

Thorsten Gather

Exakte Verfahren für das Ressourcennivellierungsproblem

GABLER RESEARCH

Produktion und Logistik

Herausgegeben von
Professor Dr. Bernhard Fleischmann,
Universität Augsburg
Professor Dr. Martin Grunow,
Technische Universität München
Professor Dr. Hans-Otto Günther,
Technische Universität Berlin
Professor Dr. Stefan Helber,
Universität Hannover
Professor Dr. Karl Inderfurth,
Universität Magdeburg
Professor Dr. Herbert Kopfer,
Universität Bremen
Professor Dr. Herbert Meyr,
Technische Universität Darmstadt
Professor Dr. Thomas S. Spengler,
Technische Universität Braunschweig
Professor Dr. Hartmut Stadtler,
Universität Hamburg
Professor Dr. Horst Tempelmeier,
Universität Köln
Professor Dr. Gerhard Wäscher,
Universität Magdeburg

Kontakt: Professor Dr. Hans-Otto Günther, Technische Universität Berlin,
H 95, Straße des 17. Juni 135, 10623 Berlin

Diese Reihe dient der Veröffentlichung neuer Forschungsergebnisse auf den Gebieten der Produktion und Logistik. Aufgenommen werden vor allem herausragende quantitativ orientierte Dissertationen und Habilitationsschriften. Die Publikationen vermitteln innovative Beiträge zur Lösung praktischer Anwendungsprobleme der Produktion und Logistik unter Einsatz quantitativer Methoden und moderner Informationstechnologie.

Thorsten Gather

Exakte Verfahren für das Ressourcennivellierungsproblem

Mit einem Geleitwort von Prof. Dr. Jürgen Zimmermann



RESEARCH

Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek
Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der
Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über
<<http://dnb.d-nb.de>> abrufbar.

Dissertation Technische Universität Clausthal, 2010

1. Auflage 2011

Alle Rechte vorbehalten

© Gabler Verlag | Springer Fachmedien Wiesbaden GmbH 2011

Lektorat: Stefanie Brich | Nicole Schweitzer

Gabler Verlag ist eine Marke von Springer Fachmedien.

Springer Fachmedien ist Teil der Fachverlagsgruppe Springer Science+Business Media.

www.gabler.de



Das Werk einschließlich aller seiner Teile ist urheberrechtlich geschützt. Jede Verwertung außerhalb der engen Grenzen des Urheberrechtsgesetzes ist ohne Zustimmung des Verlags unzulässig und strafbar. Das gilt insbesondere für Vervielfältigungen, Übersetzungen, Mikroverfilmungen und die Einspeicherung und Verarbeitung in elektronischen Systemen.

Die Wiedergabe von Gebrauchsnamen, Handelsnamen, Warenbezeichnungen usw. in diesem Werk berechtigt auch ohne besondere Kennzeichnung nicht zu der Annahme, dass solche Namen im Sinne der Warenzeichen- und Markenschutz-Gesetzgebung als frei zu betrachten wären und daher von jedermann benutzt werden dürften.

Umschlaggestaltung: KünkelLopka Medienentwicklung, Heidelberg

Gedruckt auf säurefreiem und chlorfrei gebleichtem Papier

Printed in Germany

ISBN 978-3-8349-2759-0

Fantasie ist wichtiger als Wissen, denn Wissen ist begrenzt.

Albert Einstein

Geleitwort

Verfahren der Projektplanung spielen seit nahezu fünfzig Jahren eine entscheidende Rolle bei der Entscheidungsunterstützung im Projektmanagement. Waren die Arbeiten zunächst primär theoretischer Natur und vor allem der Projektdauerminimierung gewidmet, so finden sich in den letzten Jahren eine Reihe von Veröffentlichungen zur Lösung realer Projektplanungsprobleme. Dabei wurden die bestehenden Modelle und Methoden nicht nur zur Lösung konkreter betriebswirtschaftlicher Planungsprobleme verwendet, sondern auch durch spezielle Anforderungen, die für reale Problemstellungen bestehen, weiterentwickelt. Beispielsweise rückte die Betrachtung spezieller Zielkriterien, wie die Maximierung des Projektkapitalwertes oder die gleichmäßige Inanspruchnahme der benötigten Ressourcen im Betrachtungszeitraum, in den Fokus. In diesem Kontext bewegt sich auch die vorliegende Monographie, in der Herr Gather neue Verfahren zur Lösung von Ressourcennivellierungsproblemen vorstellt.

Die praktische Relevanz der betrachteten Problemstellung wird in der vorliegenden Arbeit am Beispiel sogenannter Revisionsprojekte in Kernkraftwerken sowie verschiedener Problemstellungen aus der taktischen Projekt- oder Unternehmensplanung verdeutlicht. Nach einer ausführlichen Diskussion von Struktureigenschaften mathematischer Modelle zur Ressourcennivellierung und zugehörigen optimalen Lösungen werden Ansätze zur Bestimmung einer optimalen Lösung entwickelt. Neben einem neuen gerüstbasierten Enumerationsverfahren werden gemischt-ganzzahlige lineare Programme vorgestellt, die auch den Einsatz kommerzieller Standard-Solver erlauben. Den Schwerpunkt der Arbeit bildet das in Kapitel 4 dargestellte Branch-and-Bound Verfahren, das auf dem neuen gerüstbasierten Enumerationsschema beruht. Durch den aus der Graphentheorie abgeleiteten und für Projektnetzpläne erweiterten Brückentest gelingt es, ein Verfahren zu konzipieren, das ohne aufwendiges Speichern von Teilerüsten auskommt. Bei der Entwicklung der verwendeten Preprocessing-Techniken bzw. unteren Schranken fließen neue interessante Ideen ein. Die Vorgehensweise orientiert sich dabei durchweg am Stand der aktuellen wissenschaftlichen Literatur.

Die in Kapitel 7 präsentierte Performanceanalyse zeigt eindrucksvoll die Effizienz der neu entwickelten Verfahren. Erstmals konnten im größeren Um-

fang Benchmark-Probleminstanzen aus der einschlägigen Literatur mit 20 Vorgängen exakt gelöst werden. Hierbei zeigt sich, dass die entwickelten MIP-Modelle besonders gut für Instanzen geeignet sind, bei denen die vorgegebene Projekthöchstdauer nahe an der minimalen Projektdauer liegt. Im Gegensatz dazu verhalten sich die Laufzeiten des neuen gerüstbasierten Branch-and-Bound Verfahrens relativ unabhängig von der vorgegebenen Projekthöchstdauer sowie auch von der Höhe der Ressourceninanspruchnahmen.

Prof. Dr. Jürgen Zimmermann

Vorwort

Die vorliegende Arbeit entstand während meiner dreieinhalbjährigen Zeit als externer Doktorand am Institut für Wirtschaftswissenschaften der Technischen Universität Clausthal.

Mein besonderer Dank gilt meinem Doktorvater Herrn Professor Jürgen Zimmermann für die geduldige und engagierte Betreuung meiner Arbeit. Für die Übernahme des Korreferats sowie für zahlreiche interessante Anregungen und Gespräche danke ich Herrn Professor Christoph Schwindt.

Während meines Promotionsstudiums war ich parallel als Berater bei der Tiba Software Center GmbH tätig und möchte mich an dieser Stelle ganz herzlich bei den Herren Roger Mähr, Martin Rudolph und Dr. Helmut Wagner für den Rückhalt sowie für die entgegengebrachte Geduld bedanken. Ferner danke ich meinen Kollegen vom Tiba Software Center sowie vom Institut für Wirtschaftswissenschaften für die wunderbaren Arbeitsatmosphären und meinen lieben Bundesgeschwistern von der Akademischen Vereinigung Kristall für die gelegentlich notwendige Zerstreuung sowie für die Fürsorge und die tatkräftige Unterstützung insbesondere zum Ende meiner Arbeit.

Mein außerordentlicher Dank gilt darüber hinaus den Herren Dr. Jan-Hendrik Bartels, Dr. Rafael Fink, Albert Sailer und Matthias Walter sowie Frau Dr. Julia Rieck für die kritische Durchsicht des Manuskripts sowie für viele nette und anregende Gespräche.

Zu guter Letzt möchte ich mich ganz herzlich bei meinen Eltern, meinen Schwestern und meiner Freundin Dorothea Brügger für das Verständnis und die Unterstützung während meiner gesamten Dissertationszeit bedanken.

Thorsten Gather

Inhaltsverzeichnis

Symbolverzeichnis	XIII
Einleitung	1
1 Problemstellung	5
1.1 Projektplanung unter allgemeinen Zeitbeziehungen	5
1.2 Das klassische Ressourcennivellierungsproblem	12
1.3 Weitere Zielfunktionen für die Ressourcennivellierung	15
1.4 Literaturüberblick	17
2 Anwendungsbeispiele	21
2.1 Revisionsprojekte in Kernkraftwerken	22
2.2 Mittelfristplanung in Unternehmen und Projekten	25
2.2.1 Mittelfristplanung in Unternehmen	26
2.2.2 Mittelfristplanung in Projekten	28
3 Struktureigenschaften des Ressourcennivellierungsproblems	31
3.1 Ausgezeichnete Punkte	31
3.1.1 Strenge Ordnungen	32
3.1.2 Eigenschaften der betrachteten Zielfunktionen	35
3.1.3 Quasistabile Schedules	36
3.1.4 Darstellung ausgezeichneter Punkte durch Gerüste	37
3.2 Möglichst spätes Projektende	37
4 Ein gerüstbasiertes Lösungsverfahren	39
4.1 Graphentheoretische Grundlagen	39
4.2 Generierungsschema	40
4.2.1 Erstellung eines Konstruktionsgraphen	40
4.2.2 Konstruktion von Gerüsten	42
4.2.3 Redundanzfreie Enumeration von Gerüsten	46
4.2.4 Redundanzfreie Enumeration von Schedules	52
4.3 Preprocessing	57
4.3.1 Entfernen redundanter Pfeile	58

4.3.2	Isolieren kritischer Vorgänge	59
4.4	Obere und untere Schranken für Zielfunktion (RL)	61
4.5	Betrachtung weiterer Zielfunktionen	69
4.6	Verkürzte Enumeration	72
5	Ganzzahlige und gemischt-ganzzahlige Modelle	73
5.1	Zeitindexbasierte Problemformulierung	73
5.2	Quadratische Formulierung	76
5.3	Linearisierte Formulierungen	76
5.3.1	Linearisierung durch Binärvariablen	77
5.3.2	Linearisierung über diskrete Stützstellen	78
5.4	Modelle für weitere Zielfunktionen	79
6	Exakte Lösungsverfahren aus der Literatur	85
6.1	Ein zeitfensterbasiertes Enumerationsverfahren	85
6.2	Ein alternatives Gerüstenumerationsverfahren	88
6.3	Ein populationsbasiertes lokales Suchverfahren	91
7	Experimentelle Performance-Analyse	95
7.1	Verwendete Testsets	96
7.2	Ergebnisse	98
7.3	Bewertung der Branch-and-Bound Elemente	105
8	Zusammenfassung und Ausblick	107
	Literaturverzeichnis	111

Symbolverzeichnis

Allgemein

\emptyset	Leere Menge
$\#$	Anzahl an (z.B. $\#$ Knoten - Anzahl an Knoten)
$ A $	Elementanzahl der endlichen Menge A
$A \cup B$	Vereinigungsmenge der Mengen A und B
$A \cap B$	Schnittmenge der Mengen A und B
$A \subseteq B$	A ist Teilmenge von B
$A \setminus B$	Menge A ohne die Elemente aus Menge B
\mathbb{R}	Menge der reellen Zahlen
\mathbb{Z}	Menge der ganzen Zahlen
$\mathbb{Z}_{\geq 0}$	Menge der nichtnegativen ganzen Zahlen
$\mathbb{Z}_{> 0}$	Menge der positiven ganzen Zahlen

Modellierung

$\langle i, j \rangle$	Pfeil von Knoten i zu Knoten j
$\mathcal{A}(S, t)$	Aktive Menge (Menge der Vorgänge, die sich gemäß Schedule S zum Zeitpunkt t in Ausführung befinden)
c_k	Kostenfaktor für Ressource k
c_k^+, c_k^-	Kostenfaktoren für Ressource k bei einer Unterscheidung von positiven und negativen Abweichungen
d_{ij}	Länge eines längsten Weges von Knoten i zu Knoten j
d_{ij}^{min}	Mindestabstand zwischen den Startzeitpunkten von Vorgang i und Vorgang j
d_{ij}^{max}	Höchstabstand zwischen den Startzeitpunkten von Vorgang i und Vorgang j
\bar{d}	Vorgegebene Projekthöchstdauer
$D = (d_{ij})_{i,j \in \mathcal{V}}$	Matrix der Längen längster Wege d_{ij} zwischen allen Knotenpaaren i, j
δ_{ij}	Bewertung eines Pfeils von Knoten i zu Knoten j
EC_i	Frühester Endzeitpunkt von Vorgang i
$EC_i(S^V)$	Planungsabhängiger frühester Endzeitpunkt für Vorgang i bei gegebenem Teilschedule S^V

ES_i	Frühester Startzeitpunkt von Vorgang i
$ES_i(S^V)$	Planungsabhängiger frühester Startzeitpunkt für Vorgang i bei gegebenem Teilschedule S^V
\mathcal{E}	Pfeilmenge des Projektnetzwerks \mathcal{N}
f	Zielfunktion
$f_{[a,b]}$	Zielfunktion (nur Intervall $[a, b]$ betrachtet)
$f^a(r_k(S^V, \cdot), i, S_i)$	Erweiterungskosten, die bei gegebenem Ressourcenprofil $r_k(S^V, \cdot)$ durch eine Einplanung von Vorgang i zu Startzeitpunkt S_i entstehen
I_i	Intervall $[ES_i, LC_i[$, in dem sich Vorgang i in Ausführung befinden kann
$I_i(S^V)$	Planungsabhängiges Intervall $[ES_i(S^V), LC_i(S^V[$, in dem sich Vorgang i bei gegebenem Teilschedule S^V in Ausführung befinden kann
LC_i	Spätester Endzeitpunkt von Vorgang i
$LC_i(S^V)$	Planungsabhängiger spätester Endzeitpunkt für Vorgang i bei gegebenem Teilschedule S^V
LS_i	Spätester Startzeitpunkt von Vorgang i
$LS_i(S^V)$	Planungsabhängiger spätester Startzeitpunkt für Vorgang i bei gegebenem Teilschedule S^V
\mathcal{N}	Projektnetzwerk
p_i	Ausführungsdauer von Vorgang i
\mathcal{R}	Menge der (erneuerbaren) Ressourcen
r_{ik}	Ressourcenbedarf von Vorgang i an Ressource $k \in \mathcal{R}$
$r_k(S, \cdot)$	Ressourcenprofil von Ressource k bei gegebenem Schedule S
S	Schedule (Vektor mit Startzeitpunkten aller Vorgänge)
S^V	Teilschedule mit den Startzeitpunkten der Vorgänge $i \in V \subset \mathcal{V}$
\mathcal{S}_T	Menge aller (zeit-) zulässigen Schedules
TF_i	Gesamtpufferzeit von Vorgang i
\mathcal{V}	Vorgangsmenge / Knotenmenge von Projektnetzwerk \mathcal{N}
W_i	Intervall $[ES_i, LS_i]$ aller zulässigen Startzeitpunkte von Vorgang i (Zeitfenster von i)
$W_i(S^V)$	Planungsabhängiges Intervall $[ES_i(S^V), LS_i(S^V)]$ aller zulässigen Startzeitpunkte von Vorgang i bei gegebenem Teilschedule S^V (planungsabhängiges Zeitfenster)
Y_k	Vorgegebene Zielressourceninanspruchnahme für Ressource k

Gerüstenumerationsverfahren

\prec_e	Pfeil-Relation
\prec_T	Gerüst-Relation
B_k	Restworkload für Ressource k in sogenannten 1-Blöcken (eine Einheit von Ressource k für eine Zeiteinheit)
E	Pfeilmenge von Teilgerüst $T^{V,E}$
\mathcal{E}^+	Pfeilmenge des Konstruktionsgraphen $\mathcal{N}(\mathcal{O})$
$\mathcal{E}^{\mathcal{O}}$	Pfeilmenge von Ordnungsnetzwerk $\mathcal{N}(\mathcal{O})$
$\mathcal{E}^{\mathcal{O}^+}$	Menge aller Netzwerkpfeile ergänzt um die Ordnungspfeile der strengen Ordnung \mathcal{O}
\mathcal{F}	Menge aller einfügbaren Pfeile (als Stapel verwaltet)
$LB(T^{V,E})$	Untere Schranke für den Zielfunktionswert von (Teil-) Gerüst $T^{V,E}$
λ_e, σ_e	Kennzeichnungen für temporär gesperrte Pfeile e
$\mathcal{N}(\mathcal{O})$	Ordnungsnetzwerk für Ordnung \mathcal{O}
$\mathcal{N}(\mathcal{O})$	Konstruktionsgraph (enthält die Netzwerkpfeile sowie die Ordnungspfeile aller für sich betrachtet zulässigen strengen Ordnungen $\mathcal{O} \in \mathcal{O}$)
$\tilde{\mathcal{N}}(\mathcal{O})$	Konstruktionsgraph zum aktuellen Zeitpunkt der Enumeration
$\Pi(i)$	Prioritätsregelwert für Vorgang $i \in \mathcal{V}$
\mathcal{O}	Strenge Ordnung auf der Knotenmenge \mathcal{V}
$\mathcal{O}(S)$	Durch Schedule S induzierte strenge Ordnung
\mathcal{O}	Menge aller zulässigen strengen Ordnungen
$\pi(i)$	Reihenfolgeposition, zu der Knoten i in (Teil-) Gerüst $T^{V,E}$ eingefügt worden ist
$r_k^{lb}(S^{V,E}, \cdot)$	Ressourcenprofil der unteren Schranke aus Abschnitt 4.4
S^E	Durch Gerüst T^E induzierter Schedule
$S^{V,E}$	Durch (Teil-) Gerüst $T^{V,E}$ induzierter (Teil-) Schedule
S^A	Menge der ausgezeichneten Punkte für Problem RLP
S^Q	Menge der quasistabilen Schedules
$\mathcal{S}_T(\mathcal{O})$	Ordnungspolytop von Ordnung \mathcal{O}
$\mathcal{S}_T(\mathcal{O}(S))$	Schedulepolytop von Schedule S
$\mathcal{S}_T^=(\mathcal{O}(S))$	Isoordnungsmenge von Schedule S
T^E	Gerüst
$T^{V,E}$	(Teil-) Gerüst
$\dot{T}^{V,E}$	Pseudogerüst

\vec{T}^E	Gerichtetes Gerüst mit Wurzelknoten \mathcal{W}
$\vec{T}^{V,E}$	Gerichtetes (Teil-) Gerüst mit Wurzelknoten \mathcal{W}
UB	Obere Schranke für den Zielfunktionswert der betrachteten Probleminstanz
V	Knotenmenge von Teilgerüst $T^{V,E}$
\bar{V}	Menge von Knoten, die nicht zu Teilgerüst $T^{V,E}$ gehören
$\bar{V}^{opt}, \bar{V}^{rest}$	Partition der Menge \bar{V} mit $\bar{V}^{opt} \cup \bar{V}^{rest} = \bar{V}$
V^{krit}	Menge aller von Beginn an kritischen Vorgänge der betrachteten Probleminstanz
W_k	Workload (Kumulierte Inanspruchnahme von Ressource k durch alle Projektvorgänge)
(Gemischt-) Ganzzahlige Problemformulierungen	
Δ_{kt}^+	Positive Abweichung der Inanspruchnahme r_{kt} einer Ressource k zu Zeitpunkt t von Niveau Y_k bzw. von der Inanspruchnahme zu Zeitpunkt $r_{k(t-1)}$
Δ_{kt}^-	Negative Abweichung der Inanspruchnahme r_{kt} einer Ressource k zu Zeitpunkt t von Niveau Y_k bzw. von der Inanspruchnahme zu Zeitpunkt $r_{k(t-1)}$
\bar{H}	Höchste Inanspruchnahme, die für irgendeine Ressource $k \in \mathcal{R}$ in einer zulässigen Lösung auftreten kann
\bar{H}_k	Höchste Inanspruchnahme, die für Ressource k in einer zulässigen Lösung auftreten kann
r_{kt}	Inanspruchnahme von Ressource k zum Zeitpunkt t
\hat{r}_{kt}	Quadierte Inanspruchnahme von Ressource k zum Zeitpunkt t
$\bar{\mathcal{W}}_i$	Menge der zulässigen ganzzahligen Startzeitpunkte $\{ES_i, \dots, LS_i\}$ von Vorgang i
x_{it}	Menge von Binärvariablen zur Darstellung des Startzeitpunktes von Vorgang i
y_{kth}	Menge von Variablen zur Darstellung der Inanspruchnahme h einer Ressource k zum Zeitpunkt t
\bar{y}_{kth}	Menge von Binärvariablen zur Darstellung der Inanspruchnahme h einer Ressource k zum Zeitpunkt t

Lösungsverfahren aus der Literatur

\mathcal{M}	Stapel zur Verwaltung von Teillösungen des Verfahrens aus Abschnitt 6.1
---------------	-------------------------------------------------------------------------

\mathcal{P}	Population (Menge) von Schedules für das heuristische Verfahren aus Abschnitt 6.3
\mathcal{Q}	Stapel zur Verwaltung von Teillösungen des Verfahrens aus Abschnitt 6.2