

Drexl, Andreas; Kolisch, Rainer; Salewski, Frank

Working Paper — Digitized Version

Projektmanagement bei flexiblen Arbeitszeiten

Manuskripte aus den Instituten für Betriebswirtschaftslehre der Universität Kiel, No. 494

Provided in Cooperation with:

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

Suggested Citation: Drexl, Andreas; Kolisch, Rainer; Salewski, Frank (1998) : Projektmanagement bei flexiblen Arbeitszeiten, Manuskripte aus den Instituten für Betriebswirtschaftslehre der Universität Kiel, No. 494, Universität Kiel, Institut für Betriebswirtschaftslehre, Kiel

This Version is available at:

<https://hdl.handle.net/10419/147587>

Standard-Nutzungsbedingungen:

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

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

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

Terms of use:

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

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

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

Manuskripte
aus den
Instituten für Betriebswirtschaftslehre
der Universität Kiel

Nr. 494

**Projektmanagement
bei flexiblen Arbeitszeiten**

Andreas Drexl / Rainer Kolisch / Frank Salewski



Manuskripte
aus den
Instituten für Betriebswirtschaftslehre
der Universität Kiel

Nr. 494

**Projektmanagement
bei flexiblen Arbeitszeiten**

Andreas Drexl / Rainer Kolisch / Frank Salewski

Dezember 1998

Wir danken der Deutschen Forschungsgemeinschaft für die gewährte Unterstützung.

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

Dr. *Rainer Kolisch*
Institut für Betriebswirtschaftslehre, Fachgebiet Baubetriebswirtschaftslehre
Technische Universität Darmstadt, Hochschulstr. 1, 64289 Darmstadt

email: {Drexl, Kolisch, Salewski}@bwl.uni-kiel.de
URL: <http://www.wiso.uni-kiel.de/bwlinstitute/Prod>
<ftp://ftp.wiso.uni-kiel.de/pub/operations-research>

1 Einleitung

Flexibilität hat sich in den letzten Jahren zu einem zentralen Begriff der betriebswirtschaftlichen Forschung¹ und der betrieblichen Praxis entwickelt. Ungeachtet dessen gibt es keine einhellige Auffassung darüber, was man unter Flexibilität verstehen soll, wie Flexibilität quantitativ zu erfassen oder planerisch zu handhaben wäre. Es verwundert daher nicht weiter, daß mit Flexibilität immer noch äußerst verschwommene Vorstellungen verbunden werden.²

Gleichzeitig ist zu beobachten, daß angesichts zunehmender Kundenorientierung die Kundenauftragsfertigung und damit die Bedeutung des Projektmanagements dramatisch zugenommen haben. Projektmanagement beschäftigt sich per definitionem nicht mit Routineaufgaben, sondern mit komplexen, einmaligen, zeitlich, sachlich und räumlich begrenzten Vorhaben.

Gegenstand des vorliegenden Beitrages ist es, Projektmanagement bei flexiblen Arbeitszeiten zu betrachten. Dazu wird wie folgt vorgegangen: Abschnitt 2 stellt die Grundlagen des Projektmanagements dar. In Abschnitt 3 wird die im Zentrum der Ausführungen stehende Problemstellung anhand eines Beispiels veranschaulicht. In Abschnitt 4 formulieren wir ein neuartiges Optimierungsmodell, mit dem sich flexible Arbeitszeiten im Rahmen des Projektmanagements angehen lassen. Kern des Modells ist das innovative Konzept „partiell erneuerbarer Ressourcen“, mit dessen Hilfe flexible Arbeitszeiten definiert und planerisch behandelt werden können. Abschnitt 5 dient dazu, die Modellierungsmächtigkeit des zuvor beschriebenen Modells anhand von Beispielen zu verdeutlichen. Schließlich skizzieren wir in Abschnitt 6 die Vorgehensweise von Verfahren zur Lösung des Modells. Ausgewählte Rechenergebnisse werden in Abschnitt 7 dargestellt.

2 Grundlagen des Projektmanagements

Ein Projekt ist ein einmaliges, zeitlich, sachlich und räumlich begrenztes Vorhaben, das unter Verwendung knapper Ressourcen durchzuführen ist.³ Projektaufgaben sind in der Regel komplex und erfordern funktionsübergreifendes Wissen. Die Maßnahmen zur Realisierung eines Projektes werden unter Projektmanagement subsumiert. Planung, Steuerung und Kontrolle von Aufgaben, Personal und Betriebsmitteln im Sinne der Projektziele bilden die Schwerpunkte. Klassische Projektziele sind dabei termin-, kosten- und qualitätsorientiert.⁴ Aus der ursprünglichen Anwendung des Projektmanagements im technischen Bereich, zum Beispiel zur Abwicklung von Großbauprojekten, hat sich mittlerweile ein breites Anwendungsspektrum entwickelt: Projekte zur Reorganisation, zur Entwicklung und Implementation von Informationssystemen sowie zur Kundenauftragsferti-

¹ Vgl. zur Definition und gegenseitigen Abgrenzung der Begriffe Flexibilität, Elastizität und Robustheit *Schneeweiß/Kühn* (1990).

² *Schneeweiß/Wild* (1996) nennen hierfür als Paradebeispiel die Flexibilisierung der Arbeitszeit. *Günther/Schneeweiß* (1988) beschäftigen sich mit kapazitiven Wirkungen von Arbeitszeitflexibilisierungen.

³ Vgl. hierzu insbesondere die Definition nach DIN 69 901.

⁴ Zu einer empirischen Untersuchung von Projektzielen vgl. *Icmeli/Rom* (1998).

gung seien exemplarisch genannt. Die Einmaligkeit jedes Projekts ergibt sich dabei aus der Summe der relevanten Faktoren wie z.B. der Projektaufgabe, den Projektzielen und der Projektlaufzeit sowie den Zugriffsrechten auf personelle, technische und finanzielle Ressourcen.⁵ Bedingt durch die zunehmende Dynamik in der Unternehmensaußen- und -innenwelt gehen Unternehmen immer häufiger dazu über, nicht permanente Aufgaben von der Linie an Projekte zu übertragen. Die Anzahl der Projekte nimmt daher beständig zu.⁶

Im wesentlichen besteht das Projektmanagement aus einer funktionellen, einer institutionellen und einer personellen Komponente:⁷

- Das *funktionelle* Projektmanagement definiert Projektgegenstand, -aufgaben und -ziele. Als integraler Bestandteil bestimmt die Prozeß- bzw. Ablauforganisation⁸ die einzusetzenden Instrumente sowie die Reihenfolge und den Zeitpunkt der Bearbeitung der Aufgaben.
- Das *institutionelle* Projektmanagement ordnet den Projektträgern Aufgaben, Kompetenzen und Verantwortung zu und konstituiert somit die projektinterne Aufbauorganisation. Mit der Definition der Schnittstellen zwischen dem Projekt und der übergeordneten Organisationseinheit wird die projektexterne Aufbauorganisation festgelegt.
- Das *personelle* Projektmanagement definiert, basierend auf den Projektaufgaben, die Anforderungsprofile der Projektträger und Maßnahmen zur Abdeckung der Anforderungen. Unter Berücksichtigung der Unternehmenskultur wird die Projektkultur durch Führungs-, Kooperations- und Verhaltensrichtlinien vorgegeben.

Zentrale Aufgabe des funktionellen Projektmanagements ist das Ressourcenmanagement, worunter wir die dynamische Allokation der vorhandenen Betriebsmittelkapazitäten auf die Projektvorgänge verstehen. Damit beinhaltet das Ressourcenmanagement die klassische Terminplanung unter Berücksichtigung von Anordnungsbeziehungen und Terminen.⁹ Das so definierte Ressourcenmanagement ist für die Phase der Projektdurchführung von erheblicher Bedeutung, da nur die Vorgabe reliabler Planwerte eine im Sinne der Projektziele anforderungsgerechte Realisierung des Projekts gewährleistet.¹⁰

Im folgenden wollen wir unter Ressourcen nicht nur Betriebsmittel, sondern alle Potentialfaktoren, d.h. auch das Personal, subsumieren.¹¹ Dieses Vorgehen ist insofern gerechtfertigt, als insbesondere für Projekte, die nicht im Leistungserstellungsbereich eines

⁵Vgl. Mörsdorf (1998) S. 56.

⁶Vgl. erneut Mörsdorf (1998) S. 54.

⁷Vgl. hierzu ausführlicher Krüger (1993); siehe zum Projektmanagement auch Madauss (1990) sowie Moder et al. (1983).

⁸Siehe hierzu Gaitanides (1983), Küpper/Helber (1995) sowie Domschke et al. (1997).

⁹Vgl. zur Terminplanung bspw. Schwarze (1994).

¹⁰Auf die Aufgabe des Projektcontrolling in diesem Kontext soll hier nicht eingegangen werden. Der Leser sei hierzu auf Nandi/Dutta (1988) sowie Mörsdorf (1998) verwiesen. Eine Übersicht der Koordinations- und Integrationsmechanismen des funktionellen Projektmanagements ist in Drexler et al. (1998) zu finden.

¹¹Damit entstehen Überschneidungen zum Personalmanagement; vgl. z.B. Scholz (1994).

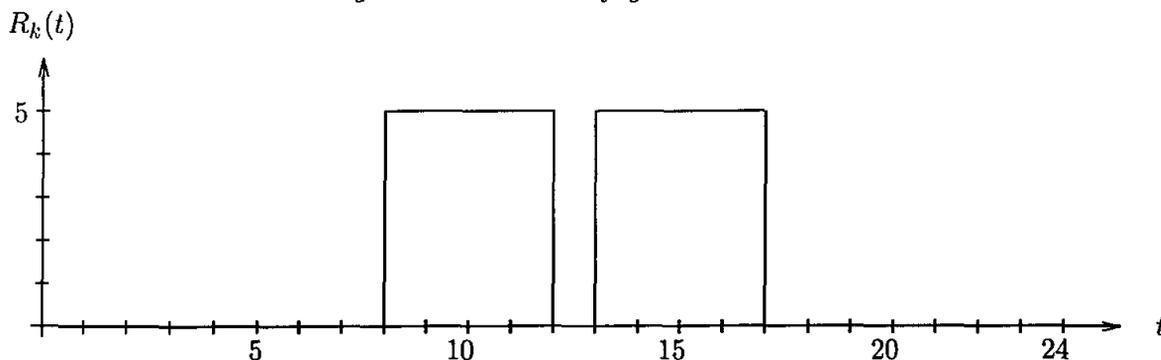
Unternehmens angesiedelt sind, die Ressource Personal für das Projektmanagement von zentraler Bedeutung ist.

Trotz ihrer Bedeutung wurden jedoch bis dato nur die Konzepte „klassischer Ressourcen“ für das Management der Ressource Personal verwendet.¹² Neuere Entwicklungen wie z.B. flexible Arbeitszeiten, Jahresarbeitszeitkonzepte u.a. mehr¹³ fanden dabei bisher keine Berücksichtigung. Im vorliegenden Beitrag soll dieses Modell- und Methodendefizit beseitigt werden. Indem wir eine neue Klasse von sogenannten „partiell erneuerbaren“ Ressourcen definieren, können die vorhandenen Erkenntnisse zum Ressourcenmanagement um personalspezifische Komponenten, wie sie etwa bei der Schichtplanung von Bedeutung sind, erweitert werden.

3 Verdeutlichung der Problemstellung

Zur Verdeutlichung der Problemstellung betrachten wir das folgende, bewußt sehr einfach gehaltene Beispiel, bei dem die erneuerbare Ressource Personal eingeplant werden soll. Eine erneuerbare Ressource vom Typ k ist in jeder Periode t mit einer Kapazität $R_k(t)$ verfügbar.¹⁴ Abbildung 1 zeigt beispielsweise, daß fünf Mitarbeiter von 8 bis 12 Uhr und von 13 bis 17 Uhr zur Verfügung stehen; von 12 bis 13 Uhr ist Mittagspause. Wie man leicht sieht, kann in dieser Situation kein Vorgang, der mindestens 3 Stunden beansprucht, und dessen Bearbeitung nicht unterbrochen werden darf, um 10 Uhr begonnen werden.

Abbildung 1: Mitarbeiterverfügbarkeit — Variante 1



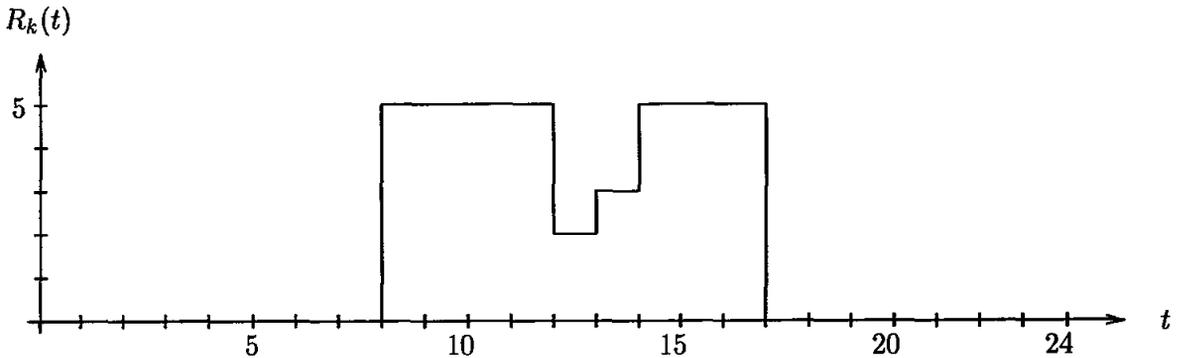
Etwas mehr Flexibilität könnte dadurch gewonnen werden, daß nicht alle Mitarbeiter ihre Pause gleichzeitig haben. In Abbildung 2 etwa haben 3 Mitarbeiter von 12 bis 13 Uhr und 2 Mitarbeiter von 13 bis 14 Uhr Pause. Unter der Voraussetzung, daß der nicht unterbrechbare Vorgang je Periode nicht mehr als zwei Mitarbeiter zu seiner Bearbeitung benötigt,

¹²Zu einem Überblick von Modellen und Methoden zum klassischen Ressourcenmanagement vgl. Brucker et al. (1999).

¹³Vgl. zur Berücksichtigung der Arbeitszeitflexibilisierung für die Produktionsprogrammplanung Günther/Schneeweiß (1988), Günther (1989) sowie Schneeweiß (1992)

¹⁴Vgl. etwa Drexel et al. (1997) sowie Kolisch (1995).

Abbildung 2: Mitarbeiterverfügbarkeit — Variante 2



könnte man ihn nun auch um 10 Uhr beginnen. Weil es jedoch zahlreiche Möglichkeiten gibt, a priori mögliche Aufteilungen der Mittagspause zu spezifizieren, gewinnt man mit einer derartigen Vorgehensweise nicht die wünschenswerte Flexibilität.

Das Angebotsprofil der Ressourcen¹⁵ in beiden Abbildungen verdeutlicht, daß die Modellierungsmöglichkeiten „klassischer“ erneuerbarer Ressourcen nicht ausreichend sind, um allgemeinere und kompliziertere Situationen zu meistern. Im folgenden Abschnitt werden wir ein neues Modellierungskonzept auf der Basis von sogenannten „partiell erneuerbaren Ressourcen“ vorstellen, das die erforderliche Flexibilität bereitstellt.

4 Modellformulierung

Wir betrachten im folgenden ein deterministisches¹⁶ Problem der Netzplantechnik¹⁷, das durch folgende Annahmen gekennzeichnet ist:

- Ein Projekt besteht aus den Aktivitäten $0, 1, \dots, n, n + 1$. Die Aktivitäten 0 bzw. $n + 1$ entsprechen dabei — ohne Beschränkung der Allgemeinheit — einer fiktiven Quelle bzw. Senke.
- Die Menge der unmittelbaren Vorgänger von Aktivität j wird mit \mathcal{P}_j bezeichnet. Zur Vereinfachung der Notation gehen wir davon aus, daß die Aktivitäten topologisch sortiert sind, also jeder Vorgänger von Aktivität j eine kleinere Vorgangsnummer als j hat.
- Aktivität j erfordert eine Bearbeitungsdauer von p_j Perioden; die Bearbeitung darf nicht unterbrochen werden.

¹⁵Vgl. Elmaghraby (1977).

¹⁶Stochastische Problemstellungen werden unter anderem in Neumann (1990) behandelt.

¹⁷Zu grundlegenden Beziehungen zwischen Netzplantechnik und Projektmanagement vgl. Küpper et al. (1975), Altrogge (1994) sowie Schwarze (1994).

- Mit \mathcal{T} bezeichnen wir die Menge der Perioden des Planungszeitraums, in denen das gesamte Projekt bearbeitet werden muß; einzelne Perioden werden mit $t \in \mathcal{T}$ bezeichnet.¹⁸
- Für die Bearbeitung der Aktivitäten des Projektes steht die Menge \mathcal{R} der (partiell erneuerbaren) Ressourcen zur Verfügung. Die Aktivitäten sind durch Ressourcenbeschränkungen gekoppelt, und zwar wie folgt: Jede Aktivität j benötigt $r_{j,k}$ Einheiten von Ressource $k \in \mathcal{R}$ während jeder Bearbeitungsperiode.
- Mit $P_k(\pi)$ bezeichnen wir die Teilmenge der Perioden, in denen Ressource k mit Kapazität $R_k(\pi)$ verfügbar ist. Für Ressource $k \in \mathcal{R}$ gibt es insgesamt $|\Pi(k)|$ Teilmengen von Perioden $P_k(\pi)$, d.h. $\pi = 1, \dots, |\Pi(k)|$.
- Als Zielsetzung wird die Minimierung der Projektdauer verfolgt, wobei Reihenfolgebeziehungen zu beachten sind und die Verfügbarkeit der Ressourcen nicht überschritten werden darf.

Unter diesen Annahmen lassen sich nun früheste und späteste Anfangs- und Beendigungszeitpunkte ES_j, LS_j und EF_j, LF_j für jede Aktivität j mit Hilfe einer kritischen Pfadanalyse berechnen.¹⁹ Bezeichne nun $E_j = \{EF_j, \dots, LF_j\}$ die Menge der möglichen Beendigungszeitpunkte von Aktivität j und sei $Q_{j,t} = \{t, \dots, t + p_j - 1\}$ die Menge der Perioden, in denen Aktivität j dann bearbeitet wird, wenn sie zu Beginn der Periode t gestartet wird. Definieren wir schließlich Entscheidungsvariablen $x_{j,t} = 1$, falls Aktivität j am Ende von Periode t abgeschlossen wird (0, sonst), so können wir folgendes Modell formulieren:

$$\text{Minimiere } Z(x) = \sum_{t \in E_{n+1}} t \cdot x_{n+1,t} \quad (1)$$

unter den Nebenbedingungen

$$\sum_{t \in E_j} x_{j,t} = 1 \quad j \in \{0, \dots, n+1\} \quad (2)$$

$$\sum_{t \in E_h} t \cdot x_{h,t} - \sum_{t \in E_j} (t - p_j) x_{j,t} \leq 0 \quad \begin{array}{l} j \in \{1, \dots, n+1\} \\ h \in \mathcal{P}_j \end{array} \quad (3)$$

$$\sum_{j \in \{1, \dots, n\}} r_{j,k} \sum_{t \in P_k(\pi)} \sum_{q \in Q_{j,t} \cap E_j} x_{j,q} \leq R_k(\pi) \quad \begin{array}{l} k \in \mathcal{R} \\ \pi \in \{1, \dots, |\Pi(k)|\} \end{array} \quad (4)$$

$$x_{j,t} \in \{0, 1\} \quad \begin{array}{l} j \in \{0, \dots, n+1\} \\ t \in E_j \end{array} \quad (5)$$

¹⁸Der Zusammenhang von Periode und Zeitpunkt ist dabei wie folgt: Periode t erstreckt sich von Zeitpunkt $t - 1$ bis t .

¹⁹Vgl. Domschke/Drexel (1998); $ES(LS, EF, LF)$ steht für earliest start (latest start, earliest finish, latest finish).

Die Zielfunktion (1) minimiert den Beendigungszeitpunkt der einzigen Senke und damit das Projektende.²⁰ Die Nebenbedingungen (2) forcieren die Bearbeitung aller Aktivitäten. Schließlich stellen die Restriktionen (3) sicher, daß die Reihenfolgebeziehung zwischen den Aktivitäten (h, j) beachtet wird, sofern Aktivität h unmittelbarer Vorgänger von Aktivität j ist. Die Nebenbedingungen (4) limitieren je Ressource und Periodenteilmenge den Gesamtverbrauch auf die Anzahl der verfügbaren Einheiten.

Mit Hilfe des im vorhergehenden Abschnitt eingeführten Beispiels lassen sich partiell erneuerbare Ressourcen wie folgt veranschaulichen. Belegen wir die Parameter $P_1(\pi)$ und $R_1(\pi)$ mit

$$\begin{array}{ll}
 P_1(1) = \{1, \dots, 8, 18, \dots, 24\} & R_1(1) = 0 \\
 P_1(2) = \{9\} & R_1(2) = 5 \\
 P_1(3) = \{10\} & R_1(3) = 5 \\
 P_1(4) = \{11\} & R_1(4) = 5 \\
 P_1(5) = \{12\} & R_1(5) = 5 \\
 P_1(6) = \{15\} & R_1(6) = 5 \\
 P_1(7) = \{16\} & R_1(7) = 5 \\
 P_1(8) = \{17\} & R_1(8) = 5 \\
 P_1(9) = \{13, 14\} & R_1(9) = 5
 \end{array}$$

so läßt sich eine einstündige Mittagspause für alle Mitarbeiter vorsehen, ohne daß ex ante spezifiziert werden muß, ob sie in Periode 13 oder in Periode 14 liegt. Abbildung 3 verdeutlicht das Konzept. Insgesamt sind neun Periodenteilmengen zu bilden. Für jede Periodenteilmenge $\pi = 1, \dots, 9$ sind die zugehörigen Perioden $P_1(\pi)$ durch das Symbol 'x' und die Anzahl verfügbarer Mitarbeiter $R_1(\pi)$ in Spalte 2 angegeben.

Im Anhang befindet sich ein Beispiel zur Illustration des Modells (1)–(5). Insbesondere soll es verdeutlichen, wie sich die Periodenteilmengen und die Verfügbarkeit partiell erneuerbarer Ressourcen auf die Einplanbarkeit von Aktivitäten auswirken.

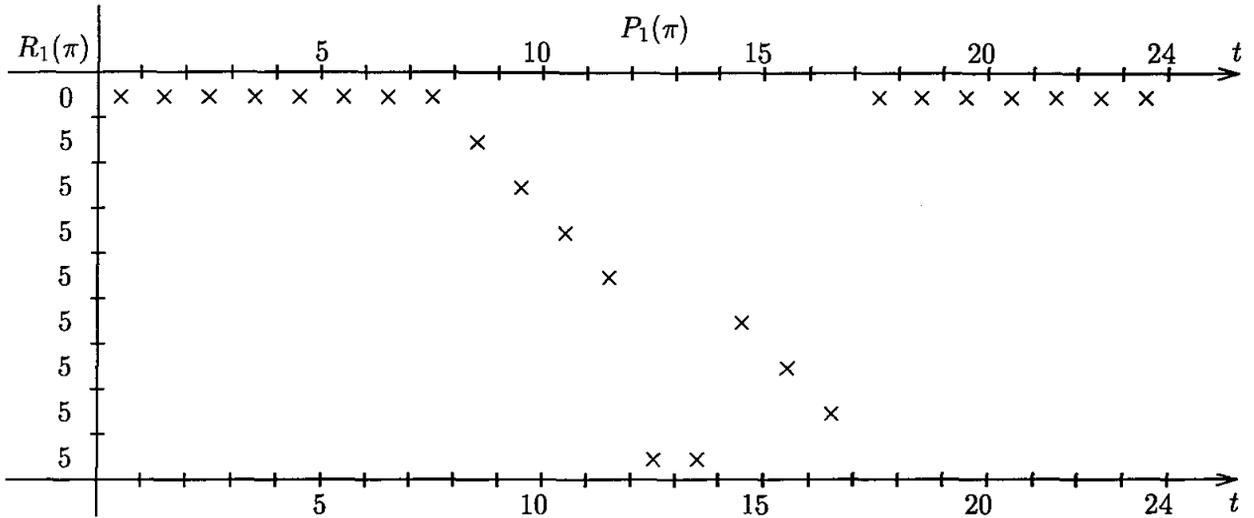
5 Anwendungsbeispiele

Wir betrachten zunächst ein Beispiel aus dem Bereich der Schichtplanung.²¹ Dabei nehmen wir an, daß jeder Mitarbeiter k in zwei aufeinanderfolgenden Wochen an höchstens acht Werktagen eingeplant werden darf. Ferner kann kein Mitarbeiter k an mehr als zwei Samstagen und/oder Sonntagen berücksichtigt werden. Ohne auf alle Parameter im Detail einzugehen, ermöglicht es die Parameterinstanziierung

²⁰Zu weiteren Zielsetzungen und zu Mehrzielproblemen in der Projektplanung vgl. *Słowiński et al.* (1994).

²¹Zu Charakteristika und Durchsetzbarkeit von Arbeitszeitmodellen vgl. *Salewski* (1998).

Abbildung 3: Veranschaulichung partiell erneuerbarer Ressourcen



$P_k(1)$	$=$	$\{1\}$	$R_k(1)$	$=$	1
$P_k(2)$	$=$	$\{2\}$	$R_k(2)$	$=$	1
\vdots			\vdots		
$P_k(14)$	$=$	$\{14\}$	$R_k(14)$	$=$	1
$P_k(15)$	$=$	$\{6, 7, 13, 14\}$	$R_k(15)$	$=$	2
$P_k(16)$	$=$	$\{1, \dots, 5, 8, \dots, 12\}$	$R_k(16)$	$=$	8
\vdots			\vdots		

den Projektablaufplan in Abbildung 4 zu ermitteln. Wie man sieht, werden alle Arbeitszeitanforderungen eingehalten. Aktivität 5 kann nicht vor Periode 14 starten, weil die (partiell erneuerbare) Ressource 'Wochenende' mit nur zwei Einheiten in der Periodenteilmenge $P_k(15) = \{6, 7, 13, 14\}$ verfügbar ist und bereits eine Einheit durch Vorgang 2 in Periode 6 verbraucht wird.

In einem weiteren Beispiel nehmen wir an, daß ein an der Projektdurchführung beteiligter Subunternehmer monatlich bezahlt werden muß, und zwar auf der Basis von Budgets für jeweils fünf Monate. Zur Modellierung wird die Ressource „Budget“ gebildet. Diese ist über disjunkte Periodenteilmengen von jeweils 5 Monaten beschränkt. Ohne auch hier auf alle Parameter im Detail einzugehen, ermöglicht die folgende Parameterinstanziierung den Projektablaufplan in Abbildung 5 zu ermitteln.

$P_k(1)$	$=$	$\{1, \dots, 5\}$	$R_k(1)$	$=$	10
$P_k(2)$	$=$	$\{6, \dots, 10\}$	$R_k(2)$	$=$	10
$P_k(3)$	$=$	$\{11, \dots, 15\}$	$R_k(3)$	$=$	10
$P_k(4)$	$=$	$\{16, \dots, 20\}$	$R_k(4)$	$=$	10

Abbildung 4: Schichtplanung

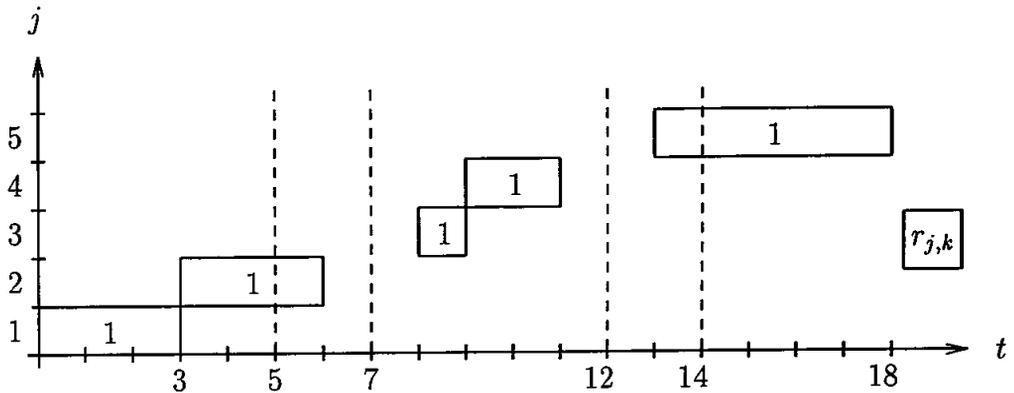
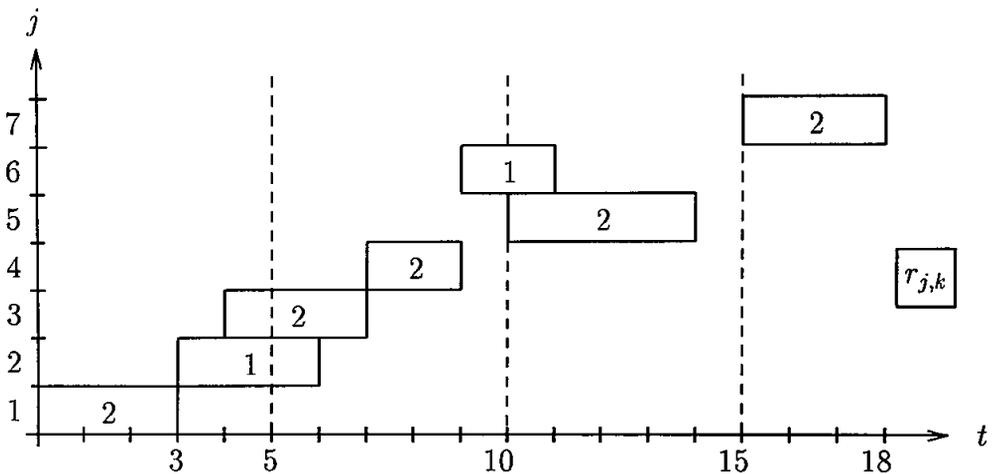


Abbildung 5: Bezahlung von Subunternehmern



Die skizzierten Beispiele unterstreichen die Anwendungsrelevanz partiell erneuerbarer Ressourcen. Angesichts ihrer Modellierungsmächtigkeit ist es jedoch nicht verwunderlich, daß das Modell (1)–(5) zur Klasse der schwierigen (Optimierungs-)Probleme gehört.²²

6 Lösungsverfahren

Zur Lösung des Modells (1)–(5) werden in *Böttcher et al. (1998)* ein exaktes Branch & Bound- sowie mehrere Prioritätsregelverfahren vorgeschlagen.²³ Prioritätsregelverfahren

²²Komplexitätsaussagen sind in *Schirmer/Drexl (1997)* zu finden.

²³Exakte Verfahren zur Lösung verwandter Problemstellungen sind in *Sprecher (1994)*, *Kolisch et al. (1995)*, *Demeulemeester/Herroelen (1997)*, *Hartmann/Drexl (1997)*, *Mingozzi et al. (1998)*, *Sprecher et al. (1997)*, *Brucker et al. (1998)* sowie *Sprecher/Drexl (1998)* zu finden. Heuristische Verfahren zur Lösung

verwenden eine Kombination aus Konstruktionsschema und Prioritätsregel. Aus der Literatur sind sogenannte serielle und parallele Konstruktionsschemata bekannt.²⁴ Vereinfacht ausgedrückt wählen serielle Schemata einen Vorgang, dessen Vorgänger bereits eingeplant sind, aus und planen ihn dann unter Beachtung von Kapazitätsrestriktionen so früh wie möglich ein. Parallele Schemata führen einen Zeitindex t mit. Auswählbar sind diejenigen Aktivitäten, die zum gegebenen Zeitindex unter Beachtung von Reihenfolge- und Kapazitätsrestriktionen eingeplant werden können. In beiden Schemata werden Prioritätsregeln dazu benutzt, einen Vorgang zur Einplanung auszuwählen.

Bei der Lösung des Modells (1)–(5) sind serielle Schemata konzeptionell überlegen.²⁵ Die implementierten Verfahren basieren daher auf dem Prinzip serieller Konstruktionsverfahren. Dabei werden durch sukzessives Einplanen von Aktivitäten partielle Ablaufpläne \mathcal{S} erzeugt, die durch eine Menge von Tupeln $\{(i, j_i, t_i) \mid i = 1, \dots, I\}$, $1 \leq I \leq n$, beschrieben werden können. I gibt die Nummer der Einplanungsstufe, auf der die letzte Aktivität eingeplant wurde, und damit die Anzahl der bereits eingeplanten Aktivitäten an. j_i ist die auf Stufe i eingeplante Aktivität und t_i die zugehörige Startperiode. Zur Veranschaulichung betrachten wir das Beispiel aus Abbildung 5. Für $I = 3$ ist $\mathcal{S} = \{(1, 1, 1), (2, 2, 4), (3, 3, 5)\}$, d.h. nach der Einplanung $I = 3$ sind die Aktivitäten 1, 2 und 3 eingeplant und beginnen in den Perioden 1, 4 bzw. 5.

In jeder Stufe des Verfahrens wird die Mengen D der Einplanungsalternativen verwendet. Eine Einplanungsalternative $(j, t) \in D$ ist durch einen Vorgang j und einen zulässigen Startzeitpunkt t gekennzeichnet, wobei ein Vorgang j mehrere mögliche Startzeitpunkte haben kann. Die Auswahl genau eines Tupels (j, t) aus der Menge der Einplanungsalternativen D erfolgt mit Prioritätsregeln.

Tabelle 1 gibt einige der von uns untersuchten Prioritätsregeln wider. Die zeitbasierten Regeln MINEFT, MINLFT und MINSLK sowie die strukturbasierte Regel MTSUCC wurden bereits erfolgreich bei der Lösung von Spezialfällen des Modells (1)–(5) eingesetzt.²⁶ Die ressourcenorientierten Regeln MAXTRU, MINTRU, MINRRU und MINDRRU definieren wir im folgenden.

Zur Vereinfachung vernachlässigen wir dabei den Index π zur Numerierung unterschiedlicher Mengen von Periodenteilmengen.²⁷ $P_k(\pi)$ und $R_k(\pi)$ reduzieren sich damit zu P_k und R_k . Des weiteren verwenden wir folgende Notation:²⁸

ähnlicher Problemstellungen werden beispielsweise in *Drexel* (1991), *Kolisch* (1995), *Kolisch/Drexel* (1996), (1997), *Hartmann* (1998) sowie *Salewski et al.* (1997) beschrieben; vgl. hierzu auch die neuere Übersicht in *Kolisch/Padman* (1997).

²⁴Vgl. *Kolisch* (1996a) sowie *Kolisch/Hartmann* (1998).

²⁵Vgl. *Böttcher et al.* (1998).

²⁶Vgl. *Kolisch* (1996b).

²⁷In *Böttcher et al.* (1998) wird gezeigt, daß man durch eine entsprechende „Normalisierung“ des Modells zu einer inhaltlich äquivalenten Darstellung kommt.

²⁸*SC* steht für consumption bzgl. start, *TC* für total consumption, *S* für successor, *LP* für longest path, *MC* für minimal consumption und *MCI* für minimal induced consumption.

$SC_{j,k,t}$	Verbrauch von Ressource k durch Aktivität j bei Start in Periode t , d.h. $SC_{j,k,t} = r_{j,k} Q_{j,t} \cap P_k $
$TC_k(\mathcal{S})$	Gesamtverbrauch von Ressource k durch Ablaufplan \mathcal{S} , d.h. $TC_k(\mathcal{S}) = \sum_{i=1}^I SC_{j_i,k,t_i}$
$\bar{R}_k(\mathcal{S})$	Restkapazität von Ressource k bzgl. Ablaufplan \mathcal{S} , d.h. $\bar{R}_k(\mathcal{S}) = R_k - TC_k(\mathcal{S})$
S_j	Menge aller direkten und indirekten Nachfolger von Aktivität j
$LP_{j,h}$	längster Weg vom Start von Aktivität j zum Start von Aktivität h
$MC_{j,k,t}$	Mindestverbrauch von Ressource k durch Aktivität j , wenn sie nicht früher als in Periode t startet, d.h. $MC_{j,k,t} = \min\{SC_{j,k,\tau} \mid t \leq \tau \leq LS_j\}$
$MCI_{j,k,t}$	Mindestverbrauch von Ressource k durch alle direkten und indirekten Nachfolger von Aktivität j bei Start von Aktivität j in t , d.h. $\sum_{h \in S_j} MC_{h,k,\max\{ES_h,t+LP_{j,h}\}}$

Tabelle 1: Akronyme der Prioritätsregeln

Abkürzung	Definition
MINEFT	Minimum Earliest Finish Time
MINLFT	Minimum Latest Finish Time
MINSLK	Minimum Slack
MTSUCC	Most Total Successors
MAXTRU	Maximum Total Resource Usage
MINTRU	Minimum Total Resource Usage
MINRRU	Minimum Relative Resource Usage
MINDRRU	Minimum Dynamic Relative Resource Usage

Die Größe

$$TRU_{j,t} = \sum_{k \in \mathcal{R}} (SC_{j,k,t} + MCI_{j,k,t}) \quad (j, t) \in D \quad (6)$$

ist dann eine startzeitabhängige untere Schranke für den gesamten Ressourcenverbrauch. Als Prioritätsregel zur Bestimmung einer Einplanungsalternative $(j, t) \in D$ wählt MAXTRU das Tupel (j, t) mit dem maximalen $TRU_{j,t}$ -Wert aus. Die Regel MINTRU plant das Tupel (j, t) mit dem minimalen $TRU_{j,t}$ -Wert ein.

Die Regeln MAXTRU und MINTRU haben den Nachteil, daß sie die verfügbare Kapazität nicht beachten. Sei nun

$$RRU_{j,t} = \sum_{\substack{k \in \mathcal{R} \\ R_k > 0}} \frac{1}{R_k} (SC_{j,k,t} + MCI_{j,k,t}) \quad (j, t) \in D \quad (7)$$

der relative Ressourcengebrauch, dann wählt die Regel MINRRU das Tupel (j, t) mit dem minimalen $RRU_{j,t}$ -Wert.

Wie man leicht sieht, berücksichtigt diese Regel die noch verfügbare Restkapazität $\bar{R}_k(\mathcal{S})$ nicht. Diese wird demgegenüber von

$$DRRU_{j,t} = \sum_{\substack{k \in \mathcal{R} \\ \bar{R}_k(\mathcal{S}) > 0}} \frac{1}{\bar{R}_k(\mathcal{S})} (SC_{j,k,t} + MCI_{j,k,t}) \quad (j, t) \in D \quad (8)$$

beachtet. Entsprechend erhalten wir die Regel MINDRRU, die das Tupel (j, t) mit minimalem $DRRU_{j,t}$ -Wert einplant.

7 Ausgewählte Rechenergebnisse

Die im vorhergehenden Abschnitt dargestellten Prioritätsregeln wurden als Bestandteil eines seriellen Verfahrens implementiert, und zwar in einer „randomisiert-regretbasierten“ Variante. Bei dieser werden Tupel nicht deterministisch ausgewählt, sondern es werden auf der Basis der Prioritätswerte Auswahlwahrscheinlichkeiten berechnet.²⁹ Als Folge kann man das Verfahren mehrfach wiederholen, man erhält im allgemeinen verschiedene Pläne und kann anschließend den Plan mit dem bestem Zielfunktionswert auswählen.

Zur Untersuchung der Verfahren wurden durch Verallgemeinerung der Vorgehensweise bei der Erzeugung der ProGen-Testdatensätze³⁰ Instanzen generiert, die für die Menge möglicher Testdatensätze des Modells (1)–(5) repräsentativ sind.³¹

Tabelle 2: Vergleich der Prioritätsregeln — $n = 30$

Prioritätsregel	leicht			schwierig		
	$Z = 10$	$Z = 100$	$Z = 1000$	$Z = 10$	$Z = 100$	$Z = 1000$
MINEFT	12.23	9.17	6.38	134.74	133.10	100.40
MINLFT	1.36	0.81	0.81	7.87	7.87	6.50
MINSLK	8.70	7.53	6.50	75.13	74.83	40.25
MTSUCC	4.71	3.31	2.77	55.52	40.06	39.86
MAXTRU	49.48	9.41	5.26	4.93	3.84	1.63
MINTRU	49.48	10.01	5.60	4.71	3.95	1.63
MINRRU	50.15	10.38	5.93	5.04	3.73	1.73
MINDRRU	50.15	10.38	6.04	5.37	3.73	1.52

²⁹Zu weiteren Details verweisen wir auf Böttcher et al. (1998).

³⁰Vgl. Kolisch et al. (1995).

³¹Zu Details vgl. erneut Böttcher et al. (1998).

Tabelle 3: Vergleich der Prioritätsregeln — $n = 60$

Prioritätsregel	leicht		schwierig	
	$Z = 10$	$Z = 100$	$Z = 10$	$Z = 100$
MINEFT	8.11	7.87	41.84	41.84
MINLFT	1.63	1.52	0.70	0.70
MINSLK	5.49	5.26	41.64	41.64
MTSUCC	2.67	2.46	1.83	1.83
MAXTRU	58.73	17.51	4.17	4.17
MINTRU	58.73	17.65	4.17	4.17
MINRRU	58.73	17.51	4.17	4.06
MINDRRU	58.73	17.51	4.17	4.17

Tabelle 2 gibt die Ergebnisse einiger Testrechnungen für Instanzen mit $n = 30$ Aktivitäten wieder. Z bezeichnet dabei den Stichprobenumfang, d.h. die Anzahl an berechneten Lösungen. Dabei wird jeweils zwischen leichten und schwierigen Datensätzen unterschieden. Datensätze gelten als leicht, wenn sie mit dem exakten Verfahren in vertretbarer Rechenzeit optimal gelöst werden konnten, andernfalls sind sie als schwierig klassifiziert. Angegeben sind die durchschnittlichen prozentualen Abweichungen vom besten bekannten Zielfunktionswert nach jeweils Z berechneten Lösungen. Die geringste mittlere prozentuale Abweichung ist jeweils durch ein \square gekennzeichnet. Analog dazu enthält Tabelle 3 Ergebnisse von Testrechnungen für Instanzen mit $n = 60$ Aktivitäten.

Die Ergebnisse sind wie folgt zu interpretieren: Bei den leichten Instanzen mit $n = 30$ Aktivitäten dominieren die zeit- und strukturbasierten Prioritätsregeln, während bei den schwierigen Datensätzen die ressourcenbasierten Regeln bessere Ergebnisse liefern. Ähnliches gilt bei den Instanzen mit $n = 60$ Aktivitäten. Insgesamt schneidet die Prioritätsregel MINLFT am besten ab.

Literatur

- [1] ALTROGGE, G. (1994): *Netzplantechnik*. Oldenbourg, München–Wien, 2. Aufl.
- [2] BÖTTCHER, J., DREXL, A., KOLISCH, R., SALEWSKI, F. (1998): Project scheduling under partially renewable resource constraints. Erscheint in *Management Science*.
- [3] BRUCKER, P., KNUST, S., SCHOO, A., THIELE, O. (1998): A branch & bound algorithm for the resource-constrained project scheduling problem. *European Journal of Operational Research*, Vol. 107, S. 272–288.
- [4] BRUCKER, P., DREXL, A., MÖHRING, R., NEUMANN, K., PESCH, E. (1999): Resource-constrained project scheduling: Notation, classification, models, and methods. *European Journal of Operational Research*, Vol. 112, S. 3–41.

- [5] DEMEULEMEESTER, E., HERROELEN, W. (1997): New benchmark results for the resource-constrained project scheduling problem. *Management Science*, Vol. 43, S. 1485–1492.
- [6] DOMSCHKE, W., SCHOLL, A., VOSS, S. (1997): *Produktionsplanung — Ablauforganisatorische Aspekte*. Springer, Berlin, 2. Aufl.
- [7] DOMSCHKE, W., DREXL, A. (1998): *Einführung in Operations Research*. Springer, Berlin, 4. Aufl.
- [8] DREXL, A. (1991): Scheduling of project networks by job assignment. *Management Science*, Vol. 37, S. 1590–1602.
- [9] DREXL, A., KOLISCH, R., SPRECHER, A. (1997): Neuere Entwicklungen in der Projektplanung. *Zeitschrift für betriebswirtschaftliche Forschung*, Jg. 49, S. 95–120.
- [10] DREXL, A., KOLISCH, R., SPRECHER, A. (1998): Koordination und Integration im Projektmanagement — Aufgaben und Instrumente. *Zeitschrift für Betriebswirtschaft*, Jg. 68, S. 275–295.
- [11] ELMAGHRABY, S.E. (1977): *Activity networks — project planning and control by network models*, Wiley, New York.
- [12] GAITANIDES, M. (1983): *Prozeßorganisation*. Vahlen, München.
- [13] GÜNTHER, H.-O. (1989): *Produktionsplanung bei flexibler Personalkapazität*. Poeschel, Stuttgart.
- [14] GÜNTHER, H.-O., SCHNEEWEISS, CHR. (1988): Kapazitative Wirkungen von Arbeitszeitflexibilisierungen. *Zeitschrift für betriebswirtschaftliche Forschung*, Jg. 40, S. 915–929.
- [15] HARTMANN, S. (1998): A competitive genetic algorithm for resource-constrained project scheduling. *Naval Research Logistics*, Vol. 45, S. 733–750.
- [16] HARTMANN, S., DREXL, A. (1997): Project scheduling with multiple modes: A comparison of exact algorithms. Erscheint in *Networks*.
- [17] ICMELI, O., ROM, W. (1998): Analysis of the characteristics of projects in diverse industries. *Journal of Operations Management*, Vol. 16, S. 43–61.
- [18] KOLISCH, R. (1995): *Project scheduling under resource constraints — efficient heuristics for several problem classes*. Physica, Heidelberg.
- [19] KOLISCH, R. (1996a): Serial and parallel resource-constrained project scheduling methods revisited — theory and computation. *European Journal of Operational Research*, Vol. 90, S. 320–333.
- [20] KOLISCH, R. (1996b): Efficient priority rules for the resource-constrained project scheduling problem. *Journal of Operations Management*, Vol. 14, S. 179–192.
- [21] KOLISCH, R., DREXL, A. (1996): Adaptive search for solving hard project scheduling problems. *Naval Research Logistics*, Vol. 43, S. 23–40.

- [22] KOLISCH, R., DREXL, A. (1997): Local search for nonpreemptive multi-mode resource-constrained project scheduling. *IIE Transactions*, Vol. 29, S. 987-999.
- [23] KOLISCH, R., HARTMANN, S. (1998): Heuristic algorithms for solving the resource-constrained project scheduling problem: classification and computational analysis. Erscheint in: J. Weglarz (Hrsg.): *Handbook on Recent Advances in Project Scheduling*, Kluwer.
- [24] KOLISCH, R., PADMAN, R. (1997): An integrated perspective of project scheduling. Working Paper, Carnegie Mellon University.
- [25] KOLISCH, R., SPRECHER, A., DREXL, A. (1995): Characterization and generation of a general class of resource-constrained project scheduling problems. *Management Science*, Vol. 41, S. 1693-1703.
- [26] KRÜGER, W. (1993): Stichwort 'Projektmanagement'. In: WITTMANN, W. et al., (Hrsg.), *Handwörterbuch der Betriebswirtschaft*, Sp. 3560-3570. Poeschel, Stuttgart, 5. Aufl.
- [27] KÜPPER, H.-U., HELBER, S. (1995): *Ablauforganisation in Produktion und Logistik*. Schäffer-Poeschel, Stuttgart, 2. Aufl.
- [28] KÜPPER, W., LÜDER, K., STREITFERDT, L. (1975): *Netzplantechnik*. Physica, Würzburg.
- [29] MADAUSS, B.-J. (1990): *Handbuch Projektmanagement*. Poeschel, Stuttgart, 3. Aufl.
- [30] MINGOZZI, A., MANIEZZO, V., RICCIARDELLI, S., BIANCO, L. (1998): An exact algorithm for the resource-constrained project scheduling based on a new mathematical formulation. *Management Science*, Vol. 44, S. 714-729.
- [31] MÖRSDORF, M. (1998): *Konzeption und Aufgaben des Projektcontrolling*. Deutscher Universitäts Verlag, Wiesbaden.
- [32] MODER, J.J., PHILLIPS, C.R., DAVIS, E.W. (1983): *Project management with CPM, PERT and precedence diagramming*. Van Nostrand Reinhold, New York, 3. Aufl.
- [33] NANDI, S.N., DUTTA, B.K. (1988): Trends in project cost control systems. *OMEGA*, Vol. 16, S. 524-520.
- [34] NEUMANN, K. (1990): *Stochastic project networks*. Springer, Berlin.
- [35] SALEWSKI, F. (1998): Arbeitszeitmodelle — Bewertung und Durchsetzbarkeit. Erscheint in *Wirtschaftswissenschaftliches Studium*.
- [36] SALEWSKI, F., SCHIRMER, A., DREXL, A. (1997): Project scheduling under resource and mode identity constraints: Model, complexity, methods, and application. *European Journal of Operational Research*, Vol. 102, pp. 88-110.
- [37] SCHIRMER, A., DREXL, A. (1997): Allocation of partially renewable resources — concept, models and application. Manuskripte aus den Instituten für Betriebswirtschaftslehre der Universität Kiel, No. 455.
- [38] SCHNEEWEISS, CHR. (Hrsg.) (1992): *Kapazitätsorientiertes Arbeitszeitmanagement*. Physica, Heidelberg.

- [39] SCHNEEWEISS, CHR., KÜHN, M. (1990): Zur Definition und gegenseitigen Abgrenzung der Begriffe Flexibilität, Elastizität und Robustheit. *Zeitschrift für betriebswirtschaftliche Forschung*, Jg. 42, S. 378–395.
- [40] SCHNEEWEISS, CHR., WILD, B. (1996): Flexibilität und Disponibilität — Eine Analyse am Beispiel von Betriebsvereinbarungen zur Arbeitszeit. *Zeitschrift für betriebswirtschaftliche Forschung*, Jg. 48, S. 871–884.
- [41] SCHOLZ, CHR. (1994): *Personalmangement — Informationsorientierte und verhaltensorientierte Grundlagen*. Vahlen, München, 4. Auflage.
- [42] SCHWARZE, J. (1994): *Netzplantechnik: Eine Einführung in das Projektmanagement*. Verlag Neue Wirtschaftsbriefe, Herne, 7. Aufl.
- [43] R. SŁOWIŃSKI, B. SONIEWICKI, J. WĘGLARZ, J. (1994): DSS for multiobjective project scheduling subject to multiple-category resource constraints. *European Journal of Operational Research*, Vol. 79, S. 220–229.
- [44] SPRECHER, A. (1994): *Resource constrained project scheduling — exact methods for the multi-mode case*. Springer, Berlin.
- [45] SPRECHER, A., DREXL, A. (1998): Solving multi-mode resource-constrained project scheduling problems by a simple, general and powerful sequencing algorithm. *European Journal of Operational Research*, Vol. 107, S. 431–450.
- [46] SPRECHER, A., HARTMANN, S., DREXL, A. (1997): An exact algorithm for project scheduling with multiple modes. *OR Spektrum*, Vol. 19, S. 195–203.

Zusammenfassung

Flexibilität hat sich in den letzten Jahren zu einem zentralen Begriff der betriebswirtschaftlichen Forschung und der betrieblichen Praxis entwickelt. Ungeachtet dessen gibt es keine einhellige Auffassung darüber, was man unter Flexibilität verstehen soll, wie Flexibilität quantitativ zu erfassen oder planerisch zu handhaben wäre. Gleichzeitig ist zu beobachten, daß angesichts zunehmender Kundenorientierung die Kundenauftragsfertigung und damit die Bedeutung des Projektmanagements dramatisch zugenommen haben.

Gegenstand des vorliegenden Beitrages ist es, Projektmanagement bei flexiblen Arbeitszeiten zu betrachten. Dazu wird ein neuartiges Optimierungsmodell vorgestellt, mit dessen Hilfe flexible Arbeitszeiten im Rahmen des Projektmanagements angegangen werden können. Kern des Modells ist das innovative Konzept „partiell erneuerbarer Ressourcen“, mit dessen Hilfe flexible Arbeitszeiten definiert und planerisch behandelt werden können. Die Modellierungsmächtigkeit des Modells wird mit Hilfe von Beispielen verdeutlicht. Ferner werden Verfahren zur Lösung des Modells skizziert und ausgewählte Rechenergebnisse dargestellt.

Summary

Recently, flexibility turned out to be a fundamental term both in Management Science and in practice. Nevertheless, there is ambiguity as to what flexibility really means, how to quantify flexibility and how to deal with it in planning. Also, the relevance of project management did increase as a result of an ever increasing customer orientation.

The topic of this paper is project management in the presence of flexible working conditions. More precisely, we present a novel optimization model for project scheduling. The core of the model are so-called „partially renewable resources“ which allow to capture flexibility of work. The expressive power of the model is illustrated by means of examples. Finally, we sketch out solution procedures and provide some computational results.

Anhang: Beispiel

Wir betrachten folgendes Beispiel. Gegeben sei das Projekt-Netzwerk in Abbildung 6 sowie die weiteren Daten aus Tabelle 4.

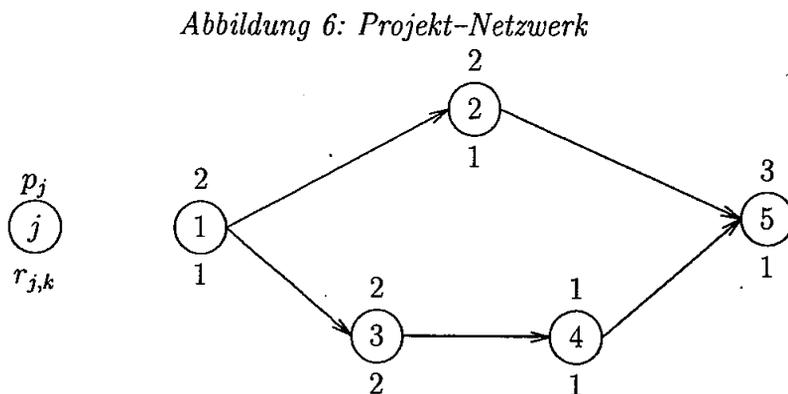


Tabelle 4: Daten des Beispiels

$\mathcal{T} = \{1, 2, \dots, 11\}, n = 5, \mathcal{R} = 1, \Pi(1) = 3$ $P_1(1) = \{1, 2, 3, 4\}, R_1(1) = 7$ $P_1(2) = \{5, 6, 7, 8\}, R_1(2) = 3$ $P_1(3) = \{9, 10, 11\}, R_1(3) = 2$

Abbildung 7 verdeutlicht die Einplanungsalternativen im Überblick. Insbesondere ist dem oberen Teil der Graphik die Lage der Periodenteilmengen $P_k(\pi)$ — durch mit dem Symbol \oplus markierte Kästchen kenntlich gemacht — und die Verfügbarkeit partiell erneuerbarer Ressourcen $R_k(\pi)$ der einzigen Ressource $k = 1$ zu entnehmen.

Im unteren Teil der Graphik wird folgendes veranschaulicht:

- Für jede Aktivität j ist das — unter Beachtung der Reihenfolgebeziehungen maximal zulässige — Zeitintervall $[ES_j, LF_j]$ durch (gestrichelte) Kästchen hervorgehoben.
- Ferner sind für jede Aktivität j durch das Symbol \times diejenigen Perioden markiert, die bei frühestmöglicher Einplanung belegt wären.
- Im Hinblick auf die Verfügbarkeit partiell erneuerbarer Ressourcen ist die vollständige Einplanung der drei Aktivitäten $j = 1, 2, 3$ in Periodenteilmenge $P_1(1)$ wegen $\sum_{j=1}^3 k_{j1} = 8 > 7$ nicht zulässig.
- Mit durchgezogenen Linien hervorgehobene Kästchen markieren die Lage der Aktivitäten bei der einzigen zulässigen Lösung der Instanz.

Das Ergebnis ist wie folgt zu interpretieren:

- Jede Aktivität j ist innerhalb des zulässigen Intervalls $[ES_j, LF_j]$ gemäß Nebenbedingung (2) eingeplant.
- Falls Aktivität j einen positiven Ressourcenverbrauch $r_{j,k}$ hat und in Periodenteilmengen, die zur Menge $P_k(\pi)$ gehören, eingeplant wird, dann wird Ressource k auch tatsächlich verbraucht.
- Die Aktivitäten 1 und 3 werden vollständig, Aktivität 2 wird teilweise in Periodenteilmenge $P_1(1)$ bearbeitet; alle drei Aktivitäten verbrauchen zusammen genau die $R_1(1) = 7$ verfügbaren Einheiten.
- Die Aktivitäten 2 und 5 werden teilweise, Aktivität 4 wird vollständig in Periodenteilmenge $P_1(2)$ bearbeitet; alle drei Aktivitäten verbrauchen zusammen genau die $R_1(2) = 3$ verfügbaren Einheiten.
- Aktivität 5 wird teilweise in Periodenteilmenge $P_1(3)$ bearbeitet und verbraucht $r_{5,1} = 2$ Einheiten. Offensichtlich wird der Start von Aktivität 5 infolge mangelnder Ressourcenverfügbarkeit in früheren Perioden (und nicht durch Reihenfolgebeziehungen) bis zu Periode 8 verzögert.

Abbildung 7: Einplanungsalternativen im Überblick

