

Tobias Paetz

Ressourcenbeschränkte
Projektplanung bei unterbrechbaren
Aktivitäten und allgemeinen
Anordnungsbeziehungen

**Ressourcenbeschränkte Projektplanung
bei unterbrechbaren Aktivitäten und
allgemeinen Anordnungsbeziehungen**

Dissertation

zur Erlangung des Doktorgrades
der Wirtschaftswissenschaften

vorgelegt von

Tobias Paetz
geb. Haselmann
aus Düsseldorf

genehmigt von der Fakultät für Energie- und
Wirtschaftswissenschaften
der Technischen Universität Clausthal,

Tag der mündlichen Prüfung
18.08.2017

Dekan: Prof. Dr. rer. nat. Bernd Lehmann
Vorsitz der Promotionskommission: Prof. Dr. rer. pol. Mathias Erlei
Hauptberichterstatter: Prof. Dr. rer. pol. Christoph Schwindt
Mitberichterstatter: Prof. Dr. rer. pol. Jürgen Zimmermann

Operations Research

Tobias Paetz

**Ressourcenbeschränkte Projektplanung
bei unterbrechbaren Aktivitäten und
allgemeinen Anordnungsbeziehungen**

mit einem Geleitwort von Prof. Dr. Christoph Schwindt

D 104 (Diss. TU Clausthal)

Shaker Verlag
Aachen 2018

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.

Zugl.: Clausthal, Techn. Univ., Diss., 2017

Copyright Shaker Verlag 2018

Alle Rechte, auch das des auszugsweisen Nachdruckes, der auszugsweisen oder vollständigen Wiedergabe, der Speicherung in Datenverarbeitungsanlagen und der Übersetzung, vorbehalten.

Printed in Germany.

ISBN 978-3-8440-5783-6

ISSN 1862-6327

Shaker Verlag GmbH • Postfach 101818 • 52018 Aachen

Telefon: 02407 / 95 96 - 0 • Telefax: 02407 / 95 96 - 9

Internet: www.shaker.de • E-Mail: info@shaker.de

„Wollen ist Können.“

Hanny Haselmann, meine Omi

Geleitwort

Die ressourcenbeschränkte Projektplanung beschäftigt sich mit der Festlegung von Ausführungszeitintervallen für die Aktivitäten eines Projektes. Dabei muss neben technisch oder organisatorisch bedingten Ordnungsbeziehungen zwischen Aktivitäten auch die begrenzte Verfügbarkeit von Ressourcen wie Mitarbeitern oder Anlagen berücksichtigt werden, die zur Durchführung der Aktivitäten eingesetzt werden. Diese Ressourcenbeschränkungen induzieren verbotene Mengen von Aktivitäten, die sich nicht simultan in Ausführung befinden dürfen und durch zusätzliche Ordnungsbeziehungen zu entzerren sind.

In der Literatur wird zumeist davon ausgegangen, Aktivitäten könnten während ihrer Ausführung nicht unterbrochen und später fortgesetzt werden. Diese Annahme ist jedoch bei der aggregierten Grobplanung von Projekten und vielen Anwendungen der Projektplanung auf Problemstellungen der Ablaufplanung in Produktionssystemen nicht erfüllt. Die existierenden Arbeiten zur präemptiven Projektplanung, bei der die Annahme nicht-unterbrechbarer Aktivitäten aufgehoben wird, gehen in der Regel davon aus, dass die Ordnungsbeziehungen zwischen den Aktivitäten in der Form einfacher Vorrangbeziehungen spezifiziert werden. Häufig wird auch vereinfachend unterstellt, Unterbrechungen könnten nur zu ganzzahligen Zeitpunkten stattfinden.

Tobias Paetz entwickelt in der vorliegenden Monographie Modelle und Methoden für ressourcenbeschränkte Projektplanungsprobleme mit unterbrechbaren Aktivitäten, zwischen denen zeitliche Mindest- und Höchstabstände definiert werden können. Die Zeitabstände beziehen sich auf Zeitpunkte, zu denen Aktivitäten vorgegebene Ausführungsanteile erreichen. Diese allgemeinen Ordnungsbeziehungen enthalten alle Formen von Zeitabständen als Spezialfälle, die in der Literatur zur präemptiven Projektplanung bisher betrachtet worden sind. Insbesondere können auch die Fälle nicht bzw. nur zu bestimmten Zeitpunkten unterbrechbarer Aktivitäten einfach modelliert werden. Die vorgestellten Entscheidungsmodelle und Lösungsmethoden beruhen auf Strukturuntersuchungen, die u. a. Aussagen zu Eigenschaften von Projektplänen liefern, auf die die Suche nach einer optimalen Lösung eingeschränkt werden kann. Zu den Modellen gehören Formulierungen als gemischt-ganzzahlige lineare Programme und stetige Relaxationen auf der Grundlage der von den Ordnungsbeziehungen induzierten strikten Halbordnung. Diese Relaxationen können mithilfe von Verfahren der Spaltengenerierung gelöst werden und liefern sehr gute untere Schranken für die optimalen Zielfunktionswerte. Zur Verschärfung der Modellformulierungen werden Preprocessing-Algorithmen eingesetzt, die aus den Ressourcenbeschränkungen notwendige zeitliche Mindest- und Höchstabstände zwischen den Aktivitäten ableiten. Zur heuristischen Lösung großer Probleminstanzen schlägt Paetz ein neuartiges Schedule-Generierungssche-

ma vor. Dieses beruht auf der Erzeugung zusätzlicher Entscheidungszeitpunkte, die sich aus hypothetischen oberen Schranken für die optimalen Zielfunktionswerte berechnen lassen.

Tobias Paetz leistet mit seiner Abhandlung einen bemerkenswerten Beitrag zum Stand der Modellbildung und Methodik auf dem Gebiet der präemptiven Projektplanung. Das Konzept der allgemeinen Anordnungsbeziehungen erlaubt die unkomplizierte Abbildung einer Vielzahl unterschiedlicher Zeitbeziehungen zwischen unterbrechbaren Aktivitäten. Mit den von ihm entwickelten Verfahren können erstmalig präemptive Projektplanungsprobleme unter allgemeinen Anordnungsbeziehungen gelöst werden. Die erzielten Ergebnisse zeichnen sich gleichermaßen durch Originalität und methodische Fundierung aus. Aufgrund der Generalität der Modellannahmen sind sie für viele Anwendungsbereiche der ressourcenbeschränkten Projektplanung von hoher Relevanz. Ich wünsche dieser lesenswerten Arbeit eine weite Verbreitung und die ihr gebührende Beachtung in Wissenschaft und industrieller Praxis der Projektplanung.

Christoph Schwindt

Vorwort

Die vorliegende Arbeit entstand während meiner Zeit als Doktorand am Institut für Wirtschaftswissenschaft der Technischen Universität Clausthal. Ausgangspunkt für diese Arbeit waren die Beobachtungen, dass Projektplanungsprobleme mit unterbrechbaren Aktivitäten in der Literatur kaum Beachtung gefunden haben und bei den wenigen existierenden Arbeiten die Zeitbeziehungen zwischen den Aktivitäten überwiegend in Form von einfache Vorrangbeziehungen spezifiziert wurden. Zusätzlich wird vereinfachend unterstellt, dass Aktivitäten nur zu ganzzahligen Zeitpunkten unterbrochen werden dürfen. Mithilfe der allgemeinen Anordnungsbeziehungen als einer neuen Form von Zeitbeziehungen, die die bekannten Formen als Spezialfälle enthält, den Strukturuntersuchungen und den entwickelten Modellen und Verfahren liefert die Arbeit Grundlagen zur Lösung komplexer ressourcenbeschränkter Planungsprobleme mit unterbrechbaren Aktivitäten, die zu jedem beliebigen Zeitpunkt unterbrochen werden dürfen.

Die Fertigstellung der Arbeit wäre ohne die Unterstützung einiger Personen nicht möglich gewesen, denen ich herzlich danken möchte. Vor allem gilt mein Dank meinem Doktorvater Herrn Prof. Dr. Christoph Schwindt für die geduldige Betreuung, die zahlreichen Diskussionen und die Teilhabe an seinem umfangreichen Wissensschatz. Für die Übernahme des Koreferats und spannende Gespräche während meiner Zeit am Institut danke ich Herrn Prof. Dr. Jürgen Zimmermann.

Des Weiteren gilt mein Dank Jean Damay für die Zusendung der Einzelergebnisse, die dem Artikel Damay et al. (2007) zugrunde liegen. So konnten wir zur Beginn dieser Arbeit Verbesserungspotenziale identifizieren.

Ebenfalls danke ich Anja Heßler, Norman Koss, Michael Krause, Dr. Stefan Kreter, Nora Krippendorff, Mario Sillus und Illa Weiss für viele schöne Momente auch außerhalb der Forschung. Zusätzlich danke ich Illa, dass sie mit mir das Büro geteilt hat und immer einen Stift zur Hand hatte, wenn ich mal wieder alle Stifte verloren hatte. Astrid Ludwig danke ich für ihre administrative Unterstützung, damit wir Doktoranden uns auf die Forschung konzentrieren konnten. Herrn Gerrit Schulenberg danke ich für das Korrekturlesen des Manuskripts und wertvolle Hinweise.

Abschließend gilt mein größter Dank und Respekt meiner Familie. Insbesondere meiner Tochter Inken, die zwischendurch für Ablenkung gesorgt hat, und meiner Frau Friederike, die die Anzahl der Ablenkungen minimiert hat und mir tatkräftig den Rücken gestärkt und frei gehalten hat. Ohne ihre Liebe und Unterstützung wäre die Arbeit nicht möglich gewesen.

Inhaltsverzeichnis

Abkürzungsverzeichnis	v
1 Einleitung	1
2 Grundlagen der Projektplanung	7
2.1 Definition und betriebswirtschaftliche Relevanz von Projekten	7
2.2 Elemente eines Projekts und deren Beziehungen	9
2.3 Projektlebenszyklus	13
2.4 Darstellung von Projekten mithilfe von Netzwerken	16
2.5 Mathematische Modellierung	27
2.6 Relationen und Ordnungen	33
3 Projektplanung mit unterbrechbaren Aktivitäten	37
3.1 Unterbrechbarkeit von Aktivitäten	37
3.1.1 Zeitpunkte für Unterbrechungen	38
3.1.2 Gründe für die Unterbrechung einer Aktivität	39
3.1.3 Anzahl der Unterbrechungen	41
3.1.4 Allokation von Ressourcen bei der Wiederaufnahme einer Aktivität	42
3.1.5 Verallgemeinerung der Zeitbeziehungen aufgrund der Unterbrechbarkeit von Aktivitäten	42
3.1.6 Klassifikationsschema für präemptive Scheduling-Probleme	45
3.2 Stand der Forschung	47
3.2.1 Kontinuierliche Unterbrechbarkeit	47
3.2.2 Diskrete Unterbrechbarkeit	53
3.2.3 Einordnung der Quellen	69
4 Das präemptive Projektplanungsproblem mit allgemeinen Anordnungsbeziehungen	73
4.1 Beschreibungsmodell	73
4.2 Semantische Mächtigkeit des Modells	82

4.3	Strukturuntersuchungen	85
4.3.1	Kanonische Darstellung und alternative Lösungsrepräsentation	85
4.3.2	Eigenschaften zulässiger Lösungen	92
4.3.3	Nutzen der Unterbrechbarkeit	96
5	Ein gemischt-binäres Entscheidungsmodell	99
5.1	Modellformulierung	99
5.2	Eine obere Schranke für die Anzahl an Entscheidungsvariablen	102
5.3	Eine obere Schranke für die Anzahl an Unterbrechungen je Aktivität	108
6	Prioritätsregelverfahren	111
6.1	Serielles Schedule-Generierungsschema	112
6.1.1	Entscheidungszeitpunkte und dichotome Suche	112
6.1.2	Präemptives serielles Schedule-Generierungsschema	116
6.2	Prioritätsregeln	122
6.3	Multi-Start-Verfahren	126
6.3.1	Einfacher Verfahrensablauf	126
6.3.2	Erweiterter Verfahrensablauf mit gespiegelten Probleminstanzen	128
7	Preprocessing und untere Schranken	137
7.1	Bestimmung und Verschärfung der Zeitabstandsmatrix	138
7.2	Lösbarkeitstests	143
7.3	Preprocessing-Methode	144
7.4	Fixierung von Entscheidungsvariablen	144
7.5	Spaltengenerierungsverfahren nach Damay	145
8	Experimentelle Performance-Analyse	151
8.1	Experimentelles Design	151
8.2	Analyse bei einfachen Vorrangbeziehungen	155
8.2.1	Gemischt-binäres Entscheidungsmodell	156
8.2.2	Varianten des präemptiven Prioritätsregelverfahrens	157
8.2.3	Untere Schranken und Einfluss der Preprocessing-Techniken	159
8.3	Analyse bei verallgemeinerten Anordnungsbeziehungen	162
8.3.1	Gemischt-binäres Entscheidungsmodell	163
8.3.2	Varianten des präemptiven Prioritätsregelverfahrens	164
8.3.3	Einfluss von Preprocessing-Techniken	166
8.4	Resümee	168

9 Fazit	171
Literaturverzeichnis	175
Symbolverzeichnis	185
Index	199