

André Schnabel

Heuristiken für die gewinnorientierte Planung ressourcenbeschränkter Projekte mit erweiterbaren Kapazitäten



Springer Gabler

Produktion und Logistik

Reihe herausgegeben von

Bernhard Fleischmann, Lehrstuhl Produktion und Logistik, Universität Augsburg, Augsburg, Deutschland

Martin Grunow, TUM School of Management, Technische Universität München, München, Deutschland

Stefan Helber, Institut für Produktionswirtschaft, Universität Hannover, Hannover, Deutschland

Karl Inderfurth, Fak Wirtschaftswissenschaften, Otto-von-Guericke-Universität, Magdeburg, Deutschland

Herbert Kopfer, Lehrstuhl für Logistik, Universität Bremen, Bremen, Deutschland

Herbert Meyr, Universität Hohenheim, Stuttgart, Deutschland

Thomas S. Spengler, Produktion und Logistik, TU Braunschweig, Braunschweig, Deutschland

Hartmut Stadtler, Institut für Logistik und Transport, Universität Hamburg, Hamburg, Deutschland

Horst Tempelmeier, FB Produktionswirtschaft, Universität Köln, Köln, Deutschland

Gerhard Wäscher, BWL VIII: Management Science, University Magdeburg, Magdeburg, Deutschland

Christian Bierwirth, Wirtschaftswissenschaftliche Fakultät LS für BW, Universität Halle-Wittenberg, Halle, Deutschland

Katja Schimmelpfeng, Fakultät Wirtschafts- und Sozialwissensch, Universität Hohenheim, Stuttgart, Deutschland

Moritz Fleischmann, Lehrstuhl für Logistik und SCM, Universität Mannheim, Mannheim, Deutschland

Hans-Otto Günther, Technische Universität Berlin, Berlin, Deutschland

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.

Kontakt

Professor Dr. Thomas S. Spengler
Technische Universität Braunschweig
Institut für Automobilwirtschaft
und Industrielle Produktion
Mühlenpfordtstraße 23
38106 Braunschweig

Weitere Bände in der Reihe <http://www.springer.com/series/12449>

André Schnabel

Heuristiken für die gewinnorientierte Planung ressourcenbeschränkter Projekte mit erweiterbaren Kapazitäten



Springer Gabler

André Schnabel
Garbsen, Deutschland

Diese Arbeit wurde gefördert durch die Deutsche Forschungsgemeinschaft (DFG) –
SFB 871/3 – 119193472.

Produktion und Logistik
ISBN 978-3-658-31609-9 ISBN 978-3-658-31610-5 (eBook)
<https://doi.org/10.1007/978-3-658-31610-5>

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

© Der/die Herausgeber bzw. der/die Autor(en), exklusiv lizenziert durch Springer Fachmedien Wiesbaden GmbH, ein Teil von Springer Nature 2020

Das Werk einschließlich aller seiner Teile ist urheberrechtlich geschützt. Jede Verwertung, die nicht ausdrücklich vom Urheberrechtsgesetz zugelassen ist, bedarf der vorherigen Zustimmung des Verlags. Das gilt insbesondere für Vervielfältigungen, Bearbeitungen, Übersetzungen, Mikroverfilmungen und die Einspeicherung und Verarbeitung in elektronischen Systemen.

Die Wiedergabe von allgemein beschreibenden Bezeichnungen, Marken, Unternehmensnamen etc. in diesem Werk bedeutet nicht, dass diese frei durch jedermann benutzt werden dürfen. Die Berechtigung zur Benutzung unterliegt, auch ohne gesonderten Hinweis hierzu, den Regeln des Markenrechts. Die Rechte des jeweiligen Zeicheninhabers sind zu beachten.

Der Verlag, die Autoren und die Herausgeber gehen davon aus, dass die Angaben und Informationen in diesem Werk zum Zeitpunkt der Veröffentlichung vollständig und korrekt sind. Weder der Verlag, noch die Autoren oder die Herausgeber übernehmen, ausdrücklich oder implizit, Gewähr für den Inhalt des Werkes, etwaige Fehler oder Äußerungen. Der Verlag bleibt im Hinblick auf geografische Zuordnungen und Gebietsbezeichnungen in veröffentlichten Karten und Institutionsadressen neutral.

Planung/Lektorat: Carina Reibold

Springer Gabler ist ein Imprint der eingetragenen Gesellschaft Springer Fachmedien Wiesbaden GmbH und ist ein Teil von Springer Nature.

Die Anschrift der Gesellschaft ist: Abraham-Lincoln-Str. 46, 65189 Wiesbaden, Germany

Geleitwort

Die Planung von Projekten angesichts kapazitätsbeschränkter Ressourcen stellt seit vielen Jahren ein im *Operations Management* intensiv bearbeitetes Forschungsfeld dar. Dies liegt sicherlich daran, dass die Projektplanung gleichzeitig praktisch außerordentlich bedeutsam und intellektuell extrem herausfordernd ist. Zeitliche und logische Abhängigkeiten zwischen den einzelnen Arbeitselementen eines Projektes müssen dabei ebenso berücksichtigt werden wie die typischerweise nur begrenzt verfügbaren Ressourcen und die sich oftmals widersprechenden Ziele der Planung.

In der wissenschaftlichen Literatur zur Projektplanung werden dazu häufig stilisierte Problemstellungen betrachtet, in denen diese immer wiederkehrenden Aspekte und Elemente des Problems sehr deutlich hervortreten. Ein typisches Merkmal dieser stilisierten Problemstellungen ist, dass diese Probleme häufig einerseits sehr einfach, klar und elegant zu formulieren, dabei jedoch andererseits außerordentlich schwer in einem mathematischen Sinne optimal zu lösen sind.

Häufig wird in der wissenschaftlichen Literatur als Ziel angenommen, das Projekt angesichts als gegeben betrachteter Kapazitäten der Ressourcen möglichst schnell abzuschließen. Für die Situation dieser etablierten Problemstellung gibt es eine Vielzahl theoretischer Einsichten in die Struktur optimaler Lösungen und, darauf aufbauend, leistungsfähige Verfahren für die numerische Lösung konkreter Probleminstanzen.

In der Praxis ist jedoch im Zuge des Projektmanagements durchaus auch über den temporären Auf- oder Abbau der Kapazität der Ressourcen zu entscheiden, und zwar mit einem differenzierten Blick auf die Projektdauer. Diese Projektdauer ist aus praktischer Sicht häufig mit Blick auf Termine und ggf. Konventionalstrafen bei Terminüberschreitungen zu bewerten. Diese Situation führt zu einem idealtypischen betriebswirtschaftlichen Optimierungsproblem über die

optimale Nutzung von Zusatzkapazität als Ergebnis der Projektplanung. Einerseits kann durch Zusatzkapazität das Projekt schneller durchgeführt werden, so dass sich Konventionalstrafen vermeiden lassen, andererseits sind auch diese Zusatzkapazitäten teuer und sollten mit Bedacht genutzt werden.

Damit ist in groben Zügen die von Herrn Schnabel in seiner Dissertation betrachtete Problemstellung umrissen. Es gelingt Herrn Schnabel sehr schön, diese bislang wenig betrachtete Problemstellung anhand praktischer Beispiele zu motivieren, sie präzise zu kennzeichnen, wichtige Aussagen zu den Eigenschaften optimaler Lösungen zu begründen und leistungsfähige Lösungsverfahren für die praktische Lösung dieser Art von Problemen zu entwickeln. Damit leistet Herr Schnabel einen wichtigen wissenschaftlichen Beitrag insbesondere zu den quantitativen Methoden der Projektplanung.

Hannover
im Mai 2020

Prof. Dr. Stefan Helber

Vorwort und Danksagungen

Im Fokus der vorliegenden Arbeit steht die Planung von Projekten mit beschränkten Ressourcen. Genauer gesagt soll das ressourcenbeschränkte Projektplanungsproblem, das bereits durch viele Autoren über mehrere Jahrzehnte hinweg untersucht worden ist, mit einer praxisnahen Erweiterung versehen werden. Die Erweiterung ergänzt die ursprüngliche Grundproblemstellung dahingehend, dass zwei häufig gemeinsam auftretende Aspekte berücksichtigt werden. Der erste Aspekt ist eine erhöhte Zahlungsbereitschaft des Kunden, wenn das Projekt frühzeitiger fertiggestellt werden kann. Der zweite Aspekt ist die Option, kostenbehaftete zusätzliche Kapazitätseinheiten zu nutzen, um die reguläre Ressourcenkapazität zu erweitern. In Kombination führen beide Aspekte auf die sehr interessante Fragestellung, wie sich ein gewinnmaximales Gleichgewicht zwischen den gegenläufigen Zielstellungen der Projektdauer- und Kostenminimierung herstellen lässt, indem geschickt Zusatzkapazität eingesetzt wird.

Die ersten Erkenntnisse zur Problemstellung und eine Auswahl der „besten“ Lösungsansätze wurden in einer Veröffentlichung in der Zeitschrift „Business Research“ dokumentiert¹. Diese Veröffentlichung entstand in Zusammenarbeit mit Stefan Helber und Carolin Kellenbrink, welchen ich hiermit meinen besonderen Dank aussprechen möchte.

Ebenso möchte ich mich bei Carolin Kellenbrink, Stefan Bugow, Luise-Sophie Hoffmann und Steffen Rickers dafür bedanken, dass sie Rohfassungen dieses Dokuments gelesen und korrigiert haben. Die Arbeit hat in meinen Augen stark

¹Vgl. Schnabel et al. (2018).

von den Anmerkungen und Änderungsvorschlägen der genannten Personen profitiert. Für etwaige verbleibende Fehler übernehme ich jedoch alleinig die Verantwortung.

Weiterhin möchte ich mich bei all meinen jetzigen und ehemaligen Kollegen dafür bedanken, dass sie mir ein angenehmes Arbeitsklima geschaffen haben. Dies umfasst (in alphabetischer Reihenfolge): Kristina Bergmann, Justine Broihan, Stefan Bugow, Fabian Friese, Lars Heinze, Felix Herde, Luise-Sophie Hoffmann, Steffen Kasper, Ariane Kayser, Svenja Lagershausen, Steffen Rickers, Florian Sahling, Bastian Schmidtman und Insa Südbeck.

Schlussendlich möchte ich mich auch bei Freunden und Familie bedanken. Für Ihre Unterstützung über die vergangenen Jahrzehnte hinweg bedanke ich mich bei meiner Schwester Anna-Lena, meiner Mutter Annemarie und meinem Vater Günter sowie bei meiner Stiefmutter Johanna Siemer-Schnabel und meinem Stiefvater Jürgen Lukat. Besonderer Dank gilt auch meinen langjährigen Freunden Matthias Semler, Thomas Müller und Kamal El Menuawy.

Diese Arbeit wurde gefördert durch die Deutsche Forschungsgemeinschaft (DFG) -SFB 871/3- 119193472.

Hannover
im Herbst 2019

André Schnabel

Abstract

The resource-constrained project scheduling problem (RCPSP) is a widely studied problem in the academic literature. A fundamental property of the RCPSP is time invariance with regard to the given resource availabilities. However, this assumption does not hold in many real-world situations. Exogenously given fluctuating resource profiles were already covered in previous works. Alternatively, time-variant availabilities may be endogenously determined by extending the regular capacity with additional capacity in specific time periods. These supplementary resource capacities are assumed to be costly and limited. In addition, the willingness to pay of a customer is typically decreasing with an increasing project duration. The gross margin of a schedule is then defined as the difference between the makespan-dependent customer revenues and the extent of variable costs for overcapacity incurred by the schedule. The trade-off between revenue maximization and overcapacity cost minimization leads to a novel generalization of the RCPSP introduced as the resource-constrained project scheduling problem with makespan-dependent revenues and overcapacity costs (RCPSP-ROC).

As an extension of the RCPSP, the RCPSP-ROC itself is also NP-hard. This motivates the design and implementation of heuristic solution methods for solving problem instances of practically relevant size efficiently and in adequate time.

There are many efficient heuristic solution methods for the RCPSP. These schedule jobs as early as possible. In contrast to the RCPSP, which considers a regular objective, the RCPSP-ROC combines both a regular and a non-regular term in the objective. Delaying the start of a job may be beneficial in order to avoid costly overcapacity. Accordingly, the set of active schedules with regard to the maximum amount of feasible overcapacity is not guaranteed to contain

an optimal solution. Consequently, novel schedule generation schemes for the RCPSP-ROC were designed and evaluated. These solution approaches adapt and combine ideas for both time- and cost-oriented objective functions from the scheduling literature.

This thesis formally describes the RCPSP-ROC as a mixed-integer linear program and investigates structural properties of the problem in an exemplary case study.

For solving this NP-hard problem in an efficient manner, several heuristic solution methods are proposed. The different solution approaches are then benchmarked using a newly designed problem library for the RCPSP-ROC based on the RCPSP instances from the PSPLIB test set. Tailored custom genetic algorithms are shown to outperform black box local search solvers, which in turn beat standard MILP-solvers when solving RCPSP-ROC instances. Overall, the presented results highlight central characteristics of this novel problem and show the adequacy of the adaption of different solution procedures for solving the RCPSP-ROC.

Keywords: Resource-constrained project scheduling, Flexible capacities, Over-time, Overcapacity, Genetic algorithms, Local search

Zusammenfassung

Das ressourcenbeschränkte Projektplanungsproblem (RCPSP) ist eine in der Fachliteratur ausgiebig untersuchte Problemstellung. Die Kapazitäten der erneuerbaren Ressourcen im RCPSP sind über den Planungshorizont hinweg konstant verfügbar. Diese Annahme ist jedoch in der praktischen Anwendung in vielen Situationen nicht zutreffend. Exogen vorgegebene schwankende Ressourcenprofile wurden bereits in der Literatur betrachtet. Alternativ können die zeitabhängigen Kapazitäten der erneuerbaren Ressourcen endogen festgelegt werden, indem mit Kosten behaftete Zusatzkapazitäten in begrenztem Umfang hinzugenommen werden. Die Zahlungsbereitschaft eines Kunden sinkt typischerweise, wenn die Gesamtdauer des Projekts aufgrund von Verspätungen steigt. Der erzielte Deckungsbeitrag berechnet sich aus der Differenz zwischen Kundenerlös, welcher von der Projektdauer abhängt, und den variablen Kosten für Zusatzkapazität, welche durch den Ablaufplan hervorgerufen werden. Der Trade-off zwischen der Maximierung der Erlöse auf der einen Seite und einer Minimierung der variablen Kosten für Zusatzkapazität auf der anderen Seite führt zu einer neuartigen Problemstellung, welche das RCPSP generalisiert und als ressourcenbeschränkte Projektplanung mit projektdauerabhängigen Erlösen und Zusatzkapazitätskosten (engl. resource-constrained project scheduling problem with revenues and overcapacity costs, RCPSP-ROC) bezeichnet wird.

Das RCPSP-ROC ist ebenfalls *NP*-schwer, da es das bereits *NP*-schwere RCPSP um zusätzliche Aspekte erweitert. Daher wurden in dieser Schrift heuristische Lösungsverfahren für das neuartige Problem entworfen und implementiert. Die Verfahren finden gute Lösungen für Probleminstanzen mit praxisnaher Größe in annehmbarer Zeit.

In der Literatur werden mehrere effiziente heuristische Lösungsverfahren für das RCPSP vorgestellt. Diese planen Arbeitsgänge so früh wie möglich ein. Im Gegensatz zum RCPSP, welches als Zielstellung die Projektdauer minimiert,

maximiert das RCPSP-ROC den Deckungsbeitrag. Der Deckungsbeitrag wird aus einem regulären Erlös-Term und einem nicht-regulären Kosten-Term berechnet. Es kann allerdings sinnvoll sein, Arbeitsgänge bewusst verzögert zu starten, da Kosten entstehen, wenn zusätzliche Kapazität benötigt wird. Die Menge der aktiven Pläne (bezogen auf die maximal erlaubte Zusatzkapazität) enthält folglich nicht zwangsläufig eine optimale Lösung für dieses Problem. Es wurden daher neue Algorithmen entworfen und evaluiert, um Ablaufpläne für das RCPSP-ROC zu erzeugen. Die Lösungsverfahren verbinden Ansätze von sowohl zeit- als auch kostenorientierten Zielfunktionen aus der Literatur zur Projektplanung.

Diese Arbeit beschreibt das RCPSP-ROC in Form eines gemischt-ganzzahligen linearen Optimierungsmodells und untersucht strukturelle Eigenschaften des Problems im Rahmen einer fiktiven Fallstudie. Damit das NP-schwere RCPSP-ROC effizient gelöst werden kann, werden verschiedene heuristische Verfahren vorgestellt. Die Verfahren werden auf Basis einer neu entworfenen Problembibliothek miteinander verglichen. Diese Problembibliothek basiert auf den RCPSP- Testinstanzen aus der PSPLIB. Es wird gezeigt, dass maßgeschneiderte Genetische Algorithmen generische Blackbox-Heuristiken in den meisten Fällen dominieren. Die Blackbox-Heuristiken liefern wiederum bessere Ergebnisse für Instanzen des RCPSP-ROC als exakte Solver für gemischt-ganzzahlige lineare Optimierungsmodelle. Insgesamt heben die Ergebnisse die zentralen Charakteristika dieser Problemstellung hervor und zeigen, dass diverse Ansätze zur Planung von Projekten mit beschränkten Ressourcen aus der Literatur aufgegriffen und angepasst werden können, um das RCPSP-ROC zu lösen.

Schlüsselwörter: Ressourcenbeschränkte Projektplanung, Flexible Kapazitäten, Überstunden, Zusatzkapazität, Genetische Algorithmen, Lokale Suche

Inhaltsverzeichnis

1	Einführung	1
1.1	Gegenstand der Arbeit	1
1.2	Aufbau der Arbeit	4
2	Planung von Projekten mit erweiterbaren Ressourcen und von der Projektdauer abhängigen Erlösen	7
2.1	Planung des Ablaufs ressourcenbeschränkter Projekte	7
2.2	Verschiedene Zielstellungen	10
2.2.1	Minimierung der Projektdauer	10
2.2.2	Minimierung der Nutzung von Zusatzkapazitäten	11
2.2.3	Simultane Minimierung der Projektdauer und Zusatzkapazitätsnutzung	16
2.2.3.1	Beschreibung und Abgrenzung von verwandten Problemen	16
2.2.3.2	Trade-off zwischen Projektdauer- und Zusatzkapazitätsminimierung	18
2.3	Anwendungsbeispiele für erweiterbare Kapazitäten und projektdauerabhängige Erlöse	25
2.3.1	Ergänzung des Personals durch flexibel einsetzbare Leiharbeiter	25
2.3.2	Dynamische Anmietung von Servern und Produktionsmaschinen	30
2.3.3	Mieten von Traktoren und Mähdreschern in der Landwirtschaft	33
2.3.4	Handwerker und Baumaschinen in Bauvorhaben	35
2.3.5	Diverse weitere Anwendungsgebiete	37
2.4	Einordnung und Klassifikation ressourcenbeschränkter Projektplanungsprobleme	41

2.4.1	Eigenschaften der Arbeitsgänge	41
2.4.2	Eigenschaften der Ressourcen	43
2.4.3	Verschiedene Zielstellungen	45
2.4.4	Simultane Berücksichtigung mehrerer Zielstellungen	46
2.4.5	Unsichere und unscharfe Information	47
2.4.6	Diverse weitere Varianten der Projektplanung	47
2.4.7	Detaillierte Abgrenzung verwandter Probleme	48
2.5	Überblick über Lösungsverfahren für ressourcenbeschränkte Projektplanungsprobleme	52
2.5.1	(Meta-)heuristische Lösungsverfahren	52
2.5.2	Exakte Lösungsverfahren	64
3	Formale Modellierung des ressourcenbeschränkten Projektplanungsproblems mit kostenbehafteten Zusatzkapazitäten und projektdauerabhängigen Erlösen (RCPSP-ROC)	67
3.1	Formale Beschreibung des RCPSP-ROC	67
3.1.1	Modellannahmen und Notation	67
3.1.2	Mathematische Modellformulierung	71
3.2	Strukturelle Eigenschaften des RCPSP-ROC	73
3.2.1	Komplexitätsanalyse	73
3.2.2	Dekomposition der Problemstellung in Teilprobleme	75
3.2.3	Merkmale unterschiedlicher Mengen relevanter Pläne	78
3.2.4	Fiktive Fallstudie zum Einfluss der Instanzeigenschaften auf optimale Ablaufpläne	85
4	Kompakte Lösungsrepräsentationen und zugehörige Planungserzeugungsschemata für das RCPSP-ROC	95
4.1	Bedeutung der Wahl einer Kodierung für die Effizienz der Lösungsverfahren	95
4.2	Grundlagen kompakter Kodierungen und zugehöriger Dekodierungsprozeduren	102
4.2.1	Serielltes Ablaufplanerzeugungsschema	102
4.2.2	Paralleles Ablaufplanerzeugungsschema	109
4.2.3	Verbesserungsverfahren mit Minimierung der Zusatzkapazitätskosten	113
4.3	Indirekte Kodierungen für verschiedene Zielsetzungen	119
4.3.1	Simultane Minimierung der Projektdauer und Zusatzkapazitätsnutzung	119

4.3.1.1	Zusatzkapazitätsentscheidung durch heuristische Planvervollständigung	119
4.3.1.2	Zusatzkapazitätsentscheidung je Arbeitsgang mit beliebiger oder keiner Nutzung	125
4.3.1.3	Zusatzkapazitätsentscheidung je Arbeitsgang mit partieller Nutzung	128
4.3.2	Projektdauerminimierung für feste Ressourcenprofile	131
4.3.2.1	Einhaltung zeitunabhängiger Schranken für die Zusatzkapazität	131
4.3.2.2	Einhaltung zeitabhängiger Schranken für die Zusatzkapazität	133
4.3.3	Suche von gewinnmaximierenden Fristen für kostenminimale Pläne mithilfe des Verfahrens des Goldenen Schnitts.	136
5	Heuristische Verfahren auf Basis Genetischer Algorithmen und lokaler Suchverfahren zur Lösung des RCPSP-ROC	147
5.1	Überblick über (Meta-)heuristische Verfahren für das RCPSP	147
5.2	Problemspezifische Genetische Algorithmen für das RCPSP-ROC	149
5.2.1	Grundsätzliches Konzept und Ablauf.	149
5.2.2	Erzeugung der Startpopulation.	151
5.2.3	Paarbildung und Kreuzung.	155
5.2.4	Mutation.	161
5.2.5	Fitnessberechnung und Selektion.	163
5.3	Lokalsuchprozedur auf Basis der kommerziellen Software „LocalSolver“.	166
5.3.1	Nichtlineares Modell mit Listenvariable	166
5.3.2	Kodierungsspezifische Modellerweiterungen	170
5.3.3	Integration robuster Dekodierungsprozeduren.	170
6	Numerische Analyse der Performance verschiedener Lösungsverfahren für das RCPSP-ROC	173
6.1	Entwurf der Problembibliothek	173
6.1.1	Instanzengeneratoren und Problembibliotheken für das RCPSP	173
6.1.2	Erweiterung von RCPSP-Instanzen	175
6.1.2.1	Parameter für die Zusatzkapazitäten	175
6.1.2.2	Spezifikation der Erlösfunktion.	176

6.2	Versuchsaufbau für die numerischen Experimente	179
6.3	Numerische Ergebnisse	181
6.3.1	Vergleich der Heuristiken zur Lösung kleiner Projekte mit 30 Arbeitsgängen	181
6.3.2	Vergleich der Heuristiken zur Lösung großer Projekte mit 120 Arbeitsgängen	191
7	Schlussbemerkungen	197
7.1	Zusammenfassung	197
7.2	Kritische Würdigung	198
7.3	Ausblick	200
	Literaturverzeichnis	209

Abkürzungs- und Symbolverzeichnis

Abkürzungen

ACO	Ameisenkolonieoptimierung (engl. Ant Colony Optimization)
ADC	Beschleunigte Durchführung der Arbeitsschritte (engl. Activity Duration Crashing)
AG	Arbeitsgang
AIMMS	Advanced Interactive Multidimensional Modeling System
AIS	Künstliches Immunsystem (engl. Artificial Immune System)
AJE	American Journal Experts
AL	Aktivitätenliste (engl. Activity List)
AoN	Vorgangsknotendiagramm (engl. Activity on Node Graph)
API	Anwendungsentwicklungsschnittstelle (engl. Application Programming Interface)
AS	Algorithmenauswahlproblem (engl. Algorithm Selection Problem)
BCO	Bienenkolonieoptimierung (engl. Bee Colony Optimization)
CB/RAM	Kostenbasiertes Ressourcenallokationsmodell (engl. Cost Based / Resource Allocation Model)
CH	Konstruktionsheuristik (engl. Construction Heuristic)
CIP	Hybrid aus Constraintprogrammierung und ganzzahliger Optimierung (engl. Constraint Integer Programming)
CPLEX	CPLEX Optimizer
CP	Constraintprogrammierung (engl. Constraint Programming)
CSHC	Kostensensitives hierarchisches Clustering (engl. Cost-Sensitive Hierarchical Clustering)
DEA	Differentieller Evolutionärer Algorithmus (engl. Differential Evolutionary Algorithmus)

DJ	Links- und rechtsbündige Justierung der Arbeitsgänge (engl. Double Justification)
DTCTP	Diskretes Zeit-Kosten-Tradeoff-Problem (engl. Discrete Time Cost Tradeoff Problem)
EA	Evolutionärer Algorithmus (engl. Evolutionary Algorithm)
EM	Elektromagnetismus Metaheuristik (engl. Electromagnetism Metaheuristic)
FBI	Vorwärts-/Rückwärts-Verbesserungsverfahren (engl. ForwardBackward Improvement Technique)
FF	Glühwürmchen-Algorithmus (engl. Firefly Algorithm)
FL	Froschhüpfer-Algorithmus (engl. Frog Leap)
FRCPS	Ressourcenbeschränktes Projektplanungsproblem mit flexiblen Verbräuchen (engl. Flexible Resource-Constrained Project Scheduling Problem)
GA	Genetischer Algorithmus (engl. Genetic Algorithm)
GAMS	General Algebraic Modeling System
GE	Geldeinheiten (engl. Monetary Units)
GP	Genetische Programmierung (engl. Genetic Programming)
GSS	Verfahren des Goldenen Schnittes (engl. Golden Section Search)
HH	Hyper-Heuristik (engl. Hyper Heuristic)
IGH	Iterative Greedy-Heuristik (engl. Iterative Greedy Heuristic)
KE	Kapazitätseinheiten (engl. Capacity Units)
KSD	Synonym für PSPLIB nach Autoren Kolisch, Sprecher und Drexl
LNS	Große Nachbarschaftssuche (engl. Large Neighbourhood Search)
LOCS	Lokale Suche (engl. Local Search)
LS	LocalSolver
LUIS	Leibniz Universität Hannover IT Service
MILP	Gemischt-ganzzahliges lineares Optimierungsmodell (engl. Mixed-Integer Linear Programming)
ML	Maschinelles Lernen (engl. Machine Learning)
MLCLSP	Mehrstufiges dynamisches Mehrprodukt-Losgrößenmodell mit beschränkter Kapazität (engl. Multi-Level Capacitated Lot Sizing Problem)
MOVNS	Mehrziel variable Nachbarschaftssuche (engl. Multi-Objective Variable Neighbourhood Search)
MRCPS	Ressourcenbeschränktes Projektplanungsproblem mit mehreren Ausführungsmodi (engl. Multi-Mode Resource-Constrained Project Scheduling Problem)

MRIP	Ressourceninvestitionsproblem mit mehreren Ausführungsmodi (engl. Multi-Mode Resource Investment Problem)
NC	Netzwerkkomplexität (engl. Network Complexity)
NGA	Neuro-Genetischer Algorithmus (engl. Neuro Genetic Algorithm)
OPC	Einpunkt-Kreuzung (engl. One Point Crossover)
PCP	Präzedenz-Constraint-Posting (engl. Precedence Constraint Posting)
PDS	Projektplanungsproblem in der Softwareentwicklung (engl. Project Scheduling Problem for Software Development)
PR	Prioritätsregel (engl. Priority Rule)
ProGen	Project Scheduling Problem Instance Generator
PSGS	Paralleles Ablaufplanerzeugungsschema (engl. Parallel Schedule Generation Scheme)
PSO	Partikelschwarmoptimierung (engl. Particle Swarm Optimization)
PSPDL	Projektplanungsproblem mit strikter Frist für das Projektende (engl. Project Scheduling Problem with Deadline)
PSPLIB	Problembibliothek für Projektplanungsprobleme (engl. Project Scheduling Problem Library)
RACP	Ressourcenverfügbarkeitskostenproblem (engl. Resource Availability Cost Problem)
RBRS	Regret-Based Biased Random Sampling
RCC	Ressourcenkritische Verdichtung (engl. Resource Critical Crashing, RCC)
RCMPSP	Ressourcenbeschränktes Multi-Projektplanungsproblem (engl. Resource-Constrained Multi-Project Scheduling Problem)
RCPSP	Ressourcenbeschränktes Projektplanungsproblem (engl. Resource-Constrained Project Scheduling Problem)
RCPSP-PS	Ressourcenbeschränktes Projektplanungsproblem mit flexibler Projektstruktur (engl. Resource-Constrained Project Scheduling with flexible Project Structure)
RCPSP-PS-Q	Ressourcenbeschränktes Projektplanungsproblem mit flexibler Projektstruktur und Qualitätsberücksichtigung (engl. Resource-Constrained Project Scheduling with flexible Project Structure and Quality consideration)
RCPSP-ROC	Ressourcenbeschränktes Projektplanungsproblem mit Erlösen und Zusatzkapazitätskosten (engl. Resource-Constrained Project Scheduling Problem with Revenues and Overcapacity Costs)

RCPSP/t	Ressourcenbeschränktes Projektplanungsproblem mit zeitvarianten Ressourcenbeanspruchungen und Kapazitäten (engl. Resource-Constrained Project Scheduling Problem with Time-varying Resource Requirements and Capacities)
RF	Ressourcenfaktor (engl. Resource Factor)
RIP	Ressourceninvestitionsproblem (engl. Resource Investment Problem)
RK	Prioritätswerte (engl. Random Key)
RLP	Ressourcennivellierungsproblem (engl. Resource Leveling Problem)
ROP	Ressourcenüberladungsproblem (engl. Resource Overload Problem)
RRP	Ressourcenanmietungsproblem (engl. Resource Renting Problem)
RS	Ressourcenstärke (engl. Resource Strength)
SA	Simulierte Abkühlung (engl. Simulated Annealing)
SAT	Erfüllbarkeitsproblem (engl. Satisfiability Problem)
SCIP	Solving Constraint Integer Programs
SGS	Ablaufplanerzeugungsschema (engl. Schedule Generation Scheme)
SRK	Standardisierte Prioritätswerte (engl. Standardized Random Key)
SS	Streusuche (engl. Scatter Search)
SSGS	Serielltes Ablaufplanerzeugungsschema (engl. Serial Schedule Generation Scheme)
TCPSP	Zeitbeschränktes Projektplanungsproblem (engl. Time-Constrained Project Scheduling Problem)
TPC	Zweipunkt-Kreuzung (engl. Two Point Crossover)
TS	Tabusuche (engl. Tabu Search)
VNS	Variable Nachbarschaftssuche (engl. Variable Neighbourhood Search)
WTOT	Projektplanungsproblem mit gewichteten Verspätungen und Überstundenkosten (engl. Weighted Tardiness and Overtime)
ZE	Zeiteinheiten

Symbole

A_t	Menge der in Periode t aktiv durchgeführten AG
$\mathcal{AS}$	Menge der aktiven Pläne (engl. Active Schedules)
β_j	$\begin{cases} 1, & \text{AG } j \text{ darf Zusatzkapazität bei Einplanung nutzen,} \\ 0, & \text{sonst.} \end{cases}$
$\overline{C}$	Kosten des kostenminimalen Plans mit Dauer T
$\overline{C}^{heurCB}$	Kosten des $\mathcal{ESS}$. Obere Schranke für $\overline{C}$
$\mathcal{C}$	Menge der bereits eingeplanten AG in einem Teilplan
δ	Zwingend (vgl. lediglich bestrafte „due date“) einzuhaltende Frist für Projektende (engl. deadline), d. h. $S_{J+1} \leq \delta$
$\mathcal{D}$	Menge der im Rahmen des RBBRS an eine unvollständige AL anfügbaren AG
d_j	Bearbeitungszeit von AG j in ZE
t_{dt}	Zeitpunkt, in welchem im parallelen Planerzeugungsschema neue AG begonnen werden (sog. Entscheidungszeitpunkt)
E	Azyklische Reihenfolgerelation $E \subsetneq \mathcal{J}^2$
$\mathcal{E}$	Menge der bei der Planerzeugung in den Teilplan einplanbaren AG (sog. Entscheidungsmenge)
EST_j	Frühester Startzeitpunkt von AG j
EFT_j	Frühester Endzeitpunkt von AG j
$\mathcal{ESS}$	Kürzester Plan bei unbegrenzten Ressourcenkapazitäten (engl. Earliest Start Schedule)
F_j	Endzeitpunkt von AG j mit $F_j = S_j + d_j$
I^M	Mutter-Individuum
I^F	Vater-Individuum
I^D	Tochter-Individuum
I^S	Sohn-Individuum
$j \in \mathcal{J}$	AG mit $:= \{0, 1, \dots, J, J+1\}$
$\mathcal{K}_r$	Kosten in GE für eine KE der Zusatzkapazität von Ressource r
k_{jr}	Ressourcenverbrauch während der Durchführung von AG j auf der erneuerbaren Ressource r in KE
K_r	Verfügbare reguläre Normalkapazität der erneuerbaren Ressource r in KE
λ	AL (topologisch sortierte Permutation der AG)
λ^c	Kanonische nach aufsteigenden AG-Nummern sortierte AL
LST_j	Spätester Startzeitpunkt von AG j
LFT_j	Spätester Endzeitpunkt von AG j

N^S	Anzahl der erzeugten Pläne (Abbruchkriterium)
N^G	Anzahl der Generationen (Abbruchkriterium)
N^I	Anzahl der Iterationen (Abbruchkriterium)
$\mathcal{NDS}$	Menge der verzögerungsfreien Pläne (engl. Non-Delay Schedules)
$\mathcal{P}_j$	Menge der Vorgänger $\mathcal{P}_j \subseteq \mathcal{J}$ von AG j mit $i \in \mathcal{P}_j \Leftrightarrow (i, j) \in E$
$\text{Prob}^{\text{mutate}}$	Mutationswahrscheinlichkeit
QAS	Menge der quasiaktiven Pläne (engl. Quasiactive Schedules)
QSS	Menge der quasistabilen Pläne (engl. Quasistable Schedules)
$r \in \mathcal{R}$	Erneuerbare Ressourcen mit $R := \{1, \dots, R\}$
S_j	Menge der Nachfolger $S_j \subseteq \mathcal{J}$ von AG j mit $i \in S_j \Leftrightarrow (j, i) \in E$
s_j	Startzeitpunkt von AG j in Ablaufplan S
$\underline{T}_{\text{heurUB}}$	Gesamtdauer des Ablaufplans mit beliebig viel zulässiger Zusatzkapazitätsnutzung erzeugt durch das SSGS für λ^c . Heuristische obere Schranke für $\underline{T}$
$\underline{T}_{\text{heurLB}}$	Gesamtdauer des $\mathcal{ESS}$. Untere Schranke von $\underline{T}$
$\bar{T}_{\text{heurUB}}$	Gesamtdauer des Ablaufplans ohne Zusatzkapazitätsnutzung erzeugt durch das SSGS für λ^c . Heuristische obere Schranke für $\bar{T}$
$t \in \mathcal{T}$	Perioden (Planungshorizont) mit $\mathcal{T} := \{1, \dots, T\}$
$\underline{t}$	Frühester reihenfolge- und ressourcenzulässiger Startzeitpunkt mit beliebig viel zulässiger Zusatzkapazitätsnutzung
$\bar{t}$	Frühester reihenfolge- und ressourcenzulässiger Startzeitpunkt ohne Zusatzkapazitätsnutzung
$\underline{T}$	Gesamtdauer des kürzesten Ablaufplans mit zulässiger Zusatzkapazitätsnutzung
$\bar{T}$	Gesamtdauer des kürzesten Ablaufplans ohne Zusatzkapazitätsnutzung
τ_j	Zeitfensterposition von AG j , $\tau_j = 1 \equiv \underline{t}$ sowie $\tau_j = 0 \equiv \bar{t}$
v_j	Kundenerlös in GE bei Fertigstellung des Projekts mit Gesamtdauer von t Perioden
v_j	Prioritätswert $v_j \in [0, 1]$ für AG j in RK v
$\hat{\mathcal{W}}_j(S)$	Zulässige Startzeitpunkte von AG j zwischen frühestem Beginn mit beliebig viel zulässiger Zusatzkapazitätsnutzung ($\underline{t}$) und ohne Zusatzkapazitätsnutzung ($\bar{t}$) in Teilplan S (Zeitfenster für Zusatzkapazität)
x_{jt}	$\begin{cases} 1, & \text{wenn AG } j \text{ in Periode } t \text{ beendet wird,} \\ 0, & \text{sonst.} \end{cases}$
z_{rt}	Tatsächlich genutzte Zusatzkapazität der Ressource r in Periode t in KE

$\overline{Z}_r$	Obere Schranke für Zusatzkapazitätsnutzung von Ressource r
$\hat{Z}_{rt}$	Erlaubte Anzahl genutzter Zusatzkapazitätseinheiten von Ressource r in Periode t in KE
$\hat{Z}_r$	Erlaubte Anzahl genutzter Zusatzkapazitätseinheiten von Ressource r in jeder Periode des Planungshorizonts in KE

Algorithmenverzeichnis

Algorithmus 3.1	Berechnung frühester und spätester Anfangs- und Endzeitpunkte	70
Algorithmus 4.1	Serielltes Ablaufplanerzeugungsschema für das RCPSP	103
Algorithmus 4.2	Umkehrfunktion des seriellen Ablaufplanerzeugungsschemas	108
Algorithmus 4.3	Paralleles Ablaufplanerzeugungsschema für das RCPSP	109
Algorithmus 4.4	Iteratives Verbesserungsverfahren ohne Erhöhung der Zusatzkapazität für das RCPSP-ROC	116
Algorithmus 4.5	Dekodierungsprozedur für Repräsentation (λ)	121
Algorithmus 4.6	Dekodierungsprozedur für Repräsentation (λ) ^{gs}	142
Algorithmus 5.1	Grundgerüst eines Genetischen Algorithmus	149
Algorithmus 5.2	Regret-Based Biased Random Sampling	152
Algorithmus 5.3	Fitnessunabhängige Paarbildung	155
Algorithmus 5.4	Einpunkt-Kreuzung zweier Aktivitätenlisten	157
Algorithmus 5.5	Nachbarschaftliche Vertauschung	162
Algorithmus 5.6	Elite-Selektion	164
Algorithmus 5.7	Duell-Selektion	165

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 2.1	Ablaufplanung für Projekte mit beschränkten Ressourcen	8
Abbildung 2.2	Minimierung der Nutzungsspitzen im Ressourceninvestitionsproblem	13
Abbildung 2.3	Abgrenzung von RCPSP und Ressourceninvestitionsproblem	14
Abbildung 2.4	Varianten von Nivellierungsproblemen	15
Abbildung 2.5	Zulässiger Ablaufplan für das Beispielprojekt mit geringer Nutzung von Zusatzkapazität	16
Abbildung 2.6	Ablaufplanung für Projekte mit flexiblen Ressourcen und projektdauerabhängigen Erlösen.	17
Abbildung 2.7	Varianten der Workload-Verteilung auf Zeit- und Ressourcenbedarf im Zeit-Kosten-Tradeoff-Problem	20
Abbildung 2.8	Schematischer Verlauf von Erlös, Kosten und Deckungsbeitrag in Abhängigkeit von der Projektdauer . .	21
Abbildung 2.9	Plan A mit gemäßigter Nutzung von Zusatzkapazität	23
Abbildung 2.10	Plan B mit starker Nutzung von Zusatzkapazität.	24
Abbildung 2.11	Plan C ohne Nutzung von Zusatzkapazität	25
Abbildung 2.12	Preismodell der American Journal Experts	28
Abbildung 2.13	Verlauf des Preisaufschlags in Abhängigkeit von der Fertigungsdauer für Leiterplatten vom Typ „Multilayer“, „Flex“ und „Impendanz & Hochfrequenz“	31
Abbildung 2.14	ANDUS-Expresssystem auf der Webseite von ANDUS ELECTRONIC.	32
Abbildung 2.15	Vorgangsknotendigraph für vereinfachtes Hausbau-Projekt nach Briskorn und Hartmann (2015).	36