

Salewski, Frank; Boettcher, Lars; Drexl, Andreas

Working Paper — Digitized Version

Prüffeldorientierte Zuordnung von Prüfern für die operative Personaleinsatzplanung in Wirtschaftsprüfungsgesellschaften

Manuskripte aus den Instituten für Betriebswirtschaftslehre der Universität Kiel, No. 328

Provided in Cooperation with:

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

Suggested Citation: Salewski, Frank; Boettcher, Lars; Drexl, Andreas (1993) : Prüffeldorientierte Zuordnung von Prüfern für die operative Personaleinsatzplanung in Wirtschaftsprüfungsgesellschaften, Manuskripte aus den Instituten für Betriebswirtschaftslehre der Universität Kiel, No. 328, Universität Kiel, Institut für Betriebswirtschaftslehre, Kiel

This Version is available at:

<https://hdl.handle.net/10419/155407>

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. 328

**Prüffeldorientierte Zuordnung
von Prüfern für die operative
Personaleinsatzplanung in
Wirtschaftsprüfungsgesellschaften**

Salewski / Böttcher / Drexl

September 1993

1. Einleitung

Im Rahmen der Prüfungsplanung¹ müssen neben der Bildung von Prüferteams, deren Zuordnung zu Aufträgen und der Terminierung von Auftragsbearbeitungen u. a. für jeden Auftrag Entscheidungen über die Einteilung von Prüfern zu Prüffeldern getroffen und Bearbeitungszeitpunkte der Prüffelder festgelegt werden. Gleichzeitig sind z. B. aus dem Stufengesetz der Prüfung resultierende Reihenfolgebeziehungen, durch beschränkte personelle Ressourcen bedingte Kapazitätsrestriktionen sowie qualifikationsbedingt unterschiedliche Prüfdauern 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 operative Planung vorgestellt, die unter Berücksichtigung der Planungsergebnisse der übergeordneten taktisch-operativen Planung je Auftrag und Woche die einem Auftrag zugeteilten Prüfer zur Bearbeitung von Prüffeldern einplant und eine Terminierung der Prüffelder auf Stundenbasis vornimmt.⁴

Dazu wird zunächst eine Einordnung des operativen Bereichs in das zugrunde liegende 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 beiden übrigen Planungsbereichen siehe Salewski / Schirmer / Drexl (1993) und Salewski / Bartsch / Pesch (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 werden.¹⁰ 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 (Perioden mit einer Länge von vier Stunden) - 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 operative Planung

Üblicherweise kommt zur ordnungsgemäßen Durchführung eines Prüffeldes nicht nur ein bestimmter Prüfer in Betracht, sondern es können - unter Berücksichtigung der Grundsätze ord-

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).

nungsmäßiger Abschlußprüfung (GoA)¹² - häufig verschiedene der einem Auftrag zugeteilten Prüfer, wenn auch mit qualifikationsbedingt unterschiedlichen Bearbeitungsdauern, zur Durchführung in Erwägung gezogen werden. Die operative Planung, für die der Prüfungsleiter des betreffenden Auftrags verantwortlich zeichnet, hat - zur Vermeidung von Unterauslastungen als bezahlten, aber unproduktiven Zeiten und von Überauslastungen als in der Regel zusätzliche Kosten verursachenden Überstunden - die möglichst gleichmäßige Auslastung der dem Auftrag zugeordneten Prüfer unter Beachtung bestimmter Restriktionen zum Ziel. Zur Operationalisierung dieser Zielvorschrift und der Nebenbedingungen sind einige Annahmen erforderlich.

3.1 Prämissen

- a) Der Prüfungsleiter nimmt die Planung für einen Zeitraum von $t = 1, \dots, T$ Perioden vor. Eine einzelne Periode hat dabei üblicherweise eine Dauer von einer Stunde; der Planungszeitraum stimmt mit dem der übergeordneten taktisch-operativen Planung überein und beträgt somit in der Regel eine Woche.
- b) Zur Bearbeitung des Auftrags stehen $a = 1, \dots, A$ Prüfer (Assistenten, Prüfungsleiter u. ä.) zur Verfügung. Als Ergebnis der taktisch-operativen Planung können die Prüfer zur Bearbeitung des Auftrags in Periode t höchstens C_{at} Zeiteinheiten lang eingesetzt werden.¹³
- c) Innerhalb des Planungszeitraums sind $e = 1, \dots, E$ Prüffeldergruppen (z. B. Anlagevermögen, Forderungen, Rückstellungen) einzuplanen.
- d) Für die Prüffeldergruppe e bestehen $m = 1, \dots, M_e$ Bearbeitungsalternativen (Möglichkeiten der Prüferzuordnung), die zu der Menge \mathcal{M}_e zusammengefaßt werden. Die Menge \mathcal{M}_e ist in $u = 1, \dots, U_e$ disjunkte Teilmengen von Bearbeitungsalternativen $\mathcal{M}_{eu} \subseteq \mathcal{M}_e$ unterteilt. Jede Prüffeldergruppe muß in Bearbeitungsalternativen aus genau einer Teilmenge von Bearbeitungsalternativen durchgeführt werden.¹⁴
- e) Jede Prüffeldergruppe e setzt sich aus $p = 1, \dots, P_e$ Prüffeldern (z. B. im Fall der Prüffeldergruppe Anlagevermögen aus den Prüffeldern Prüfung der Zugänge, der Abgänge und der

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

¹³ Prüfer A ist dabei ein fiktiver Prüfer (mit $C_{At} = 0$ für $t = 1, \dots, T-1$ und $C_{AT} = \infty$), dem diejenigen Prüfungstätigkeiten, die von den realen Prüfern $a = 1, \dots, A-1$ im Planungszeitraum nicht bewältigt werden, in der Periode T zugeordnet werden. Die dem Prüfer A zugeteilten Aufgaben müssen demzufolge durch Überstunden oder - im Sinne einer rollierenden Planung - nach dem Ende des Planungszeitraums erledigt werden.

¹⁴ Im folgenden wird angenommen, daß für jede Prüffeldergruppe e die Zahl der Bearbeitungsalternativen $M_e = 2(A-1)$ ist. Weiterhin wird in der Bearbeitungsalternative m ($m = 1, \dots, A-1$) ausschließlich der reale Prüfer a mit $a = m$ und in der Bearbeitungsalternative m' ($m' = A, \dots, 2(A-1)$) ausschließlich der fiktive Prüfer A benötigt. Durch Bildung von Teilmengen $\mathcal{M}_{eu} = \{u, u+A-1\}$ für $u = 1, \dots, U_e$ mit $U_e = A-1$ kann dann erreicht werden, daß jede Prüffeldergruppe durch genau einen realen und / oder den fiktiven Prüfer bearbeitet werden darf.

Abschreibungen) zusammen.

- f) Jedes Prüffeld (e, p) läßt sich in $s = 1, \dots, S_{ep}$ Teilprüffelder untergliedern.
- g) Zur Bearbeitung des Teilprüffeldes (e, p, s) in der Bearbeitungsalternative m wird Prüfer a k_{epsma} Zeiteinheiten benötigt.¹⁵
- h) Die Bearbeitung von Teilprüffeld (e, p, s) in der Bearbeitungsalternative m erstreckt sich über eine Dauer von d_{epsm} Zeiteinheiten.¹⁶
- i) Reihenfolgebeziehungen zwischen Teilprüffeldern sind durch Mengen \mathcal{V}_{eps} spezifiziert, die die unmittelbaren Vorgänger eines Teilprüffeldes (e, p, s) beinhalten.

3.2 Beispiel

Der Zeitraum für die Planung beträgt einen Tag mit insgesamt acht Stunden.¹⁷ Während dieser Zeit sind von den drei Prüfern $a = 1, 2, 3$ (Prüfungsleiter, Assistent, fiktiver Prüfer) unter Berücksichtigung, daß Prüfer 1 nur in den Perioden 5 bis 8 und Prüfer 3 nur in der Periode 8 verfügbar ist, drei Prüffeldergruppen $e = 1, 2, 3$ (Anlagevermögen, Forderungen, Gewinn- und Verlustrechnung / GuV) zu bearbeiten:

- Anlagevermögen: Prüffelder Zugänge, Abschreibungen; das Prüffeld Zugänge besteht aus zwei und das Prüffeld Abschreibungen aus drei Teilprüffeldern;
- Forderungen: Prüffelder Saldenbestätigungen, Wertberichtigungen; die Prüffelder Saldenbestätigungen und Wertberichtigungen setzen sich aus jeweils zwei Teilprüffeldern zusammen; die Prüfung der Wertberichtigungen kann erst nach Abschluß des Prüffeldes Saldenbestätigungen erfolgen;
- GuV: Prüffeld GuV; das Prüffeld GuV untergliedert sich in drei Teilprüffelder; zur Prüfung der GuV müssen die Prüffelder Abschreibungen und Wertberichtigungen bearbeitet sein.

¹⁵ Ein Zuordnungsverbot eines Prüfers a zu einer Prüffeldergruppe e in einer Bearbeitungsalternative m läßt sich folglich mit $k_{epsma} > C_{at}$ für die zugehörigen Prüffelder $p = 1, \dots, P_e$ und deren Teilprüffelder $s = 1, \dots, S_{ep}$ in den Perioden $t = 1, \dots, T$ realisieren.

¹⁶ Die Einführung von d_{epsm} ist künstlich und lediglich vor dem Hintergrund der Einführung eines fiktiven Prüfers sinnvoll. Damit wird erreicht, daß in denjenigen Bearbeitungsalternativen m , in denen der fiktive Prüfer zur Durchführung eines Teilprüffeldes (e, p, s) eingesetzt wird, mit $d_{epsm} = 0$ zwar eine unendlich schnelle, mit $k_{epsma} = 1$ aber gleichzeitig kapazitätswirksame Bearbeitung erfolgt. In Verbindung mit $C_{at} = 0$ für $t = 1, \dots, T-1$ und $C_{AT} = \infty$ ist somit sichergestellt, daß dem fiktiven Prüfer zugeordnete Teilprüffelder ausschließlich in der Periode T terminiert werden können. Für diejenigen Bearbeitungsalternativen, in denen ein realer Prüfer a ($a = 1, \dots, A-1$) benötigt wird und $k_{epsma} \leq C_{at}$ für mindestens ein t gilt, stimmen die zeitlichen Beanspruchungen k_{epsma} und die Bearbeitungsdauern d_{epsm} überein. Die Bearbeitungsdauer eines Prüffeldes (e, p) in der Bearbeitungsalternative m durch den korrespondierenden Prüfer a ist in diesem Fall $k_{ep1ma} + k_{ep2ma} + \dots + k_{epS_{ep}ma} = d_{ep1m} + d_{ep2m} + \dots + d_{epS_{ep}m}$. Gilt für alle $t = 1, \dots, T$, daß $k_{epsma} > C_{at}$ ist, dann wird d_{epsm} der Wert der größten Periodenkapazität C_{at} des zugehörigen Prüfers a im Planungszeitraum $t = 1, \dots, T$ zugewiesen.

¹⁷ Einige Parameter wie etwa die Länge des Planungszeitraums, die Anzahl der Prüfer und der Prüffeldergruppen sind in diesem Beispiel aus Vereinfachungsgründen unrealistisch klein gewählt.

Für jede der drei Prüffeldergruppen $e = 1, 2, 3$ ergeben sich $M_e = 2(A-1) = 4$ Bearbeitungsalternativen: In $m = 1$ wird ausschließlich der Prüfungsleiter, in $m = 2$ der Assistent sowie in $m = 3, 4$ der fiktive Prüfer benötigt. Die Mengen $\mathcal{M}_e = \{1, 2, 3, 4\}$ werden in jeweils $U_e = 2$ disjunkte Teilmengen von Bearbeitungsalternativen $\mathcal{M}_{e1} = \{1, 3\}$ und $\mathcal{M}_{e2} = \{2, 4\}$ unterteilt. Jede Prüffeldergruppe e kann dann entweder in der ersten und dritten Bearbeitungsalternative, also durch den Prüfungsleiter und den fiktiven Prüfer, oder in der zweiten und vierten Bearbeitungsalternative, also durch den Assistenten und den fiktiven Prüfer, bearbeitet werden.

Tabelle 1: Zeiteinheiten je Prüfer und Bearbeitungsdauern je Teilprüffeld

e,p,s	1,1,1	1,1,2	1,2,1	1,2,2	1,2,3	2,1,1	2,1,2	2,2,1	2,2,2	3,1,1	3,1,2	3,1,3
k _{eps11}	1	0	1	0	0	1	0	1	0	1	1	1
k _{eps12}	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
k _{eps13}	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
d _{eps1}	1	0	1	0	0	1	0	1	0	1	1	1
k _{eps21}	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
k _{eps22}	1	1	1	1	1	1	1	1	1	2	2	2
k _{eps23}	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
d _{eps2}	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
k _{eps31}	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
k _{eps32}	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
k _{eps33}	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
d _{eps3}	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
k _{eps41}	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
k _{eps42}	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
k _{eps43}	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
d _{eps4}	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

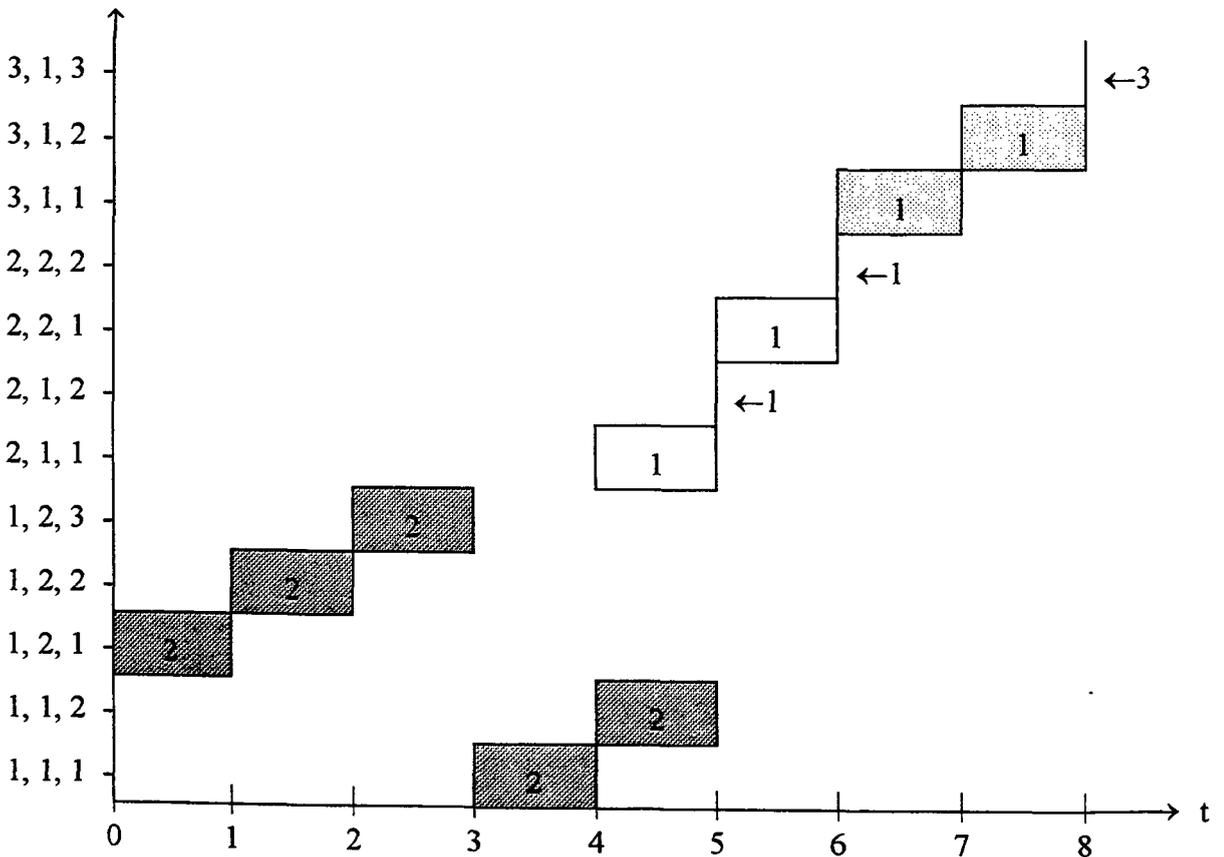
Tabelle 1 enthält die je Prüfer benötigten Zeiteinheiten k_{epsma} und die Bearbeitungsdauern je Teilprüffeld d_{epsm} . Die Bedeutung der Eintragungen soll anhand des Teilprüffeldes (1, 1, 2) verdeutlicht werden. In der ersten Bearbeitungsalternative wird der Prüfer 1 benötigt, der jedoch zur Durchführung dieses Teilprüffeldes zeitlich nicht beansprucht wird. Die zweite Bearbeitungsalternative erfordert den Prüfer 2, der zur Bearbeitung dieses Teilprüffeldes eine

Periode benötigt. In der dritten und vierten Bearbeitungsalternative kommt jeweils nur der fiktive Prüfer zum Einsatz und zwar jeweils mit einer Zeiteinheit bei gleichzeitig unendlich schneller Bearbeitungsdauer. Aus diesem Sachverhalt wird ersichtlich, daß - aus Gründen der logischen Konsistenz - die Prüffelder zwar in jeder Bearbeitungsalternative dieselben Prüfungsinhalte umfassen müssen, die Zugehörigkeit von Prüfungsinhalten zu Teilprüffeldern aber von den jeweiligen Bearbeitungsalternativen abhängt. Damit ergeben sich die Gesamtbearbeitungsdauern der Prüffelder aus den gewählten Bearbeitungsalternativen.

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 operativen Planung zugrundeliegende Zielkriterium der Vermeidung von Prüferüber- und -unterauslastungen kann dabei durch die Minimierung der Differenz aus der Summe der Zuordnungen von Teilprüffeldern zum fiktiven Prüfer und der Summe der nicht kapazitätswirksamen Einplanungen von realen Prüfern in Perioden, in denen sie verfügbar sind, operationalisiert werden. Ein für das Beispiel optimaler Ablaufplan (Prüffeld-Gantt-Diagramm) ist in Abbildung 1 wiedergegeben.

Abbildung 1: Optimaler Ablaufplan

Teilprüffeld e, p, s



m : Bearbeitungsalternative m

Abbildung 1 soll am Beispiel des Prüffeldes GuV erläutert werden (Teilprüffelder (3, 1, 1), (3, 1, 2) und (3, 1, 3)). Die Teilprüffelder (3, 1, 1) und (3, 1, 2) werden in den Perioden 7 und 8 in der Bearbeitungsalternative 1, also durch den Prüfer 1, durchgeführt und dauern eine Periode. Das Teilprüffeld (3, 1, 3) dagegen wird in der zur ersten korrespondierenden dritten Bearbeitungsalternative, also durch den fiktiven Prüfer 3, in der Periode 8 mit unendlich schneller Bearbeitungsdauer eingeplant. Darüber hinaus ist erkennbar, daß

- alle Prüffelder vollständig geprüft werden,
- alle Prüffeldergruppen von höchstens einem realen Prüfer und / oder dem fiktiven Prüfer bearbeitet und alle Teilprüffelder von genau einem Prüfer durchgeführt werden,
- Reihenfolgebeziehungen zwischen Prüffeldern eingehalten werden und
- Kapazitätsbeschränkungen der Prüfer beachtet werden.

Der Zielfunktionswert als Differenz aus der Summe der Zuordnungen von Teilprüffeldern zum fiktiven Prüfer und der Summe der nicht kapazitätswirksamen Einplanungen von realen Prüfern in Perioden, in denen sie verfügbar sind, beträgt $1 + 3 = 4$ (Zuordnung des Teilprüffeldes (3, 1, 3) zum fiktiven Prüfer; Unterauslastung des Prüfers 2 in den Perioden 6, 7 und 8).

3.3 Vorbereitende Berechnungen

Zur Vereinfachung der mathematischen Problemformulierung werden zunächst die Indizes e , p und s durch

$$j = g(e, p, s) = \sum_{e'=1}^{e-1} \sum_{p'=1}^{p_e} S_{e'p'} + \sum_{p'=1}^{p-1} S_{ep'} + s$$

ersetzt. An Stelle von Parametern \mathcal{V}_{eps} , k_{epsma} und d_{epsm} erhält man damit \mathcal{V}_j , k_{jma} und d_{jm} .

$f_e = g(e, 1, 1)$ sei dann das erste und $l_e = g(e, p_e, S_{ep_e})$ das letzte Teilprüffeld von Prüffeldergruppe e . Des weiteren werden frühest- und spätestmögliche Endtermine EF_j und LF_j berechnet.¹⁸ Schließlich sind in der Menge $\mathcal{H}_t = \{j \mid EF_j \leq t \leq LF_j\}$ diejenigen Jobs enthalten, die in der Periode t beendet werden können.

3.4 Modellformulierung

Definiert man Binärvariablen x_{jmt} mit der Bedeutung

$$x_{jmt} = \begin{cases} 1, & \text{falls Teilprüffeld } j \text{ in Bearbeitungsalternative } m \text{ durchgeführt und zum} \\ & \text{Zeitpunkt } t \text{ beendet wird,} \\ 0, & \text{sonst,} \end{cases}$$

¹⁸ Vgl. z. B. Domschke / Drexl (1991, S. 87 f.).

so kann die Problemstellung durch folgendes binäre Optimierungsproblem beschrieben werden:

$$\text{Minimiere } Z(x) = \sum_{e=1}^E \sum_{j=f_e}^{l_e} \sum_{m=1}^{M_e} \sum_{t=EF_j}^{LF_j} \left(k_{jma} - \sum_{a=1}^{A-1} k_{jma} \right) x_{jmt} + \sum_{t=1}^T \sum_{a=1}^{A-1} C_{at} \quad (1)$$

unter den Nebenbedingungen

$$\sum_{m=1}^{M_e} \sum_{t=EF_{f_e}}^{LF_{f_e}} x_{f_e m t} = 1 \quad (1 \leq e \leq E) \quad (2)$$

$$\sum_{m \in \mathcal{M}_{eu}} \sum_{t=EF_{f_e}}^{LF_{f_e}} x_{f_e m t} = \sum_{m \in \mathcal{M}_{eu}} \sum_{t=EF_j}^{LF_j} x_{j m t} \quad (1 \leq e \leq E; 1 \leq u \leq U_e; f_e + 1 \leq j \leq l_e) \quad (3)$$

$$\sum_{m=1}^{M_{e'}} \sum_{t=EF_{j'}}^{LF_{j'}} t x_{j' m t} \leq \sum_{m=1}^{M_e} \sum_{t=EF_j}^{LF_j} (t - d_{jm}) x_{j m t} \quad (1 \leq e' \leq E; 1 \leq e \leq E; f_{e'} \leq j' \leq l_{e'}; f_e \leq j \leq l_e; j' \in \mathcal{V}_j) \quad (4)$$

$$\sum_{e=1}^E \sum_{m=1}^{M_e} \sum_{\substack{j=f_e \\ j \in \mathcal{H}_t}}^{l_e} k_{jma} x_{j m t} \leq C_{at} \quad (1 \leq a \leq A; 1 \leq t \leq T) \quad (5)$$

$$x_{j m t} \in \{0, 1\} \quad (1 \leq e \leq E; f_e \leq j \leq l_e; 1 \leq m \leq M_e; EF_j \leq t \leq LF_j) \quad (6)$$

In (1) stellt x den Vektor aller Binärvariablen dar; $Z(x)$ ist der Zielfunktionswert für jeden zulässigen Vektor x , der die Nebenbedingungen (2) - (6) erfüllt. Im ersten Term wird je Teilprüffeld und Bearbeitungsalternative die Differenz aus den Zeiteinheiten des fiktiven Prüfers A und der realen Prüfer $a = 1, \dots, A-1$ gebildet und mit x_{jmt} , das M_e-1 mal den Wert 0 und einmal den Wert 1 annimmt, multipliziert; der zweite Term, der konstant ist und die im Planungszeitraum über alle realen Prüfer verfügbaren Zeiteinheiten wiedergibt, dient lediglich der besseren Interpretierbarkeit des Zielfunktionswertes. Während die Summe der benötigten Zeiteinheiten des fiktiven Prüfers einer Überauslastung entspricht, stellt die Differenz aus verfügbaren und tatsächlich eingeplanten Zeiteinheiten der realen Prüfer deren Unterauslastung im Planungszeitraum dar.

(2) erzwingt, daß das erste Teilprüffeld jeder Prüffeldergruppe genau einmal bearbeitet und im Zeitfenster $[EF_{f_e}, LF_{f_e}]$ beendet wird. Dies entspricht der obigen Aussage, daß x_{jmt} für jedes Teilprüffeld genau einmal den Wert 1 annimmt.

In Verbindung mit (2) garantiert (3), daß alle anderen Teilprüffelder einer Prüffeldergruppe ebenfalls genau einmal und in einer Bearbeitungsalternative derselben Teilmenge von Bearbeitungsalternativen wie das erste Teilprüffeld durchgeführt sowie im Zeitfenster $[EF_j, LF_j]$ beendet werden. Die korrekte Festlegung der Bearbeitungsalternative ergibt sich daraus, daß in (2) die Summe der $x_{femt} M_{e-1}$ mal den Wert 0 und nur in der gewählten Bearbeitungsalternative den Wert 1 aufweist und in (3) für genau eine Teilmenge u die Summe der $x_{femt} M_{eu-1}$ mal den Wert 0 und nur in der gewählten Bearbeitungsalternative den Wert 1 annimmt. Für die übrigen U_{e-1} Teilmengen ergibt die Summation jeweils den Wert 0.

(4) stellt sicher, daß zwischen allen Paaren von Teilprüffeldern, die in einer unmittelbaren Vorgänger-Nachfolger-Beziehung stehen, die jeweiligen Reihenfolgebeziehungen beachtet werden.

(5) sorgt für die Einhaltung der Prüferkapazität je Periode. In diesem Sinne stellen Prüfer erneuerbare Ressourcen dar.¹⁹

(6) gewährleistet die Binarität der Variablen x_{jmt} .

4. Verfahren

Klassische Methoden scheiden zur Lösung des in Abschnitt 3 dargestellten Problems von vornherein aus. Erstens ist es durch die Einordnung des Zulässigkeitsproblems als NP-vollständig bzw. des Optimierungsproblems als NP-hart²⁰ unwahrscheinlich, daß ein exaktes Verfahren für praxisrelevante Probleme mit z.T. über 1 000 000 Binärvariablen²¹ 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 mit den Nebenbedingungen (3) einen neuen, bislang in der Literatur nicht diskutierten Restriktionstyp beinhaltet.

Es wurde deshalb ein heuristisches Verfahrensschema entwickelt, das - unter Berücksichtigung der Problemstruktur - auf der Verwendung von Prioritätswerten basiert. Aufgrund der bekannten konzeptionellen Schwächen deterministischer Heuristiken wurde ein randomisiertes Verfahrensschema gewählt, d.h. die Auswahl einer von mehreren Alternativen erfolgt zufällig mit zu den Prioritätswerten proportionalen Wahrscheinlichkeiten.²² Bei mehrfacher Anwendung auf dieselbe Instanz eines Problems liefert ein randomisiertes Verfahren mehrere unterschiedliche Lösungen, unter denen sich üblicherweise mindestens eine befindet, die besser als die von einer deterministischen Heuristik gefundene Lösung ist.

¹⁹ Zu Varianten, die im Kontext von Arbeitszeitflexibilisierungen denkbar sind, siehe z. B. Günther (1989), Kossbiel (1992), Schneeweiß (1992).

²⁰ Schirmer (1993, S. 42 ff.) zeigt, daß ein derartiges Ablaufplanungsproblem mit mindestens zwei Perioden und einer erneuerbaren Ressource NP-vollständig bzw. NP-hart ist.

²¹ Vgl. Böttcher (1993).

²² Zu den Nachteilen deterministischer gegenüber randomisierten Verfahren vgl. z. B. Drexel (1990, S. 190 f.), Schirmer (1993, S. 30 f.).

4.1 Algorithmisches Grundschema

Das im folgenden vorgestellte Verfahrensschema unterscheidet zwei Phasen: In der ersten Phase wird eine Zuordnung von Bearbeitungsalternativen zu Prüffeldergruppen vorgenommen, während in der zweiten Phase die Terminierung der Teilprüffelder durchgeführt wird. Dieses Grundschema stellt dabei ein "Gerüst" dar, das die Einbindung verschiedener Regeln zur Bestimmung der Prioritätswerte gestattet.

4.1.1 Zuordnung von Bearbeitungsalternativen zu Prüffeldergruppen (Phase 1)

In der ersten Phase wird jeder Prüffeldergruppe eine Teilmenge von Bearbeitungsalternativen zugeordnet. Diese Teilmengen enthalten genau zwei Bearbeitungsalternativen, wobei die eine ausschließlich die Kapazität eines realen und die andere ausschließlich die Kapazität des fiktiven Prüfers gebraucht. Die Kapazität jedes realen Prüfers a kann im übrigen einzig in der Bearbeitungsalternative m mit $m = a$ nachgefragt werden.²³ Da des weiteren die Zuordnung des fiktiven Prüfers unmittelbar zu einer Verschlechterung des Zielfunktionswertes führt, sollen möglichst viele Teilprüffelder einer Prüffeldergruppe durch einen realen Prüfer bearbeitet werden. Diesen Überlegungen wird wie folgt Rechnung getragen:

Diejenigen realen Prüfer a , die vor der Zuordnung einer Prüffeldergruppe über eine positive Restkapazität RC_a verfügen, werden in der Menge EA zusammengefaßt,²⁴ die bislang nicht zugeordneten Prüffeldergruppen sind in der Menge EE enthalten. Solange noch Prüfer über eine positive Restkapazität verfügen und Prüffeldergruppen zuzuordnen sind, also EA und EE nicht leer sind, wird in einem ersten Schritt ein Prüfer bestimmt und diesem in einem zweiten Schritt eine Prüffeldergruppe zugeordnet. Diese Schritte werden solange wiederholt, bis entweder alle Prüffeldergruppen realen Prüfern zugeordnet worden sind oder die Menge EA leer ist. Im letztgenannten Fall werden die noch in der Menge EE befindlichen Prüffeldergruppen dem fiktiven Prüfer übertragen.²⁵

Die Auswahl des Prüfers sowie die der ihm zuzuordnenden Prüffeldergruppe wird zufällig vorgenommen und zwar gemäß Wahrscheinlichkeiten, die proportional zu Prioritätswerten²⁶ $\bar{\omega}_a$ (Auswahl des Prüfers) bzw. $\bar{\pi}_e$ (Auswahl der Prüffeldergruppe) sind. Die Prioritätswerte werden dabei durch Regeln ω und π festgelegt. Um sicherzustellen, daß alle auswählbaren

²³ Vgl. Abschnitt 3.1.

²⁴ RC_a ist die Summe der Periodenkapazitäten C_{at} des Prüfers a im Planungszeitraum $t = 1, \dots, T$ abzüglich der Summe der Kapazitätsgebräuche von Prüfer a durch die Teilprüffelder der bereits zugeordneten Prüffeldergruppen. Es ist dabei möglich, daß nach der Zuordnung einer Prüffeldergruppe die Restkapazität eines Prüfers negativ ist. In diesem Fall muß dem fiktiven Prüfer im Rahmen der Terminierung der Teilprüffelder eine entsprechende Anzahl an Teilprüffeldern zugeordnet werden.

²⁵ Im Falle der Zuordnung des fiktiven Prüfers wird der Einfachheit halber $m = A$ angenommen.

²⁶ 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.

Prüfer und Prüffeldergruppen, also auch diejenigen mit Prioritätswerten von Null, eine Zuordnungswahrscheinlichkeit größer Null erhalten, und um außerdem ein höheres Maß an Flexibilität bei der Zuordnung zu erreichen, werden die Prioritätswerte $\bar{\omega}_a$ bzw. $\bar{\pi}_e$ durch

$$\bar{\bar{\omega}}_a = (\bar{\omega}_a + \varepsilon)^\alpha \quad (a \in EA) \quad (7)$$

bzw.

$$\bar{\bar{\pi}}_e = (\bar{\pi}_e + \varepsilon)^\beta \quad (e \in EE) \quad (8)$$

modifiziert, wobei es sich bei ε , α und β um nichtnegative reellwertige Parameter handelt.²⁷ Die Wahrscheinlichkeiten $\tilde{\omega}_a$ bzw. $\tilde{\pi}_e$, daß Prüfer a bzw. Prüffeldergruppe e ausgewählt wird, betragen dann

$$\tilde{\omega}_a = \bar{\bar{\omega}}_a / \left(\sum_{a' \in EA} \bar{\bar{\omega}}_{a'} \right) \quad (a \in EA) \quad (9)$$

bzw.

$$\tilde{\pi}_e = \bar{\bar{\pi}}_e / \left(\sum_{e' \in EE} \bar{\bar{\pi}}_{e'} \right) \quad (e \in EE) \quad (10)$$

Der Einfluß der Kontrollparameter α und β auf den Zuordnungsprozeß läßt sich wie folgt verdeutlichen: für $\alpha = 0$ bzw. $\beta = 0$ haben alle Alternativen identische $\bar{\bar{\omega}}_a$ - bzw. $\bar{\bar{\pi}}_e$ -Werte und damit dieselbe Zuordnungswahrscheinlichkeit; für α bzw. β signifikant größer als 1 dominiert der größte $\bar{\omega}_a$ - bzw. $\bar{\pi}_e$ -Wert, der zugehörige $\bar{\bar{\omega}}_a$ - bzw. $\bar{\bar{\pi}}_e$ -Wert geht gegen unendlich und damit die betreffende Auswahlwahrscheinlichkeit $\tilde{\omega}_a$ bzw. $\tilde{\pi}_e$ gegen Eins.

4.1.2 Terminierung der Teilprüffelder (Phase 2)

Das Vorgehen der zweiten Phase läßt sich in Form eines randomisierten parallelen²⁸ Verfahrens beschreiben. Ein Ablaufplan wird konstruiert, indem die Perioden des Planungshorizontes in chronologischer Reihenfolge betrachtet werden. In jeder Periode wird die Menge EJ aller Teilprüffelder berechnet, die zum aktuellen Zeitpunkt ohne Verletzung der Restriktionen eingeplant werden können. Eines dieser Teilprüffelder wird ausgewählt und zur Bearbeitung in der aktuellen Periode - unter gleichzeitiger Aktualisierung der Menge EJ - eingeplant. Liegt mehr als ein einplanbares Teilprüffeld vor, so erfolgt die Auswahl wiederum zufallsgesteuert und zwar gemäß Wahrscheinlichkeiten, die proportional zu nach Regeln ρ berechneten Prioritätswerten $\bar{\rho}_j$ sind. Auf diese Weise werden Teilpläne sukzessive erweitert, bis kein Teilprüffeld mehr in der aktuellen Periode einplanbar ist. Dann wird die nächste Periode betrachtet, bis schließlich der Planungshorizont erreicht ist. Die Teilprüffelder, die aufgrund der Verletzung einer Restriktion in keiner Periode eingeplant werden konnten,

²⁷ In dieser Untersuchung wurde $\varepsilon = 1$ gesetzt. Die Frage, welche Werte für α und β gewählt werden sollten, wird in Abschnitt 5.3 behandelt.

²⁸ Zu der Unterscheidung zwischen seriellen und parallelen Verfahren siehe Kelley (1963, S. 352 ff.).

werden in der letzten Periode in der jeweils korrespondierenden Bearbeitungsalternative, die ausschließlich die Kapazität des fiktiven Prüfers nachfragt, eingeplant.

Ausgehend von Prioritätswerten $\bar{\rho}_j$ für die aktuell einplanbaren Teilprüffelder kann man dann - analog zu Abschnitt 4.1.1 - die Einplanungswahrscheinlichkeiten durch

$$\bar{\bar{\rho}}_j = (\bar{\rho}_j + \varepsilon)^\gamma \quad (j \in EJ) \quad (11)$$

berechnen, wobei es sich bei ε und γ um nichtnegative reellwertige Parameter handelt.²⁹ Die Wahrscheinlichkeit $\tilde{\rho}_j$, daß Teilprüffeld j für eine Einplanung ausgewählt wird, ergibt sich aus

$$\tilde{\rho}_j = \bar{\bar{\rho}}_j / \left(\sum_{j' \in EJ} \bar{\bar{\rho}}_{j'} \right) \quad (j \in EJ) \quad (12)$$

Jede Kombination der Regeln beider Phasen definiert - in Verbindung mit dem obigen Schema - einen eigenen Algorithmus (ω , π , ρ) zur Bearbeitung des operativen Planungsproblems.

4.2 Prioritätsregeln

In diesem Abschnitt werden für jede der beiden Phasen einige Prioritätsregeln vorgestellt, die alternativ zum Einsatz kommen können. Da dynamische Regeln im Vergleich zu statischen auf Grund der Verwendung aktuellerer Informationen bessere Ergebnisse versprechen, wurden in dieser Untersuchung ausschließlich dynamische Regeln implementiert.³⁰

4.2.1 Prioritätsregeln zur Zuordnung von Bearbeitungsalternativen zu Prüffeldergruppen

Entsprechend der Zuordnung der Bearbeitungsalternativen in zwei Schritten werden zunächst die Regeln zur Auswahl eines Prüfers und anschließend die zur Auswahl einer Prüffeldergruppe erläutert.

4.2.1.1 Prioritätsregeln zur Auswahl eines Prüfers

Die Regeln zur Prüferauswahl basieren auf der Restkapazität RC_a der einzelnen Prüfer a im Planungszeitraum.

- MINimum Remaining Capacity (MIN RC)

Diese Regel präferiert Prüfer, die über eine geringe Restkapazität verfügen. Unter Verwendung der maximalen Restkapazität RC^{\max} aller auswählbaren Prüfer mit

$$RC^{\max} = \max \{ RC_a \mid a \in EA \} \quad (13)$$

²⁹ In dieser Untersuchung wurde erneut $\varepsilon = 1$ gesetzt. Die Frage, welche Werte für γ gewählt werden sollten, wird ebenfalls in Abschnitt 5.3 behandelt.

³⁰ Zur Unterscheidung zwischen statischen und dynamischen Regeln siehe z. B. Drexel / Kolisch (1993).

können die Prioritätswerte dann wie folgt berechnet werden:

$$\bar{\omega}_a = RC^{\max} - RC_a \quad (a \in EA) \quad (14)$$

- MAXimum Remaining Capacity (MAX RC)

Durch diese Regel erhalten Prüfer mit großer Restkapazität hohe Prioritätswerte. Bezeichnet RC^{\min} die minimale Restkapazität aller auswählbaren Prüfer, also

$$RC^{\min} = \min \{ RC_a \mid a \in EA \}, \quad (15)$$

dann berechnen sich die Prioritätswerte zu

$$\bar{\omega}_a = RC_a - RC^{\min} \quad (a \in EA) \quad (16)$$

4.2.1.2 *Prioritätsregeln zur Auswahl einer Prüffeldergruppe*

Die Regeln zur Prüffeldergruppenauswahl basieren auf dem Kapazitätsgebrauch RU_{eam} einer Prüffeldergruppe e bei Bearbeitung durch den - bereits zuvor festgelegten - Prüfer a in der korrespondierenden Bearbeitungsalternative m .³¹ RU_{eam} wird durch entsprechende Summation der Kapazitätsgebräuche über alle Teilprüffelder der Prüffeldergruppe e berechnet. Ist darüber hinaus der Kapazitätsgebrauch mindestens eines Teilprüffeldes einer Prüffeldergruppe größer als die größte (Perioden-) Kapazität des gerade betrachteten Prüfers a (liegt also ein Zuordnungsverbot vor), so werden der Prüffeldergruppe bei den beiden folgenden Regeln Prioritätswerte $\bar{\pi}_e$ von Null zugewiesen.

- MINimum Resource Usage (MIN RU)

Diese Regel bevorzugt die Prüffeldergruppe mit dem geringsten Kapazitätsgebrauch. Definiert man RU^{\max} als maximalen Kapazitätsgebrauch einer Prüffeldergruppe, also

$$RU^{\max} = \max \{ RU_{eam} \mid e \in EE \}, \quad (17)$$

so berechnen sich die Prioritätswerte zu

$$\bar{\pi}_e = RU^{\max} - RU_{eam} \quad (e \in EE) \quad (18)$$

- MAXimum Resource Usage (MAX RU)

Diese Regel ordnet Prüffeldergruppen mit großen Kapazitätsgebräuchen hohe Prioritätswerte zu. Mit RU^{\min} wird der minimale Kapazitätsgebrauch bestimmt, d. h.

$$RU^{\min} = \min \{ RU_{eam} \mid e \in EE \} \quad (19)$$

³¹ a und m sind nach der Zuordnung im ersten Schritt von Phase 1 bereits bestimmt.

Analog zu MIN RU werden die Prioritätswerte durch

$$\bar{\pi}_e = RU_{eam} - RU^{\min} \quad (e \in EE) \quad (20)$$

berechnet.

4.2.2 Prioritätsregeln zur Terminierung der Teilprüffelder

In diesem Abschnitt werden einige Prioritätsregeln vorgestellt, die in der zweiten Phase alternativ zum Einsatz kommen können. Dabei werden reihenfolge-, termin- sowie ressourcenbasierte Prioritätsregeln unterschieden.

4.2.2.1 Reihenfolgebasierte Prioritätsregeln

Regeln dieses Typs setzen die Prioritätswerte in Bezug zu den Reihenfolgebeziehungen zwischen den Teilprüffeldern.

- Most ImmEDIATE Successors (MIS)³²

Die in einer Periode einplanbaren Teilprüffelder werden durch diese Regel entsprechend der Anzahl ihrer unmittelbaren Nachfolger bewertet. Die zugrundeliegende Idee besteht darin, diejenigen Teilprüffelder zuerst einzuplanen, auf deren Beendigung die größte Anzahl von unmittelbaren Nachfolgern wartet, weil deren verspätete Einplanung die Bearbeitung aller nachfolgenden Teilprüffelder verzögern würde.

Für jedes einplanbare Teilprüffeld j ist \mathcal{N}_j die Menge aller seiner unmittelbaren Nachfolger mit

$$\mathcal{N}_j = \{ i \mid i \text{ ist unmittelbarer Nachfolger von } j \} \quad (j \in EJ) \quad (21)$$

Bezeichnet man mit N^{\min} die minimale Anzahl der Nachfolger, also

$$N^{\min} = \min \{ |\mathcal{N}_j| \mid j \in EJ \}, \quad (22)$$

dann können die Prioritätswerte wie folgt berechnet werden:

$$\bar{p}_j = |\mathcal{N}_j| - N^{\min} \quad (j \in EJ) \quad (23)$$

4.2.2.2 Terminbasierte Prioritätsregeln

Diese Regeln verwenden die Ergebnisse der klassischen Zeitplanung³³, die für die Bearbeitung der Teilprüffelder frühest- und spätestmögliche Endtermine bestimmt. Während in der Modell-

³² Ähnlich in Alvarez-Valdés / Tamarit (1989).

³³ In der angelsächsischen Literatur meist als "critical-path analysis" bezeichnet; vgl. z. B. Levy / Thompson / Wiest (1963).

formulierung dazu die Zeitpunkte EF_j und LF_j berücksichtigt werden, können an dieser Stelle - aufgrund der bereits erfolgten Zuordnung von Bearbeitungsalternativen zu Prüffeldergruppen - unter Verwendung von d_{jm} "genauere" Endtermine EF_{jm} und LF_{jm} zugrunde gelegt werden.

- MINimum Latest Finishing Time (MIN LFT)³⁴

Man kann den spätesten Endtermin LF_{jm} eines Teilprüffeldes als ein Maß für dessen Dringlichkeit auffassen, weil seine Bearbeitung spätestens zu diesem Zeitpunkt abgeschlossen sein muß. Die Regel MIN LFT ordnet dementsprechend die höchsten Prioritätswerte den dringendsten Teilprüffeldern zu; dem Job j mit dem spätesten Endtermin LF_j wird ein Prioritätswert von Null zugewiesen. Mit

$$LF^{\max} = \max \{ LF_{jm} \mid j \in EJ \} \quad (24)$$

werden die Prioritätswerte durch

$$\bar{\rho}_j = LF^{\max} - LF_{jm} \quad (j \in EJ) \quad (25)$$

bestimmt.

4.2.2.3 Ressourcenbasierte Prioritätsregeln

Diese Regeln bewerten Teilprüffelder anhand des durch ihre Bearbeitung verursachten Ressourcengebrauchs (wie z. B. der Inanspruchnahme der Ressource Prüfer), der Knappheit der beanspruchten Ressourcen oder einer Kombination beider Kriterien.

- MAXimum Total Work Following (MAX TWF)³⁵

Die Auswahlwahrscheinlichkeit eines Teilprüffeldes j berechnet sich bei dieser Regel auf Grundlage von TWF_j als Summe der Kapazitätsgebräuche aller nachfolgenden Teilprüffelder.³⁶ Mit

$$TWF^{\min} = \{ TWF_j \mid j \in EJ \} \quad (26)$$

berechnen sich die Prioritätswerte zu

$$\bar{\rho}_j = TWF_j - TWF^{\min} \quad (j \in EJ) \quad (27)$$

- Next Scheduling Time (NST)

Die bisher diskutierten Regeln berücksichtigen die Verfügbarkeit von Prüfern in nachfolgenden Perioden nicht und sind deshalb wenig vorausschauend. Deshalb wird bei der ebenfalls

³⁴ Ähnlich in Alvarez-Valdés / Tamarit (1989).

³⁵ Vgl. Schirmer (1993, S. 54).

³⁶ Dabei könnte ein Teilprüffeld mehrfach berücksichtigt werden, wenn es mehrere Teilprüffelder als Vorgänger hat, die wiederum (mittelbare) Nachfolger des eingangs betrachteten Teilprüffeldes sind. Hier wird allerdings jedes mittel- oder unmittelbar nachfolgende Teilprüffeld genau einmal berücksichtigt.

kapazitätsbasierten Regel NST für jeden unmittelbaren Nachfolger eines Teilprüffeldes die Verfügbarkeit des zugeordneten Prüfers in den folgenden Perioden überprüft. Es ist naheliegend, einem Teilprüffeld eine hohe Auswahlwahrscheinlichkeit zuzuordnen, wenn durch dessen Einplanung die zu den unmittelbar nachfolgenden Teilprüffeldern zugeordneten Prüfer in den folgenden Perioden kapazitätswirksam beschäftigt werden können.³⁷

NST_{jm} hat den Wert des nächstmöglichen Bearbeitungszeitpunktes von Teilprüffeld j in der Bearbeitungsalternative m unter Berücksichtigung der Kapazitätsrestriktionen oder, falls dies im Planungszeitraum nicht möglich ist, den Wert $T + 1$. Mit

$$v_j = \sum_{j' \in \mathcal{N}_j} T + 1 - NST_{j'm'} \quad (j \in EJ)^{38} \quad (28)$$

und

$$v^{\min} = \{ v_j \mid j \in EJ \} \quad (29)$$

können dann die Prioritätswerte

$$\bar{\rho}_j = v_j - v^{\min} \quad (j \in EJ) \quad (30)$$

berechnet werden.

- AVeraGe Next Scheduling Time (AVG NST)

Bei der Regel NST ist es möglich, daß ein Teilprüffeld mit vielen Nachfolgern, die erst zu einem späteren Zeitpunkt eingeplant werden können, eine höhere Auswahlwahrscheinlichkeit erhält als ein Teilprüffeld mit wenigen Nachfolgern, die früher eingeplant werden können. Bei der Regel AVG NST wird deshalb eine auf der Anzahl der unmittelbaren Nachfolger basierende Normierung von v_j durchgeführt.

$$w_j = v_j / |\mathcal{N}_j| \quad (j \in EJ) \quad (31)$$

Die Berechnung der Prioritätswerte $\bar{\rho}_j$ erfolgt analog zu (29) und (30).

- AVeraGe Next Scheduling Time Total Work Following (AVG NST TWF)

Diese Regel stellt eine Kombination aus AVG NST und MAX TWF dar. Da es möglich ist, daß Teilprüffelder mit ungefähr gleicher Anzahl unmittelbarer Nachfolger und ähnlichen nächstmöglichen Bearbeitungszeitpunkten der Nachfolger unterschiedliche Kapazitätsgebräuche der unmittelbaren und mittelbaren Nachfolger aufweisen, kann es dann vorteilhaft sein, Teilprüffelder mit größeren Kapazitätsgebräuchen der Nachfolger zuerst einzuplanen.

³⁷ Die Anzahl der Nachfolger hat demzufolge auch Einfluß auf den Prioritätswert.

³⁸ Teilprüffeld j' wird in der durch Phase 1 zugeordneten Bearbeitungsalternative m' durchgeführt.

$$u_j = \left(\sum_{j' \in \mathcal{N}_j} \max(0, \text{TWF}_j - \text{NST}_{j'm'}) \right) / |\mathcal{N}_j| \quad (j \in E) \quad (32)$$

Die Berechnung der Prioritätswerte \bar{p}_j erfolgt analog zu (29) und (30).

5. Experimentelle Untersuchung

Um die Leistungsfähigkeit der einzelnen Algorithmen 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.³⁹ 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 die Einbeziehung eines fiktiven Prüfers ist im übrigen die Existenz mindestens einer zulässigen Lösung garantiert.

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

Obwohl die Größe eines Datensatzes von mehreren Modellparametern bestimmt wird, hat sich gezeigt, daß alle diese Parameter - direkt oder indirekt - von der Länge des Planungshorizontes abhängen. Im folgenden werden die Datensätze ihrer Größe nach in drei Klassen unterteilt. Der Planungshorizont beträgt bei *kleinen* Datensätzen 40 Stunden, bei *mittelgroßen* Datensätzen 80 Stunden und bei *großen* Datensätzen 120 Stunden. Darüber hinaus wurden *sehr kleine* Datensätze mit einem Planungshorizont von 10 Stunden erzeugt. Diese entsprechen zwar keinen realen Planungsproblemen, sind dafür aber mit Standardsoftware wie OSL exakt 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 Reihenfolgebeziehungen zwischen den einzelnen Prüffeldern als einzig entscheidend angesehen: Je größer die Anzahl

³⁹ Zu einer detaillierten Darstellung siehe Böttcher (1993, S. 25 ff.).

der Reihenfolgebeziehungen ist, desto schwieriger lösbar ist der entsprechende Datensatz, weil sich bei ansonsten identischen Parameterinstanzierungen die Zahl der zulässigen Lösungen reduziert. Bezüglich des Schwierigkeitsgrades werden *leichte*, *mittlere* und *schwere* Datensätze unterschieden.

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.⁴⁰ Die wichtigsten Faktoren sind die Prioritätsregeln ω , π und ρ , die Größe σ und der Schwierigkeitsgrad τ des Datensatzes, die Werte der Kontrollparameter α , β und γ 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 die folgenden Größen beschrieben: den Zielfunktionswert der besten in einem Lauf gefundenen Lösung und die durchschnittliche Rechenzeit für eine Iteration.⁴¹ 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 eine Reihe von Bewertungsfunktionen definieren, die die Ergebnisse des gesamten Experimentes in geeigneter Form zusammenfassen.

Die *Effizienzrate* $\phi_{\omega\pi\rho\alpha\beta\gamma\sigma\tau\iota}$ ⁴² eines Algorithmus (ω, π, ρ) mit den Kontrollparametern (α, β, γ) 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 besten von (ω, π, ρ) mit (α, β, γ) in ι Iterationen gefundenen Lösung.⁴³ Demzufolge ist $\phi_{\omega\pi\rho\alpha\beta\gamma\sigma\tau\iota} \in]0,1]$. Ein Wert von 1 bedeutet, daß alle gefundenen (besten) Lösungen je Datensatz so gut wie die jeweils beste bekannte Lösung sind; ein Wert von 0.5, daß die gefundenen Lösungen - im Durchschnitt über alle getesteten

⁴⁰ Vgl. Schirmer (1993, S. 79 ff.). Ähnliche statistische Modelle werden z. B. in Kurtulus / Davis (1982), Kurtulus / Narula (1985) sowie Alvarez-Valdés / Tamarit (1989) verwendet.

⁴¹ Da bei jeder Iteration u. U. nicht bearbeitete Teilprüffelder in T durch den fiktiven Prüfer durchgeführt werden können und deshalb immer eine zulässige Lösung ermittelt wird, sind weitere Größen wie z. B. die Anzahl der ermittelten zulässigen Lösungen nicht von Interesse.

⁴² Analog zu den angegebenen Bewertungsfunktionen 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.

⁴³ Bei einem besten bekannten Zielfunktionswert von Null muß die Berechnung geringfügig modifiziert werden.

Datensätze der Klasse - halb so gut sind wie die besten bekannten Lösungen.

Die *durchschnittliche Rechenzeit* $\nu_{\omega\pi\rho\alpha\beta\gamma\sigma\tau\iota}$ gibt die Zeit an, die während eines Laufes im Durchschnitt zur Durchführung einer Iteration benötigt wurde.⁴⁴

5.3 Ergebnisse

Wegen des erheblichen Rechenaufwandes, der mit einer vollständigen Faktorenanalyse verbunden ist, wurden in die Untersuchung ausschließlich sehr kleine, kleine und mittelgroße Datensätze einbezogen.⁴⁵ Für jeden der drei Schwierigkeitsgrade wurden 10 Datensätze erzeugt, auf die für die sehr kleinen und kleinen jeweils 24⁴⁶ und für die mittelgroßen 6 Algorithmen (ω , π , ρ), die sich bei den kleinen Datensätzen als am besten geeignet erwiesen haben, angewendet wurden. Dabei wurden die Kontrollparameter α , β und γ unabhängig voneinander über die Werte 0, 2 und 4 variiert. Pro Datensatz wurden für jeden Algorithmus und jede Kombination aus Werten der Kontrollparameter 1000 Iterationen durchgeführt, also 810 000 Iterationen je Algorithmus und Datensatzgröße.

Zur Beurteilung der Algorithmen sind die Ergebnisse der Untersuchung der kleinen Datensätze in Tabelle 2 zusammengefaßt. Die 10 besten Algorithmen sind in absteigender Reihenfolge der Werte ihrer Effizienzzraten mit den zugehörigen CPU-Zeiten für eine Iteration aufgeführt.

Tabelle 2 erlaubt die folgenden Schlußfolgerungen:

- Der Schwierigkeitsgrad eines Datensatzes hat sowohl Einfluß auf die Effizienzzrate als auch auf die Rechenzeit. Während bei den leichten und mittleren Datensätzen die Reihenfolge der Algorithmen identisch ist, ergibt sich bei den schweren Datensätzen ab Rang 3 eine andere Reihenfolge. Deutlich höhere Werte der Standardabweichungen bei den schweren Datensätzen, die hier nicht weiter dokumentiert werden, lassen jedoch die Vermutung zu, daß das beste erzielte Ergebnis häufig ähnlich gut wie bei den leichten und mittleren Datensätzen ist.
- Die Werte der Effizienzzraten und die im Durchschnitt zur Lösung benötigten Rechenzeiten sinken - bei Anwendung desselben Algorithmus - mit steigendem Schwierigkeitsgrad. Beide Beobachtungen resultieren aus dem bei schwierigeren Datensätzen reduzierten Lösungsraum.
- Die Regeln MAX RC und MAX RU (bei den schweren Datensätzen auch MIN RU) der ersten Phase bilden in Kombination mit den Regeln MAX TWF, MIN LFT sowie AVG NST TWF der zweiten Phase eine Gruppe von Algorithmen, die signifikant bessere Ergebnisse liefert als die übrigen Algorithmen.

⁴⁴ Die Algorithmen wurden in der Programmiersprache C auf einer IBM RISC/6000 Modell 550 implementiert.

⁴⁵ Jedoch ist die These, daß Prioritätsregeln, die für kleinere Datensätze gute Ergebnisse liefern, dies auch für größere Datensätze tun, weitgehend akzeptiert; vgl. Davis / Patterson (1975), Badiru (1988), Alvarez-Valdés / Tamarit (1989).

⁴⁶ Vgl. Abschnitt 4.2 : $\{\text{MIN RC, MAX RC}\} \times \{\text{MIN RU, MAX RU}\} \times \{\text{MIN LFT, MIS, MAX TWF, NST, AVG NST, AVG NST TWF}\}$.

Tabelle 2: Rangfolge der Algorithmen bei kleinen Datensätzen⁴⁷

leicht			mittel			schwer		
$\omega\rho$	$\phi_{\omega\rho\sigma\tau}$	$\nu_{\omega\rho\sigma\tau}$	$\omega\rho$	$\phi_{\omega\rho\sigma\tau}$	$\nu_{\omega\rho\sigma\tau}$	$\omega\rho$	$\phi_{\omega\rho\sigma\tau}$	$\nu_{\omega\rho\sigma\tau}$
MAX RC, MAX RU, MAX TWF	0.9829	24.3	MAX RC, MAX RU, MAX TWF	0.9710	19.8	MAX RC, MAX RU, MAX TWF	0.8953	16.6
MAX RC, MAX RU, MIN LFT	0.9820	34.8	MAX RC, MAX RU, MIN LFT	0.9693	28.9	MAX RC, MAX RU, MIN LFT	0.8946	24.4
MAX RC, MAX RU, AVG NST TWF	0.9760	21.4	MAX RC, MAX RU, AVG NST TWF	0.9647	18.3	MAX RC, MIN RU, MAX TWF	0.8735	16.6
MAX RC, MAX RU, MIS	0.9680	18.2	MAX RC, MAX RU, MIS	0.9498	14.9	MAX RC, MIN RU, MIN LFT	0.8706	24.5
MAX RC, MAX RU, NST	0.9601	20.6	MAX RC, MAX RU, NST	0.9443	16.8	MAX RC, MAX RU, AVG NST TWF	0.8648	16.3
MAX RC, MAX RU, AVG NST	0.9579	20.6	MAX RC, MAX RU, AVG NST	0.9352	16.8	MAX RC, MIN RU, AVG NST TWF	0.8349	16.3
MAX RC, MIN RU, MIN LFT	0.9434	35.4	MAX RC, MIN RU, MIN LFT	0.9210	29.3	MIN RC, MAX RU, MIN LFT	0.7906	24.4
MAX RC, MIN RU, MAX TWF	0.9378	24.4	MAX RC, MIN RU, MAX TWF	0.9148	19.9	MIN RC, MAX RU, MAX TWF	0.7879	17.5
MAX RC, MIN RU, AVG NST TWF	0.9325	21.4	MAX RC, MIN RU, AVG NST TWF	0.9108	18.3	MIN RC, MIN RU, MAX TWF	0.7590	17.8
MAX RC, MIN RU, MIS	0.9091	19.9	MAX RC, MIN RU, MIS	0.8819	15.5	MIN RC, MIN RU, MIN LFT	0.7569	24.5

Im nächsten Schritt wurden die Algorithmen $(\omega, \pi, \rho) \in \{\text{MAX RC}\} \times \{\text{MAX RU, MIN RU}\} \times \{\text{MAX TWF, MIN LFT, AVG NST TWF}\}$, die sich bei den kleinen Datensätzen im Durchschnitt über alle Schwierigkeitsgrade als besonders geeignet erwiesen haben, anhand der mittelgroßen Datensätze einer weiteren Untersuchung unterzogen. Die Ergebnisse, die in Tabelle 3 wiedergegeben sind, zeigen, daß die Algorithmen $(\omega, \pi, \rho) \in \{(\text{MAX RC, MAX RU, MIN LFT}), (\text{MAX RC, MAX RU, MAX TWF})\}$ wie schon bei den kleinen Datensätzen mit Abstand die höchsten Effizienzzraten $\phi_{\omega\rho\sigma\tau}$ erreichen konnten. Die Veränderungen der durchschnittlichen Rechenzeiten für eine Iteration bei den kleinen und den mittelgroßen Datensätzen über alle Schwierigkeitsgrade sind Tabelle 4 zu entnehmen.⁴⁸

Auf Basis der beiden besten Algorithmen, also $(\omega, \pi, \rho) \in \{(\text{MAX RC, MAX RU, MIN LFT}), (\text{MAX RC, MAX RU, MAX TWF})\}$, wurden die Auswirkungen einer Variation der Werte α , β und γ anhand der kleinen und mittelgroßen Datensätze untersucht:

⁴⁷ CPU - Zeiten in Millisekunden.

⁴⁸ Die durchschnittliche Anzahl an Binärvariablen beträgt für die kleinen Datensätze 13 800 und für die mittelgroßen 107 200, d. h. die Rechenzeiten nehmen - erwartungsgemäß - linear mit der Datensatzgröße zu.

Tabelle 3: Rangfolge der Algorithmen bei mittelgroßen Datensätzen

leicht		mittel		schwer	
$\omega\rho\rho$	$\phi\omega\rho\rho\sigma\tau$	$\omega\rho\rho$	$\phi\omega\rho\rho\sigma\tau$	$\omega\rho\rho$	$\phi\omega\rho\rho\sigma\tau$
MAX RC, MAX RU, MAX TWF	0.7612	MAX RC, MAX RU, MIN LFT	0.7234	MAX RC, MAX RU, MAX TWF	0.6830
MAX RC, MAX RU, MIN LFT	0.7534	MAX RC, MAX RU, MAX TWF	0.7225	MAX RC, MAX RU, MIN LFT	0.6824
MAX RC, MAX RU, AVG NST TWF	0.6919	MAX RC, MAX RU, AVG NST TWF	0.6148	MAX RC, MIN RU, MIN LFT	0.6082
MAX RC, MIN RU, MIN LFT	0.6373	MAX RC, MIN RU, MAX TWF	0.6099	MAX RC, MIN RU, MIN TWF	0.5956
MAX RC, MIN RU, MAX TWF	0.6315	MAX RC, MIN RU, MIN LFT	0.6096	MAX RC, MAX RU, AVG NST TWF	0.5288
MAX RC, MIN RU, AVG NST TWF	0.5961	MAX RC, MIN RU, AVG NST TWF	0.5469	MAX RC, MIN RU, AVG NST TWF	0.4840

- Die Wahl des Wertes von Parameter α hat keinen signifikanten Einfluß auf die Effizienzzraten und ist somit von untergeordneter Bedeutung.
- Es zeigte sich, daß die besten Ergebnisse erzielt wurden, wenn für den Parameter β die Werte 2 oder 4 gewählt wurden.
- Die Wahl des Wertes für den Parameter γ hat erheblichen Einfluß auf die Effizienzrate. Mit $\gamma = 4$ wurden die besten und mit $\gamma = 2$ geringfügig schlechtere Resultate erzielt, während sich $\gamma = 0$ als nicht geeignet erwies.

Somit kann festgestellt werden, daß die Parameterkonstellationen (α, β, γ) mit $\alpha \in \{0, 2, 4\}$, $\beta \in \{2, 4\}$ und $\gamma \in \{2, 4\}$ zu den besten Effizienzzraten führen.

Tabelle 4: Durchschnittliche Rechenzeiten für kleine und mittelgroße Datensätze über alle Schwierigkeitsgrade⁴⁹

klein		mittelgroß	
$\omega\rho\rho$	$\nu\omega\rho\rho\sigma$	$\omega\rho\rho$	$\nu\omega\rho\rho\sigma$
MAX RC, MAX RU, MAX TWF	20.2	MAX RC, MAX RU, MAX TWF	170.4
MAX RC, MAX RU, MIN LFT	29.4	MAX RC, MAX RU, MIN LFT	153.7
MAX RC, MAX RU, AVG NST TWF	18.7	MAX RC, MAX RU, AVG NST TWF	169.6
MAX RC, MIN RU, MIN LFT	29.8	MAX RC, MIN RU, MIN LFT	149.6
MAX RC, MIN RU, MAX TWF	20.3	MAX RC, MIN RU, MAX TWF	169.5
MAX RC, MIN RU, AVG NST TWF	18.7	MAX RC, MIN RU, AVG NST TWF	141.4

⁴⁹ CPU - Zeiten in Millisekunden.

Zu Vergleichszwecken wurde versucht, die kleinen Datensätze zusammen mit den 30 sehr kleinen Datensätzen mit der Standardsoftware OSL (Release 2) zu lösen. OSL und die Algorithmen fanden für alle sehr kleinen Datensätze die jeweilige Optimallösung.⁵⁰ Während die Algorithmen jedoch pro Datensatz für 1000 Iterationen im Durchschnitt etwa 1.5 Sekunden benötigten, nahm die Lösung mit OSL einige Sekunden bis Minuten in Anspruch. Ein Vergleich der Rechenzeiten wird in Tabelle 5 vorgenommen.

Tabelle 5: Durchschnittliche Rechenzeiten für sehr kleine Datensätze

	Algorithmen (1000 Iterationen) ⁵¹			OSL		
	leicht	mittel	schwer	leicht	mittel	schwer
$\cup\sigma\tau$	0:01.6	0:01.5	0:01.4	3:13.5	5:54.3	2:17.6
Minimum	0:00.7	0:00.5	0:00.5	0:07.8	0:07.9	0:17.1
Maximum	0:03.7	0:03.5	0:03.0	20:08.9	47:10.0	9:54.6

Einträge im Format Minuten : Sekunden . Millisekunden

Die Überlegenheit der Algorithmen gegenüber OSL wird für die kleinen Datensätze noch deutlicher. OSL fand innerhalb eines Zeitlimits von 1500 Minuten keine einzige Lösung, hingegen benötigten die Algorithmen für 1000 Iterationen durchschnittlich 20.1 Sekunden.⁵²

Zusammenfassend läßt sich feststellen, daß die Algorithmen in der Lage sind, zumindest für kleine und mittelgroße Problemstellungen der operativen Planung Lösungen in Sekundenbruchteilen zu konstruieren. Selbst die Durchführung einer hohen Anzahl von z. B. 1000 Iterationen zur Erzeugung "guter" Lösungen nimmt daher nur einige Sekunden in Anspruch.

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 operative Ebene wurde ausführlich dargestellt.

⁵⁰ Das Ergebnis erlaubt jedoch keine allgemeingültigen Rückschlüsse, da diese Datensätze zu klein sind, um noch praktische Relevanz zu besitzen.

⁵¹ Zur besseren Vergleichbarkeit wird die im Durchschnitt für 1000 Iterationen benötigte Rechenzeit angegeben.

⁵² In einem weiteren Versuch wurden 15 Datensätze generiert, die geringfügig größer als die sehr kleinen Datensätze waren. OSL konnte innerhalb eines Zeitlimits von 1500 Minuten zwar 12 Datensätze lösen, benötigte dafür aber zwischen 5 und 32 Minuten, während die Algorithmen für 1000 Iterationen, in denen für die von OSL gelösten Datensätze ebenfalls die Optimallösungen gefunden wurden, zwischen 0.9 und 3.8 Sekunden rechneten.

Da herkömmliche Methoden der Ablaufplanung zur Bearbeitung dieses Problems ungeeignet sind, wurde zur Lösung ein randomisiertes heuristisches Verfahrensschema entwickelt. Dieses Schema ist unter Verwendung verschiedener Prioritätsregeln in der Lage, gute Näherungslösungen in vernachlässigbarer Rechenzeit zu liefern.

Die grundlegenden Ideen (Randomisierung, Nutzung von Prioritätswerten, Modifikation durch exponentielle Faktoren) sind darüber hinaus allgemein genug, um leicht 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.⁵³ 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.

⁵³ 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 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 Auswahlentscheidungen 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 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 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.
- Badiru, A.B.* (1988): Towards the standardization of performance measures for project scheduling heuristics, in: *IEEE Transactions on Engineering Management*, Vol. 35, S. 82-89.
- Balachandran, B.V. / Zoltners, A.A.* (1981): An interactive audit-staff scheduling decision support system, in: *The Accounting Review*, Vol. 56, S. 801-812.
- Böttcher, L.* (1993): *Personaleinsatzplanung in Wirtschaftsprüfungsgesellschaften - Entwicklung von Lösungsverfahren für den 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.
- Davis, E.W. / Patterson, J.H.* (1975): A comparison of heuristic and optimum solutions in resource-constrained project scheduling, in: *Management Science*, Vol. 21, S. 944-955.
- 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.
- 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.

- Drexel, 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.
- Drexel, A. / Salewski, F.* (1991): Expertensystembasierte Beurteilung des Internen Kontrollsystems bei Abschlußprüfungen, in: *Zeitschrift für Betriebswirtschaft*, Jg. 61, S. 755-776.
- 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. / Bartsch, T. / Pesch, E.* (1993): *Auftragsterminierung für die taktisch-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.*