches Modell und Bewertungsfunktionen

Für die statistische Auswertung wird die Anwendung des Verfahrens als ein Zufallsexperiment betrachtet, dessen Ausgang durch mehrere Faktoren bestimmt wird.⁴⁸ Die wichtigsten Faktoren sind die Bildung von disjunkten Teilproblemen η ⁴⁹, die Prioritätsregeln ω und π für die Auswahl und Einplanung der Jobs, die Größe σ und der Schwierigkeitsgrad τ eines Datensatzes, die Werte der Kontrollparameter α und β sowie die Anzahl ι der Iterationen.

Ein Experiment läßt sich nun beschreiben, indem man für jeden Faktor eine Menge von Werten angibt, die er während des Experimentes annehmen soll; die Angabe jeweils eines einzigen Wertes für jeden Faktor spezifiziert einen Lauf eines Experimentes.

Der Ausgang eines Laufes wird durch zwei Größen beschrieben: den Zielfunktionswert der besten in einem Lauf gefundenen Lösung und die durchschnittliche Rechenzeit für eine Iteration.⁵⁰ Diese Größen werden als Zufallsvariablen angesehen, die sich als Funktionen der genannten Faktoren darstellen lassen, wobei die jeweiligen Störgrößen als statistisch unabhängig und jeweils derselben kontinuierlichen Verteilung unterliegend angenommen werden.

Ausgehend von diesen Variablen, die die Ergebnisse eines einzelnen Laufes wiedergeben, lassen sich zu den Variablen korrespondierende Bewertungsfunktionen definieren, die die Ergebnisse des gesamten Experimentes in geeigneter Form zusammenzufassen.

Die *Effizienzrate* $\phi_{\eta\omega\pi\alpha\beta\sigma\tau}$ ⁵¹ für einen Algorithmus (η , ω , π) mit den Kontrollparametern (α , β) für eine Klasse (σ , τ) berechnet sich - als Durchschnitt über alle getesteten Datensätze der Klasse - als Quotient aus dem Zielfunktionswert der besten bekannten Lösung für einen Datensatz und dem Zielfunktionswert der in ι Iterationen besten von (η , ω , π) mit (α , β) gefundenen Lösung.⁵² Demzufolge ist $\phi_{\eta\omega\pi\alpha\beta\sigma\tau} \in [0, 1]$. Ein Wert von 0 bedeutet, daß das Verfahren für keinen Datensatz der Klasse (σ , τ) eine (zulässige) Lösung gefunden hat; ein Wert von 0.5, daß die gefundenen Lösungen - im Durchschnitt über alle getesteten Datensätze

⁴⁸ Vgl. Schirmer (1993, S. 79 ff.); Ähnliche statistische Modelle werden z. B. in Kurtulus / Davis (1982), Kurtulus / Narula (1985) sowie Alvarez-Valdéz / Tamarit (1989) verwendet.

⁴⁹ Mit $\eta = 1$ ($\eta = 0$) wird angezeigt, daß disjunkte Teilprobleme gebildet (nicht gebildet) werden.

⁵⁰ Weitere Bewertungsfunktionen wie etwa ein Maß für die Zahl der in einem Lauf gefundenen zulässigen Lösungen sind nicht von Interesse, da zum einen durch die Einbettung des Modells in den hierarchischen Ansatz die Existenz mindestens einer (formal) zulässigen Lösung garantiert ist und zum anderen vom Entscheidungsträger nicht beliebige zulässige, sondern möglichst gute Lösungen gesucht werden.

⁵¹ Analog zu der angegebenen Bewertungsfunktion können Funktionen auf höherem Aggregationsniveau verwendet werden, die jedoch nicht explizit angegeben werden, da sie durch entsprechende Aggregation über einen oder mehrere der zur Indizierung verwendeten Parameter unmittelbar aus den diskutierten Bewertungsfunktionen hergeleitet werden können. Zugunsten der Lesbarkeit wird des weiteren auf eine - im streng mathematischen Sinn zur eindeutigen Kennzeichnung erforderliche - Unterscheidung abgeleiteter Bewertungsfunktionen durch zusätzliche Denotatoren verzichtet, so daß sich z. B. eine Unterscheidung der Effizienzraten $\phi_{\eta\omega\pi\sigma}$ und $\phi_{\eta\pi\sigma\tau}$ ausschließlich aus den zur Indizierung verwendeten Symbolen ergibt.

⁵² Bei einem besten bekannten Zielfunktionswert von Null muß die Berechnung geringfügig modifiziert werden; zur detaillierten Darstellung siehe Bartsch (1993, S. 110).

der Klasse - halb so gut sind wie die besten bekannten Lösungen; ein Wert von 1 schließlich, daß alle gefundenen Lösungen so gut wie die besten bekannten Lösungen sind.

Die durchschnittliche Rechenzeit $v_{\eta\omega\pi\alpha\beta\sigma\tau}$ gibt die Zeit an, die während eines Laufes im Durchschnitt zur Durchführung von einer Iteration benötigt wurde.⁵³

5.3 Ergebnisse

Wegen des erheblichen Rechenaufwandes, der mit einer vollständigen Faktorenanalyse verbunden ist, wurden an den großen Datensätzen nur wenige Faktorkombinationen exemplarisch getestet.⁵⁴ Für jede Klasse (σ , τ) wurden zehn Datensätze erzeugt, auf die die angegebenen Regeln angewendet wurden. Dabei wurde der Kontrollparameter α über die Werte 0, 1, 2 und 4 variiert. Pro Datensatz wurden für jede Faktorkombination (η , ω , π , α , β) 1000 Iterationen durchgeführt.

Aufgrund der sehr umfangreichen Untersuchung können nur die wichtigsten Ergebnisse präsentiert werden.⁵⁵ Vor allem werden die Resultate nach Schwierigkeitsgraden getrennt nur dann dargestellt, wenn sich diese von den durchschnittlichen Ergebnissen einer Datensatzgröße deutlich unterscheiden. Zunächst sollen die Auswirkungen aufgezeigt werden, falls das Gesamtproblem nicht in separat zu lösende Teilprobleme aufgesplittet wird. Die Phasen 1 und 3 entfallen also:

- Die Zerlegung in Teilprobleme hat einen um so höheren Einfluß auf die Effizienzrate, je größer die Datensätze sind. Bei den in dieser Studie verwendeten sehr kleinen Datensätzen läßt sich das Gesamtproblem wegen bestehender Interdependenzen nicht aufsplitten. Wird das Verfahren bei den übrigen Datensatzgrößen separat auf jedes Teilproblem angewendet, dann liegt die Effizienzrate bei den kleinen Datensätzen um 3.9% höher und bei den mittleren Datensätzen um 9.4% höher als ohne die Zerlegung. Die Zerlegung, die unabhängig von der Zahl der in Phase 2 durchgeführten Iterationen einmal je Lauf durchzuführen ist, führte bei jeweils 1000 durchgeführten Iterationen zu einer Verschlechterung der Rechenzeiten um nur 0.02‰ bei den kleinen und mittelgroßen Datensätzen.

Die folgenden Untersuchungsergebnisse basieren grundsätzlich auf einer Zerlegung in Teilprobleme ($\eta = 1$).

Bei einer Variation des Kontrollparameters α ist folgendes erwähnenswert:

- Für die Werte 0, 1 und 2 ergeben sich für jede Datensatzgröße nahezu gleiche Effizienzraten; für $\alpha = 4$ sinkt die Effizienzrate um bis zu 1.6%.

⁵³ Das Verfahren wurde in der Programmiersprache C auf einer IBM RISC/6000 Modell 550 implementiert.

⁵⁴ Dabei hat sich gezeigt, daß das Verfahren auch für die Lösung großer Datensätze geeignet ist. Aufgrund der kleinen Stichprobe ist die Aussagekraft der Effizienzrate jedoch gering, so daß im folgenden nur die Rechenzeiten wiedergegeben werden.

⁵⁵ Zur Darstellung weiterer Ergebnisse siehe Bartsch (1993, S. 121 ff.).

Zur Beurteilung der Prioritätsregeln ω , die für die Auswahl eines Jobs verwendet werden, sind die Ergebnisse der Untersuchung in Tabelle 1 zusammengefaßt:

Tabelle 1: Einfluß von ω auf die Effizienzzraten $\phi_{\eta\omega\pi\sigma}$ mit $\eta = 1$ und $\pi = JASST$

	sehr klein	klein	mittelgroß
MIN LFT	0.956	0.852	0.846
MIN SLK	0.953	0.865	0.844
MAX RU	0.956	0.870	0.852

- Die verwendete Prioritätsregel ω hat keinen wesentlichen Einfluß auf die Qualität der gefundenen Lösungen. Die Rechenzeiten der einzelnen Regeln unterscheiden sich ebenfalls nicht signifikant voneinander.

Eine größere Bedeutung kommt den Regeln π zu, die für die Job-Einplanung verwendet werden. Deren Effizienzmaße und Rechenzeiten sind exemplarisch für die kleinen Datensätze in Tabelle 2 wiedergegeben:

Tabelle 2: Einfluß von π auf die Effizienzzraten und Rechenzeiten⁵⁶ für $\sigma = \text{klein}$ und $\eta = 1$

	leicht		mittel		schwer	
	$\phi_{\eta\pi\sigma}$	$\nu_{\eta\pi\sigma}$	$\phi_{\eta\pi\sigma}$	$\nu_{\eta\pi\sigma}$	$\phi_{\eta\pi\sigma}$	$\nu_{\eta\pi\sigma}$
JST	0.000	0:10.8	0.000	0:09.6	0.000	0:08.5
AST	0.479	0:11.0	0.406	0:09.6	0.339	0:08.5
SST	0.073	0:10.8	0.000	0:09.6	0.000	0:08.5
JAST	0.785	0:11.7	0.741	0:10.2	0.742	0:09.1
JSST	0.238	0:11.8	0.145	0:10.5	0.036	0:09.5
ASST	0.582	0:12.2	0.532	0:10.7	0.445	0:09.6
JASST	0.874	0:13.0	0.856	0:11.5	0.857	0:10.4

- Die mit deutlichem Abstand besten Ergebnisse lassen sich mit der Regel JASST erzielen, die den Job-, den Prüfer- und den Rüstzeitstatus berücksichtigt. Das wichtigste Kriterium ist dabei der Prüferstatus, wie ein Vergleich der ersten drei Regeln zeigt.

- Bei der Verwendung der Regel JASST ist die Güte der Lösungen unabhängig vom Schwierigkeitsgrad des Datensatzes, dagegen sinken die Effizienzzraten bei der Mehrzahl der übrigen Regeln mit zunehmendem Schwierigkeitsgrad.

⁵⁶ CPU-Zeiten in Millisekunden.

- Die Rechenzeiten der Regel JASST liegen geringfügig über denen der anderen Regeln. Die sinkenden Rechenzeiten bei zunehmendem Schwierigkeitsgrad lassen sich dadurch erklären, daß ein Datensatz aufgrund der Transformation der Jobs (e, a, s) um so weniger Jobs j enthält, je größer der Schwierigkeitsgrad ist.

Abschließend werden die benötigten Rechenzeiten weiter untersucht. Dazu ist folgendes anzumerken: Zu Vergleichszwecken wurde versucht, die erzeugten Datensätze mit den Optimierungsprogrammen OSL (Release 2) und LINDO (Version 5.0) zu lösen. OSL konnte jedoch nur die sehr kleinen Datensätze optimal lösen.⁵⁷ Weder OSL noch LINDO konnten einen der kleinen Datensätze innerhalb eines Zeitlimits von 1000 CPU-Minuten lösen. Die durchschnittlichen Rechenzeiten für 1000 Iterationen und deren zugehörigen Standardabweichungen sind in Tabelle 3 zusammengefaßt:

Tabelle 3: Durchschnittliche Rechenzeiten $v_{\eta\pi\sigma}$ mit $\eta = 1$ und $\pi = \text{JASST}$ bzw. v_{σ}

	Algorithmen (1000 Iterationen) ⁵⁸		OSL	
	$v_{\eta\pi\sigma}$	Std. Abw.	v_{σ}	Std. Abw.
sehr klein	0:00.9	0:00.4	0:09.6	0:16.0
klein	0:11.6	0:07.7	---	---
mittelgroß	0:51.9	0:13.0	---	---
groß	5:57.7	3:21.9	---	---

Einträge im Format Minuten : Sekunden . Millisekunden Std. Abw.: Standardabweichung

- Die Überlegenheit des Verfahrens gegenüber OSL wird bereits bei den sehr kleinen Datensätzen deutlich. Die Heuristik benötigte nur ein Zehntel der von OSL benötigten Rechenzeit und konnte immerhin 26 der 30 sehr kleinen Datensätze optimal lösen.⁵⁹

Zusammenfassend läßt sich feststellen, daß das entwickelte Verfahren in der Lage ist, für Problemstellungen der taktisch-operativen Planung Lösugen in Sekundenbruchteilen zu konstruieren. Selbst die Einplanung von bis zu 2000 Jobs bei großen Datensätzen nimmt bei 1000 Iterationen nur einige Minuten in Anspruch.

⁵⁷ In einem weiteren Versuch wurden 30 Datensätze generiert, die geringfügig größer als die sehr kleinen Datensätze waren. OSL konnte nur 21 Datensätze lösen und benötigte dafür zwischen 1.4 Sekunden und 100 CPU-Minuten; bei den restlichen neun Datensätzen wurden die Programme wegen mangelnden Speicherplatzes oder wegen Überschreiten eines Zeitlimits von 100 CPU-Minuten abgebrochen. Von den neun nicht optimal gelösten Datensätzen konnte LINDO sechs Datensätze optimal lösen, wobei 71 bis 2000 Minuten erforderlich waren. Das parallele Verfahren konnte zwar nicht jeden Datensatz optimal lösen (die beste Parameterkonstellation erzielte eine Effizienzrate von 0.881), rechnete jedoch im Durchschnitt für 1000 Iterationen nur 2.6 Sekunden.

⁵⁸ Zur besseren Vergleichbarkeit wird die im Durchschnitt für 1000 Iterationen benötigte Rechenzeit angegeben.

⁵⁹ Mit einer Modifikation der oben dargestellten Regeln können alle 30 Datensätze optimal gelöst werden. Bei den übrigen Datensatzgrößen erzielt man damit jedoch keine besseren Effizienzzraten.

6. Resultate und Perspektiven

Bisher bekannte Modellansätze stellen die Problemstellung der Personaleinsatzplanung in Wirtschaftsprüfungsgesellschaften aus praktischer Sicht nur unzulänglich dar. Basierend auf den Ergebnissen einer Umfrage unter 200 der größten Prüfungsunternehmen in der Bundesrepublik Deutschland wurde ein dreistufiger, hierarchischer Planungsansatz konzipiert, der dieses Defizit weitgehend überwindet. Der Ansatz unterscheidet eine taktische, eine taktisch-operative und eine operative Planungsebene; die taktisch-operative Ebene wurde ausführlich dargestellt. Da herkömmliche Methoden der Ablaufplanung zur Bearbeitung dieses Problems ungeeignet sind, wurde zur Lösung ein randomisiertes heuristisches Verfahrensschema entwickelt. Dieses Schema ist nach Aufsplittung des ursprünglichen Planungsproblems in disjunkte Teilprobleme bei Verwendung verschiedener Prioritätsregeln und Ereigniswahrscheinlichkeiten in der Lage, gute Näherungslösungen in vernachlässigbarer Rechenzeit zu liefern.

Die grundlegenden Ideen (Randomisierung, Aufsplittung, Nutzung von Prioritätswerten, Ereigniswahrscheinlichkeiten, Modifikation durch exponentielle Faktoren) sind darüber hinaus allgemein genug, um auch in anderen Bereichen eingesetzt werden zu können.

Um den Forderungen der Prüfungspraxis nach einem nicht nur leistungsfähigen, sondern zugleich auch besonders flexiblen Planungsinstrument gerecht zu werden, bedarf es der Entwicklung eines Konzepts zur revidierenden Planung.⁶⁰ Damit können die nach einem Planungslauf neu hinzugekommenen Informationen vom Anwender entsprechend seinen Bedürfnissen abgestuft berücksichtigt werden. Nach der Programmierung einer benutzerfreundlichen Oberfläche ist das System zur Beurteilung seiner Leistungsfähigkeit abschließend einem Praxistest zu unterziehen, der dann als erfolgreich anzusehen ist, wenn das vorliegende Planungstool maßgeblich zur Reduzierung des Planungsaufwands und einer Verbesserung des Personaleinsatzes beitragen kann.

⁶⁰ Das Konzept wird in Salewski / Nissen (1993) vorgestellt.

Zusammenfassung

Basierend auf den Ergebnissen einer empirischen Untersuchung wurde ein hierarchischer Ansatz zur Personaleinsatzplanung in Wirtschaftsprüfungsgesellschaften entwickelt, der die Teilprobleme der taktischen, der taktisch-operativen und der operativen Planung umfaßt. Der vorliegende Beitrag setzt sich mit der taktisch-operativen Planung auseinander. Das Problem wird zunächst als binäres Optimierungsproblem formuliert. Anschließend wird ein speziell an die Problemstruktur angepaßtes heuristisches Verfahrensschema vorgestellt, das unter Verwendung von Prioritätswerten randomisierte Auswahl- und Einplanungsentscheidungen trifft. Die Eignung des Verfahrensschemas wird in einer umfangreichen experimentellen Untersuchung nachgewiesen.

Summary

Based upon an empirical survey, an hierarchical framework for audit-staff scheduling has been developed which distinguishes between a tactical, a tactical-operational and an operational level. In our paper we investigate the tactical-operational level. A binary optimization model is formulated, which adequately represents the problem. Afterwards, a randomized heuristic scheme specifically tailored to the problem structure is described which uses priority values to base randomized selection and scheduling decisions upon. Its suitability is demonstrated in an extensive computational experiment.

Literatur

- Alvarez-Valdés, R. / Tamarit, J.M.* (1989): Heuristic algorithms for resource-constrained project scheduling: A review and an empirical analysis, in: Slowinski, R. / Weglarz, J. (Hrsg.): *Advances in project scheduling*, Amsterdam, S. 113-134.
- Balachandran, B.V. / Zoltners, A.A.* (1981): An interactive audit-staff scheduling decision support system, in: *The Accounting Review*, Vol. 56, S. 801-812.
- Bartsch, T.* (1993): *Personaleinsatzplanung in Wirtschaftsprüfungsgesellschaften - Entwicklung von Lösungsverfahren für den taktisch-operativen Bereich*, Diplomarbeit, Universität Kiel.
- Bolenz, G. / Frank, R.* (1977): Das Zuordnungsproblem von Prüfern zu Prüffeldern unter Berücksichtigung von Reihenfolgebeziehungen - Ein Lösungsansatz der binären Optimierung, in: *Zeitschrift für betriebswirtschaftliche Forschung*, Jg. 29, S. 427-447.
- Chan, K.H. / Dodin, B.* (1986): A decision support system for audit-staff scheduling with precedence constraints and due dates, in: *The Accounting Review*, Vol. 61, S. 726-733.
- Dienstdorf, B.* (1972): Kapazitätsanpassung durch Personalverschiebung, in: *Zeitschrift für Betriebswirtschaft*, Jg. 67, S. 132-136.
- Dodin, B. / Chan, K.H.* (1991): Application of production scheduling methods to external and internal audit scheduling, in: *European Journal of Operational Research*, Vol. 52, S. 267-279.
- Domschke, W. / Drexl, A.* (1991): *Einführung in Operations Research*, 2. Auflage, Berlin u. a.
- Dorndorf, U. / Pesch, E.* (1992): Evolution based learning in a job shop scheduling environment, erscheint in: *Computers and Operations Research*.
- Drexl, A.* (1989a): Zuordnung von Prüfern zu Prüffeldern unter Beachtung von Reihenfolge-, Kapazitäts- und Terminrestriktionen, in: *Zeitschrift für betriebswirtschaftliche Forschung*, Jg. 41, S. 294-317.
- Drexl, A.* (1989b): Heuristische Scheduling-Verfahren zur Personaleinsatzplanung bei Unternehmensprüfungen, in: *Zeitschrift für Betriebswirtschaft*, Jg. 59, S. 193-212.
- Drexl, A.* (1990): *Planung des Ablaufs von Unternehmensprüfungen*, Stuttgart.
- Drexl, A.* (1991): Scheduling of project networks by job assignment, in: *Management Science*, Vol. 37, S. 1590-1602.
- Drexl, A. / Kolisch, R.* (1993): Produktionsplanung und -steuerung bei Einzel- und Kleinserienfertigung, in: *Wirtschaftswissenschaftliches Studium*, Jg. 22, S. 60-66, S. 102-103, S. 137-141.

- Drexl, A. / Salewski, F.* (1991): Expertensystembasierte Beurteilung des Internen Kontrollsystems bei Abschlußprüfungen, in: Zeitschrift für Betriebswirtschaft, Jg. 61, S. 755-776.
- Goldberg, D.E.* (1989): Genetic algorithms in search, optimization and machine learning, Reading.
- Günther, H. O.* (1989): Produktionsplanung bei flexibler Personalkapazität, Stuttgart.
- Hax, A.C. / Candea, D.* (1984): Production and inventory management, Englewood Cliffs (N.J.).
- Institut der Wirtschaftsprüfer in Deutschland e. V.* (Hrsg.) (1989): FG 1 / 1988: Grundsätze ordnungsgemäßer Durchführung von Abschlußprüfungen, in: Die Wirtschaftsprüfung, Jg. 42, S. 9-19.
- Kelley, J.E.* (1963): The critical-path method: Resources planning and scheduling, in: Muth, J.F. / Thompson, G.L. (Hrsg.): Industrial scheduling, Englewood Cliffs (N.J.), S. 347-365.
- Kistner, K.-P. / Steven, M.* (1991): Die Bedeutung des Operations Research für die hierarchische Produktionsplanung, in: OR Spektrum, Bd. 13, S. 123-132.
- Kossbiel, H.* (1992): Personalbereitstellung bei Arbeitszeitflexibilisierung, in: Zeitschrift für Betriebswirtschaft, Jg. 62, S. 175-198.
- Küpper, H.-U.* (1982): Ablauforganisation, Stuttgart - New York.
- Kurtulus, I.S. / Davis, E.W.* (1982): Multi-project scheduling: Categorization of heuristic rules performance, in: Management Science, Vol. 28, S. 161-172.
- Kurtulus, I.S. / Narula, S.C.* (1985): Multi-project scheduling: Analysis of project performance, in: IIE Transactions, Vol. 17, S. 58-66.
- Levy, F.K. / Thompson, G.L. / Wiest, J.D.* (1963): Introduction to the critical-path method, in: Muth, J.F. / Thompson, G.L. (Hrsg.): Industrial scheduling, Englewood Cliffs (N.J.), S. 331-345.
- Rohde, M.* (1978): Das Set-Partitioning-Problem: Wirtschaftliche Anwendungen und Algorithmen, Dissertation, FU Berlin.
- Russell, R.A.* (1986): A comparison of heuristics for scheduling projects with cash flows and resource restrictions, in: Management Science, Vol. 32, S. 1291-1300.
- Salewski, F. / Böttcher, L. / Drexl, A.* (1993): Prüffeldorientierte Zuordnung von Prüfern für die operative Personaleinsatzplanung in Wirtschaftsprüfungsgesellschaften, Arbeitspapier, Universität Kiel.

- Salewski, F. / Drexl, A. (1993): Personaleinsatzplanung in Wirtschaftsprüfungsgesellschaften - Bestandsaufnahme und konzeptioneller Ansatz, erscheint in: Zeitschrift für Betriebswirtschaft.*
- Salewski, F. / Nissen, R. (1993): Revidierende hierarchische Planung - Ein Konzept am Beispiel der Personaleinsatzplanung in Wirtschaftsprüfungsgesellschaften, Arbeitspapier, Universität Kiel.*
- Salewski, F. / Schirmer, A. / Drexl, A. (1993): Auftragsorientierte Bildung von Prüferteams für die taktische Personaleinsatzplanung in Wirtschaftsprüfungsgesellschaften, Arbeitspapier, Universität Kiel.*
- Schirmer, A. (1993): Personaleinsatzplanung bei Unternehmensprüfungen - Modelle und Methoden, Diplomarbeit, Universität Kiel.*
- Schneeweiß, Ch. (1992): Arbeitszeitmanagement und hierarchische Produktionsplanung, in: Schneeweiß, Ch. (Hrsg.): Kapazitätsorientiertes Arbeitszeitmanagement, Heidelberg, S. 7-22.*
- Stadtler, H. (1988): Hierarchische Produktionsplanung bei losweiser Fertigung, Heidelberg.*
- Switalski, M. (1989): Hierarchische Produktionsplanung - Konzeption und Einsatzbereich, Heidelberg.*