

Dissertation

**Modelle und Methoden
zur Lösung des ressourcenbeschränkten
Projektablaufplanungsproblems unter
Berücksichtigung praxisrelevanter Aspekte**

Torben Schramme, M.Sc.

Schriftliche Arbeit zur Erlangung des akademischen Grades
doctor rerum politicarum (dr. rer. pol.)
im Fach Wirtschaftsinformatik

eingereicht an der
Fakultät für Wirtschaftswissenschaften der
Universität Paderborn

Paderborn, im August 2014

Datum der Verteidigung: 30.10.2014

Gutachter:

1. Prof. Dr. Leena Suhl
2. Prof. Dr. Joachim Fischer

Danksagungen

Diese Arbeit ist während meiner Zeit als Promotionsstudent am DS&OR Lab der Universität Paderborn im Zeitraum von Oktober 2011 bis Oktober 2014 entstanden. In dieser Zeit haben viele Personen dazu beigetragen, dass ich die Promotion letztendlich erfolgreich abgeschlossen habe und dieses Buch nun vor Ihnen als Leser liegt. Zeit um zurückzublicken und „Danke!“ zu sagen:

Allen voran bedanke ich mich bei meiner Doktormutter Prof. Dr. Leena Suhl für die sehr gute Betreuung während der gesamten Zeit und die vielen konstruktiven Gespräche. Der Dank geht ebenfalls an alle anderen Kolleginnen und Kollegen am Lehrstuhl für die gute Arbeitsatmosphäre. Der International Graduate School der Universität Paderborn als betreuende Forschungsschule mit ihrem Angebot eines Promotionsstudiums in drei Jahren und vielen dabei helfenden Maßnahmen verdanke ich, dass ich die Arbeit tatsächlich in dieser vergleichsweise kurzen Zeit erfolgreich abschließen konnte. Ebenfalls bedanken möchte ich mich an dieser Stelle bei der Firma ORCONOMY GmbH und ihrem gesamten Team. Sie haben es mir einerseits durch ein Stipendium finanziell ermöglicht zu promovieren, aber sie haben mich auch so während dieser Zeit immer unterstützt und mir oft den Rücken freigehalten, wenn die dort anfallenden Projektaufgaben mit meinem Zeitplan der Promotion zu kollidieren drohten. Vielen Dank dafür! Weiterhin haben viele Studenten, zum Beispiel durch Seminar- und Abschlussarbeiten, geholfen, verschiedene Bereiche dieser Arbeit weiterzuentwickeln und mich so bei der Erforschung neuer Ideen unterstützt. Stellvertretend für alle möchte ich mich hier bedanken bei Marian Schiemann für seine geleistete Implementierungsarbeit, bei Benedikt Blumen für seine Unterstützung bei der Entwicklung der Optimierungsalgorithmen und bei Jacqueline Hüther für ihre Hilfe bei der Konzeption und Literaturrecherche. Ein großes Dankeschön geht an Maren Schmidtman, ohne die diese Arbeit, aber auch schon zuvor meine Bachelor- und Masterarbeit, sicherlich mit erheblich mehr Tippfehlern und verdrehten Sätzen gedruckt worden wären.

Neben diesen ganzen inhaltlichen Beiträgen habe ich aber auch im privaten Bereich viel Zuspruch erfahren, was enorm dabei geholfen hat, auch in schwierigen Phasen die nötige Motivation aufrecht zu erhalten. Ich bedanke mich deshalb bei meinen Freunden, die entweder aktiv durch Ansporn und gute Laune oder auch durch Akzeptanz der Entbehrung in den Phasen, in denen ich nur wenig Zeit für sie hatte, mir sehr geholfen haben. Alle hier aufzuzählen ohne jemanden zu vergessen ist kaum möglich, deswegen geht dieser Dank stellvertretend für alle an diejenige, die in der letzten Zeit besonders oft auf mich verzichten musste: Meine Freundin Maren Umbach.

Der letzte und größte Dank geht an meine Eltern: Vielen Dank für alles - nicht nur für die Unterstützung während der Promotion, sondern für all die großen und kleinen Dinge, die ihr in meinem Leben für mich getan habt.

Torben Schramme
Oktober 2014

Abstract - deutsch

Die Projektablaufplanung als eine Planungsaufgabe des Projektmanagements hat den Zweck, Ausführungszeiträume für alle Aktivitäten eines Projekts festzulegen, sodass alle Ressourcen und Restriktionen eingehalten werden und der so entstehende Projektablaufplan so gut wie möglich die Ziele der Planung abbildet. Diese Arbeit basiert auf aktuellen Veröffentlichungen, welche gezeigt haben, dass es trotz jahrzehntelanger Forschung noch immer eine Lücke gibt zwischen den Praxisanforderungen einer solchen Planung und dem, was mit aktuellen mathematischen Optimierungsmodellen und -verfahren abgebildet und gelöst werden kann. Dies betrifft besonders die Modellierung von flexibel planbaren Ressourcenbedarfen und die Abbildung unterschiedlicher Planungsziele. Während im klassischen Modell der Ressourcenbedarf einer Aktivität konstant über ihre gesamte Dauer ist und die Dauer ebenfalls konstant ist, so gibt es bei flexibel planbaren Bedarfen nur einen Gesamtbedarf für die Aktivität und die resultierende Dauer sowie die Verteilung des Bedarfs auf die einzelnen Zeitperioden der Dauer ist Teil der Optimierungsentscheidung. Dabei kann eine Aktivität beliebig viele konstante und/oder flexibel planbare Bedarfe haben. Als Lösungsverfahren wird ein MIP sowie ein genetischer Algorithmus (GA) entwickelt. Während das MIP mit einem Branch&Cut-Solver nur sehr kleinen Problem instanzen in akzeptabler Zeit lösen kann, erreicht der GA auch für große Instanzen gute Lösungen in kurzer, konstanter Zeit. Im Gegensatz zu bisher bekannten Heuristiken kann der GA einen Plan unter verschiedenen regulären und nichtregulären Zielfunktionen optimieren und so unterschiedliche Planungsziele abbilden. Die Tests wurden mit drei verschiedenen Zielfunktionen auf abgewandelten PSPLIB-Instanzen sowie einer Fallstudie aus der Praxis durchgeführt.

Abstract - englisch

The purpose of project scheduling in the process of project management is to determine execution periods for all project activities, subject to given resource or time constraints, with the objective that the resulting schedule reflects as much as possible the planning targets. This work is based on current publications that show that despite decades of research, there is still a gap between the requirements of practical planning on the one hand and the modelling and solving abilities of current state-of-the-art solution methods on the other hand. This applies in particular to the modeling of flexible, schedulable resource demands and the ability to incorporate different planning targets. In the classic model, resource demands of an activity are constant over the whole execution period and the length of this period itself is also constant. In contrast, flexible schedulable resource demands have only a total demand for the whole activity, and the activity execution duration plus the demand distribution over that execution time is determined in the optimization process. Activities can have any number of flexible schedulable and/or constant resource demands. For solving this model, two approaches are developed, namely a mixed-integer program (MIP) and a genetic algorithm (GA). While a Branch&Cut solver with the MIP can only solve small sized instances within a reasonable time, the GA achieves good solutions even for larger instances in a short, constant time. Compared to previous metaheuristic approaches, the GA is able to solve schedules under regular and non-regular objective functions and, thus, can handle different planning targets. Three different objective functions are considered in computational tests for modified test instances of the well-known PSPLIB and a case study from practice.

Inhaltsverzeichnis

1. Einleitung	1
2. Einführung in die Projektablaufplanung	5
2.1. Projektmanagement und Projektablaufplanung	5
2.1.1. Definitionen und Begriffe	5
2.1.2. Prozesse des Projektmanagements	8
2.2. Anspruch und Wirklichkeit	12
2.3. Praxisrelevante Aspekte	14
2.3.1. Besonderheiten der Multiprojektplanung	14
2.3.2. Verschiedene Ziele bei der Erstellung von Projektablaufplänen .	15
2.3.3. Flexible Ressourcenplanung	16
2.3.4. Ein Multiprojektplanungsbeispiel aus der Praxis	19
3. Stand der Technik	25
3.1. Das Resource Constrained Project Scheduling Problem	25
3.1.1. Ein Grundmodell zur Projektablaufplanung	25
3.1.2. Vergleich und Klassifizierung von Modellvarianten	28
3.1.3. Modellierung von Multiprojektproblemen	30
3.2. Exakte Lösungsverfahren	32
3.3. Heuristische Lösungsverfahren	34
3.3.1. Aktivitätenlisten und Einplanungsschemata	34
3.3.2. Lokale Suchverfahren zur Verbesserung einer Lösung	38
3.3.3. Metaheuristiken zur Verbesserung einer Lösung	40
3.4. Flexible Ressourcenplanung	45
3.5. Zielfunktionen in der Projektablaufplanung	47
3.5.1. Vorstellung relevanter Zielfunktionen	48
3.5.2. Klassifikation und Integration in heuristische Lösungsverfahren .	53
4. Ziele der Arbeit	57
5. Das Flexible Resource Constrained Project Scheduling Problem	61
5.1. Modellformulierung	61
5.2. Ein exakter Lösungsansatz mit Mixed Integer Programming	65

6. Eine Heuristik zur flexiblen Projektablaufplanung mit nichtregulären Zielfunktionen	71
6.1. Ein Einplanungsschema für flexible Ressourcen und nichtreguläre Zielfunktionen	71
6.2. Ein genetischer Algorithmus zur Steuerung des seriellen Einplanungsschemas	83
6.2.1. Allgemeiner Aufbau	83
6.2.2. Generierung einer Menge initialer Lösungen	86
6.2.3. Operatoren für die Kreuzung von Individuen	87
6.2.4. Operatoren für die Mutation	91
6.2.5. Selektionsphase und nächste Iteration	93
6.3. Anpassung an zeitbezogene Zielfunktionen	94
6.3.1. Minimierung der Projektlaufzeit	94
6.3.2. Minimierung der Verspätung von Aktivitäten oder Projekten . .	95
6.3.3. Einhaltung von Zeitfenstern	96
6.3.4. Robuste Planung mit Zeitpuffern	96
6.3.5. Kombination von Zielfunktionen	97
6.4. Anpassung an weitere Zielfunktionen	98
6.5. Alternative Ressourcenallokation	100
7. Evaluation und Vergleich der Lösungsverfahren	103
7.1. Versuchsaufbau und verwendete Testinstanzen	103
7.2. Ergebnisse des exakten Lösungsverfahrens	110
7.3. Evaluation des genetischen Algorithmus	116
7.3.1. Parameterbestimmung mit SMAC	116
7.3.2. Evaluation weiterer Algorithmusvarianten	122
7.3.3. Vergleich mit dem exakten Verfahren	124
7.4. Kombination von exaktem und heuristischem Verfahren	126
7.5. Vergleich mit anderen Heuristiken	128
7.6. Fazit	130
8. Fallstudie: Strategische Bauplanung für unterirdische Gas- und Ölspeicher	133
8.1. Aufbau des Multiprojektplans	133
8.2. Optimierungsergebnisse	138
9. Zusammenfassung und Ausblick	143
9.1. Kritische Würdigung der Ergebnisse	143
9.2. Ausblick auf weitere Forschung	147
Literaturverzeichnis	151

A. Instanzen für numerische Testläufe	161
A.1. Erläuterungen	161
A.2. Testinstanzenmenge EP150	163
A.3. Testinstanzenmenge MP50	165
A.4. Testinstanzenmenge MP250	166
B. Ergebnisse numerischer Testläufe - exakte Lösungsverfahren	171
B.1. Testinstanzenmenge EP150	171
B.2. Testinstanzenmenge MP50	173
B.3. Testinstanzenmenge MP250	175
C. Ergebnisse numerischer Testläufe - heuristische Lösungsverfahren	181
C.1. Parameterevaluation des genetischen Algorithmus	181
C.2. Vergleich mit dem exakten Lösungsverfahren	188
C.3. Vergleich mit anderen Lösungsheuristiken	205
C.4. Verbindung von exakten und heuristischen Verfahren	214
Abkürzungsverzeichnis	229
Abbildungsverzeichnis	231
Tabellenverzeichnis	233

1. Einleitung

Das Projekt als Form der Arbeitsorganisation in Unternehmen hat in den vergangenen Jahrzehnten in vielen Branchen stark an Bedeutung gewonnen (vgl. Zimmermann u. a. (2005, S. 1)). Besonders länger andauernde Vorhaben mit einem hohen Anteil an noch nie zuvor zu berücksichtigenden Bedingungen und damit einem hohen Maß an Unsicherheiten, wie z.B. größeren Produktentwicklungen, Umstrukturierungen oder Forschungsarbeiten, werden in Form von Projekten geplant und durchgeführt. Weiterhin definieren Zimmermann u. a. (2005, S. 3) das Projektmanagement als *„die Gesamtheit aller Planungs-, Steuerungs-, Koordinierungs- und Überwachungsaufgaben zur sach-, termin- und kostengerechten Realisierung von Projekten sowie die hierfür benötigten Konzepte und Methoden.“*

Die Projektplanung als erster Schritt in dieser Prozesskette legt den Grundstein dafür, ob ein Projekt später erfolgreich oder nicht erfolgreich durchgeführt wird. Da eine solche Planung von Projektzielen, Arbeitspaketen, Terminen und Ressourcen aufgrund der vielen zu verarbeitenden Informationen und zu berücksichtigenden Restriktionen eine äußerst komplexe Aufgabe werden kann, werden seit etwa 60 Jahren mathematische Optimierungsverfahren und Modelle entwickelt, um diese Planungsaufgaben im Allgemeinen und die Termin- und Ressourcenplanung im Besonderen besser zu unterstützen. Dennoch haben aktuelle Studien herausgefunden, dass je nach betrachtetem Unternehmen teilweise mehr als die Hälfte aller begonnenen Projekte fehlschlagen und die Ursachen hierfür oft in einer unzureichenden Planung des Projekts im Allgemeinen bzw. in einer fehlerhaften Planung der Ressourcen im Speziellen zu suchen sind (vgl. Engel u. a. (2006), GPM Deutsche Gesellschaft für Projektmanagement e.V. u. a. (2013)). Es hat sich gezeigt, dass die Projekte über die Jahrzehnte immer größer und komplexer geworden sind, Ressourcen dadurch genauer und flexibler geplant werden müssen und allgemein mehr Ziele und Aspekte bei der Planung berücksichtigt werden müssen. Hier ist mit der Zeit eine Lücke entstanden zwischen diesen praxisrelevanten Anforderungen an eine Planungsunterstützung auf der einen Seite und den dafür verfügbaren wissenschaftlichen Methoden auf der anderen Seite (vgl. Herroelen (2005)). Diese Arbeit wird sich daher mit der Frage beschäftigen, wie die geänderten Anforderungen der Termin- und Ressourcenplanung durch neue mathematische Optimierungsverfahren besser berücksichtigt werden können.

Zur Motivation dieser Arbeit wurde sich zunächst kritisch die Frage gestellt, ob das, was die Forschung in den letzten Jahrzehnten an Methoden und Modellen zur Unterstützung der Termin- und Ressourcenplanung hervorgebracht hat, immer noch das ist, was Projektmanager zur Planung aktueller Projekte benötigen. Um diese Frage zu beantworten, werden zunächst in Kapitel 2 einige aktuelle Studien mit dem Ergebnis

zusammengefasst, dass die Projekte der Unternehmen im Laufe der Zeit immer komplexer geworden sind und dass bei der Planung hinsichtlich Terminen und Ressourcen immer mehr Flexibilität und die Berücksichtigung von immer mehr Informationen erforderlich geworden ist. Dem gegenüber stehen auf der einen Seite breit verfügbare Softwarelösungen, die jedoch nur eine sehr vereinfachte Planungsunterstützung anbieten und auf der anderen Seite viele über die Jahre entwickelte Optimierungsverfahren, die jedoch größtenteils entweder nur auf sehr spezielle Projektplanungsprobleme anwendbar sind oder sich aufgrund ihrer Laufzeit bzw. der unterstützten Projektgrößen nicht für einen breiten Praxiseinsatz eignen. An dieser Stelle möchte die vorliegende Arbeit ansetzen und einen Beitrag liefern: Es sollen neue Planungsmethoden erforscht werden, mit denen zum einen mehr aktuelle Praxisanforderungen der Termin- und Ressourcenplanung berücksichtigt werden können und die zum anderen aufgrund von Laufzeit und Anpassbarkeit nicht nur für ein spezielles Projektplanungsproblem, sondern auch für einen breiteren, problemunabhängigeren Praxiseinsatz geeignet sind. Um diese Anforderungen genauer zu spezifizieren, werden auf Basis der vorher vorgestellten Studien, weiterer Literatur sowie einem Praxisbeispiel relevante aktuelle Aspekte der Termin- und Ressourcenplanung herausgearbeitet und vorgestellt.

In einer umfangreichen Literaturrecherche in Kapitel 3 wird zunächst das bis dahin in dieser Arbeit rein aus Managementsicht betrachtete Problem der Termin- und Ressourcenplanung auf das formalisierte Optimierungsproblem der ressourcenbeschränkten Projektablaufplanung (*Resource Constrained Project Scheduling Problem, RCPSP*) übertragen und ein Überblick über die gängigen Modelle und Lösungsverfahren gegeben. Im Anschluss wird gezeigt, welche der zuvor identifizierten praxisrelevanten Aspekte sich bereits in der Literatur finden lassen und wie diese dort umgesetzt wurden.

In Kapitel 4 wird zusammengefasst, dass zwar schon einige dieser praxisrelevanten Aspekte in anderen Veröffentlichungen betrachtet wurden, es aber bisher noch kein bekanntes Optimierungsverfahren gibt, das diese auch alle gemeinsam unterstützt und zusätzlich ein praxistaugliches Laufzeitverhalten hat. Darauf aufbauend werden als Ziele für den weiteren Verlauf der Arbeit definiert, dass nun eine solche Methode entwickelt werden soll und deren Effektivität und Effizienz anhand von künstlichen und realen Projektplanungsbeispielen demonstriert werden soll.

Zur Erreichung dieser Ziele wird in Kapitel 5 zunächst auf Basis des ursprünglichen RCPSP das mathematische Optimierungsmodell definiert, welches das zuvor aus praktischer Sicht beschriebene Planungsproblem formal abbildet. Als Referenz für die weitere Entwicklung wird anschließend gezeigt, wie man dieses Modell mit Mixed Integer Programming und dem Branch&Bound-Algorithmus exakt lösen kann. Da für einen späteren Praxiseinsatz so ein exaktes Verfahren jedoch aufgrund von zu hoher Laufzeit ausscheidet, wird im darauf folgenden Kapitel 6 eine Meta-Heuristik nach dem Vorbild eines genetischen Algorithmus entwickelt, welche durch eine variable Zielfunktion an die unterschiedlichen Aspekte angepasst werden kann und die in der Lage sein wird, das Optimierungsmodell in akzeptabler Zeit zu lösen.

Durch einen Vergleich mit dem exakten Lösungsverfahren wird in Kapitel 7 die Effektivität und Effizienz der Meta-Heuristik anhand künstlicher Testinstanzen demonstriert. Dabei wird zunächst darauf eingegangen, wie die dort verwendeten Testinstanzen auf Basis einer allgemein verfügbaren und in der Literatur vielfach benutzten Bibliothek für Standard-Projektplanungsprobleminstanzen (PSPLIB) generiert wurden. Es folgt eine Analyse der numerischen Ergebnisse hinsichtlich der geeignetsten Parameter für die Heuristik für verschiedene Planungsszenarien. Weiterhin wird getestet und ausgewertet, in wie weit sich eine Kombination der Heuristik mit dem exakten Verfahren zum schnellen und gleichzeitig optimalen Lösen der Testinstanzen eignet. Zur weiteren Demonstration der Praxistauglichkeit werden die entwickelten Verfahren in Kapitel 8 in einer Fallstudie an einem realen Projektplanungsbeispiel aus der Praxis getestet und bewertet.

Die Arbeit schließt in Kapitel 9 mit einem kritischen Rückblick auf die erzielten Ergebnisse. Es hat sich gezeigt, dass das entwickelte heuristische Verfahren in der Lage ist, die zuvor definierten Ziele und Anforderungen zu erfüllen und damit prinzipiell für einen breiten praktischen Einsatz zur Unterstützung der Ressourcen- und Terminplanung geeignet ist. Dennoch kann sich genau diese Praxistauglichkeit tatsächlich natürlich nur langfristig beweisen, weshalb weitere Fallstudien mit realen Projekten sowie die Einbindung weiterer, im Einzelnen bereits erforschter Erweiterungen des RCPSP mögliche nächste Schritte für weitere Forschung sind.

2. Einführung in die Projektablaufplanung

Die Planung und das Management sind sehr wichtige aber zugleich komplexe Aufgaben zur erfolgreichen Durchführung von Projekten. Ziel dieser Arbeit ist es, neue Modelle und Algorithmen zu entwickeln, um diese Aufgaben mit Hilfe mathematischer Optimierung besser bewältigen zu können. Zunächst soll dafür in diesem Kapitel aus Managementsicht erklärt werden, um was es bei der Projektplanung geht und wo die Herausforderungen hierbei liegen. Dazu werden als erstes einige grundlegende Begriffe definiert sowie die einzelnen Phasen des Projekts und die damit verbundenen Aufgaben des Projektmanagements erklärt. Es folgt ein Überblick über einige gängige, kommerzielle Softwareprodukte zur Unterstützung dieser Aufgaben und eine kritische Diskussion darüber, warum die Planungsmöglichkeiten solcher Produkte in einigen Punkten hinter den Erwartungen der Praxis zurückbleiben und die Wissenschaft bisher nicht zufriedenstellend in der Lage war, diesen Rückstand zu verringern. Abschließend werden für den weiteren Verlauf der Arbeit anhand von Literatur und Praxisbeispielen einige besondere Aspekte vorgestellt, die bei der Planung von Projekten von Bedeutung sein können, die jedoch, wie später gezeigt wird, durch die bisher verfügbaren Optimierungsmethoden nur unzureichend unterstützt werden.

2.1. Projektmanagement und Projektablaufplanung

Im Folgenden werden für ein einheitliches Verständnis im weiteren Verlauf der Arbeit zunächst die grundlegenden Begriffe der Projektplanung definiert. Anschließend folgt eine Übersicht über die Aufgaben und Prozesse, die beim Management von Projekten auftreten.

2.1.1. Definitionen und Begriffe

Die DIN-Norm 69901-5:2009-01 (vgl. Deutsches Institut für Normung (2009)) definiert den Begriff **Projekt** wie folgt:

Ein Projekt ist ein Vorhaben, das im Wesentlichen durch die Einmaligkeit der Bedingungen in ihrer Gesamtheit gekennzeichnet ist, wie z.B. Zielvorgabe, zeitliche, finanzielle, personelle und andere Begrenzungen, Abgrenzungen gegenüber anderen Vorhaben, projektspezifische Organisation.

Beispiele für Projekte sind z.B. die Reorganisation eines Unternehmens, die Entwicklung eines neuen Produkts oder der Bau eines Hauses. Auch wenn dies alles Vorhaben

sind, die grundsätzlich häufiger durchgeführt werden, so ist eine konkrete Durchführung dennoch immer einmalig - ein Unternehmen kann zwar z.B. mehrmals ein neues Produkt entwickeln, aber die Entwicklung eines konkreten Produkts ist hinsichtlich ihrer Rahmenbedingungen nach der genannten Definition immer einmalig und wird sich so nicht wiederholen. Um dieser Einmaligkeit und der damit logischerweise immer einhergehenden Neuartigkeit eines solchen Vorhabens auf organisatorischer Ebene zu begegnen, wurden bestimmte Planungsmethoden und Abläufe zur Durchführung von Projekten entwickelt (vgl. Abschnitt 2.1.2). Durch die Einmaligkeit grenzt sich ein Projekt klar von den immer wiederkehrenden Tätigkeiten in einem Unternehmen ab, wie z.B. im Bereich der betrieblichen Fertigung von der Serienfertigung eines Produkts (vgl. (Fischer u. a., 2002, S. 160f)) oder auf administrativer Ebene von den regelmäßig wiederkehrenden Verwaltungsaufgaben.

Aufbau eines Projekts

Die *zeitliche Begrenzung* eines Projekts bestimmt im Wesentlichen, wann ein Projekt frühestens beginnen kann und bis wann es spätestens abgeschlossen sein muss. Im Rahmen der Planung eines Projekts wird dieser Zeitraum als **Planungshorizont** bezeichnet. Der Planungshorizont wird in eine bestimmte Menge gleichgroßer **Zeiträume** eingeteilt, wobei die Länge einer solchen Periode (z.B. eine Stunde, ein Tag, ein Monat) von dem Detailgrad und ggf. weiteren Erfordernissen der jeweiligen Planung abhängt.

Die Ziele eines Projekts werden durch bestimmtes Handeln der beteiligten Akteure erreicht. Zur besseren Planung wird dieses Handeln in einzelne Aufgabenpakete aufgeteilt (näheres zu dieser Aufteilung in Abschnitt 2.1.2), welche im Folgenden als **Aktivitäten** des Projekts bezeichnet werden. Wenn es Gründe gibt, die eine bestimmte zeitliche Reihenfolge bei der Ausführung von zwei Aktivitäten A und B erfordern, so existiert zwischen diesen beiden Aktivitäten eine **Vorrangbeziehung**. Aktivität B ist damit zeitlich abhängig von Aktivität A. Im Projektmanagement wird üblicherweise zwischen den folgenden vier Arten von Vorrangbeziehungen unterschieden (vgl. (Vanhoucke, 2012, S. 18-20)):

Ende-Start Die Aktivität B kann frühestens zu dem Zeitpunkt begonnen werden, zu dem Aktivität A komplett abgeschlossen ist. Diese Vorrangbeziehung wird auch als *Normalfolge* bezeichnet.

Start-Start Die Aktivität B kann frühestens zu dem Zeitpunkt begonnen werden, zu dem auch Aktivität A begonnen wurde.

Ende-Ende Die Aktivität B kann frühestens zu dem Zeitpunkt beendet werden, zu dem auch Aktivität A beendet wurde.

Start-Ende Die Aktivität B kann frühestens zu dem Zeitpunkt beendet werden, zu dem Aktivität A begonnen wurde.

		zeitliche Verfügbarkeit	
		erneuerbar	nicht erneuerbar
Teilbarkeit	beliebig teilbar	Zur Verfügung stehende Arbeitszeit des Projektteams in jeder Zeiteinheit	Gesamte finanzielle Mittel, die für das Projekt zur Verfügung stehen
	ganzzahlig teilbar	Eine Maschine, die pro Zeiteinheit nur für eine Aktivität benutzt werden kann	Eine bestimmte Menge an Supportanfragen, die man bei einem Experten für das Projekt zur Verfügung hat

Tabelle 2.1. – Beispiele für die Klassifizierung von Projektressourcen

Um die Projektziele zu erreichen, d.h. die Aktivitäten ausführen zu können, stehen in begrenztem Umfang **Ressourcen** zur Verfügung. Gängige Beispiele für solche Ressourcen sind die Arbeitszeit eines Mitarbeiters, eine benötigte Maschine, eine Menge an bestimmten Rohstoffen oder ein bestimmter Arbeitsplatz. In der Praxis kann es je nach Projekt die verschiedensten Arten von Ressourcen geben, für eine abstraktere Planung werden sie deshalb oft anhand von ihrer Verfügbarkeit und ihrer Teilbarkeit klassifiziert (vgl. (Demeulemeester und Herroelen, 2002, S. 48ff)). Bei der Ressourcenverfügbarkeit unterscheidet man zwischen erneuerbaren Ressourcen und nicht erneuerbaren Ressourcen. Eine erneuerbare Ressource steht in jeder Zeitperiode neu in gewisser Menge zur Verfügung, die Menge einer nicht erneuerbaren Ressource steht einmalig für den gesamten Planungshorizont zur Verfügung und kann frei auf die einzelnen Perioden verteilt werden. Aus Sicht der Teilbarkeit können Ressourcen beliebig teilbar oder nur ganzzahlig teilbar sein. In Tabelle 2.1 sind Beispiele für die jeweiligen Ressourcenklassen zu finden.

Zwischen den Aktivitäten auf der einen Seite und den verfügbaren Ressourcen auf der anderen Seite besteht also eine n:m-Beziehung. Eine Aktivität kann zur Ausführung bestimmte Mengen von mehreren Ressourcen benötigen, umgekehrt kann eine begrenzte Ressource von mehreren Aktivitäten benötigt werden.

Gemeinsame Betrachtung mehrerer Projekte

Durch die stark gestiegene Verbreitung von Projektarbeit in Unternehmen kommt es immer seltener vor, dass ein einzelnes Projekt komplett isoliert betrachtet und abgewickelt wird. Herroelen (2005) fasste auf Basis verschiedener Studien zusammen, dass mittlerweile bis zu 90% aller abgewickelten Projekte in einem Multiprojektcontext ausgeführt werden. Aus Managementsicht können mehrere Projekte auf verschiedene Arten zusammengefasst betrachtet werden. Die allgemeinste Art einer solchen Gruppierung stellt das **Projektportfolio** dar, das (Seidl, 2011, S. 6) wie folgt definiert:

2. Einführung in die Projektablaufplanung

Ein Projektportfolio bezeichnet die Zusammenfassung aller geplanten, genehmigten und laufenden Projekte und Programme eines Unternehmens, einer Organisation oder eines Geschäftsbereichs.

Eine etwas restriktivere Art der Gruppierung von Projekten stellt das **Programm** dar, das neben der Zugehörigkeit zu einer Organisationseinheit auch noch die Ziele eines Projekts als Kriterium für eine gemeinsame Betrachtung heranzieht. Motzel (2006) definiert ein Programm folgendermaßen:

Ein Programm ist definiert als eine Menge zusammenhängender Projekte und organisatorischer Veränderungsprozesse, die mit dem Ziel aufgesetzt wurden, eine strategische Zielsetzung zu erreichen und einen erwarteten Nutzen für die Organisation zu erreichen.

Aus den vorangegangenen Definitionen über den Aufbau eines Projekts lässt sich folgern, dass es besonders hinsichtlich der zeitlichen Planung Sinn macht oder sogar nötig ist, mehrere Projekte gemeinsam zu betrachten, wenn zu deren Ausführung gemeinsame, beschränkte Ressourcen nötig sind. Man spricht bei einer solchen gemeinsamen Betrachtung von einem **Multiprojektplan** oder allgemein von Multiprojektmanagement (Details dazu in Abschnitt 2.3.1).

2.1.2. Prozesse des Projektmanagements

Da ein konkretes Projekt per Definition immer ein einmaliges Vorhaben ist, lässt sich dessen genaue Planung und Durchführung nur bedingt verallgemeinern und auf andere Projekte übertragen. Dennoch haben sich mit der zunehmenden Verbreitung der Projektarbeit Methoden und Vorgehensmodelle entwickelt, um diese besser zu standardisieren und das mit der Neuartigkeit einhergehende Risiko besser kontrollierbar zu machen. Im deutschsprachigen Raum hat sich zur Koordination solcher Entwicklungen und Standardisierungen die *GPM Deutsche Gesellschaft für Projektmanagement e. V.* gebildet, die zur europäischen *International Project Management Association (IPMA)* gehört. Dem gegenüber steht das US-Amerikanische *Project Management Institute (PMI)*.

Je nach betrachteter Literatur wird der Ablauf eines Projekts in unterschiedliche Abschnitte mit jeweils bestimmten Aufgaben und Zielen eingeteilt. Zur weiteren Einordnung dieser Arbeit werden die folgenden Projektphasen mit ihren jeweiligen Aufgaben beschrieben, die sich so oder so ähnlich auch in gängiger Projektmanagementliteratur finden lassen (vgl. z.B. (Seidl, 2011, S. 116ff) oder (Vanhoucke, 2012, S. 11ff)).

Projektideen entwickeln Zu Beginn der Planung gibt es i.d.R. eine Projektidee bzw. einen Grund, warum ein bestimmtes Vorhaben in Form eines Projekts durchgeführt werden soll. So ein Auslöser ist z.B., dass ein Unternehmen aus eigenem Antrieb heraus ein neues Produkt entwickeln möchte, dass das Wachstum eines

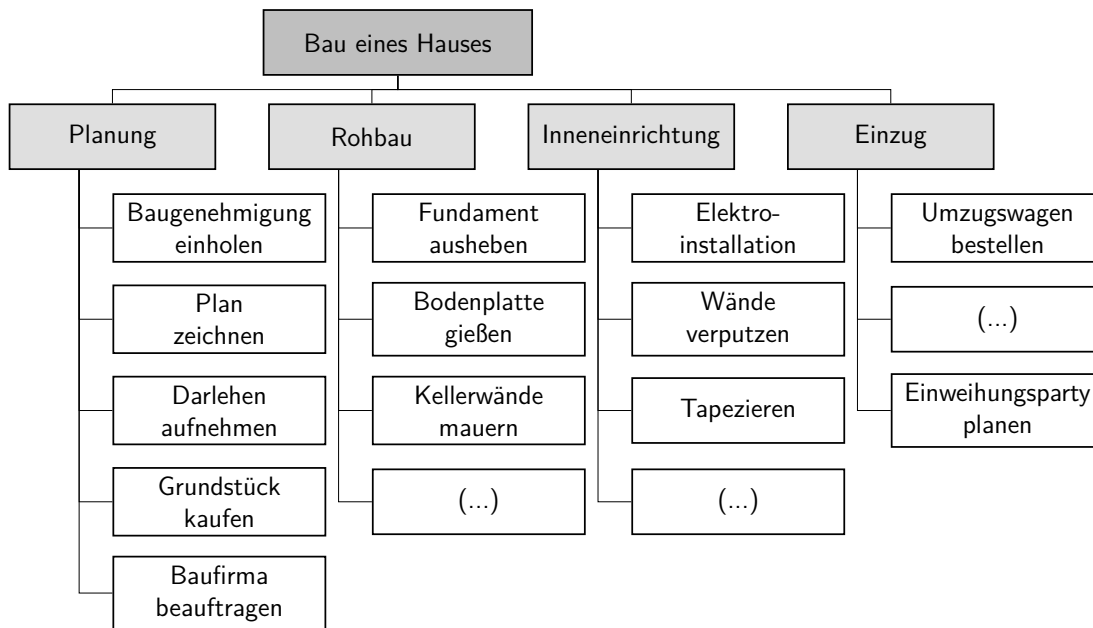


Abbildung 2.1. – Beispielhafter Auszug aus einem Projektstrukturplan

Unternehmens eine Reorganisation erforderlich macht oder dass neue gesetzliche Vorgaben die Umstellung der bisherigen Fertigung erfordern. Abgeleitet von einer solchen Projektidee werden anschließend deutlich genauer die Ziele des Projekts definiert. Es hat sich gezeigt, dass eine möglichst genaue Formulierung dieser Ziele einen großen Einfluss auf einen weiteren positiven Verlauf und letztendlich auf den Erfolg des Projekts hat. Als Orientierung wird deshalb gesagt, dass ein Ziel *smart* sein sollte (vgl. Doran (1981)), d.h. spezifisch hinsichtlich seiner Beschreibung, messbar im Hinblick auf das gewünschte Ergebnis, akzeptiert von allen Projektbeteiligten, realistisch in seiner Erreichbarkeit und immer auch terminiert bezüglich eines Zeitplans.

Projektstrukturplanung Anhand der definierten Projektziele wird im nächsten Schritt geplant, welche Handlungen voraussichtlich nötig sein werden, um diese Ziele zu erreichen. Da diese im Allgemeinen sehr umfangreich sind und es kaum möglich ist, sie als Ganzes zu überblicken, werden sie für die weitere Planung in einzelne Gruppen aufgeteilt und anschließend in kleinere Arbeitspakete bis hin zu einzelnen Aktivitäten heruntergebrochen. Die dabei entstehende Aufgabenhierarchie wird **Projektstrukturplan** (PSP) genannt und ist in Abbildung 2.1 beispielhaft für den Bau eines Hauses dargestellt. Wie detailliert und über wie viele Ebenen ein solcher PSP in der Praxis geht, hängt von dem geplanten Projekt selber, aber auch vom gewünschten Detailgrad der Planung ab (z.B. detaillierte operative Planung oder grobe strategische Planung).

Projektablaufplanung Durch den Projektstrukturplan weiß der Planer jetzt, *welche* einzelnen Aktivitäten im Rahmen des Projekts zu erledigen sind. Als nächstes stellt sich die Frage, *wann* die einzelnen Aktivitäten im Planungshorizont des Projekts ausgeführt werden sollen. Dieser Schritt wird als **Projektablaufplanung** bezeichnet. Um den Ablauf planen zu können, sind neben dem PSP noch weitere Informationen notwendig.

Zum einen müssen einige zeitliche Parameter bestimmt werden, dazu gehören die voraussichtliche Dauer jeder einzelnen Aktivität im PSP und eventuelle **frühestmögliche Anfangszeiten** und/oder gewünschte **Fertigstellungstermine** für einzelne Aktivitäten, Gruppen von Aktivitäten oder das gesamte Projekt. Außerdem werden jetzt eventuelle Vorrangbeziehungen zwischen einzelnen Aktivitäten des PSP identifiziert und festgehalten.

Zusätzlich zu dieser zeitlichen Planung werden außerdem die Ressourcenparameter des Plans bestimmt. Für jede Aktivität im PSP muss der voraussichtliche **Ressourcenbedarf** ermittelt werden, d.h. welche Menge von welcher Ressource zur Ausführung der Aktivität benötigt wird. Ebenso wird die **Ressourcenverfügbarkeit** geplant. Hier wird bestimmt, welche Ressourcen überhaupt zur Verfügung stehen, ob es sich um erneuerbare oder nicht erneuerbare Ressourcen handelt und wie hoch die verfügbare Menge pro Zeitperiode bzw. über den gesamten Planungshorizont ist.

Auf Basis dieser Menge an Anforderungen (Aktivitätsdauern, Ressourcenbedarfe) auf der einen Seite und Restriktionen (Termine, Vorrangbeziehungen, Ressourcenverfügbarkeiten) auf der anderen Seite muss jetzt ein Projektablaufplan entwickelt werden, d.h. für jede Aktivität muss bestimmt werden in welchen Zeitperioden sie ausgeführt werden soll, sodass alle Restriktionen eingehalten werden. Für die Darstellung eines solchen Projektablaufplans wird heute üblicherweise ein Gantt-Diagramm verwendet, da in einem solchen besonders die zeitlichen Abhängigkeiten zum Ausdruck gebracht werden können (vgl. Abbildung 2.2).

Abhängig von der Anzahl der Aktivitäten in einem PSP und der Ausprägung der Restriktionen kann es sehr viele mögliche und gültige Ablaufpläne für einen PSP geben. Welcher dieser Pläne nun derjenige ist, der letztendlich ausgewählt und umgesetzt wird, hängt von den weiteren Zielen der Planung ab. Wenn nur ein Projekt alleine geplant wird, dann ist das verbreitetste Ziel, die **Projektlaufzeit** möglichst kurz zu halten, also die Zeit zwischen dem Beginn der ersten und dem Ende der letzten Aktivität. Wie in Abschnitt 2.3.2 beschrieben wird, können aber auch noch weitere/andere Ziele verfolgt werden.

Projekt durchführen und überwachen Wird das Projekt auf Basis des erarbeiteten Projektablaufplans durchgeführt, so wird ein ständiges Projektcontrolling durch

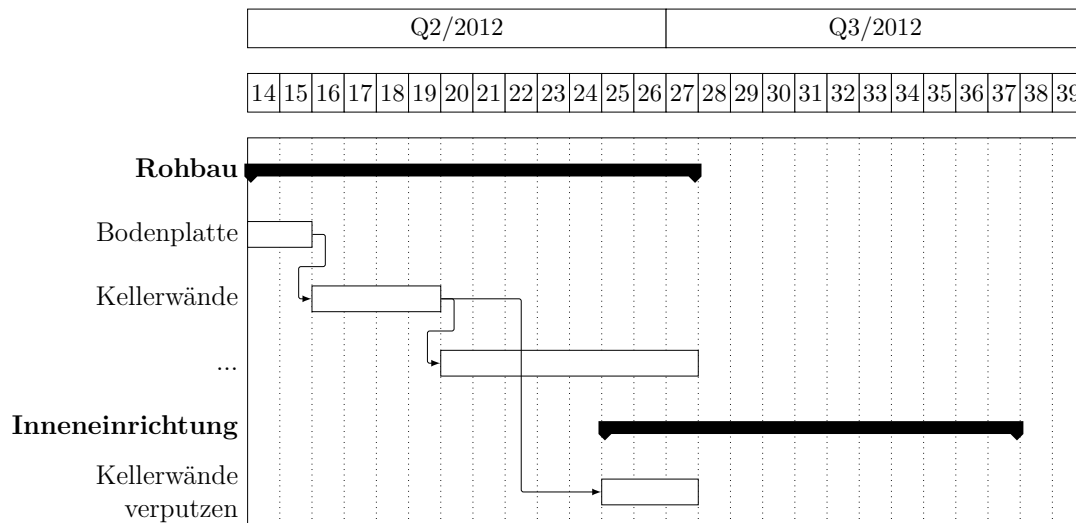


Abbildung 2.2. – Beispielhafter Auszug aus einem Projektablaufplan als Gantt-Diagramm

den Projektmanager empfohlen. Dieser hat die Aufgabe, den aktuellen Projektfortschritt zu überwachen und mit dem Projektablaufplan zu vergleichen. Hier kann es vorkommen, dass der Ist-Zustand nicht dem Soll-Zustand entspricht, wenn z.B. eine Aktivität wegen unvorhergesehener Schwierigkeiten länger dauert als zu Anfang angenommen oder mehr Ressourcen benötigt werden als zu Anfang veranschlagt. Spätestens wenn dies dazu führt, dass parallel laufende oder nachfolgende Aktivitäten nicht mehr wie geplant ausgeführt werden können oder sogar vereinbarte Termine nicht eingehalten werden können, sollte eingegriffen werden.

Die Möglichkeiten auf solche Störungen zu reagieren sind vielfältig. Es könnten einfach alle nachfolgenden Aktivitäten weiter in die Zukunft geschoben werden, falls möglich könnten auch einfach die verfügbaren Ressourcen erhöht werden oder es kann versucht werden, einen Teil des Projektablaufplans ganz neu zu planen und so den Konflikt aufzulösen.

Projekt abschließen Nachdem alle geplanten Aktivitäten fertig abgearbeitet wurden, ist das Projekt aus Sicht des Projektablaufplans abgeschlossen. Um für die Planung zukünftiger Projekte zu lernen und um festzustellen, ob aus Sicht aller Projektbeteiligten die Projektziele zufriedenstellend erreicht wurden, sollte abschließend immer eine Evaluierung des Projekts durchgeführt werden und das gelernte Wissen festgehalten werden (vgl. (Seidl, 2011, S. 148f, 214f)).

2.2. Anspruch und Wirklichkeit

Es hat sich herausgestellt, dass es mit zunehmender Anzahl an Aktivitäten und Restriktionen in einem Projekt immer schwieriger wird, durch manuelle Planung überhaupt einen gültigen Projektablaufplan zu erstellen, auf Basis dessen dann das Projekt durchgeführt wird. Noch schwieriger ist es demnach, genau so einen Plan zu finden, der möglichst gut zu den jeweiligen Zielen der Planung passt.

Seit Ende der 50er Jahre versuchen Wissenschaftler deshalb, die Projektablaufplanung durch computergestützte, mathematische Optimierungsmethoden zu unterstützen und zu verbessern (vgl. z.B. Kelley und Walker (1959), Lambourn (1963)). Das **Resource Constrained Project Scheduling Problem** als mittlerweile etabliertes Standardmodell zur Projektablaufplanung unter beschränkten Ressourcen wurde über die Jahrzehnte in hunderten Veröffentlichungen beschrieben und weiterentwickelt und hat sich dadurch als Schnittstelle zwischen dem Projektmanagement aus betriebswirtschaftlicher Sicht und der Sicht der mathematischen Optimierung herausgebildet. Aus Sicht des Projektmanagements geht es dann darum, wie betriebswirtschaftliche Prozesse erfasst und formal abgebildet werden können (vgl. z.B. Matthes (1972)) und wie diese Informationen dann in ein Modell zur Projektablaufplanung überführt werden können (vgl. z.B. Viefhues (1982)). Die tatsächliche Lösung einer solchen Modellinstanz mit Hilfe mathematischer Optimierung nimmt bei dieser Sicht eher eine untergeordnete Rolle ein, ein Optimierungsverfahren wird hier mehr als Werkzeug gesehen.

Auf der anderen Seite der Schnittstelle steht die Sicht der mathematischen Optimierung. In Veröffentlichungen aus diesem Bereich befassen sich Autoren damit, wie das Standardmodell oder Erweiterungen davon effizienter gelöst werden können, es geht um exakte und heuristische Lösungsverfahren, um lösbare Modellgrößen oder um die möglichen Aspekte einer Planung, die in der Optimierung berücksichtigt werden können (für eine Übersicht über Beiträge dazu aus der jüngeren Zeit vgl. Hartmann und Briskorn (2010)).

Diese Schnittstelle hat einerseits dabei geholfen, dass sich Forscher in ihren Arbeiten auf jeweils nur eine der beiden Sichten konzentrieren konnten und sich je nach Standpunkt entweder nicht so sehr damit beschäftigen mussten, wie ein solches Planungsmodell denn nun gelöst wird oder sich nicht so sehr damit beschäftigen mussten, wie es mit den nötigen Eingabedaten befüllt wird. Es scheint jedoch so, als hätte diese Teilung auch dazu beigetragen, dass eine Lücke entstanden ist zwischen den Anforderungen aus der Praxis, d.h. der betriebswirtschaftlichen Sicht, und dem, was auf Seite der mathematischen Optimierung aktuell an Lösungsverfahren verfügbar ist. Auf der Seite der Praxis sind mit kommerziellen Softwareprodukten wie SAP Projektsystem oder Microsoft Project Werkzeuge entstanden, um die Verwaltung von Projekten, insbesondere die Erstellung von Projektstrukturplänen und die Ressourcenplanung zu unterstützen. Dennoch hat eine Studie der GPM herausgefunden, dass je nach betrachtetem Unternehmen teilweise mehr als die Hälfte aller Projekte nicht erfolgreich abgeschlossen werden (vgl. Engel u. a. (2006)). Als eine der Hauptursachen für das

Scheitern wird eine unzureichende Projektplanung genannt. In einer aktuellen Studie der GPM Deutsche Gesellschaft für Projektmanagement e.V. u. a. (2013) zur Identifizierung von Misserfolgsk Faktoren in der Projektarbeit wird ein unvollständiger Ressourcenplan als das von den Befragten am zweithäufigsten genannte Problem angeführt. Man muss sich also die Frage stellen, was die Gründe für diese Probleme in der Praxis trotz umfangreicher Forschung auf diesem Gebiet sind. Kommen die entwickelten Modelle und Methoden der Forschung nicht in der Praxis, d.h. in den Softwareprodukten, an? Sind die zu lösenden Planungsaufgaben in der Praxis so kompliziert, dass es bisher nicht möglich war, sie mit passenden Modellen abzubilden und Lösungsverfahren zu finden, um sie zufriedenstellend zu lösen? Oder hat insgesamt die Forschung an den Bedürfnissen der Praxis vorbei gearbeitet?

Verschiedene Wissenschaftler haben in den letzten Jahren versucht, Antworten auf diese Fragen zu finden. Kolisch (1999) hat dazu die Fähigkeiten von kommerzieller Projektplanungssoftware untersucht und gezeigt, dass die Minimierung der Projektdurchlaufzeit bei wenigen Ressourcen (1-3) und wenigen Aktivitäten (10-30) gut gelingt und die Ergebnisse auf dem Niveau der damals aktuellen wissenschaftlichen Methoden sind. Werden die Pläne aber umfangreicher, bleiben die mit diesen Produkten generierten Ergebnisse deutlich hinter denen der verglichenen aktuellen Methoden aus der Forschung zurück. Eine Optimierung hinsichtlich anderer Zielfunktionen als der Minimierung der Projektlaufzeit war gar nicht möglich.

Herroelen (2005) greift die Kritik von Kolisch hinsichtlich der Ressourcenplanung auf und erweitert sie dahingehend, dass die Softwareprodukte nur sehr bedingte, einfache Verfahren anbieten, um z.B. Risikoinformationen in die Planung mit einfließen zu lassen. Es zeigt sich, dass es zwar eine ganze Reihe von weiteren Informationen gibt, die ein Projektmanager berücksichtigen muss, diese zwar auch von der Software verwaltet werden können, aber nicht bei der Optimierung der Planung berücksichtigt werden.

Williams (2003) stellt bei seiner Untersuchung die Softwarewerkzeuge als Zwischenebene etwas in den Hintergrund und stellt sich stattdessen generell die Frage, was die Forschung der mathematischen Optimierung der vergangenen 50 Jahre zur Vereinfachung von Management und Planung von Projekten beitragen konnte. Dabei kommt er unter anderem zu dem Ergebnis, dass sich die Art und Weise, in der Projekte durchgeführt werden, verändert hat. Es werden mehr Projekte parallel durchgeführt, neue Projekte kommen hinzu, abgeschlossene fallen weg. Die Projekte selber sind dynamischer und komplexer geworden, d.h. es steht nicht mehr von Anfang an fest, welche Aktivitäten nun genau durchgeführt werden müssen und es wird eine höhere Flexibilität hinsichtlich der Zuweisung von Ressourcen zu Aktivitäten vorausgesetzt. Außerdem haben die durchgeführten Projekte mittlerweile einen deutlich größeren Umfang als noch vor einigen Jahrzehnten. Williams kritisiert, dass die entwickelten Modelle und Methoden aber noch immer sehr restriktive Annahmen hinsichtlich Ressourcen und der möglichen weiteren Aspekte treffen und Änderungen am Plan durch das Management während das Projekt schon läuft auch nur sehr bedingt möglich sind. Viele Entwicklungen decken daher immer nur einen bestimmten Spezialfall der Pro-

jektplanung ab, seien jedoch nicht allgemein anwendbar und daher unbrauchbar für die Implementierung in Softwarewerkzeugen für den breiten Einsatz.

2.3. Praxisrelevante Aspekte

Die präsentierten Untersuchungen in Abschnitt 2.2 lassen sich dahingehend zusammenfassen, dass es drei wesentliche Anforderungen gibt, die im Rahmen der Projektablaufplanung aktueller Projekte wichtig sind, aber bisher nur unzureichend gemeinsam von den verfügbaren Planungsmethoden unterstützt werden. Erstens der Multiprojektkontext, zweitens eine flexible Planung mit der Berücksichtigung verschiedener Planungsziele und drittens ein flexibles Ressourcenmodell. Im Folgenden wird nun genauer untersucht, wie diese drei Anforderungen im Detail aussehen und in einem Projekt aus der Praxis auftreten können.

2.3.1. Besonderheiten der Multiprojektplanung

Wie in Kapitel 1 und 2.2 bereits erwähnt, wird ein Großteil der heute in Unternehmen durchgeführten Projekte in einem Multiprojektkontext durchgeführt. Das erfordert gegenüber der Abwicklung eines einzelnen Projekts zum einen auf organisatorischer Seite zusätzliche Maßnahmen, angefangen von der Auswahl der durchzuführenden Projekte über die Priorisierung, der Berücksichtigung von Abhängigkeiten zwischen Projekten oder dem regelmäßigen Berichten aller einzelnen Projektteams an eine zentrale, verantwortliche Stelle (für einen detaillierten Überblick über das Multiprojektmanagement, vgl. z.B. Seidl (2011)).

An dieser Stelle und im weiteren Verlauf der Arbeit werden diese organisatorischen Aufgaben ausgeblendet und es wird sich nur auf die Projektablaufplanung konzentriert. Das heißt, es wird davon ausgegangen, dass es eine zuvor definierte Menge von Projekten mit bereits ausgearbeiteten Projektstrukturplänen gibt. Da diese Projekte gemeinsame Ressourcen benutzen ist es nötig, ihre Projektstrukturpläne jetzt zu einem gemeinsamen Projektablaufplan zu planen. Gegenüber der Einzelprojektplanung ergeben sich dabei folgende Besonderheiten:

- Die gemeinsam betrachteten Projekte können zu unterschiedlichen Zeitpunkten starten.
- Die Projekte können unterschiedliche Umfänge hinsichtlich der Anzahl der Arbeitspakete und deren Inhalt haben.
- Die Projekte oder einzelne Teile von ihnen können individuelle Fertigstellungstermine haben, die eingehalten werden müssen.

Daraus lässt sich ableiten, dass es möglich ist, dass zum Zeitpunkt einer Planung bereits einige zuvor begonnenen Projekte laufen, die man in der Planung berücksichtigen muss, da sie in den Planungshorizont hineinragen und die zu verplanenden

Ressourcen nutzen. Weiterhin kann jetzt eine Neuplanung des Gesamtplans nicht mehr nur dann nötig werden, wenn dieser Plan nach einer Störung repariert werden muss (siehe Abschnitt 2.1.2), sondern auch, wenn z.B. ein neues Projekt für den aktuellen Planungshorizont hinzukommt. Während es für das neue Projekt noch eine große Planungsfreiheit gibt, kann es bei den schon zuvor im Planungshorizont vorhandenen Projekten eine Anforderung sein, dass bei einer Neuplanung die bereits zuvor eingeplanten Projektaktivitäten möglichst wenig verändert werden (vgl. Herroelen und Leus (2005)). Aufgrund der genannten Besonderheiten muss es gegenüber der Einzelprojektplanung außerdem möglich sein, Projekten bzw. ihren Aktivitäten individuelle frühestmögliche Starttermine und gewünschte Fertigstellungstermine bezogen auf den Planungshorizont zuzuweisen. Daraus ergibt sich direkt, dass es nun auch nicht mehr sinnvoll ist, die Fertigstellungszeit der letzten Aktivität im Plan zu minimieren, sondern man stattdessen versuchen muss, die Aktivitäten so zu planen, dass möglichst alle Aktivitäten mit bekannten Fertigstellungsterminen diese Termine nicht überschreiten.

Dadurch, dass nun mehrere Projekte gleichzeitig geplant werden, steigt auch die Anzahl an Aktivitäten, die insgesamt bei der Ablaufplanung berücksichtigt werden müssen. Herroelen (2005) hat die Informationen über gängige Größen von Multiprojektplänen aus verschiedenen Veröffentlichungen zusammengetragen. Daraus ergibt sich, dass im Durchschnitt zwei bis fünf Projekte zusammen betrachtet und geplant werden müssen und jedes einzelne Projekt von weniger als 50 bis über 150 Aktivitäten haben kann.

2.3.2. Verschiedene Ziele bei der Erstellung von Projektablaufplänen

Bei der Erstellung von Projektablaufplänen kann ein Planer verschiedene Ziele verfolgen wollen. Als Standardziel wird dabei oft eine möglichst kurze Projektdauer, also indirekt eine möglichst effiziente Ausnutzung der zur Verfügung stehenden Ressourcen, genannt. Sobald es mehrere Projekte in einem Plan gibt oder allgemeiner gesagt, sobald es Fertigstellungstermine für mehr als eine Aktivität gibt (wobei es innerhalb eines Projekts natürlich auch mehrere Aktivitäten mit einem Fertigstellungstermin geben kann), wird dieses Standardziel dahingehend abgewandelt, dass möglichst alle Fertigstellungstermine eingehalten oder zumindest so wenig wie möglich überschritten werden. Bei einer erneuten Planung eines zuvor schon bestehenden Plans kann es wünschenswert sein, dass zumindest der in naher Zukunft stattfindende Teil des ursprünglichen Plans möglichst wenig verändert wird. Damit eine erneute Planung z.B. aufgrund einer länger als geplant dauernden Aktivität erst gar nicht nötig wird, könnte es schon bei der initialen Planung das Ziel sein, einen Zeitpuffer hinter Aktivitäten einzuplanen, die im Vorfeld vom Projektmanager als risikobehaftet eingestuft wurden.

Eine genauere und vor allem formale Betrachtung dieser und anderer Zielfunktionen findet in Abschnitt 3.5.1 statt. An dieser Stelle wird zunächst festgehalten, dass es aus praktischer Sicht oft nötig ist, mehrere dieser Ziele gleichzeitig bei der Planung zu berücksichtigen. Herroelen (2005) stellt dies in seiner Kritik so dar, dass es zumindest

bei den breit einsetzbaren Werkzeugen nicht möglich sei, weitere Managementinformationen wie z.B. Risiko in angemessener Weise in die Planung mit einfließen zu lassen. Anders formuliert könnte gesagt werden, dass es dem Planer nur bedingt weiterhilft, wenn ihm die Optimierung einen Plan generiert, der zwar alle Termine einhält, in den aber anschließend von Hand noch (soweit überhaupt möglich) Zeitpuffer eingebaut werden müssen. Besser wäre es, wenn eine solche Optimierung direkt beide Ziele beachten könnte, also einen Plan finden, in dem zunächst alle Termine eingehalten werden, aber zweitrangig versucht wird, die Zeitpuffer hinter zuvor ausgewählte kritische Aktivitäten einzubauen. Gibt es dann nämlich mehrere mögliche Pläne, welche die Einhaltung aller Termine ermöglichen, so soll automatisch der Plan aus dieser Menge gefunden werden, der bei den kritischen Aktivitäten die größten Puffer ermöglicht.

Neben diesem Beispiel können in der Praxis natürlich weitere Kombinationen von Zielen denkbar sein. Welche das im Einzelnen sind und wie die Prioritäten zwischen diesen sind, hängt sicherlich auch immer vom betrachteten Fall, den Rahmenbedingungen und den Wünschen des Managements ab. Es sollte also generell möglich sein, für die Planung mehrere, ggf. individuelle Ziele angeben zu können und festzulegen, wie diese gegeneinander gewichtet sein sollen.

2.3.3. Flexible Ressourcenplanung

Damit die Aktivitäten eines Projekts durchgeführt werden können, werden zum Zeitpunkt der Durchführung bestimmte Ressourcen benötigt bzw. verbraucht. So benötigt die Durchführung einer Programmieraufgabe eine bestimmte Menge an Arbeitsstunden eines Programmierers, wohingegen z.B. für das Ausheben eines Fundaments ein Bagger an der Baustelle benötigt wird. In der klassischen Projektablaufplanung wird zur Planung von Ressourcen und Terminen die Annahme getroffen, dass eine benötigte Ressource für eine Aktivität in jeder Zeitperiode ihrer Ausführung konstant in einer zuvor festgelegten Menge zur Verfügung stehen muss.

Für das Beispiel mit dem Bagger als Ressource kann diese Annahme noch relativ leicht nachvollzogen werden: Wenn die Baufirma nur einen Bagger hat und dieser zum Ausheben des Fundaments von Montag bis Mittwoch zu einer entfernten Baustelle gebracht wird, dann steht er an diesen Tagen auf anderen Baustellen nicht zur Verfügung. Auch wenn er an dem ihm zugewiesenen Ort jetzt immer nur den halben Tag lang tatsächlich eingesetzt würde, wäre ein schneller Transport zu einer anderen Baustelle zur Nutzung der restlichen Zeit logistisch nicht möglich.

Bei der Verplanung der Arbeitszeit des Programmierers wirkt sich diese Annahme schon deutlich restriktiver aus: Wenn die zu erledigende Aufgabe beispielsweise einen Umfang von 24 Arbeitsstunden hat, dann muss sich der Planer bereits im Vorfeld der Planung entscheiden, ob er dafür eine Aktivität mit einer Dauer von 3 Tagen und einem Ressourcenbedarf von 8 Arbeitsstunden/Tag modelliert oder aber der Aktivität z.B. eine Dauer von 6 Tagen und ein Bedarf von 4 Stunden/Tag zuweist. Entscheidet er sich für die zweite Variante, so sollte er sich zu diesem Zeitpunkt der

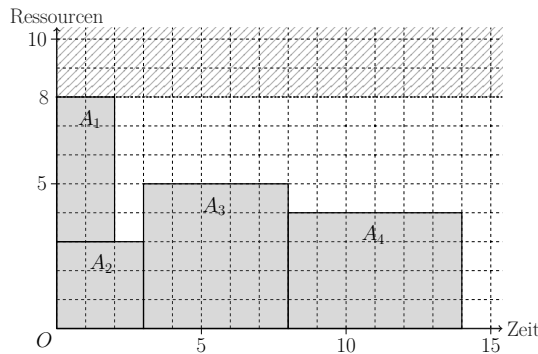
Planung bereits sicher sein, dass es eine weitere Aktivität gibt, die die verbleibenden 4 Stunden/Tag ausnutzen kann, da die Arbeitszeit des Programmierers sonst nicht gut ausgenutzt wird. Welche Variante nun die bessere von beiden im Hinblick auf das Planungsergebnis ist, hängt also immer von den weiteren zu planenden Aktivitäten und ihren Ressourcenbedarfen ab.

Im Hinblick auf eine bessere Entscheidungsunterstützung für den Planer wäre es jetzt hilfreich, wenn diese Festlegung auf die pro Tag zu nutzende Menge an Ressourcen und die sich daraus ergebende Dauer einer Aktivität nicht mehr im Vorfeld getroffen werden müsste, sondern Teil des Optimierungsproblems wird. In Abbildung 2.3 wird gezeigt, wie dadurch eine flexiblere Ressourcenplanung und somit auch ein kompakterer Plan möglich wird. Die Aktivitäten A_1 bis A_4 sollen verplant werden und benötigen für ihre Ausführung eine Ressource, die mit 8 Einheiten pro Zeitperiode zur Verfügung steht. Es gibt zwei Vorrangbeziehungen, die Aktivitäten A_3 und A_4 können jeweils erst begonnen werden, wenn Aktivität A_2 abgeschlossen wurde. Ziel der Planung ist es, die Projektdauer zu minimieren. In Teil (a) der Abbildung ist ein mögliches Ergebnis einer Planung zu sehen, der die Annahme der konstanten Ressourcennutzung zu Grunde liegt. Durch einen vorher festgelegten Ressourcenbedarf von 5 Einheiten/Zeitperiode für A_3 sowie 4 Einheiten/Zeitperiode für A_4 ist es nicht möglich, diese beiden Aktivitäten gleichzeitig einzuplanen. Es ist also egal, ob nun zuerst A_3 und dann A_4 oder umgekehrt eingeplant wird (beides wäre aufgrund der Vorrangbeziehungen möglich), das Projekt hätte in jedem Fall eine Laufzeit von 14 Zeitperioden.

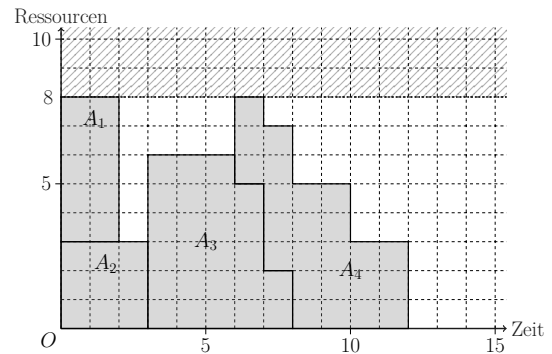
Im rechten Teil (b) dagegen wird davon ausgegangen, dass die Ressourcenverteilung Teil des Optimierungsproblems wird und der Planer nur die Rahmenbedingungen für die Verteilung vorher festlegt. Als Rahmenbedingungen werden in diesem Fall angenommen, dass A_3 pro Zeitperiode ihrer Ausführung mindestens 2 und höchstens 6 Ressourceneinheiten benötigt und ihre Ausführung abgeschlossen ist, sobald der Gesamtbedarf von 20 Ressourceneinheiten erfüllt wurde. Analog dazu wird für A_4 ein Gesamtbedarf von 24 Einheiten mit einem Minimum von 3 und einem Maximum von 5 pro Zeitperiode festgelegt. Die Ressourcenverteilung wird nun von der Optimierung übernommen und durch die gewonnenen Freiheitsgrade der flexiblen Dauer und dem flexiblen Ressourceneinsatz werden einerseits die Ressourcen besser ausgenutzt und andererseits wird ein kürzerer Plan mit einer Projektlaufzeit von nur noch 12 Zeitperioden möglich. Aus praktischer Sicht geben diese Minima und Maxima dem Planer die Möglichkeit, das Ergebnis auf sinnvolle Ressourcenverteilungen zu beschränken - um auf das Beispiel der Programmieraufgabe zurückzukommen würde dort z.B. eine Dauer von 48 Tagen mit je einer halben Stunde/Tag wahrscheinlich als nicht sinnvoll betrachtet.

Das Konzept einer solchen flexiblen Ressourcenplanung ist noch recht neu und bisher nur wenig untersucht worden (vgl. Kapitel 3.4), in breit eingesetzten Planungswerkzeugen steht es noch gar nicht zur Verfügung. Die bekannten Veröffentlichungen zeigen jedoch, dass diese Flexibilität bei bestimmten Ressourcentypen von hoher praktischer

2. Einführung in die Projektablaufplanung



(a) Konstante Ressourcennutzung pro Aktivität über den Zeitverlauf



(b) Flexible Ressourcennutzung pro Aktivität über den Zeitverlauf

Abbildung 2.3. – Verschiedene Möglichkeiten der Ressourcenallokation

Relevanz ist, so stellen Kolisch u. a. (2003) eine Fallstudie für die flexible Zuteilung von Forschungszeit aus dem Bereich der Pharmaforschung vor, Fündeling (2006) verallgemeinert in seiner Dissertation die Anwendbarkeit auf Fälle, in denen mit Rohstoffen, Energie oder allgemein mit beliebig teilbaren Ressourcen umgegangen werden muss und im weiteren Verlauf dieser Arbeit wird in Abschnitt 2.3.4 ein Bauprojekt aus der Praxis vorgestellt, bei dem ebenfalls eine solche flexible Planung nötig ist. Es kann deshalb angenommen werden, dass weitere Forschung für eine breitere Anwendbarkeit von Methoden und Modellen mit dieser Ressourcenflexibilität dazu beitragen wird, mittelfristig den in Abschnitt 2.2 genannten Kritikpunkt der bisher zu starren Ressourcenmodelle abzumildern oder gar ganz auszuräumen.

2.3.4. Ein Multiprojektplanungsbeispiel aus der Praxis

Persönliche Anmerkung des Autors:

Im Laufe dieser Arbeit konnte ich als Mitarbeiter einer Unternehmensberatung Einblick in die Arbeitsweise und die Planung von Projektabteilungen großer und mittelständischer deutscher Unternehmen aus unterschiedlichen Branchen erlangen. Im Folgenden werde ich eine in diesem Rahmen untersuchte Ablaufplanung im Multiprojektumfeld vorstellen, da sie einerseits die zuvor beschriebenen Aspekte der Projektablaufplanung beinhaltet und damit deren gemeinsame Relevanz weiter belegt. Sie unterscheidet sich aber auch in Punkten wie der Anzahl der Projekte, der Projektstruktur und den betrachteten Ressourcen von dem, was in der Literatur häufig betrachtet und als Referenz angenommen wird und soll daher die Kritik bzw. den Wunsch aus Abschnitt 2.2 nach einer breiteren Anwendbarkeit und höheren Flexibilität von Planungsmethoden weiter unterstreichen. In Kapitel 8 dieser Arbeit wird abschließend gezeigt, wie sich auch dieses Problem mit den in dieser Arbeit entwickelten Methoden lösen lässt.

Unterirdische, künstlich angelegte Hohlräume dienen in Deutschland besonders seit der Ölkrise der 70er Jahre dazu, strategische Erdöl- und Erdgasreserven langfristig zu speichern. Einem Bericht von Sedlacek (2009) zu Folge befanden sich Anfang 2009 alleine für Erdgas noch weitere 173 solcher Untergrundspeicher durch verschiedene Unternehmen in Planung oder in Bau. Durch deren Fertigstellung wird das zum damaligen Zeitpunkt und in der Form in Deutschland vorhandene Speichervolumen von etwa 10 Mrd. Kubikmeter nochmal verdoppelt. Ein im Jahr 2011 untersuchtes Unternehmen ist Erbauer und Betreiber solcher Untergrundspeicher im norddeutschen Raum, dessen Vorgehen bei der strategischen Bauplanung im Folgenden genauer vorgestellt wird.

Planungshorizont Die strategische Bauplanung hatte zum Zeitpunkt der Untersuchung je nach betrachtetem Szenario einen Planungshorizont von 10-15 Jahren. Es wurde auf Monatsebene geplant (1 Zeitperiode = 1 Monat), sodass sich ein Planungshorizont von bis zu 180 Zeitperioden ergab.

Struktur eines Projekts Der Bau von jedem dieser Untergrundspeicher wurde bzw. wird aufgrund der individuellen geologischen und organisatorischen Besonderheiten als einzelnes Projekt betrachtet und dementsprechend geplant und durchgeführt.

Zu Anfang eines solchen Baus erfolgt eine rein organisatorische Phase, in der der weitere Bau des Speichers detaillierter geplant wird und das Land gekauft wird, unter dem später der Speicher entstehen soll. Ebenso werden in dieser Phase geologische Gutachten zur Machbarkeit erstellt. Anschließend wird überirdisch der

Bauplatz eingerichtet, von dem insgesamt bis zu sieben solcher Unterspeicher errichtet werden können. Von diesem Bauplatz aus wird dann mit einem speziellen Bohrer zwischen 1000 und 2000 Meter in die Tiefe gebohrt, bis die dort vorhandene Salzschrift erreicht wurde. Anschließend wird dieses Bohrloch durch doppelwandige Rohre ausgekleidet und gegenüber den umgebenden Erdschichten abgedichtet. Darauf folgt der Prozess der Ausspülung mit Wasser. Je nach geplanter Baugeschwindigkeit wird jetzt über einen Zeitraum von etwa 1-3 Jahren Wasser durch das Rohr in die Salzschrift und wieder zurück durch das Rohr an die Oberfläche gepumpt, das Wasser löst dabei das vorhandene Salz, sodass nach und nach ein immer größerer Hohlraum entsteht. Hat dieser zu diesem Zeitpunkt noch mit dem restlichen Wasser gefüllte Hohlraum im Salz seine Zielgröße erreicht, so werden die Rohre zur Ausspülung abgebaut und durch gasdichte Rohre ersetzt. Der Speicher kann jetzt an den zukünftigen Mieter übergeben werden. Dieser wird diesen nun erstmalig befüllen, dazu pumpt er mit Hilfe von Überdruck über die Rohrleitungen Erdgas hinein, wodurch gleichzeitig das noch verbliebene Wasser durch ein zweites Rohr zurück an die Oberfläche gedrückt wird. In der strategischen Planung wird dieser Ablauf durch 8 seriell hintereinander angeordnete Aktivitäten abgebildet, wobei zwischen einigen von denen aus Gründen der Unsicherheit schon bewusst zusätzliche Zeitpuffer eingeplant werden sollten.

Ressourcenverbrauch und Verfügbarkeit In dieser Bauplanung ist das Wasser, was zur Ausspülung des Hohlraums genutzt wird, die vorrangig beschränkende Ressource. Dieses Wasser wird aus einem angrenzenden Meer entnommen und nachdem es bei der Ausspülung mit Salz angereichert wurde, wieder zurück ins Meer geleitet. Hauptsächlich aus Umweltschutzauflagen aber auch aufgrund nur begrenzter Pumpenkapazitäten steht pro Monat nur eine begrenzte Menge Wasser zur Verfügung. Für die Ausspülung des gesamten Hohlraums eines solchen Speichers ist eine bestimmte Menge Wasser nötig, die aufgrund eines aus den Erfahrungen der Vergangenheit heraus bekannten Umrechnungsfaktors vorher bekannt ist. Diese Ausspülung kann in unterschiedlichen Geschwindigkeiten erfolgen, die auch von Monat zu Monat variieren dürfen, so lange eine aus technischen Gründen vorgegebene Mindestgeschwindigkeit nicht unter- und eine gegebene Höchstgeschwindigkeit nicht überschritten wird (vgl. flexible Ressourcennutzung in Abschnitt 2.3.3). Diese Mindestgeschwindigkeit liegt in etwa bei $\frac{1}{6}$ der Höchstgeschwindigkeit, wodurch sich auch die hohe Variabilität der möglichen Dauer der Projektplanaktivität „Ausspülung“ ergibt (in der Praxis wurden die oben erwähnten 1-3 Jahre bzw. 12-36 Monate als gewünschte Dauern angenommen).

Wasser als Ressource wird weiterhin für die Aktivität der ersten Gasbefüllung benötigt. Hier muss zwar kein weiteres frisches Wasser aus dem Meer entnommen werden, aber die durch die Ausspülung noch im Hohlraum verbliebene Menge

wird jetzt zurück an die Erdoberfläche gedrückt und dann auch zurück in das Meer geleitet, weswegen sie wegen der Umweltauflagen auch mit bilanziert werden muss. Auch hier kann pro Monat flexibel entschieden werden, wie viel Wasser aus dem Hohlraum zurück ins Meer gepumpt wird, die Dauer dieser Aktivität ist mit 4-7 Monaten jedoch deutlich kürzer.

Alle weiteren Aktivitäten eines solchen Bauprojekts sind konstant in ihrer Länge und haben nur einige wenige, konstante Ressourcenbedarfe. So ist die Menge der gleichzeitig möglichen Bohrungen begrenzt, ebenso kann pro Bauplatz immer nur ein Speicher für die erste Befüllung vorbereitet werden. Die Gesamtlaufzeit eines Projekts ist damit maßgeblich abhängig von der Dauer der Ausspülung des Hohlraums und liegt im Bereich von 3-5 Jahren bzw. 36-60 Monaten.

Multiprojektplanung Zum Zeitpunkt der Untersuchung im Oktober 2011 waren im Rahmen dieser Planung noch etwa 80 solcher Untergrundspeicher als einzelne Projekte in Planung oder in Bau. Durch die gemeinsam genutzten Ressourcen müssen alle diese Projekte in einem gemeinsamen Multiprojektplan geplant werden. Bei durchschnittlich 8 Aktivitäten pro Projekt ergibt sich eine Plangröße von $8 * 80 = 640$ Aktivitäten, wobei es für die jeweils letzte Aktivität eines Projekts (die Übergabe an den Mieter und damit die erste Gasbefüllung), d.h. für bis zu 80 Aktivitäten, einen festen Starttermin geben kann.

Ziele der Planung Durch die serielle Abarbeitung der Aktivitäten innerhalb eines einzelnen Bauprojekts ergeben sich dort alleine zunächst gar keine Ressourcenbeschränkungen, diese kommen erst durch die parallele Durchführung mehrerer solcher Projekte. Besonders das nur begrenzt verfügbare Wasser führt dazu, dass abhängig von den jeweils gewählten Ausspülgeschwindigkeiten nur eine gewisse Menge dieser Speicher parallel ausgespült werden kann.

Übergeordnetes Ziel der Gesamtplanung ist es jetzt, Termine und im Fall der Ausspülung und der ersten Gasbefüllung auch die jeweilige Wassermenge pro Monat und damit die Dauer für die einzelnen Aktivitäten der Projekte festzulegen. Das muss unter den Bedingungen erfolgen, dass alle Ressourcenverfügbarkeiten eingehalten werden und insbesondere alle der zuvor angesprochenen Übergabetermine an die Mieter eingehalten werden. Als untergeordnetes Ziel der Planung sollte dann noch, wenn möglich, hinter zuvor ausgewählte Aktivitäten Zeitpuffer eingeplant werden, damit so Unsicherheiten bei der Ressourcenverfügbarkeit oder des Bedarfs besser abgefangen werden können. Weiterhin sollte aus technischen Gründen die festgelegte Menge Wasser zur Ausspülung zwischen einzelnen Monaten nicht zu stark schwanken und zuletzt sollten alle Aktivitäten eines Bauprojekts möglichst nah beieinander liegen.

Iterative Planung Die hier vorgestellte strategische Planung wird jeden Monat mit dem Ist-Stand verglichen und aktualisiert. Dazu nimmt sich das Planungsteam

mehrere Tage pro Monat Zeit, in denen der vorherige Plan aktualisiert wird und der Planungshorizont um einen Monat weiter geschoben werden wird. Im Rahmen einer solchen Neuplanung werden viele verschiedene Szenarien durchgesprochen. In solchen Szenarien geht es darum, dass z.B. geprüft wird, ob bestimmte Aktivitäten auf bestimmte Termine fixiert werden können, ohne dass sich der Gesamtplan zu stark ändert. Oder es soll geprüft werden, wann es möglich wäre, ein weiteres Bauprojekt für einen neuen Untergrundspeicher in den Plan mit aufzunehmen und dem zukünftigen Mieter hierfür im Anschluss einen Fertigstellungstermin zu versprechen. Um solche Szenarien zu erstellen und bewerten zu können, ist umfangreiches Expertenwissen der Mitglieder der Projektteams notwendig, dieses Wissen ließe sich im Vorfeld nur sehr schwer oder im Einzelfall gar nicht als formale Restriktionen und Ziele für eine automatische Planerstellung formulieren. Es muss also möglich sein, innerhalb kurzer Zeit auf Basis der zur Verfügung stehenden Informationen einen neuen Plan zu erstellen, sodass das Management hier in absehbarer Zeit in mehreren Iterationen Szenarien erstellen, bewerten und modifizieren kann, um anschließend einen neuen Plan zu bestimmen, der dann ab dem nächsten Monat gilt.

Das hier vorgestellte Beispiel für Multiprojektplanung beinhaltet den in Abschnitt 2.3.3 vorgestellten Aspekt der flexiblen Ressourcenbedarfe sowie einige der aus Abschnitt 2.3.2 genannten Planungsziele. Im Gegensatz zu den in Abschnitt 2.3.1 gängigen Größen von Projektablaufplänen ist es mit bis zu 80 Projekten und insgesamt bis zu 640 Aktivitäten enorm groß, dafür hat jedes einzelne Projekt nur eine sehr einfache Aktivitätenstruktur. Es gibt auf der einen Seite verschiedene Planungsziele zu berücksichtigen, auf der anderen Seite ist es aber aufgrund der durch zeitliche und andere qualitative Ressourcen herbeigeführte Nebenbedingungen schwierig, überhaupt eine gültige Lösung zu finden.

Zum damaligen Zeitpunkt der Untersuchung wurde zunächst versucht, dieses Planungsproblem mit Hilfe von Mixed Integer Programming und dem Branch&Bound-Algorithmus zu lösen. Es zeigte sich schnell, dass dies aufgrund der enormen Größe und der gleichzeitig geforderten kurzen Lösungszeit nicht möglich war. Zudem war es auch gar nicht nötig, immer zwingend die optimale Lösung hinsichtlich der Zielfunktionen zu finden. Eine gültige und wenn möglich gute Lösung reichte, da diese im Anschluss sowieso noch durch weitere Fachexperten bewertet und ggf. verändert wurde. Es wurde daraufhin auch aus zeitlichen Gründen eine Greedy-Heuristik entwickelt, welche die oberen Anforderungen im Wesentlichen erfüllt und in den meisten Fällen in der Lage war, solche gültigen Lösungen zu finden. Diese Heuristik hatte allerdings eine Reihe von Nachteilen, die eine allgemeine Anwendbarkeit auf andere Projektplanungsprobleme verhindern:

1. Die Heuristik war spezialisiert auf die eben beschriebene Art von Multiprojektplänen, d.h. ein Projekt musste genau die festgelegte Anzahl von Aktivitäten

in serieller Reihenfolge haben und diese Aktivitäten durften auch nur wie eben beschrieben die Ressourcen benutzen.

2. Der Ressourcenplanungsalgorithmus war nicht besonders effektiv. Es konnten leicht Fälle konstruiert werden, in denen gar keine Lösung gefunden wurde, obwohl schon bei genauerer Betrachtung der Eingabedaten klar wurde, dass es offensichtlich eine gültige Lösung geben muss. In solchen Fällen wurden die Eingabedaten dann etwas von den Planungsexperten modifiziert, um die Optimierung in die richtige Richtung zu lenken.
3. Die Heuristik war eine reine Konstruktionsheuristik, die im Erfolgsfall einen gültigen Plan erzeugt hat. Verschiedene Bestandteile haben dafür gesorgt, dass die zuvor beschriebenen Planungsziele dabei möglichst gut berücksichtigt wurden. Eine weitere Verbesserung des Plans konnte nur durch Anpassung der Eingabedaten und erneuter Berechnung erreicht werden.

Für diese Arbeit kann das untersuchte Planungsproblem einerseits nochmal als Beispiel für die schon zuvor aus der Literatur abgeleiteten Anforderungen für praxisnahe Projektablaufplanung gesehen werden. Andererseits zeigt sich aber auch, dass aufgrund nicht vorhandener allgemeiner Lösungsverfahren die Entwicklung eines neuen, proprietären Verfahrens nötig war, welches jedoch aufgrund des begrenzten Zeitrahmens nur dieses Planungsproblem im Rahmen der Anforderungen lösen konnte und damit keinen allgemeinen Beitrag zur Wissenschaft lieferte. Deshalb sollen im weiteren Verlauf dieser Arbeit nun mathematische Optimierungsmethoden entwickelt und untersucht werden, mit deren Hilfe die Projektablaufplanung auch unter solchen praktischen Aspekten, aber unabhängig von einer konkreten Problemstellung wie der hier vorgestellten, durchgeführt werden kann.

3. Stand der Technik

In diesem Kapitel wird ein Überblick darüber gegeben, welche mathematischen Modelle und Lösungsverfahren es bereits zur Unterstützung der ressourcenbeschränkten Projektablaufplanung gibt. Dafür wird zunächst auf die Modellierung des zu Grunde liegenden Basismodells eingegangen, gefolgt von bekannten exakten und heuristischen Lösungsverfahren. Anschließend wird gezeigt, wie und mit welchem Ergebnis einzelne der in Kapitel 2.3 herausgearbeiteten Aspekte bereits erforscht wurden und wie diese Arbeit darauf aufbauen kann.

3.1. Das Resource Constrained Project Scheduling Problem

In diesem Abschnitt werden allgemeine Grundlagen zur Modellierung von Problemen der Projektablaufplanung erläutert. Dazu wird zunächst ein gängiges Basismodell aufgestellt und erklärt. Es folgt eine Diskussion über weitere mögliche Modellvarianten und deren Klassifikation in der wissenschaftlichen Literatur. Abschließend wird in Hinblick auf den in Kapitel 2.3.1 herausgearbeiteten Aspekt der Multiprojektplanung genauer erläutert, wie dieser bei der Modellierung berücksichtigt wird.

3.1.1. Ein Grundmodell zur Projektablaufplanung

Die Erforschung von mathematischen Modellen und Methoden zur Unterstützung der Projektterminplanung (vgl. z.B. Kelley und Walker (1959)) und später auch der integrierten Projekttermin- und Ressourcenplanung (vgl. z.B. Lambourn (1963)) geht bis in die 1950er Jahre zurück. Getrieben von den jeweiligen, oft sehr unterschiedlichen praktischen Anforderungen auf der einen Seite und der zur effizienten Lösung nötigen Abstraktion auf der anderen Seite wurden so über die Jahrzehnte viele verschiedene Modelle, Modellvarianten und auch Bezeichnungen entwickelt, wenn es im Allgemeinen um eine Form der Optimierung der Projektablaufplanung ging. In der neueren Zeit hat sich als übergeordnete Bezeichnung für dieses Planungsproblem der Begriff *Resource Constrained Project Scheduling Problem* (RCPSP) durchgesetzt. In Anlehnung an Demeulemeester und Herroelen (2002, S. 203ff) wird im Folgenden eine gängige Grundform des RCPSP beschrieben:

Gegeben sei der fertige Projektstrukturplan eines Projekts (vgl. Abbildung 2.1) sowie die dazugehörigen Informationen bezüglich Dauer und Ressourcenbedarf jeder Aktivität. Es wird für diese Grundvariante angenommen, dass es nur eine Ressource gibt, die mit einer bestimmten Menge in jeder Zeitperiode zur Verfügung steht. Zur Anwendung der Optimierungsmethoden muss der Projektstrukturplan zunächst

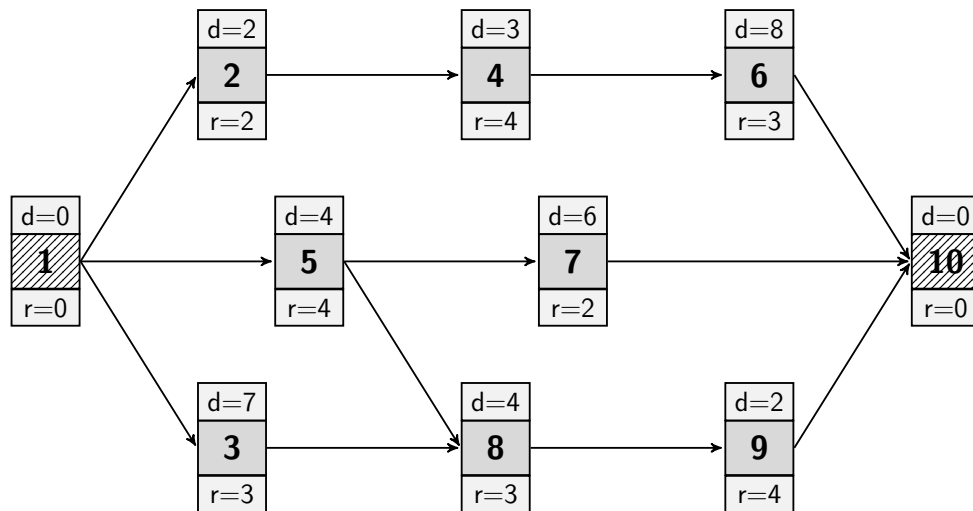


Abbildung 3.1. – Beispiel für das Aktivitätennetzwerk eines Projekts, Quelle: in Anlehnung an Demeulemeester und Herroelen (2002, S. 207)

in ein Aktivitätennetzwerk, wie in Abbildung 3.1 dargestellt, überführt werden. Jeder Knoten in diesem Netz repräsentiert eine Aktivität, jede gerichtete Kante eine Ende-Start-Vorrangbeziehung (vgl. Abschnitt 2.1.1) zwischen den Aktivitäten, die sie verbindet. Jeder Aktivität ist außerdem eine feste Dauer d in anonymen Zeitperioden und ein fester Ressourcenverbrauch r pro Zeitperiode der Ausführung der Aktivität zugeordnet.

Die meisten Optimierungsmethoden haben außerdem die Anforderung, dass das Aktivitätennetzwerk genau eine ausgezeichnete Startaktivität ohne Eingangskanten und eine ausgezeichnete Endaktivität ohne Ausgangskanten hat. Da es jedoch aus Sicht eines Projektstrukturplans durchaus mehrere Aktivitäten geben kann, mit denen ein Projekt beginnen oder enden kann, werden für die Optimierung in das Aktivitätennetzwerk zwei zusätzliche Blindaktivitäten eingefügt. Hier im Beispiel Blindaktivität 1 mit ausgehenden Ende-Start-Beziehungen zu allen echten möglichen Startaktivitäten 2, 3, 5 des Projekts sowie Blindaktivität 10 mit eingehenden Ende-Start-Beziehungen von allen echten möglichen Endaktivitäten 6, 7, 9. Solche Blindaktivitäten haben immer eine Dauer $d = 0$ und einen Ressourcenbedarf $r = 0$, sodass sie also weder Zeit noch Ressourcen belegen. So ist sichergestellt, dass das Aktivitätennetzwerk unabhängig von der späteren tatsächlichen Ausführungsreihenfolge der Aktivitäten immer mit der Blindaktivität 1 beginnt und immer mit der Blindaktivität 10 endet.

Zur Optimierung eines solchen Aktivitätennetzwerks, d.h. zur Bestimmung der tatsächlichen Start- und Endzeiten der Aktivitäten auf Basis der im Netzwerk enthaltenen Restriktionen und einer angenommenen Ressourcenverfügbarkeit, definieren Demeulemeester und Herroelen (2002, S. 208) weiterhin folgendes konzeptionelles Optimierungsmodell:

$$\min f_n \tag{3.1}$$

$$\text{s.t. } f_i \leq f_j - d_j, \quad \forall (i, j) \in A \tag{3.2}$$

$$f_1 = 0 \tag{3.3}$$

$$\sum_{i \in S_t} r_{ik} \leq a_k, \quad \forall k \in \{1, \dots, m\}, t \in \{1, \dots, f_n\} \tag{3.4}$$

Dabei bezeichnen die einzigen Entscheidungsvariablen $f_i \in \mathbb{N}_0^+$ den Fertigstellungszeitpunkt einer Aktivität i . Durch die immer als konstant angenommene Dauer d_i kann so direkt auch auf den Startzeitpunkt geschlossen werden. Die Zielfunktion (3.1) gibt an, dass der Fertigstellungszeitpunkt der letzten Aktivität im Netzwerk, d.h. der von der Blindaktivität am Ende, minimiert werden soll. Da diese, wie eben beschrieben, mit allen echten möglichen Endaktivitäten des Projekts verbunden ist und damit erst beginnen und enden kann, sobald alle diese echten Endaktivitäten abgeschlossen wurden, wird mit der Minimierung des Fertigstellungszeitpunkts der Blindaktivität auch eine Minimierung der Projektlaufzeit insgesamt erreicht - unabhängig davon, welche echte Aktivität tatsächlich zum Schluss ausgeführt wird.

Die Restriktion (3.2) sorgt für die Einhaltung aller Vorrangbeziehungen im Aktivitätennetzwerk, dargestellt durch die Adjazenzmatrix A . Die Blindaktivität am Anfang des Netzwerks wird durch die Gleichung (3.3) auf den Zeitpunkt 0 fixiert. Zuletzt sorgt die Restriktion (3.4) für die Einhaltung der verfügbaren Ressourcen pro Zeitperiode. Dabei wird hier allgemeiner davon ausgegangen, dass es nicht wie im vorherigen Beispiel nur eine, sondern m verschiedene Ressourcen geben kann. Dabei bezeichnet r_{ik} den Bedarf der Aktivität i an Ressource k pro Zeitperiode und a_k die Verfügbarkeit der Ressource k in jeder Zeitperiode. Die als Invariante definierte Menge S_t enthält alle Aktivitäten, die in Periode t ausgeführt werden. Die hier getroffene Annahme, dass in jeder Zeitperiode die gleiche Menge an Ressourcen zur Verfügung steht, kann durch die Auswechslung von a_k durch a_{kt} dahingehend erweitert werden, dass für jede Zeitperiode eine individuelle Ressourcenverfügbarkeit angegeben werden kann.

In diesem Modell wird hinsichtlich der Ressourcennutzung und der Dauer einer Aktivität davon ausgegangen, dass eine einmal begonnene Aktivität nicht unterbrochen werden kann. Vom Startzeitpunkt an werden daher in den folgenden, der Aktivitätendauer entsprechenden Anzahl Zeitperioden, jeweils die vordefinierten Mengen an Ressourcen zur Ausführung der Aktivität benötigt. Ein Zeitpunkt wird dabei als Grenze zwischen zwei Zeitperioden angesehen, wobei er von der Bezeichnung her der nachfolgenden Zeitperiode zugeordnet wird. Eine Aktivität kann in diesem Modell immer nur an einem solchen Grenzpunkt starten und enden und belegt dadurch immer eine ganzzahlige Anzahl an Zeitperioden. Der daraus resultierende Zusammenhang zwischen den Zeitpunkten für den Start und die Fertigstellung einer Aktivität sowie den Zeitperioden der Ressourcennutzung wird in Abbildung 3.2 nochmal verdeutlicht.

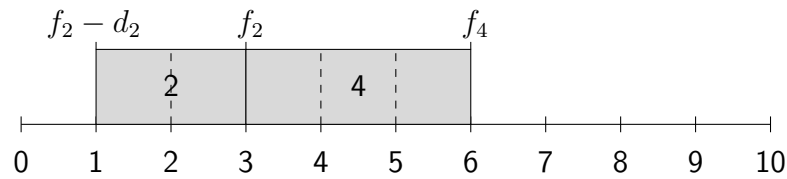


Abbildung 3.2. – Visualisierung der Start- und Endzeitpunkte und der Ausführungsperioden von Aktivitäten

Aktivität 2 aus dem vorherigen Beispiel von Abbildung 3.1 hat eine Dauer $d_2 = 2$ Zeitperioden. Aus einem beispielhaft angenommenen Fertigstellungszeitpunkt $f_2 = 3$ ergibt sich ein Startzeitpunkt 1. Die Aktivität verbraucht somit in den Zeitperioden 1 und 2 Ressourcen. Die durch eine Vorrangbeziehung verbundene, nachfolgende Aktivität 4 kann dann zum Fertigstellungszeitpunkt 3 ihrer Vorgängeraktivität starten (vgl. Restriktion (3.2)) und verbraucht somit in den Zeitperioden 3, 4 und 5 Ressourcen (vgl. Menge S_t aus Restriktion (3.4)).

3.1.2. Vergleich und Klassifizierung von Modellvarianten

Im vorherigen Abschnitt wurden bei der Modellierung des Planungsproblems einige restriktive Annahmen hinsichtlich verschiedener Aspekte der Planung getroffen. So hatte eine Aktivität immer eine feste, ganzzahlige Dauer, einen konstanten, jedoch nicht zwingend ganzzahligen Ressourcenbedarf über die Dauer, es wurden nur Ende-Start-Vorrangbeziehungen betrachtet und als Optimierungsziel wurde die Minimierung der Projektdauer angenommen. Schon die allgemeine Beschreibung der Projektablaufplanung in Kapitel 2.1 sowie die tiefergehende Analyse verschiedener praxisrelevanter Aspekte in 2.3 lassen den Schluss zu, dass solche restriktiven Annahmen zur Lösung vieler praktischer Planungsprobleme nicht immer hinnehmbar sind. Da das Treffen gewisser Annahmen besonders für die Auswahl oder die Entwicklung eines geeigneten Lösungsverfahrens für so ein Modell jedoch immer nötig ist, haben Forscher in den vergangenen Jahrzehnten, getrieben von den jeweiligen speziellen Anforderungen praktischer Planungsprobleme, unzählige Modellvarianten des RCPSP sowie darauf angepasste Lösungsverfahren entwickelt. Die Konsequenz daraus war, dass es sehr schwierig wurde, verschiedene Lösungsverfahren und deren zu Grunde liegende Modelle miteinander zu vergleichen bzw. eine Aussage darüber treffen zu können, ob eine für eine Modellvariante A entwickelte Lösungsmethode auch grundsätzlich für eine andere Variante B einsetzbar sein müsste.

Um diese Vergleichbarkeit zu ermöglichen, haben Brucker u. a. (1999) die aus dem Bereich der Maschinenbelegungsplanung bekannte $\alpha|\beta|\gamma$ -Notation erweitert und damit zur Klassifizierung von Projektplanungsproblemen vorgeschlagen, die in der darauf folgenden Zeit von verschiedenen Forschern zur Beschreibung ihrer Planungsproble-

me verwendet wurde. Bei dieser Notation wird das jeweilige Projektplanungsproblem hinsichtlich der folgenden drei grundlegenden Eigenschaften beschrieben:

- α beschreibt das Grundproblem und die betrachtete Ressourcenumgebung. Zur Abgrenzung der Maschinenbelegungsplanung wird PS für Probleme der Projektablaufplanung verwendet. Allgemein wird PSm, σ, ρ vorgeschlagen, wobei m die Anzahl der betrachteten erneuerbaren Ressourcen bezeichnet, σ die Anzahl der pro Periode verfügbaren Einheiten pro Ressource und ρ den maximalen Ressourcenbedarf einer Aktivität pro Periode. Ist einer dieser Aspekte nicht fest an das Modell bzw. das Lösungsverfahren gebunden, sondern kann über die Eingabeparameter einer Modellinstanz beliebig bestimmt werden, so kann das dazugehörige Symbol durch den Platzhalter \cdot ersetzt werden oder, wenn es am Ende der Notationskette steht, einfach weggelassen werden. Gibt es pro Aktivität mehrere mögliche Ausführungsmodi, die neben einer jeweils unterschiedlichen Dauer auch unterschiedliche Ressourcenbedarfe auf der einen Seite und nicht erneuerbare Ressourcen auf der anderen Seite zur Folge haben, so wird das Problem mit $MPSm, \sigma, \rho, \mu, \tau, \omega$ bezeichnet, wobei μ die Anzahl an nicht erneuerbaren Ressourcen bezeichnet, τ die verfügbare Menge pro nicht erneuerbarer Ressource und ω den maximalen Bedarf einer Aktivität an nicht erneuerbaren Ressourcen.
- β beschreibt die Charakteristiken der betrachteten Aktivitäten. Hier gibt es im Gegensatz zu α keine vordefinierten Platzhalter, es werden stattdessen verschiedene Abkürzungen angegeben. p_j wird für die Beschreibung einer speziellen Dauer der Aktivitäten verwendet, so haben bei $p_j = 1$ alle Aktivitäten eine Dauer von 1, $p_j = sto$ kennzeichnet dagegen eine stochastische Dauer. Mit d wird angegeben, dass es Fertigstellungstermine für Projekte gibt, $prec$ bezeichnet das Vorhandensein von Vorrangbeziehungen zwischen Aktivitäten und $temp$ drückt aus, dass allgemein minimale und maximale Zeitabstände zwischen den Aktivitäten definiert sein können.
- γ beschreibt die betrachtete Zielfunktion. Diese wird entweder direkt als Formel angegeben oder bei oft verwendeten Zielfunktionen durch etablierte Abkürzungen wie C_{\max} für die Minimierung der Projektdurchlaufzeit (= Minimierung der maximalen Fertigstellungszeit über alle Aktivitäten im Projekt) oder L_{\max} für die Minimierung der maximalen Verspätung über alle Aktivitäten mit einem Fertigstellungstermin.

Mit Hilfe dieser Notation kann das Beispiel aus Abbildung 3.1 als $\alpha|\beta|\gamma = PS1, \cdot, 4|prec|\cdot$ beschrieben werden, da aus dem Beispiel keine direkte Zielfunktion ableitbar ist. Das allgemeinere Optimierungsmodell (3.1)-(3.4) kann als $PS|prec|C_{\max}$ beschrieben werden, da es hinsichtlich Anzahl und Menge der Ressourcen keine Beschränkung aufweist. Daraus lässt sich schlussfolgern, dass das Beispielp Problem mit dem gezeigten Optimierungsmodell unter dem Ziel der Minimierung der Projektdurchlaufzeit gelöst werden kann. Dennoch ist diese Notation durch die Erweiterbarkeit

der möglichen Ausprägungen der drei Kategorien und auch durch die oft bewusst nicht exakt definierten vorgegebenen Ausprägungen nicht als abgeschlossener Formalismus zu verstehen, mit dessen Hilfe sich jedes erdenkliche Problem aus der Projektablaufplanung und die dazu passenden Lösungsalgorithmen eindeutig beschreiben und zuordnen lassen. In umfangreichen Literaturrecherchen geben jedoch Brucker u. a. (1999) und z.B. Hartmann und Briskorn (2010) einen Überblick darüber, welche Ausprägungen sich für die drei Kategorien aufgrund vorheriger Veröffentlichungen identifizieren lassen, welche speziellen Probleme im jeweiligen Fall gelöst wurden und welche allgemeinen Lösungsverfahren für bestimmte Grundprobleme wie $PS|prec|C_{\max}$ bereits zur Verfügung stehen. Dadurch lassen sich die einzelnen herausgearbeiteten Aspekte einer neuen, praktischen Problemstellung (vgl. Abschnitt 2.3) zumindest ungefähr in die verschiedenen Ausprägungen der Problemklassen einordnen, wodurch erste verwandte Ansätze in der Literatur gefunden und möglicherweise in Frage kommende Lösungsverfahren identifiziert werden können.

Neben dem inhaltlichen Vergleich von Modellen und deren Lösungsmethoden kann man solche Methoden, sofern sie zur Lösung der gleichen Variante des Projektplanungsproblems geeignet sind, auch noch hinsichtlich ihrer Geschwindigkeit und der Qualität der gefundenen Lösung vergleichen und bewerten. Mit Hilfe solcher Vergleiche kann z.B. objektiv die Verbesserung vorhandener Methoden überprüft werden, die Effizienz neuer Methoden gegenüber alten bestimmt werden oder die Ergebnisse vorheriger Forschungen verifiziert werden. Um vergleichbare Optimierungsergebnisse zu erhalten ist es jedoch nötig, dass die verschiedenen Optimierungen auf den gleichen Testinstanzen ausgeführt wurden. Um dies zu ermöglichen, erarbeiteten Kolisch und Sprecher (1997) eine große Menge verschiedener generischer Probleminstanzen verschiedener Größe (30, 60, 90 oder 120 Aktivitäten pro Instanz) für das RCPSP und stellten diese unter der Bezeichnung *PSPLIB* öffentlich zur Verfügung. In der Literaturübersicht von Hartmann und Briskorn (2010) werden die Instanzen der *PSPLIB* als Testgrundlage für eine große Anzahl von Veröffentlichungen genannt.

3.1.3. Modellierung von Multiprojektproblemen

Sollen im RCPSP weitere Aspekte berücksichtigt werden, so ist dies aus Sicht der Modellierung der Eingabedaten (vgl. Abschnitt 3.1.1) oft in der Form möglich, dass die vorhandenen Entitäten eine weitere Eigenschaft erhalten. Soll z.B. für die Aktivitäten ein frühester Startzeitpunkt r und ein gewünschter Fertigstellungstermin t modelliert werden, kann dies über den Index für jede Aktivität erfolgen ($r_i, t_i \forall i \in \{1, \dots, n\}$).

Sollen jedoch für die Multiprojektablaufplanung (*Resource Constrained Multi Project Scheduling Problem*, RCMPSP) mehrere Projekte gleichzeitig geplant werden (vgl. Kapitel 2.3.1), stellt sich das Problem, an welche Entität man jetzt projektspezifische Eigenschaften hängt, wie z.B. einen frühestmöglichen Projektstarttermin oder ein Fertigstellungstermin. Im Einzelprojektfall entsprach das Aktivitätennetzwerk (vgl. Abbildung 3.1) dem Projekt, sodass man die umschließenden Blindaktivitäten am Anfang

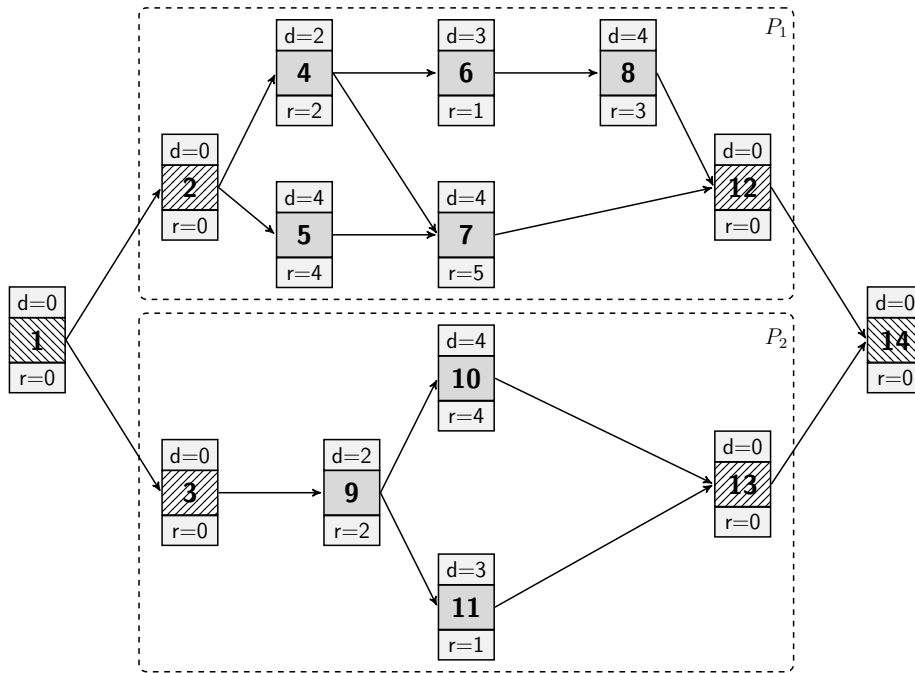


Abbildung 3.3. – Mehrere Projekte in einem Aktivitätennetzwerk

und Ende als Projektentitäten betrachten konnte. Dies ist jedoch, sobald es mehrere Projekte gibt, verständlicherweise nicht mehr möglich.

Der laut Hartmann und Briskorn (2010, S. 9) verbreitetste Ansatz, um dieses Problem zu lösen, geht implizit auf die Modellierung von Pritsker u. a. (1969) zurück und wird in Abbildung 3.3 dargestellt. Die Aktivitäten jedes einzelnen Projekts (gekennzeichnet durch die gestrichelten Umrandungen) werden weiterhin durch zwei Blindaktivitäten eingeschlossen. Weiterhin werden jetzt zwei zusätzliche Blindaktivitäten eingeführt (hier 1 und 14), die mit den jeweiligen Start- bzw. Endblindaktivitäten aller im Netzwerk vorhandenen Projekte verbunden werden. Den Blindaktivitäten der einzelnen Projekte können jetzt projektspezifische Eigenschaften, wie z.B. ein frühestmögliches Startdatum oder gewünschte Projektfertigstellungstermine, zugewiesen werden, außerdem können im Optimierungsmodell projektspezifische Kennzahlen einfach bestimmt und verwendet werden (z.B. die Projektdauer von P_1 über $f_{12} - f_2$). Die grundsätzlichen Eigenschaften dieser Modellierung, dass es genau ein Aktivitätennetzwerk mit einem ausgezeichneten Startknoten und einem ausgezeichneten Endknoten gibt, bleiben jedoch erhalten. So können alle Algorithmen für den Einzelprojektfall auch auf den auf diese Weise modellierten Multiprojektfall angewendet werden, sofern sie die integrierten Aspekte, wie z.B. Fertigstellungstermine für Aktivitäten, unterstützen.

3.2. Exakte Lösungsverfahren

Es gibt verschiedene exakte Verfahren, um das RCPSP optimal zu lösen. Eine einfache Herangehensweise ist das Aufstellen eines Mixed Integer Programming-Modells (MIP), welches anschließend mit einem MIP-Solver wie Gurobi¹ oder CPLEX² über den Branch&Bound-Algorithmus gelöst wird. Pritsker u. a. (1969) stellten für $PS|prec|C_{\max}$ folgendes Modell auf:

$$\min \sum_{t=EFT_n}^{LFT_n} t * x_{nt} \quad (3.5)$$

$$\text{s.t.} \quad \sum_{t=EFT_i}^{LFT_i} x_{it} = 1, \quad \forall i \in \{1, \dots, n\} \quad (3.6)$$

$$\sum_{t=EFT_i}^{LFT_i} t * x_{it} \leq \sum_{t=EFT_j}^{LFT_j} t * x_{jt} - d_j, \quad \forall (i, j) \in A \quad (3.7)$$

$$\sum_{i=1}^n \sum_{q=\max\{t+1, EFT_i\}}^{\min\{t+d_i, LFT_i\}} r_{ik} * x_{iq} \leq a_k, \quad \forall \begin{matrix} k \in \{1, \dots, m\} \\ t \in \{0, \dots, T-1\} \end{matrix} \quad (3.8)$$

$$x_{it} \in \{0, 1\}, \quad \forall \begin{matrix} i \in \{1, \dots, n\} \\ t \in \{EFT_i, \dots, LFT_i\} \end{matrix} \quad (3.9)$$

Zur Lösung dieses Modells wird ein fester Planungshorizont von T Zeitperioden angenommen. Auf Basis der Vorrangbeziehungen des Aktivitätennetzwerks und der jeweiligen Dauer der Aktivitäten werden zunächst ohne Berücksichtigung der Ressourcenbedarfe für jede Aktivität der frühestmögliche Start- und Fertigstellungszeitpunkt (Earliest Start Time, EST; Earliest Finish Time, EFT), sowie der spätestmögliche Start- und Fertigstellungszeitpunkt (Latest Start Time, LST; Latest Finish Time, LFT) ausgerechnet. Diese vier abgeleiteten Parameter werden hier und auch in allen weiteren Verfahren zur Bestimmung der möglichen Positionen einer Aktivität verwendet, sie können nach Demeulemeester und Herroelen (2002, S. 96-99) wie folgt bestimmt werden:

Mit einer Vorwärtsrechnung werden die frühestmöglichen Start- und Fertigstellungszeitpunkte einer Aktivität bestimmt. Dazu wird $EST_1 = 0$ gesetzt, also der frühestmögliche Startzeitpunkt der ersten Blindaktivität des Netzwerks fixiert. Der frühestmögliche Fertigstellungszeitpunkt ergibt sich durch die gegebene Dauer immer als

¹Gurobi Optimizer der Gurobi Optimization, Inc.,
<http://www.gurobi.com/>

²IBM ILOG CPLEX Optimization Studio,
<http://www-01.ibm.com/software/commerce/optimization/cplex-optimizer/>

$EFT_i = EST_i + d_i$. Anschließend wird iterativ für jede nachfolgende Aktivität j im Netzwerk $EST_j = \max \{EFT_i | (i, j) \in A\}$ gesetzt, sobald für alle Vorgänger EST_i und EFT_i berechnet wurden.

Analog wird über die Rückwärtsrechnung der spätestmögliche Start- und Fertigstellungszeitpunkt aller Aktivitäten bestimmt. Dazu wird $LFT_n = T - 1$ gesetzt, also der spätestmögliche Fertigstellungszeitpunkt der letzten Blindaktivität im Netzwerk auf die letzte Zeitperiode fixiert. Der spätestmögliche Startzeitpunkt ergibt sich dann immer als $LST_j = LFT_j - d_j$. Anschließend wird iterativ für jede Vorgängeraktivität i im Netzwerk $LFT_i = \min \{LST_j | (i, j) \in A\}$ gesetzt, sobald für alle Nachfolger LST_j und LFT_j berechnet wurden.

Im Optimierungsmodell bezeichnen die binären Entscheidungsvariablen x_{ij} für alle Aktivitäten i alle möglichen Fertigstellungszeitpunkte. Über die Restriktion (3.6) wird gesteuert, dass für jede Aktivität genau ein Fertigstellungszeitpunkt ausgewählt werden muss. Da über den Index t bekannt ist, für welchen möglichen Fertigstellungszeitpunkt ein x_{it} steht, lässt sich der tatsächlich gewählte Fertigstellungszeitpunkt einer Aktivität i über die Formel $\sum_{t=EFT_i}^{LFT_i} t * x_{it}$ bestimmen. Dies wird in der Restriktion (3.7) zur Einhaltung der Vorrangbeziehungen und in der Zielfunktion (3.5) zur Minimierung des Fertigstellungszeitpunkts der letzten Aktivität verwendet. Zuletzt wird mit der Restriktion (3.8) die Einhaltung der Ressourcenverfügbarkeit sichergestellt, hier läuft die innere Summe über genau diejenigen x_{iq} , bei deren Aktivierung es aufgrund der Dauer der Aktivität bedeuten würde, dass die Aktivität in der aktuellen Periode t Ressourcen verbraucht.

Demeulemeester und Herroelen (2002, S. 210ff) stellen einige weitere MIP-Formulierungen aus der Literatur zur Lösung bestimmter Varianten des RCPSP vor. Da die Lösung solcher MIP-Modelle mit einem generischen Branch&Bound-Algorithmus sehr lange dauern kann, haben einige Forscher in der Vergangenheit untersucht, in wie sich das RCPSP mit problemspezifisch angepassten Branch&Bound-Algorithmen lösen lässt. Brucker u. a. (1999) geben zu solchen Algorithmen eine Literaturübersicht und fassen anschließend auch die Ergebnisse numerischer Tests aus verschiedenen Veröffentlichungen zusammen. Dabei kommt heraus, dass selbst mit den besten angepassten Algorithmen nur etwa 86% der Instanzen der kleinsten Problemgröße (30 Aktivitäten/Instanz) aus der PSPLIB innerhalb von 1000 Sekunden optimal gelöst werden konnten.

Weiterhin wurde versucht, das RCPSP als Erfüllbarkeitsproblem zu formulieren und zu lösen. Während bei einem MIP-Modell mit den verschiedenen Restriktionen eine konvexe Hülle des Lösungsraums beschrieben wird, die anschließend nach ganzzahligen Lösungen abgesucht wird, werden bei einem Erfüllbarkeitsproblem eine Menge von aussagenlogischen Bedingungen über die betrachteten Variablen formuliert, die für eine gültige Lösung des Problems erfüllt sein müssen. Durch das Belegen einzelner Variablen können sich so neue Bedingungen für den noch offenen Teil des Problems ergeben, bis es schließlich entweder zum Widerspruch kommt oder eine insgesamt gültige Lösung gefunden wird. Brucker (2002) benutzt eine solche Formulierung und stellt

einen Branch&Bound-Algorithmus vor, mit dem systematisch mögliche Variablenbelegungen ermittelt und gültige Lösungen gefunden werden.

Nach den zuvor zitierten, mittlerweile auf veralteter Hardware durchgeführten Tests von Brucker u. a. (1999) stellen Koné u. a. (2013) eine Formulierung des RCPSP als Erfüllbarkeitsproblem verschiedenen neueren MIP-Formulierungen gegenüber. Auch dabei werden Testinstanzen aus verschiedenen Quellen mit Größen von bis zu 35 Aktivitäten verwendet, es wird ein Zeitlimit von 500 Sekunden gesetzt. Trotz aktueller Hardware konnten von den verwendeten 30er-Instanzen aus der PSPLIB mit der besten MIP-Formulierung nur 49% optimal gelöst werden, für 36% dieser Instanzen wurde innerhalb des Zeitlimits keine einzige ganzzahlige Lösung gefunden. Die durchschnittliche benötigte Lösungszeit betrug 179 Sekunden. Mit der Formulierung als Erfüllbarkeitsproblem wurden 68% der Instanzen in einer durchschnittlichen Zeit von 183 Sekunden optimal gelöst, dafür gab es hier mit einem durchschnittlichen Gap von 28,3% gegenüber nur 4,2% bei der besten MIP-Formulierung erheblich schlechtere Ergebnisse, wenn nicht die optimale Lösung gefunden wurde.

3.3. Heuristische Lösungsverfahren

Da sich die im letzten Abschnitt vorgestellten exakten Lösungsverfahren wegen ihrer hohen Laufzeit nur sehr bedingt zum Lösen von größeren Probleminstanzen eignen, haben in der Vergangenheit viele Forscher versucht, heuristische Lösungsverfahren zu entwickeln und zu verbessern. In diesem Abschnitt soll ein Überblick darüber gegeben werden, wie diese Verfahren funktionieren und welche sich besonders gut zur Lösung des RCPSP eignen. Da die meisten heuristischen Verfahren konstruktiv nur für eine bestimmte Problemklasse geeignet sind, wird in diesem Abschnitt immer $PS|prec|C_{\max}$ als das zu lösende Problem angenommen. Eine Betrachtung bezüglich weitergehender Modellaspekte findet dann in den Unterkapiteln 3.4 und 3.5 statt.

3.3.1. Aktivitätenlisten und Einplanungsschemata

Aus den Vorrangbeziehungen zwischen den Aktivitäten ergibt sich, dass eine Aktivität frühestens dann beginnen kann, wenn alle ihre Vorgängeraktivitäten abgeschlossen wurden. Die im vorherigen Abschnitt 3.2 beschriebene Vorwärts- und Rückwärtsrechnung machte sich diese Eigenschaft zu nutze, um die frühestmögliche Startzeit einer Aktivität zu berechnen. Bei dieser Berechnung wurden jedoch noch keinerlei Ressourcen berücksichtigt. Hat die in Abbildung 3.4 (a) gezeigte Aktivität 1 die drei Nachfolger 2, 3 und 5, so wird mit der Vorwärtsrechnung die frühestmögliche Startzeit von allen drei Nachfolgern auf den frühestmögliche Fertigstellungszeitpunkt von 1 gesetzt. Bei dieser Berechnung wurde mit den Vorrangbeziehungen jedoch nur die erste der beiden Restriktionen des RCPSP berücksichtigt. Wie in Abbildung 3.4 (b) zu sehen ist, wäre es aufgrund der Ressourcenverfügbarkeit nicht möglich, alle drei Aktivitäten zum Zeitpunkt 0 starten zu lassen. Wenn also nun entschieden wurde, dass die Aktivitäten

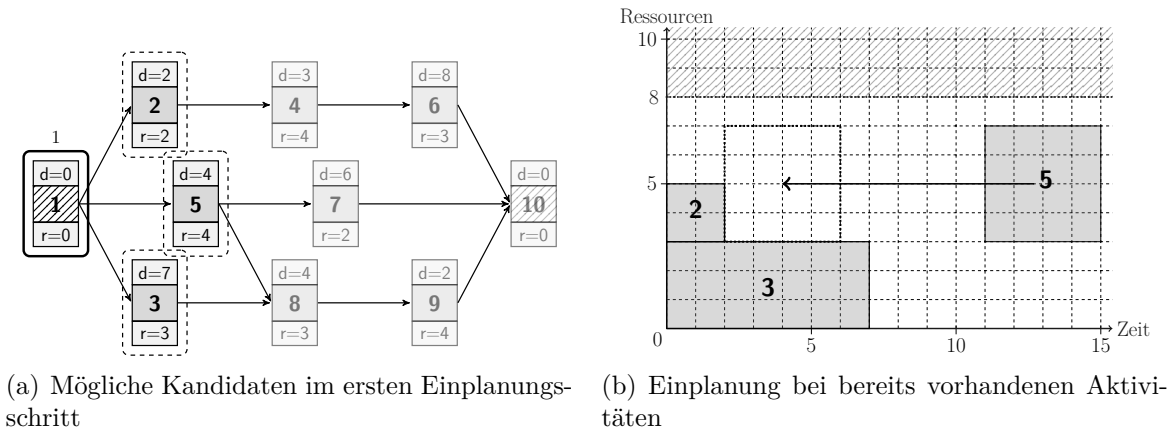


Abbildung 3.4. – Einfaches Einplanen von Aktivitäten

2 und 3 zuerst eingeplant werden und damit beide zum Zeitpunkt 0 starten können, könnte Aktivität 5 aufgrund der Ressourcenbeschränkung frühestens zum Zeitpunkt 2 starten. Aus diesem einfachen Beispiel heraus lassen sich für die Planung mit Vorrangbeziehungen und Ressourcen zwei Schlussfolgerungen ableiten:

1. Eine Aktivität kann frühestens dann beginnen, wenn alle ihre Vorgängeraktivitäten abgeschlossen wurden und genügend Ressourcen für die Aktivität zur Verfügung stehen.
2. Bei Aktivitäten, die aus Sicht der Vorrangbeziehungen gleichwertig sind, spielt aufgrund der beschränkten Ressourcen ggf. die Reihenfolge, in der die Aktivitäten tatsächlich eingeplant werden, eine entscheidende Rolle. In diesem Beispiel hätte man alternativ auch z.B. die Aktivitäten 3 und 5 zuerst einplanen können, sodass Aktivität 2 hätte hinten anstehen müssen. Dies hätte zu einem anderen Plan geführt.

Auf diesen zwei Überlegungen basiert die Konstruktion einer Aktivitätenliste und der anschließende Aufbau eines Plans mit dem seriellen oder dem parallelen Einplanungsschema. Aufgrund ihrer Effizienz bilden diese Aktivitätenlisten in Kombination mit einem Einplanungsschema die Grundlage für viele angepasste Heuristiken bzw. den Kern vieler Metaheuristiken für die ressourcenbeschränkte Projektablaufplanung. Für die Beschreibung hier und im Folgenden wird als Referenz auf Demeulemeester und Herroelen (2002, S. 268ff) verwiesen.

Eine **Aktivitätenliste** ist eine sortierte Liste aller Aktivitäten eines Aktivitätsnetzwerks, für deren Sortierung die folgende Einschränkung gilt:

$$\forall i, j \in \{1, \dots, n\} : p_j < p_i \rightarrow (i, j) \notin A \quad (3.10)$$

Dabei bezeichnet p_i die Position der Aktivität i in der Aktivitätenliste und A die Adjazenzmatrix des Aktivitätennetzwerks zur Repräsentation aller Vorrangbeziehungen (vgl. Abschnitt 3.1.1). Vereinfacht gesagt darf also keine Aktivität vor einer ihrer Vorgänger-Aktivitäten in die Liste einsortiert sein. Diese Bedingung gilt genau so auch für die topologische Sortierung der Knoten eines Graphen (vgl. Krumke und Nolte-meier (2009, S. 35f)). Weiterhin gilt dabei, dass eine solche topologische Sortierung immer existiert, sofern es durch die gerichteten Kanten im Graph keine Kreise gibt. Durch die beim Thema Projektablaufplanung herrschende Semantik dieser Kanten als Vorrangbeziehungen und der reinen Betrachtung von Ende-Start-Beziehungen bei diesem Grundmodell macht es keinen Sinn, dass eine Aktivität A_2 nach einer Aktivität A_1 ausgeführt werden soll und gleichzeitig (ggf. über weitere Aktivitäten) festgelegt ist, dass A_1 nach A_2 ausgeführt werden soll. Es kann also angenommen werden, dass ein gültiges Aktivitätennetzwerk immer kreisfrei ist. Daher existiert für jedes gültige Aktivitätennetzwerk immer mindestens eine topologische Sortierung und somit auch immer mindestens eine gültige Aktivitätenliste, die die Bedingung (3.10) erfüllt. Für das Netzwerk in Abbildung 3.4 (a) wäre beispielsweise

$$\tau = \langle 1, 2, 4, 6, 5, 7, 3, 8, 9, 10 \rangle$$

eine gültige Aktivitätenliste.

Die Einplanungsschemata nutzen jetzt so eine Aktivitätenliste, um daraus einen Plan aufzubauen. Das **serielle Einplanungsschema** (vgl. Kelley (1963)) orientiert sich dabei komplett an der Reihenfolge in der Aktivitätenliste und plant die Aktivitäten iterativ in dieser Reihenfolge in den Plan ein. Eine Aktivität wird hierbei eingeplant, sobald einerseits alle Vorgängeraktivitäten abgeschlossen wurden und andererseits genug Ressourcen für die Ausführung der Aktivität verfügbar sind (vgl. Abbildung 3.4). Da durch den Aufbau der Aktivitätenliste schon sichergestellt ist, dass die Vorrangbeziehungen eingehalten werden und hier jetzt noch auf die Ressourcen geachtet wird, kann mit diesem Algorithmus ein gültiger Plan erzeugt werden.

Während sich das serielle Einplanungsschema direkt an der durch die Aktivitätenliste vorgegebenen Reihenfolge orientiert, betrachtet das **parallele Einplanungsschema** (vgl. Brooks und White (1965)) die Zeitpunkte, zu denen eine neue Aktivität eingeplant werden könnte. Da bei der Einplanung der Aktivitäten Vorrangbeziehungen und Ressourcen berücksichtigt werden müssen, ist das immer genau dann der Fall, wenn eine Aktivität abgeschlossen wurde (da eine konstante Ressourcenverfügbarkeit und eine konstante Ressourcennutzung angenommen wird). Für die Einplanung wird jetzt wie folgt vorgegangen:

1. Setze den ersten betrachteten Zeitpunkt auf $t = 0$.
2. Die Kandidatenmenge der möglichen, jetzt einzuplanenden Aktivitäten entspricht allen Aktivitäten aus der Aktivitätenliste, deren Vorgänger bereits eingeplant wurden, die aber noch nicht selbst eingeplant sind.

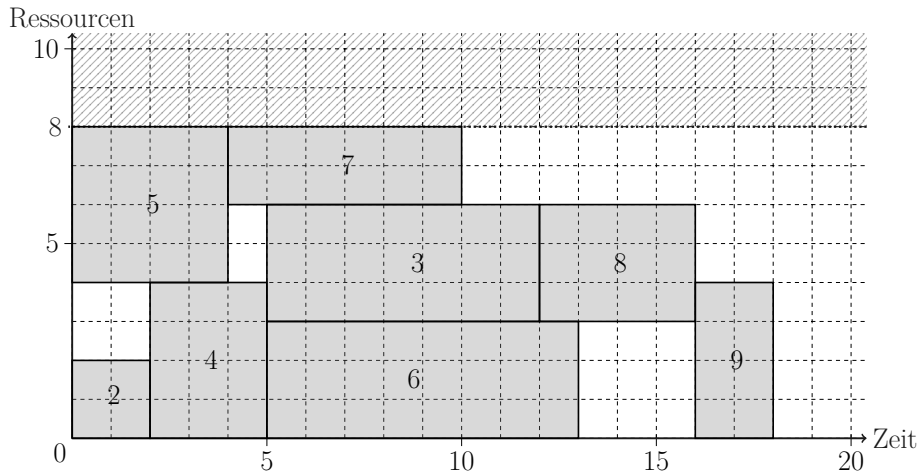


Abbildung 3.5. – Nach der Aktivitätenliste τ geplanter Projektablaufplan

3. Plane zum aktuellen Zeitpunkt t aus der Kandidatenmenge unter Berücksichtigung der Reihenfolge in der Aktivitätenliste so viele Aktivitäten ein, wie es über die Ressourcenverfügbarkeit möglich ist.
4. Setze t auf den frühesten Fertigstellungszeitpunkt aller, vom aktuellen t ausgehend, noch nicht fertiggestellten Aktivitäten und gehe zu Schritt 2, sofern es noch ungeplante Aktivitäten gibt.

Die Ergebnisse des seriellen und des parallelen Einplanungsschemas auf der gleichen Aktivitätenliste können je nach Vorrangbeziehungen zwischen den Aktivitäten unterschiedlich ausfallen, in diesem Fall ergibt sich jedoch für die zuvor beschriebene Liste τ mit beiden Schemata der in Abbildung 3.5 visualisierte Plan.

In beiden vorgestellten Einplanungsschemata werden die Aktivitäten aus der Aktivitätenliste zeitlich gesehen vorwärtsgerichtet, ausgehend von einem initialen Startpunkt $t = 0$, jeweils so früh wie möglich eingeplant. Demeulemeester und Herroelen (2002, S. 272–279) stellen dazu noch zwei weitere Varianten der Einplanung vor, die sich sowohl auf das serielle als auch auf das parallele Einplanungsschema anwenden lassen. Bei der Rückwärtsplanung wird ein fixer Fertigstellungszeitpunkt $t = T$ für den gesamten Plan angenommen. Ausgehend von diesem Zeitpunkt wird die Aktivitätenliste jetzt rückwärts von hinten nach vorne durchgegangen und jede Aktivität unter Berücksichtigung der Vorrangbeziehungen und der Ressourcen so spät wie möglich eingeplant.

Bei der bidirektionalen Planung wird die Vorwärtsplanung und die Rückwärtsplanung kombiniert. Bis zu einem bestimmten Index der Aktivitätenliste wird der Plan vorwärts ausgehend vom Zeitpunkt $t = 0$ geplant. Die restlichen Aktivitäten der Liste werden nun mit Hilfe der Rückwärtsplanung umgekehrt ihrer Listenreihenfolge so spät wie möglich eingeplant. Dadurch ist es möglich, genau an einer Stelle in der Mitte des

Plans einen Zeitpuffer entstehen zu lassen, wenn der initiale Fertigstellungszeitpunkt für den rückwärts geplanten Teil entsprechend spät gewählt ist.

3.3.2. Lokale Suchverfahren zur Verbesserung einer Lösung

Im letzten Abschnitt wurde gezeigt, wie mit den verschiedenen Einplanungsschemata aus einer Aktivitätenliste eindeutig ein Projektablaufplan generiert werden kann. Weiterhin wurde durch das Beispiel zu Abbildung 3.4 gezeigt, dass es bei unterschiedlichen Reihenfolgen der Aktivitäten in der Aktivitätenliste zu unterschiedlichen Platzierungen der Aktivitäten und damit letztendlich zu unterschiedlich guten oder schlechten Plänen kommen kann. Das parallele Einplanungsschema sorgt dafür, dass zu einem beliebigen Zeitpunkt eine Aktivität immer auch tatsächlich gestartet wird, wenn sie aus Sicht der verfügbaren Ressourcen und der Vorrangbeziehungen dort starten könnte (vgl. Kolisch (1996b)). Für das serielle Einplanungsschema gilt, wenn man die weiteren Beweise von Sprecher u. a. (1995) und Kolisch (1996b) zusammennimmt, dass sich unter allen gültigen Permutationen einer Aktivitätenliste immer mindestens eine befindet, die im Sinne der C_{\max} -Zielfunktion bei Verwendung des seriellen Einplanungsschemas zu einer optimalen Lösung führt.

Mit dieser Erkenntnis lässt sich das Problem $PS|prec|C_{\max}$ derart reduzieren, dass zur Bestimmung der optimalen Lösung nur noch die *richtige* Permutation der Aktivitätenliste gefunden werden muss. Dazu gab es in der Vergangenheit verschiedene Ansätze. Der einfachste besteht darin, einfach zufällig eine gültige Permutation für eine Aktivitätenliste zu erzeugen oder zufällig zwei Aktivitäten innerhalb der Liste zu vertauschen, ohne die Gültigkeit der Liste zu verletzen (vgl. Bedingung (3.10)). Auf die geänderte Liste wird erneut das serielle Einplanungsschema angewendet und geprüft, ob diese Liste zu einer besseren Lösung geführt hat. Dieses zufällige Ausprobieren verschiedener Listen wird in der englischen Literatur als *Random sampling* bezeichnet, für eine genauere Beschreibung mit weiteren Literaturverweisen wird auf Demeulemeester und Herroelen (2002, S. 287f) verwiesen.

Neben dem zufälligen Ausprobieren verschiedener Listen gibt es viele Forscher, die versucht haben, verschiedene Charakteristiken von einzelnen Aktivitäten oder von dem gesamten Aktivitätennetzwerk zu identifizieren, mit deren Hilfe sich direkt eine möglichst gute Aktivitätenliste generieren lässt. Solche, auf verschiedenen Charakteristiken basierende Sortierungsregeln werden Prioritätsregeln genannt, die damit erzeugten Aktivitätenlisten heißen Prioritätslisten (vgl. Demeulemeester und Herroelen (2002, S. 289f)). In Abbildung 3.6 wird der Aufbau einer Prioritätsliste anhand der Regel *längste Dauer* visualisiert. Diese Regel sagt aus, dass bei mehreren möglichen einzuplanenden Aktivitäten immer diejenige als nächstes ausgewählt wird, die die längste Dauer hat. Haben mehrere der möglichen Aktivitäten die aktuell längste Dauer, so wird die Aktivität mit der kleineren Bezeichnernummer gewählt. Im ersten Schritt (a) kann als einziges die Aktivität 1 ausgewählt werden, hier ist keine Entscheidung zu treffen ($\tau^{LD} = \langle 1 \rangle$). Die nächsten möglichen einzuplanenden Aktivitäten sind jetzt 2, 3 und

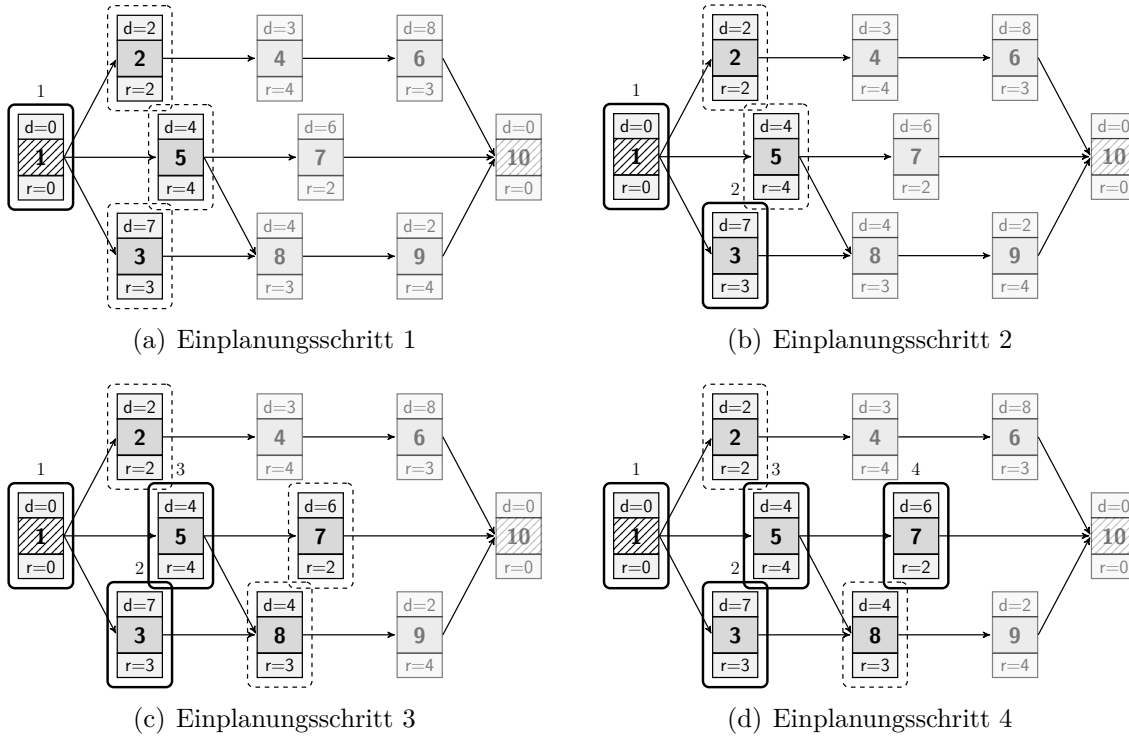


Abbildung 3.6. – Aufbau einer Aktivitätenliste nach Prioritätsregeln

5. Davon hat die Aktivität 3 mit $d = 7$ die längste Dauer und wird somit als nächstes in Schritt (b) ausgewählt ($\tau^{LD} = \langle 1, 3 \rangle$). Die Kandidatenliste der nächsten, möglichen Aktivitäten enthält jetzt nur noch 2 und 5. Es kommt keine weitere Aktivität hinzu, da die Aktivität 8 als Nachfolger von 3 noch nicht eingeplant werden kann, weil ihr zweiter Vorgänger 5 noch nicht eingeplant wurde. In Schritt (c) wird mit einer Dauer von $d = 4$ Aktivität 5 gewählt ($\tau^{LD} = \langle 1, 3, 5 \rangle$), die neue Kandidatenliste besteht jetzt aus den Aktivitäten 2, 7 und 8. Davon wird im nächsten Schritt (d) Aktivität 7 mit $d = 6$ ausgewählt. Die am Ende komplette, mit dieser Regel erstellte Aktivitätenliste, lautet dann:

$$\tau^{LD} = \langle 1, 3, 5, 7, 8, 2, 4, 6, 9, 10 \rangle$$

Demeulemeester und Herroelen (2002, S. 280–286) beschreiben eine Reihe von verschiedenen Prioritätsregeln, z.B. aktivitätenabhängige Regeln (kürzeste/längste Dauer), netzwerkabhängige Regeln (meisten/wenigsten Nachfolger einer Aktivität), vom kritischen Pfad abhängige Regeln (früheste/späteste Startzeit) und andere Varianten.

Aufgrund ihrer Performance und der Möglichkeit ihrer einfachen Implementierung werden Prioritätslisten gerne von verschiedenen Forschern zur Lösung verschiedener RCPSP-Modelle verwendet oder ihre Ergebnisse zum Vergleich mit anderen Heuristi-

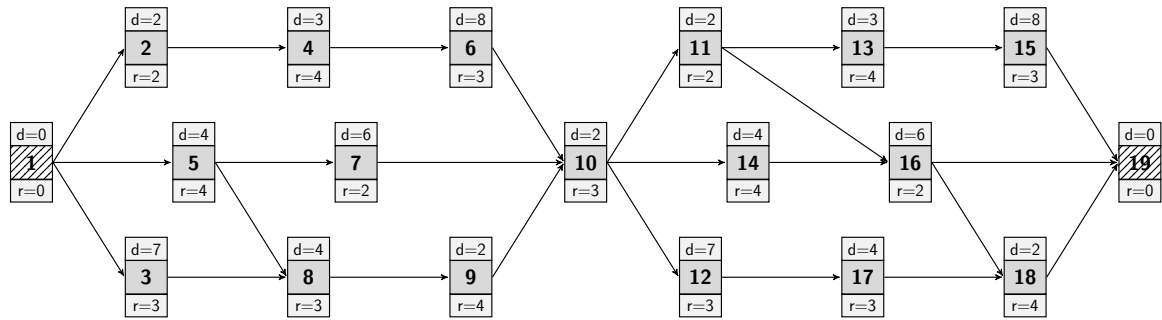


Abbildung 3.7. – Abhängigkeiten in einem Aktivitätennetzwerk

ken herangezogen. Kolisch (1996a) gibt einen Überblick über verschiedene Prioritätsregeln und evaluiert die damit jeweils erzeugten Lösungen für Instanzen der PSPLIB und weiterer Testinstanzen. Hartmann und Kolisch (2000) ziehen zu einem solchen Vergleich auch noch weitere Metaheuristiken hinzu (Genetischer Algorithmus, Tabu-Suche, Simulated Annealing, vgl. auch Abschnitt 3.3.3). Dabei kommt heraus, dass diese Prioritätslisten gegenüber den Metaheuristiken insofern interessant sind, dass sie nur eine einzige Iteration benötigen und in dieser Zeit schon eine vergleichsweise gute Lösung produzieren. Die Metaheuristiken oder auch die zu Anfang dieses Abschnitts vorgestellte Random Sampling-Methode erzeugen zwar letztendlich bessere Lösungen, benötigen dafür aber deutlich mehr Iterationen.

3.3.3. Metaheuristiken zur Verbesserung einer Lösung

Durch die Vorrangbeziehungen in einem Netzwerk werden Abhängigkeiten zwischen den Aktivitäten geschaffen, welche die Möglichkeiten der Planung beschränken können. Durch diese Abhängigkeiten entstehen mehr oder weniger eindeutige Gruppen von Aktivitäten im Netzwerk, deren Planung entscheidende Auswirkungen auf viele nachfolgende Aktivitäten hat und damit auch auf das Planungsergebnis insgesamt. Ein solcher Zustand wird (ggf. aus praktischer Sicht etwas übertrieben) in Abbildung 3.7 dargestellt. Das Netzwerk kann hier in die Aktivitäten vor Aktivität 10 und ab Aktivität 10 aufgeteilt werden. Es ist einfach zu erkennen, dass eine Verbesserung des Planungsergebnisses der Aktivitäten 1-9 (z.B. durch eine andere Teilsortierung der Aktivitätenliste in diesem Bereich) direkt dazu führt, dass auch Aktivität 10 früher starten kann und damit der komplette hintere Bereich des Netzwerks ab Aktivität 10. Auf der anderen Seite kann es Aktivitäten geben, deren Reihenfolge zueinander in der Aktivitätenliste egal ist. Ob nun ein Teil der Liste als $\tau = \langle \dots, 10, 11, 14, \dots \rangle$ oder $\tau = \langle \dots, 10, 14, 11, \dots \rangle$ vorgegeben ist, spielt beim seriellen Einplanungsschema keine Rolle, da sowohl Aktivität 11 als auch 14 parallel nach der Fertigstellung von Aktivität 10 starten können und Aktivität 12 in beiden Fällen warten müsste (bei einer wie zuvor angenommenen Ressourcenverfügbarkeit von 8, vgl. dazu auch Abbildung 3.4).

Durch dieses Beispiel wird deutlich, dass das Finden einer möglichst guten Sortie-

rung der Aktivitätenliste stark davon abhängig ist, in wie weit es den Lösungsverfahren möglich ist, die unwichtigen von den kritischen Bereichen des Aktivitätsnetzwerks zu unterscheiden und letztere gezielt zu verbessern, anstatt einfach nur zufällig verschiedene Listen auszuprobieren. Diesen Umstand haben in der Vergangenheit verschiedene Forscher genutzt, um Metaheuristiken zu entwickeln, die gezielt vorhandene Aktivitätenlisten verbessern anstatt einfach komplett neue Listen zu generieren. Dabei wurden im Wesentlichen die auch schon aus anderen Bereichen der mathematischen Optimierung bekannten Verfahren *Tabusuche* (TS, engl. Tabu Search), *Simulierte Abkühlung* (SA, engl. Simulated Annealing) und *Genetischer Algorithmus* (GA, engl. Genetic Algorithm) adaptiert. Für eine aktuelle Einführung in diese Metaheuristiken wird auf Gendreau und Potvin (2010) verwiesen.

Tabusuche (TS) Die Tabusuche wurde als problemunabhängige Metaheuristik für verschiedene Optimierungsprobleme (unter anderem auch für das mit dem RCPSP verwandte Maschinenbelegungsplanungsproblem) von Glover (1990) beschrieben. Dabei wird vorausgesetzt, dass eine aktuelle Lösung des Optimierungsproblems in einer Form vorliegt, in der durch einen Operator eine lokale Änderung vorgenommen wird, die zu einer anderen gültigen Lösung führt und dass diese neue Lösung hinsichtlich einer eventuellen Verbesserung oder Verschlechterung des Zielfunktionswerts bewertet werden kann. In jeder Iteration werden jetzt alle möglichen Lösungen betrachtet, die mit dem lokalen Änderungsoperator aus der aktuellen Lösung erzeugt werden können (die sogenannte Nachbarschaft) und die aktuell nicht in einer sogenannten Tabu-Menge enthalten sind. Diese Lösungen werden nun hinsichtlich ihres Zielfunktionswertes bewertet und die beste Lösung wird als neue aktuelle Lösung angenommen. Zugleich wird diese neue Lösung für die nächsten n Iterationen zur eben schon angesprochenen Tabu-Menge hinzugefügt, damit eine erneute Betrachtung und vor allem eine erneute Wahl dieser Lösung verhindert wird, falls der Operator zwar andere, aber hinsichtlich des Zielfunktionswerts lediglich gleichwertige Lösungen aus der aktuellen erzeugen kann. Würde es diese Tabu-Menge nicht geben, könnte der Algorithmus in einer solchen Situation sonst schnell in einer Endlosschleife enden, bei der nach einigen Iterationen immer wieder die selbe Lösung gefunden wird. Die Tabusuche wurde nach ihrer ersten Veröffentlichung von vielen Forschern aufgegriffen und verbessert, in einer weiteren Veröffentlichung Glover und Laguna (1999) geben die Autoren einen Überblick über die so erreichten Fortschritte und Weiterentwicklungen der einzelnen Bereiche des Verfahrens.

Bezogen auf das RCPSP wird die Aktivitätenliste für die Tabusuche von verschiedenen Forschern (vgl. z.B. Mika u. a. (2005); Demeulemeester und Herroelen (2002, S. 297)) zur Repräsentation einer Lösung herangezogen, als Operator zur Erzeugung der Nachbarschaft wird z.B. das Vertauschen von zwei benachbarten Aktivitäten oder zwei beliebigen Aktivitäten in der Liste definiert. Auf diese Weise wird in jeder Iteration beurteilt, welche der möglichen lokalen Änderungen in

der Aktivitätenliste zur größten Verbesserung des Gesamtplans führt und diese geänderte Liste wird dann als Grundlage für die nächste Iteration angenommen.

Dass die Tabusuche nicht nur auf Aktivitätenlisten anwendbar ist, wird z.B. von Thomas und Salhi (1998) gezeigt. Sie repräsentieren eine Lösung als Vektor der Startzeiten aller Aktivitäten und setzen zu Anfang voraus, dass diese Startzeiten hinsichtlich Ressourcen und Vorrangbeziehungen gültig sind. Als Operator zur Erzeugung der Nachbarschaft wird nun der Tausch der Startzeiten zweier Aktivitäten definiert, sofern durch diesen Tausch alle Ressourcenrestriktionen und Vorrangbeziehungen eingehalten werden.

Auch zur Optimierung hinsichtlich weiterer Planungsziele wurde die Tabusuche in der Literatur verwendet, so benutzten beispielsweise Hazir und Schmidt (2012) ein solches Verfahren zur Lösung des Multi-Mode RCPSP (vgl. Abschnitt 3.4) oder Calhoun u. a. (2002) und Deblaere u. a. (2011) zur Neuplanung oder Reparatur von ungültig gewordenen Projektablaufplänen.

Simulierte Abkühlung (SA) Die Tabusuche hat konzeptionell das Problem, dass sie aus der generierten Nachbarschaft immer nur die beste Lösung als neue Referenzlösung für die nächste Iteration auswählt. Dies führt dazu, dass wenn man nach mehreren Iterationen in einem lokalen, jedoch nicht globalen Optimum gelandet ist, es unmöglich ist, dieses wieder zu verlassen, um ggf. ein anderes besseres lokales oder gar das globale Optimum zu finden. Der SA-Algorithmus löst dieses Problem, indem er nicht immer die beste Lösung der Nachbarschaft als neue Referenzlösung wählt, sondern eine zufällige, also möglicherweise auch eine schlechtere. Um diese Suche trotzdem in Richtung möglichst guter Lösungen zu bewegen, werden bei der zufälligen Auswahl gute Lösungen mit einer höheren Wahrscheinlichkeit ausgewählt als schlechtere. Zudem sinkt die Wahrscheinlichkeit, dass überhaupt schlechtere Lösungen ausgewählt werden, mit steigender Anzahl Iterationen. Der Name ist als Analogie zur Stahlumformung entstanden, je länger der anfangs heiße Stahl geformt wird, desto mehr kühlt er ab und desto schwieriger wird es, ihn in eine grundsätzlich andere Form zu bringen, irgendwann sind nur noch sehr kleine Änderungen möglich. Metropolis u. a. (1953) liefern dabei als eine der ersten grundlegende Ideen zu dieser Art von Algorithmus indem sie beschreiben, wie ein beliebiges System algorithmisch von einem aktuellen Zustand in einen gewünschten Zielzustand überführt werden kann.

Demeulemeester und Herroelen (2002, S. 298) geben einen Überblick über verschiedene Verwendungen des SA-Algorithmus im Bereich Project Scheduling. Mika u. a. (2005) implementieren und testen ihn analog zur Tabusuche und kommen zu dem Ergebnis, dass er der Tabusuche beim Lösen von $PS|prec|C_{\max}$ überlegen ist. Abbasi u. a. (2006) setzen ebenfalls sehr erfolgreich eine Variante des SA-Algorithmus ein, um ein RCPSP unter einer kombinierten Zielfunktion aus

der Minimierung der Projektlaufzeit und der Maximierung der Robustheit zu optimieren.

Genetischer Algorithmus (GA) Sowohl die Tabusuche als auch der SA-Algorithmus basieren auf der Annahme, dass es bei dem zu lösenden Problem gut möglich ist, eine einzige vorhandene Lösung durch wiederholtes Anwenden gezielter kleiner Änderungen schrittweise zu verbessern und sie damit auf ein Optimum zuzubewegen. Um sagen zu können, ob eine solche kleine Änderung tatsächlich zielführend ist, ist es notwendig, dass man ihren Einfluss auf eine Lösung gut bewerten kann d.h. dass sich die Änderung direkt in einer (wenn auch nur sehr kleinen) Änderung des Zielfunktionswerts widerspiegelt.

Bei einem genetischen Algorithmus wird dieses Prinzip umgekehrt. Es gibt eine Vielzahl von gleichzeitig betrachteten Lösungen, die als Population bezeichnet werden, eine einzelne Lösung wird als Individuum dieser Population bezeichnet. In einer Iteration werden jetzt alle Individuen der Population zufällig mehr oder weniger stark durch einen lokalen Operator verändert. Dazu können zum einen zwei zufällig ausgewählte und bereits vorhandene Individuen kombiniert werden (Kreuzungsoperator) oder es kann ein einzelnes Individuum lokal verändert werden (Mutationsoperator). Sind durch die Kombination von Individuen neue Individuen entstanden, so ist die Population insgesamt gewachsen und muss durch anschließende Eliminierung einiger schlechter Individuen wieder auf ihre ursprüngliche Größe gebracht werden. Die Idee hinter diesem Ansatz basiert auf der Evolutionstheorie aus der Biologie. Es wird angenommen, dass es zwar schwierig ist, von außen gezielt bestimmte Eigenschaften als besonders gut zu identifizieren und zu verbessern, dass sich aber bei zufälligen Änderungen der Eigenschaften und einer genügend großen Population die Individuen mit den besten Kombinationen von guten Eigenschaften über mehrere Generationen hinweg durchsetzen werden. Erste Ideen zu Algorithmen dieser Art gehen auf Holland (1975) zurück, fast zur gleichen Zeit stellten Rechenberg (1973) und Schwefel (1977) ähnliche Ansätze als Lösungsmethoden vor.

Das generelle Prinzip von genetischen Algorithmen wird von Demeulemeester und Herroelen (2002, S. 298f) mit weiteren Literaturverweisen für den Bereich des Project Scheduling beschrieben. Hartmann (1998) testet verschiedene Varianten eines genetischen Algorithmus für das RCPSP. Dabei benutzt er zur Lösungsrepräsentation zum einen eine Aktivitätenliste und als Mutationsoperator mit einer bestimmten Wahrscheinlichkeit den Tausch zweier Aktivitäten in dieser Liste. Zur Erzeugung neuer Individuen werden die Aktivitätenlisten zweier vorhandener Individuen mit dem Kreuzungsoperator an einer zufällig ausgewählten Stelle getrennt und anschließend wird jeweils der vordere Teil der Liste eines Individuums mit dem hinteren Teil der Liste des anderen Individuums kombiniert,

wobei verschiedene Techniken zur Wahrung der Vorrangbeziehungen angewendet werden.

Als zweite Variante der Repräsentation verweist Hartmann auf die Arbeit von Lee und Kim (1996), bei der jeder Aktivität ein beliebiger Prioritätswert $\in [0, 1]$ zugewiesen wird (*Random Key*-Repräsentation). Dieser Vektor von Prioritätswerten wird dann als Prioritätsregel zum Aufbau der Aktivitätenliste herangezogen, d.h. aus der Menge der möglichen Kandidaten für die nächste einzuplanende Aktivität wird immer die Aktivität gewählt, die den höchsten Prioritätswert hat (vgl. Abschnitt 3.3.2). Mit dem Mutationsoperator wird jetzt der Prioritätswert jeder Aktivität mit einer geringen Wahrscheinlichkeit durch einen beliebigen neuen Wert ersetzt. Dadurch wird die Aktivität beim nächsten Aufbau der Aktivitätenliste ggf. an eine andere Position einsortiert. Der Kreuzungsoperator nimmt in diesem Fall die Prioritätswerte einer Untermenge von Aktivitäten von einem Individuum und ergänzt sie für die jetzt noch fehlenden Aktivitäten durch deren Prioritätswerte von einem anderen Individuum. Diese Art der Repräsentation wurde auch in neuerer Zeit unter anderem von Gonçalves u. a. (2008) verwendet.

Auch weitere Varianten des RCPSP wurden bereits erfolgreich mit genetischen Algorithmen gelöst, so schlugen Alcaraz u. a. (2003) einen solchen Algorithmus zur Lösung des Multi-Mode RCPSP (vgl. Abschnitt 3.4) vor und Kumanan u. a. (2006) setzten ihn erfolgreich in der Multiprojektplanung zur Lösung des RCMPSP ein.

Hartmann und Kolisch (2000) sind der Frage nachgegangen, welche Heuristik bzw. Metaheuristik sich am besten für welche Art von Plänen eignet. Dazu haben sie auf verschiedenen Instanzen der PSPLIB (mit 30, 60 und 120 Aktivitäten je Plan) die drei Metaheuristiken mit dem Random Sampling-Verfahren und verschiedenen Prioritätslisten verglichen. Während bei den kleinen Instanzen mit 30 Aktivitäten der SA-Algorithmus noch einen leichten Vorsprung vor dem genetischen Algorithmus mit Aktivitätenlisten (wie zuvor beschrieben) hat, so liegt der genetische Algorithmus bei allen größeren Instanzen vorne. Während die Tabusuche bei 30 Aktivitäten noch relativ gute Ergebnisse erzielt, wird sie bei größeren Instanzen deutlich schlechter. Unabhängig von der Größe der Testinstanzen war jedoch jede Metaheuristik dem Random Sampling-Verfahren überlegen, besonders bei größeren Instanzen schlagen sie auch immer deutlich die verschiedenen Prioritätslisten.

Etwas später haben Kolisch und Hartmann (2006) den zuvor angestellten Vergleich nochmal unter Berücksichtigung neuer Varianten der Metaheuristiken wiederholt, auch dabei war wieder der genetische Algorithmus die beste Metaheuristik. Es zeigte sich außerdem, dass eine Erweiterung des Einplanungsschemas in Form einer zusätzlichen Nachbearbeitung des erzeugten Plans nochmal deutlich bessere Ergebnisse brachte. Bei diesem Nachbearbeitungsschritt werden alle Aktivitäten des generierten Plans in

einer bestimmten Reihenfolge zuerst ganz nach hinten und dann wieder soweit wie möglich nach vorne geschoben (dort als *Forward-backward improvement* bezeichnet).

3.4. Flexible Ressourcenplanung

Das in Abschnitt 3.1.1 vorgestellte Grundmodell des RCPSP setzt voraus, dass zur Planung allen Aktivitäten eine feste Dauer zugewiesen wird und alle Ressourcenbedarfe über diesen Zeitraum der Ausführung konstant sind. Diese Einschränkung ist jedoch in vielen Fällen sehr praxisfern, da es oft mehrere denkbare Möglichkeiten gibt, eine Aktivität in einem Projekt hinsichtlich Dauer und Ressourceneinsatz durchzuführen (vgl. Kapitel 2.3.3). Ist eine Aktivität zur pünktlichen Fertigstellung eines Projekts besonders zeitkritisch, kann eine möglichst kurze Dauer mit einem dafür hohen Ressourceneinsatz nötig sein, sofern genügend Ressourcen verfügbar sind. Hat man dagegen genug Zeit, kann bewusst eine langsame und dafür ressourcenschonendere Ausführung die bessere Lösung sein, um noch Ressourcenkapazitäten für andere, parallel ausgeführte Aktivitäten zu haben. Ob die Zeit für den Pfad an Vorrangbeziehungen, auf dem sich eine Aktivität gerade befindet, jedoch knapp ist, entscheidet sich erst bei der Lösung des Planungsproblems und ergibt sich auch durch die letztendlich gewählte Art der Ausführung. Es kann also sinnvoll sein, die Ausführungsart einer Aktivität hinsichtlich Ressourcennutzung und Dauer erst bei der Planung und nicht schon im Vorfeld festzulegen.

Ein erster Ansatz zu einer solchen, etwas flexibleren Ressourcenplanung stellt das Multi-Mode RCPSP (MMRCPSP) dar (vgl. Elmaghraby (1977)). In diesem ist es möglich, für eine Aktivität mehrere alternative Ausführungsmodi hinsichtlich Dauer und Ressourcenbedarf pro Periode anzugeben, bei der Optimierung wird sich dann für einen dieser Ausführungsmodi entschieden. Forscher haben in der Vergangenheit verschiedene der in Abschnitt 3.2 und 3.3 vorgestellten Verfahren benutzt, um das MMRCPSP zu lösen. So schlugen Sprecher und Drexler (1998) einen exakten Branch&Bound-Ansatz vor, Alcaraz u. a. (2003) benutzten einen genetischen Algorithmus und Coelho und Vanhoucke (2011) formulierten und lösten das Problem als aussagenlogisches Erfüllungbarkeitsproblem.

Mit dem MMRCPSP ist zwar eine etwas flexiblere Planung möglich, man muss jedoch für jede Aktivität alle denkbaren Modi für Kombinationen aus Dauer und Ressourcenbedarf im Vorfeld ermitteln und explizit angeben. Ein weiterer Nachteil ist, dass der Ressourcenverbrauch der Aktivität in jedem Modus immer noch konstant über den Zeitverlauf ist. Dies erfüllt somit immer noch nicht die in Kapitel 2.3.3 vorgestellte Anforderung einer komplett flexiblen Ressourcenplanung. Einen ersten Ansatz für eine solche Planung beschreiben Józefowska u. a. (2000). Dabei wird zwar auch noch explizit von verschiedenen Modi einer Aktivität ausgegangen, ein Modus beschreibt hier aber nur noch die Dauer der Aktivität. Für eine gewählte Dauer wird dann die prozentuale Ressourcennutzung pro Zeitperiode bestimmt, wobei am Ende

der Aktivität der gesamte Ressourcenbedarf (= 100%) erfüllt sein muss. Einschränkend wird jedoch angenommen, dass die Ressourcen zwar zunächst kontinuierlich sind, sie jedoch für die Berechnung einer gültigen Ressourcenbelegung bei gegebenen Startzeitpunkten/Dauern diskretisiert werden. Außerdem wird fest von einer ausgezeichneten Ressource ausgegangen, die flexibel benutzt werden kann. Das Problem wird unter Verwendung eines SA-Algorithmus unter der C_{\max} -Zielfunktion gelöst. Als Repräsentationsform für den SA-Algorithmus wird eine Aktivitätenliste zusammen mit einem Vektor gewählt, der jeder Aktivität ihren aktuellen Modus zuordnet.

Eine etwas andere Herangehensweise schlagen Ranjbar und Kianfar (2010) vor: In ihrem Verfahren werden zunächst alle möglichen Modi für eine Aktivität generiert, wobei ein Modus hier nicht nur die Dauer einer Aktivität beschreibt, sondern auch ein (nicht notwendigerweise konstantes) Ressourcennutzungsprofil über die Dauer. Zur Lösung des Problems wird ein genetischer Algorithmus verwendet, als Repräsentationsform wird eine Aktivitätenliste für die Einplanungsreihenfolge benutzt sowie ein zusätzlicher Vektor, der jeder Aktivität ihren aktuellen Modus zuordnet.

Mit den zuvor vorgestellten Verfahren ist es immer nötig, dass alle möglichen Modi einer Aktivität im Vorfeld bekannt sind. Besonders wenn ein Modus auch das Ressourcennutzungsprofil beschreibt, kann es so unter Umständen sehr viele mögliche Modi für eine Aktivität geben. Einen etwas anderen Ansatz, der dieses Problem umgeht, schlagen Kolisch u. a. (2003) zur Lösung des RCMPSP vor. Es werden also mehrere Projekte betrachtet, die alle einen individuellen Fertigstellungstermin haben. Bei der Repräsentation werden jedoch nicht mehr unterschiedliche Modi angenommen, sondern die Bestimmung der Dauer einer Aktivität wird ganz in das serielle Einplanungsschema verlagert, welches wie beim Standard-RCPSP nur auf einer Aktivitätenliste arbeitet. Eine Aktivität hat einen minimalen und einen maximalen Ressourcenbedarf pro Periode sowie einen Gesamtbedarf, diese Werte gehen als Parameter in das Optimierungsmodell ein. Bei der Einplanung einer Aktivität wird jetzt für diese durch Ausprobieren der frühestmögliche und anschließend kürzeste Zeitraum gewählt, der

1. frühestens zu dem Zeitpunkt beginnt, an dem alle bereits eingeplanten Vorgängeraktivitäten abgeschlossen sind,
2. in welchem in jeder Periode noch genug Ressourcen zur Erfüllung des minimalen Ressourcenbedarfs pro Periode verfügbar sind und
3. in welchem in den einzelnen Zeitperioden in Summe noch genug Ressourcen verfügbar sind, um unter Berücksichtigung des maximalen Ressourcenbedarfs pro Periode den Gesamtbedarf der Aktivität zu erfüllen.

Ist ein solcher Zeitraum gefunden, steht damit die Startzeit und die Dauer der Aktivität fest, außerdem wurde bereits sichergestellt, dass es eine gültige Ressourcenallokation gibt. Zur tatsächlichen Ressourcenallokation wird jetzt zunächst in jeder Zeitperiode der minimale Ressourcenbedarf pro Periode allokiert, anschließend

werden vom Startzeitpunkt der Ausführung angefangen in jeder Zeitperiode so viele weitere Ressourceneinheiten wie möglich (unter Berücksichtigung des maximalen Ressourcenbedarfs pro Periode und der aktuellen Ressourcenverfügbarkeit) allokiert, bis der gesamte Ressourcenbedarf der Aktivität erfüllt ist. Letztendlich wird eine einzelne Aktivität damit also so früh wie möglich abgeschlossen und die Ressourcen innerhalb der Aktivität werden so früh wie möglich verbraucht. Das Problem wird durch Ausprobieren verschiedener Aktivitätenlisten mit dem Random Sampling-Verfahren gelöst. Ziel dabei ist es, die Fertigstellungszeit des gesamten Projektprogramms, also die späteste Fertigstellungszeit aller Projekte im Plan zu minimieren. Die Autoren weisen bezüglich möglicher Lösungsansätze darauf hin, dass das Modell auch prinzipiell als MIP formuliert und mit einem entsprechenden Standard-Solver gelöst werden kann (vgl. Abschnitt 3.2), eine entsprechende Modellformulierung wird vorgestellt. Jedoch wird darauf verwiesen, dass das Problem als Erweiterung des RCPSP zu den *NP*-schweren Optimierungsproblemen gehört, deren Lösungsaufwand exponentiell mit der Problemgröße steigt. Eine exakte Lösung sei bei sehr kleinen Instanzen noch denkbar, bei größeren Instanzen jedoch auch mit speziell angepassten Branch&Bound-Verfahren ausgeschlossen.

Mit diesem angepassten seriellen Einplanungsschema arbeiten anschließend auch Fündeling (2006), Fündeling und Trautmann (2010) und Zhang und Sun (2011). In allen drei Veröffentlichungen werden besonders gute Prioritätsregeln zum Aufbau von Aktivitätenlisten gesucht, um das RCPSP mit flexiblen Ressourcen möglichst gut zu lösen. Während die ersten beiden Autoren dabei den Fall mit nur einem Projekt und der Minimierung der Projektdurchlaufzeit erforschen, betrachten Zhang und Sun (2011) den Multiprojektfall und wollen die Summe aller Verspätungen der einzelnen Projekte gegenüber ihren Fertigstellungsterminen minimieren.

Tritschler u. a. (2014) benutzen ebenfalls das modifizierte serielle Einplanungsschema, um flexibel planbare Ressourcenbedarfe zu berücksichtigen. Als erste bekannte Veröffentlichung (zeitgleich mit der Veröffentlichung von Schramme und Suhl (2014) aus diesem Forschungsprojekt) schlagen sie vor, die Sortierung der Aktivitätenliste für das Einplanungsschema mit dem Genetischen Algorithmus von Hartmann (1998) zu bestimmen und das Problem so mit dem Ziel der minimalen Projektlaufzeit zu lösen.

3.5. Zielfunktionen in der Projektablaufplanung

In den vorherigen Abschnitten wurde beim Lösen des RCPSP stets die C_{\max} -Zielfunktion betrachtet. Die Untersuchung möglicher Planungsziele in Kapitel 2.3.2 hat jedoch gezeigt, dass die Minimierung der Projektlaufzeit nur eines von vielen wichtigen Zielen in der praktischen Projektablaufplanung ist. In diesem Abschnitt der Literaturrecherche wird daher ein besonderer Fokus auf weitere mögliche Zielfunktionen des RCPSP gelegt. Dazu werden zunächst einige in der Vergangenheit untersuchte Zielfunktionen vorgestellt und formalisiert. Anschließend wird diskutiert, in wie weit es in den bisher

veröffentlichten Heuristiken möglich war, auch Modelle unter anderen als der C_{\max} -Zielfunktion zu lösen.

3.5.1. Vorstellung relevanter Zielfunktionen

Im Folgenden werden verschiedene bereits in der Literatur betrachtete Zielfunktionen vorgestellt, die aus Sicht der in Kapitel 2.3.2 abgeleiteten Planungsziele relevant sind. Für eine allgemeine Übersicht zu diesen und weiteren Zielfunktionen wird auf Hartmann und Briskorn (2010, S. 6–9) verwiesen.

Minimierung der Projektlaufzeit Wie bereits in Abschnitt 3.1.1 beschrieben, ist die Minimierung der Projektlaufzeit, d.h. die Anzahl der benötigten Zeitperioden zwischen dem Beginn der ersten und dem Ende der letzten Aktivität, die Standard-Zielfunktion für das RCPSP. Die im $\alpha|\beta|\gamma$ -Schema als C_{\max} bezeichnete Funktion wird formal als

$$\min f_n \tag{3.11}$$

beschrieben, wobei f_n den Fertigstellungszeitpunkt der letzten Aktivität n im Aktivitätennetzwerk bezeichnet. Auf weitere Literaturangaben wird an dieser Stelle verzichtet, da sich die in den vorherigen Abschnitten beschriebenen Methoden und die dazu genannten Veröffentlichungen hinreichend mit dieser Zielfunktion auseinandergesetzt haben.

Minimierung von Verspätungen/Verfrühungen Soll eine Aktivität spätestens zu einem bestimmten Termin fertiggestellt sein, so kann dies durch Angabe eines Fertigstellungstermins, d.h. einem Zeitpunkt im Planungshorizont, realisiert werden. Damit ist es zum einen möglich, nur für eine Aktivität selber einen Termin vorzugeben. Durch das zusätzliche Setzen von entsprechenden Vorrangbeziehungen und ggf. das Einfügen von Blindaktivitäten (vgl. Abschnitt 3.1.3) können so aber auch für komplette Unterstrukturen des Aktivitätennetzwerks Termine gesetzt werden. So kann z.B. ein Meilensteintermin nach einer Gruppe von Aktivitäten realisiert werden oder einem ganzen Projekt, wenn es mehrere Projekte im Netzwerk gibt, ein Fertigstellungstermin zugewiesen werden. Wenn $D \subseteq \{1, \dots, n\}$ die Menge der Aktivitäten mit einem Fertigstellungstermin ist und t_i^D den Fertigstellungstermin für Aktivität i beschreibt, dann wird mit der Zielfunktion

$$\min \sum_{i \in D} \max(0, f_i - t_i^D) \tag{3.12}$$

die Summe aller Verspätungen gegenüber den eigentlichen Fertigstellungsterminen minimiert. Dieses Optimierungsziel wird beispielsweise von Ballestín u. a. (2006) oder Kolisch (2000) verfolgt.

In einigen Fällen kann es wünschenswert sein, dass eine Aktivität nicht spätestens zu einem Termin abgeschlossen wird, sondern genau zu einem solchen vorgegebenen Zeitpunkt endet. Das kann beispielsweise bei der erneuten Planung eines bereits zuvor geplanten Projektablaufplans der Fall sein, wenn dieser durch unvorhergesehene Änderungen/Ausfälle nicht mehr ausführbar ist. In diesem Fall kann es das Ziel sein, besonders die in der nahen Zukunft liegenden Aktivitäten wenn möglich nah an ihre ursprünglich geplanten Zeitpunkte zu setzen, da für die praktische Ausführung zu diesen Zeitpunkten eventuell schon weitere Vorbereitungen eingeleitet wurden. Eine solche Minimierung von sowohl der Verspätung als auch der Verfrühung einer Aktivität wird z.B. von Van de Vonder u. a. (2007) untersucht und kann wie folgt ausgedrückt werden:

$$\min \sum_{i \in D} |f_i - t_i^D| \quad (3.13)$$

Sowohl bei der Zielfunktion (3.12) als auch bei (3.13) ist es möglich, den Term in der Summe noch mit einem aktivitätenabhängigen Gewichtungsfaktor zu multiplizieren, um die Abweichung von Terminen unterschiedlicher Aktivitäten unterschiedlich stark zu gewichten (vgl. Viana und de Sousa (2000)).

Zeitfenster für Aktivitäten einhalten Eine Abwandlung der zuvor angesprochenen Optimierung hinsichtlich eines genauen Fertigstellungstermins ist die Einhaltung von Zeitfenstern. Damit kann die Reoptimierung eines Plans durch Angabe von einzuhaltenden Zeitfenstern anstatt Zeitpunkten etwas weniger restriktiv gestaltet werden. Ein weiteres Beispiel nennt Vanhoucke (2006), in dem Aktivitäten aus Qualitätsgründen in bestimmten Zeitfenstern abgeschlossen werden sollten und ansonsten Strafkosten anfallen. Wenn $\underline{t}_i^W, \overline{t}_i^W$ der Beginn und das Ende des Zeitfensters bezeichnen, in dem eine Aktivität abgeschlossen werden sollte, und W die Menge aller Aktivitäten mit definiertem Zeitfenster bezeichnet, dann kann mit der Zielfunktion

$$\min \sum_{i \in W} \max(0, \underline{t}_i^W - f_i) + \max(0, f_i - \overline{t}_i^W) \quad (3.14)$$

die Minimierung aller Abweichungen aus den vorgegebenen Zeitfenstern erreicht werden.

Erhöhung der Robustheit Die Reparatur eines Plans, z.B. mit der zuvor beschriebenen erneuten Optimierung hinsichtlich fester Termine oder Zeitfenster, ist erforderlich, wenn der ursprüngliche Plan durch eine unvorhergesehene Störung nicht mehr wie geplant durchgeführt werden kann. Konkret kann so eine Störung bedeuten, dass z.B. eine Aktivität mehr Ressourcen benötigt als ursprünglich geplant, länger dauert als geplant oder dass in bestimmten Zeitperioden weniger

Ressourcen zur Verfügung stehen als ursprünglich angenommen (vgl. Kapitel 2.3.2).

Es ist möglich, dass schon bei der ursprünglichen Planung der Verdacht besteht, dass so eine Störung bei einer bestimmten Aktivität auftreten könnte, z.B. weil ihr Ressourcenbedarf vom Projektmanager nur grob geschätzt werden kann und sie deshalb mit einem hohen Risiko behaftet ist. In einem solchen Fall können dann auch direkt bei dieser Planung entsprechende Gegenmaßnahmen ergriffen werden, damit eine später tatsächlich eintretende Störung an dieser Stelle keine komplette Neuplanung erforderlich macht. Eine solche Art der Planung wird robuste oder auch proaktive Planung genannt, eine Übersicht dazu wird z.B. von Herroelen und Leus (2005) gegeben. Neben verschiedenen Techniken zur Bestimmung von geeigneten Planungsparametern für unsichere Aktivitäten kann ein solcher Plan dahingehend optimiert werden, dass von Anfang an Zeitpuffer hinter solche Aktivitäten eingeplant werden. Kommt es dann tatsächlich zu einer der angesprochenen Störungen, so kann die Aktivität problemlos verlängert werden, ohne dass dadurch ihre Nachfolger beeinflusst werden. Sei N^C die Menge der kritischen Aktivitäten, hinter die ein Puffer eingeplant werden soll, dann lautet die entsprechende Zielfunktion zur Maximierung der Zeitpuffer:

$$\max \sum_{i \in N^C} \min_{j \in S^N | (i,j) \in A} (f_j - d_j) - f_i \quad (3.15)$$

Zu beachten ist jetzt, dass ein RCPSP mit einer solchen Zielfunktion ein unbeschränktes Optimierungsproblem ist, wenn nicht durch einen endlichen Zeithorizont oder die Hinzunahme weiterer Zielfunktionen (wie im weiteren Verlauf dieses Abschnitts beschrieben) zusätzliche Einschränkungen gesetzt werden.

Kostenabhängige Ziele Während in den vorherigen Zielfunktionen immer direkt verschiedene Zeitpunkte/Zeitspannen der Aktivitäten bewertet wurden, gibt es auch einige Ansätze in der Literatur, den Aktivitäten je nach Platzierung einen (ggf. künstlichen) Kostenwert zuzuweisen und dann die Summe aller anfallenden Kosten zu minimieren. Einen solchen Ansatz schlagen z.B. Maniezzo und Mingozzi (1999) vor, indem sie jeder Aktivität i eine individuelle Kostenfunktion $c_i(t)$ zuweisen und dann die Zielfunktion

$$\min \sum_{i \in N} c_i(f_i) \quad (3.16)$$

zum Lösen des Problems benutzen. Eine realitätsnähere Betrachtung der Kosten stellt die Maximierung des Kapitalwerts (Net Present Value) dar, wie es z.B. von Mika u. a. (2005) oder Kimms (2001) vorgeschlagen wird. Dabei wird im Sinne einer Investitionsrechnung davon ausgegangen, dass durch die Ausführung einer Aktivität i ein bestimmter positiver Geldfluss CF_i in das Unternehmen

entsteht. Je früher dieser Geldfluss stattfindet, desto eher kann das hinzugewonnene Kapital Zinserträge abwerfen. Mika u. a. (2005) untersuchen dazu verschiedene Zahlungsmodelle aus der Investitionsrechnung, die sich darin unterscheiden, wann der mit einer Aktivität verknüpfte Geldfluss tatsächlich stattfindet. Dafür nehmen die Autoren in einem Modell an, dass dieser Geldfluss direkt mit dem Abschluss der jeweiligen Aktivität wirksam wird. Durch die Optimierung mit der Zielfunktion

$$\max \sum_{i \in N} \frac{CF_i}{(1 + \alpha)^{f_i}} \quad (3.17)$$

wird dann der Kapitalwert maximiert, wobei α der angenommene Zinssatz ist, mit dem das zusätzliche Kapital Zinsgewinne pro Zeitperiode abwirft, sobald es im Unternehmen ist.

Während in diesem Modell nur positive Geldflüsse berücksichtigt werden, so betrachten Vanhoucke u. a. (2001) auch die Möglichkeit, dass ein Geldfluss negativ sein kann. Das ist immer dann der Fall, wenn die Ausführung einer Aktivität das Unternehmen mehr Geld kostet, als sie einbringt. Umgekehrt zur vorherigen Überlegung ist es bei solchen Aktivitäten das Ziel, sie möglichst spät auszuführen, damit das vorhandene Kapital möglichst spät dezimiert wird und länger Zinserträge generieren kann. Diese gleichzeitige Betrachtung von positiven und negativen Geldflüssen führt bei der Optimierung zu einer Abwägung, welche Aktivitäten besser besonders früh und welche eher spät ausgeführt werden sollten.

Gleichmäßige Ressourcenauslastung Bei manchen Arten von Ressourcen ist die Intensität der Nutzung pro Zeitperiode aus praktischer Sicht ein wichtiger Indikator für einen guten Projektplan. Während es z.B. bei einem auf Lager liegenden Rohstoff weitgehend egal ist, wie viel man von diesem in den einzelnen Zeitperioden verbraucht, so kann dies z.B. bei einer Ressource *Arbeitszeit* schon anders aussehen, ebenso bei der Nutzung mehrerer teurer Maschinen. Werden solche Ressourcen als Ergebnis der Planung immer mal wieder sehr stark beansprucht, gefolgt von einigen Zeitperioden mit einer nur sehr geringen Beanspruchung, dann müsste das Unternehmen hohe Kapazitäten dieser Ressourcen bereithalten (und bezahlen), obwohl im Durchschnitt eine deutlich geringere Kapazität ausreichen würde.

Wenn diese Überlegungen in das Optimierungsmodell mit einfließen, so spricht man von dem *Resource Leveling*-Problem. Neumann und Zimmermann (2000) beschreiben dazu verschiedene Zielfunktionen für eine möglichst gleichmäßige Ressourcenauslastung, zwei davon werden im Folgenden vorgestellt:

$$\min \sum_{t \in \{0, \dots, T-1\}} |r_k(t) - Y_k| \quad (3.18)$$

$$\min \sum_{t \in \{1, \dots, T-1\}} |r_k(t) - r_k(t-1)| \quad (3.19)$$

Dabei bezeichnet $r_k(t)$ die Nutzung der Ressource k in Zeitperiode t . In der Zielfunktion (3.18) wird ein Referenzwert Y_k für die gewünschte Nutzungsintensität der Ressource k eingebracht. Ziel ist es jetzt, die Summe aller Abweichungen gegenüber diesem Referenzwert zu minimieren. In der zweiten Zielfunktion (3.19) wird dagegen die Summe der Abweichungen bei der Ressourcennutzung aller Zeitperioden gegenüber der jeweiligen vorherigen Zeitperiode minimiert. Dadurch wird ein insgesamt glatteres Ressourcennutzungsprofil erzeugt, ohne dass ein Referenzwert für die gewünschte Nutzung vorher berechnet und angegeben werden muss.

Kombination mehrerer Ziele In der praktischen Projektablaufplanung besteht oft die Anforderung, mehrere Ziele gleichzeitig berücksichtigen zu können (vgl. Kapitel 2.3.2). Zwei dafür geeignete Optimierungsansätze werden von Viana und de Sousa (2000) beschrieben.

Als erste Möglichkeit wird angenommen, dass es eine Menge von voneinander unabhängigen Zielfunktionen $f(x) = \{f_1(x), \dots, f_O(x)\}$ gibt. Das Optimierungsproblem wird jetzt hinsichtlich jeder dieser Funktionen optimal gelöst, wobei für jede dieser Lösungen auch die sich ergebenden Werte der jeweils anderen Zielfunktionen bestimmt werden. Aus dieser Menge der Lösungen werden zunächst alle dominierten Lösungen entfernt, wobei eine Lösung x dominiert wird, wenn es eine andere Lösung y gibt, für die $f_k(y) \leq f_k(x) \forall k$ gilt und $f(x) \neq f(y)$. Die Menge der nicht-dominierten Lösungen bildet dann die Paretofront, aus der der Projektmanager anschließend die für ihn beste Lösung aussuchen kann. Diese Herangehensweise ist sinnvoll, wenn sich die einzelnen Zielfunktionen inhaltlich stark voneinander unterscheiden und kein direkter Vergleich möglich ist, z.B. weil eine Zielfunktion einen Kapitalwert ausrechnet und die andere eine Pufferzeit.

Ist dagegen ein Vergleich der Werte der unterschiedlichen Zielfunktionen inhaltlich sinnvoll, so bietet sich als zweite Möglichkeit eine Gewichtung der Zielfunktionen an: $f(x) = f_1(x) * w_1 + \dots + f_O(x) * w_O$. Dieser Ansatz wird zum Beispiel von Abbasi u. a. (2006) und Al-Fawzan und Haouari (2005) verwendet, um die Minimierung der Verspätungen von Aktivitäten mit der Erhöhung der Pufferzeiten zu kombinieren. Die sich dabei ergebende Gesamtzielfunktion lautet

$$\min w^T * \sum_{i \in D} \max(0, f_i - t_i^D) - w^P * \sum_{i \in S^N} \min_{(k,j) \in A | k=i} (f_j - d_j) - f_i \quad (3.20)$$

wobei w^T der Gewichtungsfaktor für die Termineinhaltung und w^P der Gewichtungsfaktor zur Einplanung der Pufferzeit ist. Wenn in diesem Fall z.B. $w^T = 1$ und $w^P = 0.1$ gesetzt sind, dann bedeutet das, dass es im Entscheidungsfall für

eine zusätzliche Verspätung einer Aktivität von einer Zeitperiode möglich sein müsste, bei anderen Aktivitäten mindestens 10 Zeitperioden Puffer einzubauen. Dadurch überwiegt das Ziel die Termine einzuhalten deutlich gegenüber dem Einbau von Puffern, die Puffer würden also wahrscheinlich nur dann eingebaut, wenn dies ohne Terminverzögerung möglich ist.

3.5.2. Klassifikation und Integration in heuristische Lösungsverfahren

Die im vorherigen Abschnitt 3.5.1 vorgestellten Zielfunktionen lassen sich (ggf. nach Umformung oder mit Hilfsvariablen) alle in einem MIP-Modell abbilden und anschließend mit einem Standard Branch&Bound-Verfahren lösen. Da jedoch solche exakten Verfahren bei größeren Modellen aufgrund ihrer Laufzeit nicht mehr eingesetzt werden können (vgl. Abschnitt 3.2), soll in diesem Abschnitt eine Übersicht darüber gegeben werden, ob und in wie weit es bisher möglich ist, diese Zielfunktionen auch in heuristischen Lösungsverfahren einzusetzen.

Eine Zielfunktion wird als *reguläre Zielfunktion* bezeichnet, wenn für zwei mögliche Fertigstellungszeitpunkte f_i^1, f_i^2 einer beliebigen Aktivität gilt (vgl. Neumann u. a. (2003, S. 199)):

$$f_i^1 < f_i^2 \rightarrow f^\Delta(f_i^1) \leq f^\Delta(f_i^2)$$

Dabei beschreibt $f^\Delta(t)$ den Anteil am Gesamtwert der Zielfunktion, der sich bei einer Fertigstellung der Aktivität i zum Zeitpunkt t ergibt. Es wird also bei regulären Zielfunktionen angenommen, dass bei der Wahl zwischen einer frühen und einer späteren Fertigstellung ohne Beeinflussung der anderen Aktivitäten immer die frühere Fertigstellung als mindestens gleichwertig oder besser erachtet wird. Von den im vorherigen Abschnitt vorgestellten Zielfunktionen gehört die C_{\max} -Zielfunktion (3.11), die Minimierung der Verspätung (3.12) und die Maximierung des Kapitalwerts bei positiven Geldflüssen (3.17) zu den regulären Zielfunktionen.

Zur Lösung des RCPSP unter einer regulären Zielfunktion eignet sich das serielle Einplanungsschema mit der vorwärtsgerichteten Planung, da hier versucht wird, die Aktivitäten so früh wie möglich einzuplanen (vgl. Abschnitt 3.3.1). Sollen dagegen Aktivitäten so spät wie möglich geplant werden, kann man das rückwärtsgerichtete serielle Einplanungsschema anwenden. Die ebenfalls in Abschnitt 3.3.1 vorgestellte Kombination aus vorwärts- und rückwärtsgerichtetem Einplanungsschema bietet sich an, um an genau einer Stelle im Plan einen Puffer einzuplanen, in diesem Fall würden alle Aktivitäten vor dem Puffer vorwärts und alle Aktivitäten danach rückwärts geplant.

Liefert dagegen nicht die früheste oder die späteste Platzierung einer Aktivität den besten Beitrag zum Zielfunktionswert, sondern irgendeine Position dazwischen, dann ist es weder mit der Vorwärtsplanung noch mit der Rückwärtsplanung möglich, auf eine dafür möglichst gute Lösung hinzuoptimieren (z.B. bei der Minimierung der Ver-

frühung und Verspätung (3.13), bei Zeitfenstern (3.14) und ggf. bei kostenorientierter Optimierung (3.16)). Das ist auch der Fall, wenn anhand der Position einer einzelnen Aktivität keine Aussage über die Qualität der Lösung gemacht werden kann, sondern wenn eine bestimmte relative Platzierung mehrerer Aktivitäten zueinander erreicht werden soll (z.B. beim Einbau von Zeitpuffern (3.15), beim Optimieren der Ressourcenausnutzung (3.18)/(3.19) oder bei kombinierten Zielfunktionen (3.20)).

Bei genauerer Untersuchung der Veröffentlichungen zu den zuvor vorgestellten Zielfunktionen zeigt sich, dass im Fall von nicht regulären Zielfunktionen sehr oft ein exakter Branch&Bound-Ansatz vorgeschlagen wird, um das Problem zu lösen (vgl. Neumann und Zimmermann (2000) für Resource Leveling, Maniezzo und Mingozzi (1999) für Kostenfunktionen, Vanhoucke (2006) für Zeitfenster oder Van de Vonder u. a. (2007) für Minimierung von Verfrühungen und Verspätungen). In all diesen Fällen wird dann auch stets nur mit vergleichsweise kleinen Testinstanzen die Effektivität der Algorithmen demonstriert. Heuristiken oder Metaheuristiken für nicht reguläre Zielfunktionen werden nur in einigen Einzelfällen vorgeschlagen, so entwickelten sowohl Abbasi u. a. (2006) als auch Al-Fawzan und Haouari (2005) jeweils angepasste Metaheuristiken für den speziellen Fall der Einplanung von Zeitpuffern, indem sie nach der übergeordneten Minimierung von Verspätungen versuchen, an einzelne Stellen gezielt Puffer in den Plan zu bauen.

Es zeigt sich, dass die in der Literatur vorgeschlagenen heuristischen Lösungsverfahren für das RCPSP in fast allen Fällen für eine spezielle Zielfunktion entworfen wurden und einen Plan dann auch nur hinsichtlich dieser Zielfunktion optimieren können. Dies macht jedoch einen möglichst breiten Praxiseinsatz schwierig, da es hier stark vom betrachteten Einzelfall abhängen kann, hinsichtlich welcher Ziele ein Plan jetzt optimiert werden soll (vgl. Kapitel 2.2).

Einen ersten Ansatz zu einer zielfunktionsunabhängigen Lösungsheuristik liefern (Neumann u. a., 2003, S. 265–267). Sie schlagen vor, zu jeder Aktivität zunächst die Menge ihrer möglichen Platzierungen im späteren Plan aufzuzählen und daraus dann eine sortierte Liste zu erstellen. Die Sortierung jeder dieser Listen hängt vom Einfluss der jeweiligen Aktivität auf die Zielfunktion ab, es wird so sortiert, dass die am meisten gewünschte Platzierung am Anfang der Liste steht und die am wenigsten gewünschte am Ende. Die Autoren zeigen anhand verschiedener Zielfunktionen, wie im jeweiligen Fall die Sortierung der Listen der beteiligten Aktivitäten aussehen müsste. Für die eigentliche Einplanung einer Aktivität schlagen sie dann vor, dass serielle Einplanungsschema zu verwenden. Jedoch wird dabei eine einzuplanende Aktivität nicht auf ihre frühestmögliche Position gesetzt (vgl. Abschnitt 3.3.1), sondern es wird die erste Platzierung der Liste gewählt, die aufgrund von Vorrangbeziehungen und noch vorhandenen Ressourcen möglich ist. Dadurch können abhängig von der im Einzelfall gewählten Zielfunktion passende Platzierungen der Aktivitäten erreicht werden.

Das Verfahren von Neumann u. a. (2003) hat jedoch den Nachteil, dass für eine einzuplanende Aktivität A_1 immer direkt die lokal beste Platzierung gewählt wird. Dadurch wird ggf. verhindert, dass eine danach einzuplanende Aktivität A_2 eben-

falls möglichst nah an ihrem lokalen Optimum platziert wird, wenn z.B. A_1 möglichst spät und A_2 möglichst früh im Plan platziert werden sollte. Durch das Ausprobieren unterschiedlicher Aktivitätenlisten (wie von den Autoren auch in Form einer Tabusuche vorgeschlagen) können in manchen Fällen andere Sortierungen und damit auch andere mögliche lokale Optima der Aktivitäten erreicht werden. Da jedoch aufgrund von Vorrangbeziehungen manche Aktivitäten immer vor bzw. hinter manchen anderen Aktivitäten in der Aktivitätenliste einsortiert werden, können ggf. die immer hinten einsortierten Aktivitäten ihrem lokalen Optimum nie nahe genug kommen, obwohl das für das Erreichen des globales Optimums eventuell nötig wäre.

4. Ziele der Arbeit

In den vorherigen zwei Kapiteln wurde sich mit dem aktuellen Stand und den Anforderungen der Projektablaufplanung als Teilbereich des Projektmanagements beschäftigt. Diese Analyse wurde in zwei Bereiche aufgeteilt. Zum einen wurden in Kapitel 2 aus Sicht eines Projektmanagers die praktischen Aspekte und Anforderungen beschrieben und ausgewertet, zum anderen wurde dann in Kapitel 3 eine Literaturrecherche zur Definition, Einordnung und Lösung des Problems der Projektablaufplanung aus Sicht der Forschung zu mathematischen Optimierungsmethoden durchgeführt.

Konkret hat sich in Kapitel 2 gezeigt, dass in den letzten Jahrzehnten durch die Veränderungen im Projektmanagement eine Lücke zwischen den mit diesen Veränderungen einhergehenden veränderten Anforderungen an eine effektive und effiziente Planungsunterstützung auf der einen Seite und den für den breiten Einsatz zur Verfügung stehenden wissenschaftlichen Planungsunterstützungsmethoden auf der anderen Seite entstanden ist. Es wurde aufgezeigt, dass immer mehr Projekte gemeinsam mit anderen Projekten in einem Multiprojektkontext geplant und durchgeführt werden und die zu betrachtende Gesamtgröße eines Plans dadurch auf bis zu mehrere hundert Aktivitäten angewachsen ist. Jedoch sei diese Entwicklung noch nicht ausreichend bei der Erforschung breit einsetzbarer Lösungsmethoden berücksichtigt worden, kommerzielle Planungssoftware setze aus Geschwindigkeitsgründen immer noch sehr einfache Optimierungsmethoden ein, die jedoch schon bei etwas größeren Plänen mit mehr als 30 Aktivitäten keine guten Lösungen mehr erzeugen, wie verschiedene Autoren gezeigt haben. Weiterhin haben diese einfachen Methoden den Nachteil, dass sie nicht in der Lage sind, weitere praxisrelevante Planungsaspekte bei der Optimierung zu berücksichtigen. Dabei wird zum einen ein flexibleres Ressourcenmodell gefordert, bei dem die benötigten Ressourcen von Aktivitäten nicht im Vorfeld der Planung auf eine feste Aktivitätendauer und einen damit verbundenen konstanten Ressourcenbedarf festgelegt werden müssen. Zum anderen wird gezeigt, dass die bisher mögliche Optimierung hinsichtlich einer möglichst kurzen Projektdurchlaufzeit für den Praxiseinsatz unzureichend ist, da dort oft noch weitere individuelle Zielvorgaben wie die angemessene Berücksichtigung von Risiko, die Einhaltung von Terminen oder ein kostenschonender Umgang mit den Ressourcen berücksichtigt werden müssen.

Die Literaturrecherche in Kapitel 3 hat dann gezeigt, dass diese Anforderungen im Einzelnen zwar schon gut erforscht wurden, es bisher aber noch keine Lösungsmethoden gibt, die ein flexibles Ressourcenmodell bieten und einen Plan hinsichtlich verschiedener Zielvorgaben optimieren können, die aber auch gleichzeitig so effizient

arbeiten, dass sie auch größere Pläne möglichst schnell lösen können. Als wesentliche Punkte lassen sich dabei die folgenden Punkte festhalten:

Das Grundmodell des Resource Constrained Project Scheduling Problems (RCPSP) unterstützt nur konstante Dauern und konstante Ressourcenbedarfe und wird hinsichtlich der Minimierung der Projektdurchlaufzeit optimiert. Literaturübersichten wie z.B. Hartmann und Briskorn (2010) lassen erkennen, dass besonders die Formulierung als MIP in Kombination mit einem generischen Branch&Bound-Algorithmus aufgrund ihrer sehr einfachen Erweiterbarkeit gerne eingesetzt wird, wenn es darum geht, neue Aspekte der Planung in das RCPSP zu integrieren oder es unter anderen Zielfunktionen zu lösen. Die in Abschnitt 3.2 vorgestellten Untersuchungen zeigen jedoch, dass es trotz jahrelanger Forschung selbst auf aktueller Hardware mit speziell angepassten Algorithmen schwierig ist, Instanzen mit mehr als 30 Aktivitäten in akzeptabler Zeit zu lösen. Da die in der Praxis vorkommenden Problem instanzen laut der Analyse von Kapitel 2.3.1 jedoch mit bis zu 150 Aktivitäten um ein Vielfaches größer sind, erscheint es auch ohne die Berücksichtigung der weiteren praxisrelevanten Aspekte sehr unwahrscheinlich, dass im Rahmen dieser Arbeit neue exakte Verfahren entwickelt werden können, die solche großen Instanzen schnell lösen können.

Zur Verbesserung der Lösungszeit wurden heuristische Lösungsverfahren entwickelt und immer wieder verbessert. Im Kern steht dabei fast immer das serielle Einplanungsschema, das auf Basis einer sortierten Aktivitätenliste sehr schnell einen gültigen Plan erzeugen kann. Es wurde gezeigt, dass sich verschiedene Metaheuristiken, insbesondere genetische Algorithmen, sehr gut dafür eignen, eine gute Sortierung der Aktivitätenliste und damit automatisch auch eine gute Lösung des Planungsproblems auch bei größeren Problem instanzen zu finden. Allerdings ist das serielle Einplanungsschema selber und auch die darauf aufbauenden Metaheuristiken nur in der Lage, das RCPSP bezüglich Zielfunktionen zu optimieren, bei denen eine möglichst frühe Platzierung aller Aktivitäten gewünscht ist (reguläre Zielfunktionen). Eine Analyse von verschiedenen Zielfunktionen zu den zuvor genannten Zielvorgaben der Planung hat jedoch gezeigt, dass eine solche frühe Platzierung bei allen Aktivitäten oft nicht zur besten Lösung führt. Soll ein Problem unter diesen anderen Zielfunktionen gelöst werden, wurden fast immer exakte aber dafür langsame Algorithmen verwendet, in Einzelfällen wurden Heuristiken speziell auf eine andere Zielfunktion angepasst. Es scheint so, als ob es bisher nur sehr wenige Bemühungen gab, heuristische Lösungsverfahren für das RCPSP zu entwickeln bei denen man die Zielfunktion wie bei einem exakten Verfahren in gewissen Grenzen frei auswählen kann. Ein erster Ansatz von Neumann u. a. (2003) für das serielle Einplanungsschema geht zwar in diese Richtung, führt jedoch je nach Zielfunktion nur zu lokalen Optima.

Das RCPSP mit flexiblen Ressourcen wurde von verschiedenen Forschern beschrieben und heuristisch gelöst, weiterhin wurden exakte Lösungsverfahren aufgrund ihrer langen Laufzeit speziell für dieses erweiterte Modell ausgeschlossen. Besonders das von Kolisch u. a. (2003) vorgeschlagene modifizierte serielle Einplanungsschema scheint hierfür sehr gut geeignet zu sein, da es zum einen auf eine explizite Enumeration aller

möglichen Ausführungsmodi einer Aktivität verzichtet und dadurch prinzipiell besser zum Lösen von Instanzen mit sehr vielen Aktivitäten und sehr vielen Ausführungsmodi pro Aktivität geeignet sein müsste. Zum anderen arbeitet es durch diese fehlende explizite Enumeration nur auf einer Aktivitätenliste und würde sich daher gut analog zum klassischen RCPSP für eine Einbettung in eine Metaheuristik eignen.

Weiterhin fällt auf, dass das RCPSP mit flexiblen Ressourcen bisher nur in der Form untersucht wurde, dass es entweder insgesamt nur eine Ressource gab, die dann flexibel zugewiesen wurde, oder dass es bei einer vorgegebenen Dauer und damit verbundenen konstanten Ressourcenbedarfen eine weitere ausgezeichnete Ressource gab, die dann flexibel von allen Aktivitäten genutzt werden konnte. Ein allgemeines Modell und dazu passende Lösungsverfahren, bei dem Ressourcen beliebig sowohl flexibel als auch konstant durch verschiedene Aktivitäten genutzt werden können, wurde bis jetzt noch nicht entwickelt.

Es lässt sich schlussfolgern, dass schnelle Lösungsmethoden für das RCPSP mit einem flexiblen Ressourcenmodell und anpassbaren Zielfunktionen aus praktischer Sicht erforderlich wären, von der Forschung bisher aber nur unzureichend untersucht und entwickelt wurden. Für den weiteren Verlauf dieser Arbeit werden daher die folgenden drei Ziele definiert:

1. **Das RCPSP-Modell $PS|prec|$ soll dahingehend erweitert werden, dass eine flexible Ressourcennutzung von Aktivitäten abgebildet werden kann.** Bei dieser Formulierung soll sich an der Modellbeschreibung von Kolisch u. a. (2003) orientiert werden. Es ist jedoch das Ziel, dass die Art der Ressourcennutzung in diesem neuen Modell keinen Einschränkungen unterliegt, d.h. eine Ressource kann von Aktivitäten wahlweise flexibel oder konstant genutzt werden und es kann mehrere konstante und/oder flexible Ressourcenbedarfe pro Aktivität geben. Dadurch sollen zum einen möglichst wenig Einschränkungen für eine praktische Anwendbarkeit vorhanden sein, zum anderen ist so auch eine vollständige Abwärtskompatibilität zu $PS|prec|$ gegeben, sodass vorhandene Testinstanzen wie von Kolisch und Sprecher (1997) auch unverändert weiterhin genutzt werden können.

Neben der konzeptionellen Formulierung soll auch eine MIP-Formulierung erarbeitet werden, über die das Modell mit einem Standard MIP-Solver zum Zweck eines Vergleichs gegenüber heuristischen Lösungsverfahren gelöst werden kann.

2. **Zur schnellen Lösung des aufgestellten Modells soll ein heuristisches Optimierungsverfahren entwickelt werden.** Dazu soll zunächst das modifizierte Einplanungsschema von Kolisch u. a. (2003) für flexible Ressourcen auf das eben angesprochene allgemeinere Modell angepasst und mit dem genetischen Algorithmus von Hartmann (1998) kombiniert werden, da dieser GA auch schon beim klassischen $PS|prec|C_{\max}$ eine sehr gute Performance lieferte. Weiterhin

soll evaluiert werden, in wie weit sich der von Neumann u. a. (2003) vorgeschlagene Ansatz zur Unterstützung verschiedener Zielfunktionen mit diesem neuen heuristischen Verfahren kombinieren lässt. Dabei soll insbesondere gezeigt werden, wie der einzusetzende GA und das Verfahren von Neumann u. a. (2003) derart angepasst und verbunden werden können, dass der in Kapitel 3.5.2 aufgezeigte Nachteil eliminiert wird, durch den bisher bei manchen Zielfunktionen nur ein lokales Optimum gefunden werden konnte.

3. **Die Effektivität und Effizienz des entwickelten heuristischen Verfahrens soll anhand verschiedener Experimente demonstriert werden.** Dazu werden zunächst Einzelprojektpläne mit flexiblen Ressourcenbedarfen auf Basis der Instanzen von Kolisch und Sprecher (1997) erzeugt und unter regulären Zielfunktionen (C_{\max} , Verspätungen minimieren) zum einen mit dem neuen Verfahren und zum anderen mit bekannten Verfahren aus der Literatur für flexible Ressourcen gelöst und diese Ergebnisse anschließend verglichen.

Anschließend werden diese neue Einzelprojektpläne zu Multiprojektplänen zusammengebaut, um zu evaluieren, in wie weit sich das neue Verfahren auch zum Lösen unter nicht regulären Zielfunktionen eignet, wie z.B. der Minimierung von Verspätungen in Kombination mit dem Einbau von Zeitpuffern. Da es hierzu noch keine bekannten Verfahren in der Literatur gibt, mit denen ein Vergleich möglich wäre, werden diese Ergebnisse mit denen verglichen, die mit dem zuvor entwickelten MIP-Ansatz erzeugt werden konnten.

Zuletzt soll in einer Fallstudie gezeigt werden, dass es mit dem neuen Verfahren auch möglich ist, Pläne von der Größe und Struktur des in Kapitel 2.3.4 vorgestellten Praxisproblems in akzeptabler Zeit zu lösen.

5. Das Flexible Resource Constrained Project Scheduling Problem

In diesem Kapitel wird aufgezeigt, wie die in Kapitel 4 definierten Anforderungen an eine erweiterte ressourcenbeschränkte Projektablaufplanung in einem Optimierungsmodell abgebildet werden können. Dazu wird zunächst ein konzeptionelles Modell des Problems aufgestellt und diskutiert, welches im Gegensatz zu vergangenen Forschungsbeiträgen mehrere sowohl konstante als auch flexibel planbare Ressourcenbedarfe pro Aktivität unterstützt. Anschließend wird gezeigt, wie dieses Modell in ein MIP-Modell überführt werden kann, um es mit einem Standard MIP-Solver lösen zu können.

5.1. Modellformulierung

Im Folgenden wird das Grundmodell des RCPSP (vgl. Kapitel 3.1.1) durch die Hinzunahme von flexibel planbaren Ressourcenbedarfen zum *Flexible Resource Constrained Project Scheduling Problem* (FRCPSPP) erweitert (vgl. Kapitel 2.3.3). Dabei wird sich an den Formulierungen von Kolisch u. a. (2003) und Fündeling und Trautmann (2010) orientiert, wobei hier jedoch im Gegensatz zu den zwei Veröffentlichungen ein allgemeineres Konzept für flexible und konstante Ressourcenbedarfe vorgeschlagen wird. Für eine durchgängig einheitliche Notation in dieser Arbeit erfolgt die Benennung und Verwendung von Symbolen analog zu den in Kapitel 3 vorgestellten Modellen.

Dimensionen des Modells

T	Zeithorizont ¹	$t \in S^T = \{0, \dots, T\}$
N	Anzahl an Aktivitäten	$i \in S^N = \{1, \dots, N\}$
K	Anzahl der nicht erneuerbaren Ressourcen	$k \in S^K = \{1, \dots, K\}$

Entscheidungsvariablen

f_i	Fertigstellungszeitpunkt der Aktivität i (vgl. Abbildung 3.2)
d_i	Ausführungsdauer der Aktivität i
r_{ikt}	Ressourcennutzung der Aktivität i von Ressource k in Zeitperiode t
s_i	Hilfsvariable, bezeichnet den Startzeitpunkt von Aktivität i , ist fixiert als $s_i = f_i - d_i$
S	Hilfsmenge, bezeichnet einen kompletten Plan für die Bewertung durch die Zielfunktion, also die aktuelle Belegung aller f_i, d_i, r_{ikt}

¹Es gibt T Zeitperioden und $T + 1$ Zeitpunkte (vgl. Abbildung 3.2)

Modellparameter

$(i, j) \in A$	Menge der Ende-Start-Vorrangbeziehungen im Aktivitätennetzwerk, Tupel (i, j) beschreibt eine Ende-Start-Vorrangbeziehung zwischen zwei Aktivitäten i und j
\overline{d}_i	Maximal erlaubte Ausführungsdauer der Aktivität i
\underline{d}_i	Minimal erlaubte Ausführungsdauer der Aktivität i
\overline{r}_{ik}	Maximal erlaubte Nutzung der Ressource k von Aktivität i pro Zeitperiode
\underline{r}_{ik}	Minimal erlaubte Nutzung der Ressource k von Aktivität i pro Zeitperiode
$(i, k) \in F$	Menge der flexibel planbaren Ressourcenbedarfe, Tupel (i, k) beschreibt einen flexibel planbaren Bedarf an Ressource k von Aktivität i .
w_{ik}	Insgesamt benötigte Menge der Ressource k von Aktivität i (nur $\forall (i, k) \in F$ definiert)
a_{kt}	Verfügbarkeit der Ressource k in Zeitperiode t

Konzeptionelles Optimierungsmodell

$$\min f(S) \quad (5.1)$$

$$\text{s.t. } f_i \leq f_j - d_j, \quad \forall (i, j) \in A \quad (5.2)$$

$$\underline{d}_i \leq d_i \leq \overline{d}_i, \quad \forall i \in S^N \quad (5.3)$$

$$\underline{r}_{ik} \leq r_{ikt} \leq \overline{r}_{ik}, \quad \forall i \in S^N, k \in S^K, t \in \{s_i, \dots, f_i - 1\} \quad (5.4)$$

$$r_{ikt} = 0, \quad \forall i \in S^N, k \in S^K, t \in S^T \setminus \{s_i, \dots, f_i - 1\} \quad (5.5)$$

$$\sum_{i \in N} r_{ikt} \leq a_{kt}, \quad \forall k \in S^K, t \in S^T \quad (5.6)$$

$$\sum_{t=f_i-d_i}^{f_i-1} r_{ikt} = w_{ik}, \quad \forall (i, k) \in F \quad (5.7)$$

$$s_1 = 0 \quad (5.8)$$

$$f_N \leq T \quad (5.9)$$

Bei dem hier aufgestellten Modell wird der gesamte Projektablaufplan S hinsichtlich einer zu diesem Zeitpunkt noch anonymen Zielfunktion $f(S)$ optimiert (5.1). Die Restriktion (5.2) sorgt für die Einhaltung aller Ende-Start-Vorrangbeziehungen. Da die Dauer d_i einer Aktivität im Gegensatz zum klassischen RCPSP jetzt variabel ist und damit eine Entscheidungsvariable, wird sie über die Restriktion (5.3) bezüglich einer minimal und einer maximal erlaubten Dauer begrenzt. Gleiches gilt für die Nutzungsintensität r_{ikt} einer Ressource durch eine Aktivität in einer Zeitperiode, auch diese wird in den Zeitperioden, in denen die Aktivität ausgeführt wird, über die Restriktion (5.4) in vorgegebenen Grenzen gehalten und ansonsten über die Restriktion (5.5) auf

0 gesetzt. Die Restriktion (5.6) stellt sicher, dass in allen Zeitperioden nur maximal so viele Ressourcen verbraucht werden, wie verfügbar sind. Ist ein Ressourcenbedarf einer Aktivität flexibel planbar, so wird über die Restriktion (5.7) sichergestellt, dass über alle Zeitperioden der Ausführung der Aktivität insgesamt der gesamte Bedarf verplant wird. Zuletzt sorgen die Restriktionen (5.8) und (5.9) dafür, dass alle Aktivitäten innerhalb des Planungshorizonts verplant werden.

Modellierung von Ressourcenbedarfen

Ein Ressourcenbedarf (i, k) bedeutet, dass eine Aktivität i zu ihrer Ausführung eine Ressource k benötigt. Im klassischen RCPSP (vgl. Kapitel 3.1.1) werden solche Bedarfe derart abgebildet, dass für jede Aktivität eine feste Ausführungsdauer d_i vorgegeben ist und die Aktivität in jeder Zeitperiode ihrer Ausführung eine feste Menge r_{ik} einer Ressource benötigt, wobei es mehrere Bedarfe an unterschiedlichen Ressourcen pro Aktivität geben kann. Der Gesamtbedarf an einer Ressource ergibt sich so durch die Formel $d_i * r_{ik}$. In diesem Modell wurde das Konzept der flexibel planbaren Bedarfe (vgl. Kapitel 2.3.3) in der Form umgesetzt, dass die Dauer d_i sowie die Menge der verwendeten Ressource pro Zeitperiode der Ausführung r_{ikt} nicht mehr im Vorfeld auf bestimmte Werte fixiert sein muss. Wie in Abbildung 2.3 dargestellt kann so für flexibel planbare Bedarfe pro Zeitperiode entschieden werden, wie viele Ressourcen verwendet werden, wobei die Aktivität genau dann abgeschlossen ist, wenn eine zuvor festgelegte Gesamtmenge an Ressourcen w_{ik} verwendet wurde. Da sowohl die mögliche Dauer d_i als auch die Ressourcennutzung pro Zeitperiode r_{ikt} durch Minima und Maxima begrenzt werden können, können auf diesem Weg trotzdem auch noch wie im klassischen Modell konstante Bedarfe modelliert werden. Dadurch ergeben sich vier mögliche Ressourcenkonfigurationen einer Aktivität, welche, wie in Tabelle 5.1 gezeigt, modelliert werden können.

Aktivität i hat	Aktivitätendauer	Ein Bedarf (i, k) ist	
		konstant	flexibel
keine Bedarfe	$\underline{d_i} = \overline{d_i}$	—	—
nur konstante Bedarfe	$\underline{d_i} = \overline{d_i}$	$\underline{r_{ik}} = \overline{r_{ik}}$	—
nur flexible Bedarfe	$\underline{d_i} \leq \overline{d_i}$	—	$\underline{r_{ik}} < \overline{r_{ik}}$ + Restriktion (5.7)
flexible und konstante Bedarfe	$\underline{d_i} \leq \overline{d_i}$	$\underline{r_{ik}} = \overline{r_{ik}}$	$\underline{r_{ik}} < \overline{r_{ik}}$ + Restriktion (5.7)

Tabelle 5.1. – Mögliche Ressourcenkonfigurationen einer Aktivität

Hat eine Aktivität keinerlei Ressourcenbedarfe, so ist ihre Dauer fixiert. Im Falle der Blindaktivitäten am Anfang bzw. am Ende des Aktivitätennetzwerks wird die Dauer der Aktivität auf 0 fixiert, allgemein muss das aber nicht immer der Fall sein. Zur Modellierung von benötigten Zeitpuffern oder für Aktivitäten, die zwar zeitlich geplant werden müssen, die aber keine planbare Ressource erfordern, ist auch eine Fixierung der Dauer auf einen Wert > 0 denkbar.

Hat eine Aktivität nur konstante Bedarfe, so sollte ihre Dauer ebenfalls fixiert sein, da es im Gegensatz zu den flexibel planbaren Bedarfen über den Ressourcenverbrauch keine direkte Einschränkung zu dieser Dauer gibt. Die Grenzen des möglichen Ressourcenverbrauchs während der Ausführungszeit der Aktivität werden auf denselben Wert gesetzt. Damit verhält sich eine solche Aktivität exakt wie im Standardmodell des RCPSP (vgl. Abschnitt 3.1.1).

Hat eine Aktivität mindestens einen flexiblen Bedarf, so kann auch ihre Dauer variabel sein. Dabei sollten die Grenzen der Dauer und aller flexibel planbaren Bedarfe so gewählt sein, dass es prinzipiell möglich sein muss, die insgesamt benötigte Menge w_{ik} zu erfüllen, d.h. $\underline{d}_i * \underline{r}_{ik} \leq w_{ik} \leq \overline{d}_i * \overline{r}_{ik}$. Bei flexibel planbaren Bedarfen können die Begrenzungsparameter $\underline{d}_i, \overline{d}_i$ und $\underline{r}_{ik}, \overline{r}_{ik}$ benutzt werden, um Einschränkungen hinsichtlich einer aus praktischer Sicht sinnvollen Dauer und eines sinnvollen Ressourcenverbrauchs pro Zeitperiode vorzugeben.

Hat eine Aktivität sowohl flexible als auch konstante Bedarfe, so ist es prinzipiell denkbar, dass ihre Dauer weiterhin variabel ist. Es sollte bei diesem Anwendungsfall jedoch klar sein, dass dann für die konstanten Bedarfe die letztendlich insgesamt verbrauchte Menge an Ressourcen nicht vorher bekannt ist und sich erst bei der Optimierung durch die Wahl der tatsächlichen Aktivitätendauer d_i als $d_i * \underline{r}_{ik}$ ergibt. Ein solch großer Freiheitsgrad bei der Ressourcenplanung wird bisher in keiner anderen Veröffentlichung ermöglicht und soll deshalb in diesem Modell explizit berücksichtigt werden. So ist es aus praktischer Sicht denkbar, dass z.B. eine Aktivität eine bestimmte Menge an Stunden einer Personalressource benötigt, die flexibel geplant werden können und zusätzlich noch einen Arbeitsplatz als konstante Ressource. Der Arbeitsplatz wird dabei so lange benötigt, wie die Aktivität ausgeführt wird und diese Länge hängt letztendlich davon ab, wie viel Stunden der Personalressource in jeder Zeitperiode für die Fertigstellung zugeordnet werden.

Klassifizierung des Modells

Bei der Literaturrecherche wurde in Kapitel 3.1.2 gezeigt, wie sich die verschiedenen Varianten des RCPSP mit Hilfe des $\alpha|\beta|\gamma$ -Schemas von Brucker u. a. (1999) klassifizieren und vergleichen lassen. Es ist nicht bekannt, dass das FRCPS in der bisherigen Literatur hinsichtlich dieses Schemas eingeordnet wurde, deshalb wird für das zuvor vorgestellte FRCPS folgende Klassifizierung vorgeschlagen:

$\alpha = \textbf{FPS}$ Im Standardmodell wird die Ressourcenumgebung als $\alpha = PS$ (*Project Scheduling*) bezeichnet. Damit wird ausgedrückt, dass die benötigte Zeit für eine Aktivität, also die Dauer der Ausführung, und die Menge der benötigten Ressourcen während dieser Ausführung, konstant und im Vorfeld bekannt sind. Mit $\alpha = MPS$ (*Multi-Mode Project Scheduling*) bezeichnen Brucker u. a. (1999) den Fall, wenn es für eine Aktivität mehrere, im Vorfeld bekannte, Modi der Ausführung hinsichtlich Dauer und damit zusammenhängendem Ressourcenbedarf pro Zeitperiode geben kann. Im hier vorgestellten FRCPSP kann es für eine Aktivität auch mehrere mögliche Ausprägungen von Ausführungsdauer und Ressourcennutzung geben, jedoch kann jetzt die Ressourcennutzung zwischen mehreren Zeitperioden variieren, außerdem werden im Gegensatz zum *MPS*-Fall im Vorfeld nicht explizit alle möglichen Ausprägungen aufgezählt. Aus diesem Grund wird für das FRCPSP $\alpha = FPS$ (*Flexible Project Scheduling*) vorgeschlagen.

$\beta = \textbf{prec}$ Da in diesem Modell weiterhin nur Ende-Start-Vorrangbeziehungen berücksichtigt werden, wird wie beim klassischen RCPSP $\beta = prec$ gesetzt.

$\gamma = \cdot$ Analog zur Notation in der Ressourcenumgebung α (vgl. Kapitel 3.1.2) wird durch die Festlegung von $\gamma = \cdot$ ausgedrückt, dass die Zielfunktion an dieser Stelle noch beliebig ist und erst im weiteren Verlauf (vgl. Kapitel 5.2, 6.3 und 6.4) festgelegt wird.

Das FRCPSP in der zuvor aufgestellten Form wird somit an dieser Stelle und im weiteren Verlauf dieser Arbeit als $FPS|prec|\cdot$ hinsichtlich des $\alpha|\beta|\gamma$ -Schemas bezeichnet.

5.2. Ein exakter Lösungsansatz mit Mixed Integer Programming

Aufgrund der Indizes der Nebenbedingungen (5.4) und (5.5) ist das im vorherigen Abschnitt vorgestellte Modell des FRCPSP kein lineares Optimierungsmodell und kann somit auch nicht mit einem Standard-MIP-Solver gelöst werden. In diesem Abschnitt soll deshalb jetzt gezeigt werden, wie das zuvor vorgestellte konzeptionelle Modell in ein lineares, gemischt-ganzzahliges Optimierungsmodell überführt werden kann, damit es anschließend mit einem Standard-MIP-Solver exakt gelöst werden kann. Auch wenn die Literatur gezeigt hat, dass es mit exakten Verfahren nicht möglich ist, große Projektplanungsprobleme effizient zu lösen, soll hier zunächst ein solcher exakter Lösungsansatz vorgestellt werden. Dieser soll bei den Tests in Kapitel 7 und 8 verwendet werden, um einerseits die Aussage der mangelnden Effizienz auch für das FRCPSP nochmal zu evaluieren und andererseits, um für die verwendeten Testpläne untere Schranken auszurechnen, die dann zur Evaluation der heuristischen Lösungsverfahren herangezogen werden können.

Als Grundlage für ein MIP-Modell kommen die Modelle bisheriger Veröffentlichungen zum FRCPSP nicht in Frage. Kolisch u. a. (2003) stellen zwar ein Optimierungsmodell auf, in diesem Modell wird aber davon ausgegangen, dass jede Aktivität immer

nur einen Bedarf hat und dieser Bedarf auch immer flexibel planbar ist. Im Modell wird deshalb die Dauer der Aktivitäten nicht explizit berücksichtigt, diese ergibt sich nur aus dem Ressourcenverbrauch. Damit eignet es sich nicht für das hier zu lösende Problem, da nicht mehrere Ressourcenbedarfe pro Aktivität und vor allem keine konstanten Bedarfe/Dauern berücksichtigt werden können. Ein weiteres Modell stellt (Fündeling, 2006, S. 30) auf, er weist jedoch direkt darauf hin, dass es sich dabei nur um ein nichtlineares Konzeptmodell handelt und in der Form nicht direkt mit einem Standard-Solver gelöst werden kann. Im Folgenden soll deshalb ein bestehendes MIP-Modell für das klassische RCPSP erweitert werden, sodass damit auch das FRCPSPP gelöst werden kann. Als Grundlage wird dafür das Modell von Pritsker u. a. (1969) gewählt, was auch schon in Kapitel 3.2 vorgestellt wurde. Neuere Formulierungen, z.B. von Mingozzi u. a. (1998) oder Klein (2000), können das RCPSP zwar eventuell performanter lösen, nutzen dafür im Gegensatz zur Formulierung von Pritsker u. a. (1969) aber auch spezielle Eigenschaften der immer konstanten Ressourcenbedarfe und festen Dauern aus, die so beim FRCPSPP nicht immer gegeben sind.

Dimensionen des Modells

T	Zeithorizont	$t \in S^T = \{0, \dots, T\}$
N	Anzahl an Aktivitäten	$i \in S^N = \{1, \dots, N\}$
K	Anzahl der nicht erneuerbaren Ressourcen	$k \in S^K = \{1, \dots, K\}$

Modellparameter

$(i, j) \in A$	Menge der Ende-Start-Vorrangbeziehungen im Aktivitätennetzwerk, Tupel (i, j) beschreibt eine Ende-Start-Vorrangbeziehung zwischen zwei Aktivitäten i und j
$(f, d) \in P_i$	Mögliche Ausführungszeiträume der Aktivität i
\bar{d}_i	Maximal erlaubte Ausführungsdauer der Aktivität i
\underline{d}_i	Minimal erlaubte Ausführungsdauer der Aktivität i
\bar{r}_{ik}	Maximal erlaubte Nutzung der Ressource k von Aktivität i pro Zeitperiode
\underline{r}_{ik}	Minimal erlaubte Nutzung der Ressource k von Aktivität i pro Zeitperiode
$(i, k) \in F$	Menge der flexibel planbaren Ressourcenbedarfe, Tupel (i, k) beschreibt einen flexiblen Bedarf an Ressource k von Aktivität i .
w_{ik}	Insgesamt benötigte Menge der Ressource k von Aktivität i (nur $\forall (i, k) \in F$ definiert)
a_{kt}	Verfügbarkeit der Ressource k in Zeitperiode t

Im Gegensatz zum konzeptionellen Modell aus Abschnitt 5.1 werden in dieser Formulierung alle möglichen Ausführungszeiträume P_i einer Aktivität i explizit aufgezählt. Analog zu Pritsker u. a. (1969), bei deren Modell aufgrund der konstanten Dau-

ern nur alle möglichen Fertigstellungszeitpunkte von jeder Aktivität berücksichtigt werden müssen, werden in diesem Fall alle möglichen Kombinationen aus Fertigstellungszeitpunkt und Dauer einer Aktivität gebildet. Zur Berechnung der möglichen Ausführungszeitpunkte müssen zunächst mit der Vorwärts- und Rückwärtsrechnung die frühesten bzw. spätesten Start- und Endzeitpunkte jeder Aktivität bestimmt werden (vgl. Kapitel 3.2). Anschließend lässt sich die Menge P_i wie folgt definieren:

$$P_i = \{(f, d) | f \in \{EST_i, \dots, LFT_i\} \wedge d \in \{\underline{d}_i, \dots, \overline{d}_i\} \wedge f - d \leq LST_i\}$$

Entscheidungsvariablen

- $x_{ifd} \in \{0, 1\}$ Ausführungszeitraum der Aktivität i hat eine Dauer von d und endet zum Zeitpunkt f , $\forall i \in S^N, (f, d) \in P_i$
- $r_{ikt} \in \mathbb{R}^+$ Ressourcennutzung der Aktivität i von Ressource k in Zeitperiode t , $\forall i \in S^N, k \in S^K, t \in \{EST_i, \dots, LFT_i - 1\}$

MIP-Modell für $FPS|prec|C_{\text{Max}}$

$$\min \sum_{(f,d) \in P_N} x_{Nfd} * f \quad (5.10)$$

$$\text{s.t.} \quad \sum_{(f,d) \in P_i} x_{ifd} = 1, \quad \forall i \in S^N \quad (5.11)$$

$$\sum_{(f,d) \in P_i} x_{ifd} * f \leq \sum_{(f,d) \in P_j} x_{jfd} * (f - d), \quad \forall (i, j) \in A \quad (5.12)$$

$$\sum_{i \in N} r_{ikt} \leq a_{kt}, \quad \forall k \in S^K, t \in S^T \quad (5.13)$$

$$\sum_{t=EST_i}^{LFT_i-1} r_{ikt} = w_{ik}, \quad \forall (i, k) \in F \quad (5.14)$$

$$r_{ikt} \leq \sum_{(f,d) \in P_i | f-d \leq t < f} x_{ifd} * \overline{r_{ik}}, \quad \forall i \in S^N, k \in S^K, t \in \{EST_i, \dots, LFT_i - 1\} \quad (5.15)$$

$$r_{ikt} \geq \sum_{(f,d) \in P_i | f-d \leq t < f} x_{ifd} * \underline{r_{ik}}, \quad \forall i \in S^N, k \in S^K, t \in \{EST_i, \dots, LFT_i - 1\} \quad (5.16)$$

Für jeden möglichen Ausführungszeitraum $(f, d) \in P_i$ einer Aktivität i wird eine Binärvariable x_{ifd} angelegt und über die Restriktion (5.11) wird sichergestellt, dass pro Aktivität genau einer ihrer möglichen Ausführungszeiträume ausgewählt ist. Damit

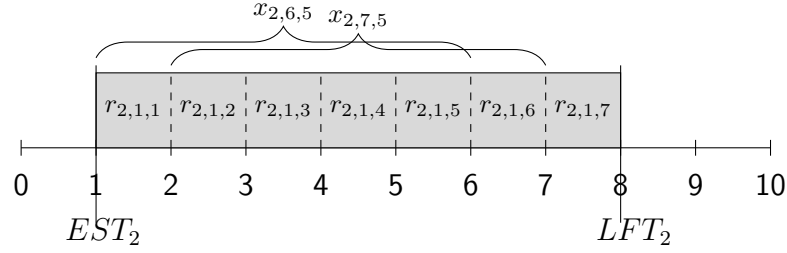


Abbildung 5.1. – Zusammenhang von möglichen Ausführungsperioden und Ressourcenallokationsvariablen (für eine angenommene Aktivität 2 mit einem Bedarf an einer Ressource 1)

lassen sich die entsprechenden Zeitpunkte einer Aktivität i mit den folgenden linearen Ausdrücken berechnen:

$$f_i = \sum_{(f,d) \in P_i} x_{ifd} * f \quad d_i = \sum_{(f,d) \in P_i} x_{ifd} * d \quad s_i = \sum_{(f,d) \in P_i} x_{ifd} * (f - d)$$

Damit lässt sich die C_{Max} -Zielfunktion (siehe Gleichung (3.11)) mit der Summe (5.10) abbilden, weiterhin wird analog zur Restriktion (5.2) des konzeptionellen Modells mit der Restriktion (5.12) sichergestellt, dass alle Vorrangbeziehungen zwischen den Aktivitäten eingehalten werden.

Die weiteren Restriktionen bzw. der Zusammenhang zwischen den Ressourcenallokationsvariablen r_{ikt} und den möglichen Ausführungszeiträumen x_{ifd} werden in Abbildung 5.1 verdeutlicht. Für jede mögliche Zeitperiode t , in der eine Aktivität i ausgeführt werden kann (frühester Startzeitpunkt bis spätester Endzeitpunkt) wird für jede benötigte Ressource k eine Ressourcenallokationsvariable r_{ikt} angelegt. Der gesamte Verbrauch einer bestimmten Ressource k^* in einer bestimmten Zeitperiode t^* lässt sich dadurch sehr einfach durch Aufsummieren aller $r_{ikt}, k = k^*, t = t^*$ begrenzen, wie in Restriktion (5.13) dargestellt. Der gesamte Ressourcenbedarf einer Aktivität, für den Fall, dass der Bedarf flexibel planbar ist, lässt sich jetzt ebenfalls einfach durch Aufsummieren aller Ressourcenallokationsvariablen der Aktivität sicherstellen (Restriktion (5.14)).

Zuletzt muss noch sichergestellt werden, dass über jede Ressourcenallokationsvariable einer Aktivität tatsächlich immer nur dann Ressourcen benutzt werden, wenn die entsprechende Variable zu einer Zeitperiode gehört, die innerhalb des aktuell gewählten Ausführungszeitraums der Aktivität liegt. In Abbildung 5.1 sind für eine angenommene Aktivität $i = 2$ zwei mögliche Ausführungszeiträume ($f = 6, d = 5$) und ($f = 7, d = 5$) eingezeichnet. Es wird ersichtlich, dass für einen Bedarf an Ressource 1 über die Variable $r_{2,1,1}(t = 1)$ nur dann Ressourcen allokiert werden dürfen, wenn der Ausführungszeitraum $x_{2,6,5}$ gewählt ist. Die Variable $r_{2,1,2}(t = 2)$ wird dagegen von

beiden eingezeichneten Ausführungszeiträumen abgedeckt, die Variable $r_{2,1,7}(t = 7)$ wiederum nur vom zweiten Ausführungszeitraum $x_{2,7,5}$. Dies wird im Optimierungsmodell mit den Restriktionen (5.15) und (5.16) erreicht. Wird eine Ressourcenallokationsvariable vom aktuell ausgewählten Ausführungszeitraum abgedeckt, so muss sich ihr Wert zwischen \underline{r}_{ik} und \overline{r}_{ik} bewegen, ansonsten wird er auf 0 fixiert.

Mit dem so aufgestellten Modell lassen sich sowohl das klassische RCPSP mit konstanten Ressourcenbedarfen als auch das in Abschnitt 5.1 beschriebene FRCPSP mit flexibel planbaren Bedarfen lösen. Hat eine Aktivität nur konstante Bedarfe, so ist ihre Dauer ebenfalls konstant und es wird genau wie bei der Formulierung von Pritsker u. a. (1969) (vgl. Kapitel 3.2) eine Binärvariable pro möglichem Fertigstellungszeitpunkt erstellt. Der Unterschied zu der Pritsker-Formulierung liegt darin, dass auch bei solchen rein konstanten Bedarfen noch die Ressourcenallokationsvariablen erstellt werden und auf den konstanten Bedarf fixiert werden. Dadurch wird ein mit dieser Formulierung aufgestelltes Optimierungsproblem immer deutlich mehr Variablen haben als die Pritsker-Formulierung. In wie weit sich das bei der Lösung von klassischen RCPSP-Problemen auswirkt und wie gut sich diese neue Formulierung zum Lösen von FRCPSP-Problemen eignet, wird in Kapitel 7.2 untersucht.

6. Eine Heuristik zur flexiblen Projektablaufplanung mit nichtregulären Zielfunktionen

Die Literaturrecherche hat gezeigt, dass das RCPSP und das allgemeinere FRCPSPP nicht effizient mit exakten Optimierungsmethoden gelöst werden können. In diesem Kapitel soll daher ein heuristischer Lösungsansatz erarbeitet werden, mit dem die Berechnung von nicht zwingend optimalen, aber zumindest sehr guten Lösungen innerhalb kurzer Zeit möglich ist.

Dazu wird zunächst das serielle Einplanungsschema von Kolisch u. a. (2003) angepasst. Dieses kann in der damals veröffentlichten Form nur einen Ressourcenbedarf pro Aktivität flexibel planen, außerdem unterstützte es nur reguläre Zielfunktionen. In dieser Arbeit wird es dahingehend erweitert, dass auch mehrere flexibel planbare und konstante Ressourcenbedarfe pro Aktivität berücksichtigt werden können (vgl. Modell (5.1)–(5.9)) und dass Aktivitäten zur Umsetzung von nichtregulären Zielfunktionen nicht mehr zwingend so früh wie möglich eingeplant werden. Für die Berücksichtigung solcher nichtregulärer Zielfunktionen wird ein Konzept von Neumann u. a. (2003) als Grundlage genommen und erweitert, welches auf der Bewertung der Platzierungen der Aktivitäten basiert.

Durch das so erweiterte Einplanungsschema wird auch eine Erweiterung der Lösungsrepräsentation nötig, da die bisher in der Literatur genutzten sortierten Aktivitätenlisten alleine nicht ausreichen, um auch die Informationen über die Dauern der Aktivitäten und deren gewünschte Platzierung zur Erreichung der Zielfunktion zu speichern. Durch diese stark erweiterte Lösungsrepräsentation ist es nun nicht mehr möglich, die bekannten Metaheuristiken aus der Literatur zu nutzen, um diese zu verbessern. Aus diesem Grund wird im weiteren Verlauf des Kapitels ein neu entwickelter genetischer Algorithmus auf Basis des genetischen Algorithmus von Hartmann (1998) vorgestellt, welcher auch mit dieser erweiterten Lösungsrepräsentation umgehen kann.

Zuletzt wird gezeigt, wie man die verschiedenen Zielfunktionen aus Kapitel 3.5 in der neuen Lösungsrepräsentation abbilden kann und es werden alternative Varianten für einzelne Teile der hier entwickelten Algorithmen vorgestellt. Eine genaue Evaluation dieser Verfahren und der möglichen Alternativen wird dann in Kapitel 7 durchgeführt.

6.1. Ein Einplanungsschema für flexible Ressourcen und nichtreguläre Zielfunktionen

Das klassische serielle Einplanungsschema für $PS|prec|C_{\max}$ (vgl. Kapitel 3.3.1) plant die Aktivitäten nacheinander nach einer zuvor festgelegten Reihenfolge unter Berücksichtigung der Ressourcenbedarfe.

sichtigung von Vorrangbeziehungen und vorhandenen Ressourcen so früh wie möglich in den Projektplan ein. Wenn eine bestimmte Aktivität eingeplant wird, ist durch die Sortierung der Aktivitätenliste sichergestellt, dass mindestens alle direkten Vorgänger der Aktivität bereits eingeplant wurden und es dadurch eine Menge noch vorhandener Ressourcen gibt, die ggf. geringer ist als die Menge der am Anfang der Planung verfügbaren Ressourcen. Die Prüfung, ob eine bestimmte Aktivität i an einer Position s_i starten kann, ist dann vergleichsweise trivial, da die Dauer im Vorfeld bekannt ist und über diese Dauer hinweg lediglich eine konstante Menge an Ressourcen verfügbar sein muss und $s_i \geq \max \{f_j | \forall (j, i) \in A\}$ gelten muss.

Kolisch u. a. (2003) gehen von maximal einem flexibel planbaren Ressourcenbedarf pro Aktivität aus und berücksichtigen auch keine minimale oder maximale Dauer von Aktivitäten. Somit kann in ihrem erweiterten Einplanungsschema eine Aktivität genau dann zum Zeitpunkt s_i starten, wenn es aufgrund von verfügbaren Ressourcen möglich ist, in den auf s_i folgenden Zeitperioden so lange so viele Ressourcen wie möglich, aber mindestens immer die minimale Menge r_{ik} , zu allokalieren, bis der Gesamtbedarf w_{ik} der Aktivität erfüllt ist. Bei diesem Ansatz werden die Ressourcen in einem Greedy-Verfahren so früh wie möglich innerhalb der Ausführungszeit der Aktivität allokiert und anschließend auch nicht mehr verändert. Damit wird die Ressourcenzuweisung, d.h. die Belegung der r_{ikt} -Entscheidungsvariablen, als reines Erfüllbarkeitsproblem betrachtet, welches der Optimierung der Platzierung einer Aktivität untergeordnet ist. Aufgrund der häufig verwendeten Zielfunktionen (vgl. Kapitel 3.5.1) und der praxisrelevanten Aspekte (vgl. Kapitel 2.3.2) erscheint diese Vereinfachung auch für das Ziel dieser Arbeit legitim. Im Folgenden wird deshalb zur Entwicklung eines Verfahrens für nicht-reguläre Zielfunktionen angenommen, dass zunächst nur zeitbasierte Zielfunktionen unterstützt werden, d.h. solche, in denen lediglich die Platzierung der Aktivitäten von Relevanz ist, nicht jedoch die Ressourcennutzung. In Abschnitt 6.4 dieses Kapitels wird jedoch erklärt, wie trotz dieser jetzt getroffenen Einschränkung z.B. die Optimierung der Ressourcenauslastung (siehe Gleichung (3.18) oder (3.19)) dennoch zumindest teilweise möglich ist.

Da das Verfahren von Kolisch u. a. (2003) lediglich einen flexibel planbaren Ressourcenbedarf pro Aktivität unterstützt und es keine Einschränkung hinsichtlich der Dauer der Aktivität gibt, ergibt sich die resultierende Dauer direkt aus der Anzahl an Zeitperioden, in denen Ressourceneinheiten allokiert wurden und bei der Allokation der Ressource muss auf keine anderen Ressourcen Rücksicht genommen werden. Bei dem in Kapitel 5.1 beschriebenen Problem $FPS|prec|$ gibt es jedoch eine untere und obere Grenze $\underline{d}_i, \overline{d}_i$ für die Dauer jeder Aktivität, ebenso kann es mehrere, sowohl flexibel planbare als auch konstante Ressourcenbedarfe pro Aktivität geben. Es müssen jetzt also für alle vorhandenen Bedarfe jeweils Ressourcennutzungsprofile gefunden werden, die alle zur gleichen, gültigen Dauer führen. Dazu wird der Algorithmus zur Einplanung einer Aktivität derart abgeändert, dass nun nicht mehr nur geprüft wird, ob eine bestimmte Startzeit s_i möglich ist (und sich die Dauer daraus ergibt), sondern es wird für diese Prüfung auch eine Dauer d_i vorgegeben.

Einplanung einer Aktivität an eine vorgegebene Position

Das Tupel (s_i, d_i) beschreibt eine beliebige zeitliche Platzierung der Aktivität i . Mit dem Algorithmus 1 kann nun ermittelt werden, ob diese Platzierung auch gültig ist, d.h. ob es unter Berücksichtigung noch vorhandener Ressourcen und Vorrangbeziehungen möglich ist, die Aktivität tatsächlich an diese Position einzuplanen. Dabei wird angenommen, dass mindestens alle direkten Vorgängeraktivitäten von i bereits eingeplant wurden und deren Platzierungen somit bekannt sind. Werden die Aktivitäten in der Reihenfolge einer gültigen Aktivitätenliste (vgl. Kapitel 3.3.1 Gleichung (3.10)) eingeplant, ist dies durch die Sortierung der Liste immer sichergestellt.

Es werden nun zunächst die trivialen Fälle abgeprüft, ob die zu testende Platzierung außerhalb ihrer frühesten bzw. spätesten Anfangs- und Endzeiten liegt (Zeilen 1–2) oder ob die Aktivität damit vor dem Ende einer ihrer Vorgängeraktivitäten starten würde (Zeile 3). In beiden Fällen wäre eine Platzierung an dieser Position nicht möglich.

Anschließend wird geprüft, ob an der vorgegebenen Position für alle Ressourcenbedarfe ein gültiges Ressourcennutzungsprofil gefunden werden kann. Dazu wird zunächst eine Kopie der Variable der noch verfügbaren Ressourcen angelegt (Zeile 4), auf der im weiteren Verlauf gearbeitet werden kann. Weiterhin wird die Variable zur Speicherung der Ressourcenallokation pro Zeitperiode und Ressourcenbedarf zunächst mit 0 initialisiert (Zeile 5). Für jede im Modell vorhandene Ressource werden nun die Bedarfe der Aktivität geplant (ab Zeile 6). Eine temporäre Variable w_{ik}^* speichert den jeweils bereits zugeordneten Gesamtverbrauch an einer Ressource für eine Aktivität und wird zu Anfang der Schleife mit 0 initialisiert (Zeile 7). Anschließend wird in einer ersten inneren Schleife die minimalen Ressourcenbedarfe pro Zeitperiode zugeordnet (Zeilen 8–13). Ist es in einer Zeitperiode der gewünschten Platzierung aufgrund zu wenig verfügbarer Ressourcen nicht möglich, die minimal nötige Ressourcenmenge zu belegen, so kann die Aktivität an dieser Stelle nicht platziert werden und der Algorithmus kann abbrechen (Zeile 9). Andernfalls wird für jede Zeitperiode die Ressourcenverfügbarkeit entsprechend der minimal nötigen Menge reduziert (Zeile 10) und diese minimal nötige Menge wird zum einen auf die insgesamt zugewiesene Menge addiert (Zeile 11) und für die jeweilige Zeitperiode als dort allokierte Menge gespeichert (Zeile 12).

Handelt es sich bei dem Bedarf zur aktuell zu planenden Ressource um einen konstanten Bedarf, so gibt es für diesen keine Gesamtmenge w_{ik} , außerdem entspricht $r_{ik} = \overline{r_{ik}}$. Somit sind konstante Bedarfe zum Ende der Schleife in Zeile 13 bereits komplett eingeplant. Bei flexibel planbaren Bedarfen dagegen ist an dieser Stelle zumindest schon mal sichergestellt, dass die in jeder Zeitperiode benötigte minimale Menge eingeplant werden konnte, es muss jetzt noch die zusätzlich benötigte Ressourcenmenge verplant werden, die sich aus der Differenz der Gesamtmenge w_{ik} und der bereits verplanten Menge w_{ik}^* ergibt. Dafür wird zunächst geprüft, ob bereits durch die Summe der minimal benötigten Mengen pro Zeitperiode die nötige Gesamtmenge überschrit-

6. Eine Heuristik zur flexiblen Projektablaufplanung mit nichtregulären Zielfunktionen

Algorithmus 1 : Einplanung einer Aktivität auf eine vorgegebene Platzierung

Input : Gewünschte Platzierung (s_i, d_i) , aktuelle Ressourcenverfügbarkeit a_{kt}
Data : Ressourcenbedarfe $w_{ik} \forall (i, k) \in F, \underline{r}_{ik}, \overline{r}_{ik} \forall i \in S^N, k \in S^K$
Result : Info ob die Aktivität platziert werden konnte, aktualisierte Ressourcenverfügbarkeit a_{kt} bei erfolgreicher Platzierung

```

1 if  $s_i < EST_i \vee s_i > LST_i \vee d_i < \underline{d}_i \vee d_i > \overline{d}_i \vee s_i + d_i > LFT_i$  then
2   | return FEHLER
3 if  $s_i < \max \{f_j | \forall (j, i) \in A\}$  then return FEHLER
4  $a'_{kt} \leftarrow a_{kt} \quad \forall k \in S^K, t \in S^T$ 
5  $r_{ikt} \leftarrow 0 \quad \forall k \in S^K, t \in S^T$ 
6 foreach  $k$  in  $S^K$  do
7   |  $w_{ik}^* \leftarrow 0$ 
8   | for  $t = s_i$  to  $s_i + d_i - 1$  do
9     | if  $a'_{kt} < \underline{r}_{ik}$  then return FEHLER
10    |  $a'_{kt} \leftarrow a'_{kt} - \underline{r}_{ik}$ 
11    |  $w_{ik}^* \leftarrow w_{ik}^* + \underline{r}_{ik}$ 
12    |  $r_{ikt} \leftarrow \underline{r}_{ik}$ 
13  | end
14  | if  $(i, k) \text{ in } F \wedge w_{ik}^* \neq w_{ik}$  then
15    | if  $w_{ik}^* > w_{ik}$  then return FEHLER
16    | for  $t = s_i$  to  $s_i + d_i - 1$  do
17      |  $w^+ \leftarrow \min(w_{ik} - w_{ik}^*, a'_{kt}, \overline{r}_{ik} - \underline{r}_{ik})$ 
18      |  $w_{ik}^* \leftarrow w_{ik}^* + w^+$ 
19      |  $a'_{kt} \leftarrow a'_{kt} - w^+$ 
20      |  $r_{ikt} \leftarrow r_{ikt} + w^+$ 
21    | end
22    | if  $w_{ik}^* < w_{ik}$  then return FEHLER
23  | end
24 end
25  $a_{kt} \leftarrow a'_{kt}$ 
26 return OK

```

ten wurde (Zeile 15). Ist das der Fall, so ist die gewünschte Platzierung nicht möglich bzw. präziser ausgedrückt ist die gewählte Dauer der Platzierung zu lang, bezogen auf die benötigte Gesamtmenge der Ressource im Verhältnis zur minimal nötigen Menge pro Zeitperiode.

Es wird nun aufsteigend in jeder Zeitperiode der gewünschten Platzierung versucht, so viele weitere Ressourcen wie möglich der Aktivität zuzuordnen (Zeilen 16–21). Dabei wird in jeder Zeitperiode jedoch darauf geachtet, dass durch eine Zuordnung nicht die

maximal benötigte Menge an Ressourcen überschritten wird, dass nur maximal so viele Ressourcen zugeordnet werden wie in dieser Zeitperiode noch verfügbar sind und dass nicht eine höhere Ressourcenmenge zugeordnet wird, als es durch die vorgegebene maximale Menge an Ressourcen pro Periode erlaubt ist (Zeile 17). Die sich daraus ergebende Ressourcenmenge wird nun zur Gesamtmenge an zugeordneten Ressourcen hinzuaddiert (Zeile 18), von den noch verfügbaren Ressourcen abgezogen (Zeile 19) und zur zugeordneten Ressourcenmenge in der aktuellen Zeitperiode addiert (Zeile 20). Die Beschränkung in Zeile 17 sorgt also dafür, dass die Ressourcen so früh wie möglich belegt werden und in den späteren Zeitperioden der Platzierung ggf. nur noch die schon zuvor zugeordnete minimal benötigte Menge zugeordnet bleibt. War es jedoch auch über alle Zeitperioden hinweg nicht möglich, die benötigte Gesamtmenge an Ressourcen zuzuordnen, so ist eine Platzierung der Aktivität an dieser Stelle nicht möglich (Zeile 22).

Ist die äußere Schleife für alle Ressourcen erfolgreich durchgelaufen, so konnte die Aktivität an die gewünschte Position platziert werden. Da in der Funktion nur auf einer Kopie der Variable der noch verfügbaren Ressourcen gerechnet wurde, wird nun die originale Variable der noch verfügbaren Ressourcen entsprechend aktualisiert (Zeile 25), anschließend kann der Algorithmus erfolgreich terminieren.

Finden der besten Position für eine Aktivität

Der Algorithmus 1 hat geprüft, ob eine bestimmte Aktivität an eine vorgegebene Position eingeplant werden kann. Wenn dem so ist, wurde diese Einplanung auch direkt vorgenommen, d.h. die benötigten Ressourcen wurden der Aktivität zugeordnet und entsprechend wurden die noch verfügbaren Ressourcenmengen reduziert.

Um nun eine Aktivität an eine möglichst gute Position aus Sicht einer Zielfunktion einzuplanen, müssen zunächst alle möglichen Platzierungen ermittelt werden. Anschließend werden diese möglichen Platzierungen nacheinander durchprobiert, wobei die am meisten gewünschte Platzierung als erstes getestet wird und die am wenigsten gewünschte zuletzt. Sobald die Platzierung erfolgreich war, kann mit der nächsten Aktivität fortgefahren werden. War jedoch für alle möglichen Positionen keine Platzierung erfolgreich, so kann die Aktivität nicht eingeplant werden und der Projektplan kann insgesamt nicht berechnet werden.

Das ursprüngliche serielle Einplanungsschema und auch die Variante von Kolisch u. a. (2003) planen eine Aktivität so früh wie möglich ein, probieren also als erstes die frühestmögliche Startzeit aus und zuletzt die spätestmögliche Startzeit. Es wurde gezeigt, dass dadurch in Kombination mit der richtigen Einplanungsreihenfolge der Aktivitäten reguläre Zielfunktionen, wie die Minimierung der Projektlaufzeit, bestmöglich antizipiert werden und eine optimale Lösung gefunden werden kann (vgl. Kapitel 3.3.2). Da hier nun beliebige zeitbasierte Zielfunktionen unterstützt werden sollen, ist es nicht mehr möglich, bereits beim Entwurf des Einplanungsalgorithmus eine Reihenfolge zum Ausprobieren der möglichen Startzeiten festzulegen. Stattdessen

wird im Folgenden eine Notation zur Beschreibung dieser Reihenfolge vorgestellt, die dann Teil der Eingabedaten eines konkreten Optimierungsmodells wird und im Vorfeld aus der zu verwendenden Zielfunktion abgeleitet werden muss (Beispiele für verschiedene Zielfunktionen in Abschnitt 6.3). Dazu wird zunächst die Menge der möglichen Platzierungen P_i einer Aktivität i auf Basis der frühesten bzw. spätesten Start- und Endzeiten und der minimalen bis maximalen Dauer wie folgt definiert:

$$P_i = \{(s_{ix}, d_{iy}) | s_{ix} \in \{EST_i, \dots, LST_i\} \wedge d_{iy} \in \{\underline{d}_i, \dots, \overline{d}_i\} \wedge s_{ix} + d_{iy} \leq LFT_i\}$$

Zur Bewertung dieser möglichen Platzierungen wird jetzt für jede Aktivität eine zielfunktionsabhängige lokale Fitnessfunktion definiert:

$$k_i : (s_i, d_i) \rightarrow \mathbb{R}$$

Diese Funktion weist einer möglichen Platzierung (s_i, d_i) der Aktivität i einen lokalen Fitnesswert zu. Dieser lokale Fitnesswert spiegelt die Attraktivität einer möglichen Platzierung wieder, ist jedoch zunächst unabhängig von dem tatsächlichen Beitrag einer bestimmten Platzierung zum eigentlichen Zielfunktionswert der Optimierung. Er dient lediglich dazu, mehrere mögliche Platzierungen untereinander zu vergleichen, deshalb wird festgelegt, dass die k_i -Funktion so definiert sein muss, dass aus $k_i(s_i^1, d_i^1) > k_i(s_i^2, d_i^2)$ folgt, dass die Platzierung (s_i^1, d_i^1) lokal betrachtet im Sinne der Zielfunktion gegenüber der Platzierung (s_i^2, d_i^2) bevorzugt wird. Eine möglichst frühe Platzierung einer Aktivität mit einer dann möglichst kurzen Dauer (analog zum Optimierungsziel von Kolisch u. a. (2003)) könnte so z.B. über die Funktion

$$k_i(s_i, d_i) = -s_i - \epsilon * d_i$$

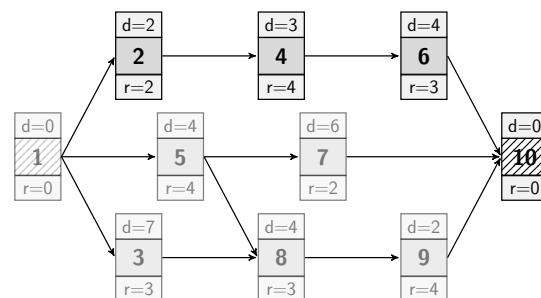
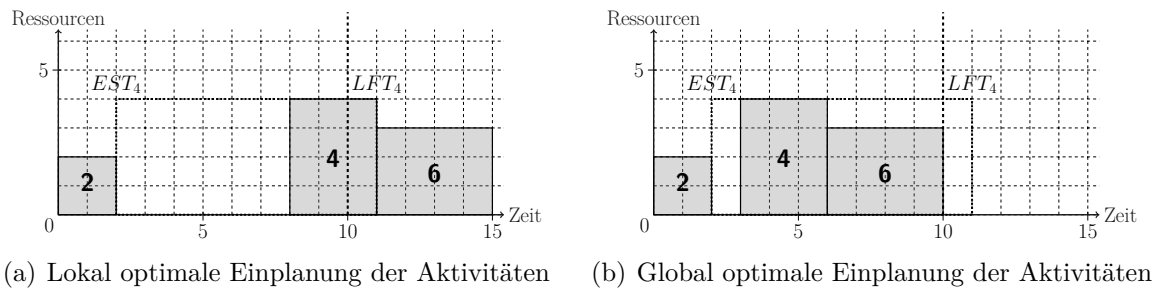
ausgedrückt werden. Als ersten, trivialen Ansatz könnte man jetzt die Aktivitäten in der durch die Aktivitätenliste vorgegebenen Reihenfolge durchlaufen und dabei für jede Aktivität zuerst mit Hilfe ihrer jeweiligen k_i -Funktion eine sortierte Liste Θ_i ihrer möglichen Platzierungen ableiten, sodass für alle Elemente der Liste gilt:

$$k_i(s_i^1, d_i^1) > k_i(s_i^2, d_i^2) \rightarrow Idx(s_i^1, d_i^1) < Idx(s_i^2, d_i^2)$$

Dabei beschreibt die Idx -Funktion den Index der Platzierung in der sortierten Liste Θ_i . Je attraktiver eine mögliche Platzierung ist, desto weiter vorne wird sie in die Liste Θ_i einsortiert. Anschließend werden alle Aktivitäten in Reihenfolge der Aktivitätenliste durchgegangen und pro Aktivität i ihre möglichen Platzierungen in der festgelegten Reihenfolge der Liste Θ_i mit Algorithmus 1 durchprobiert, sodass für jede Aktivität die lokal jeweils bestmögliche Platzierung gewählt wird.

Diesen Ansatz haben so schon Neumann u. a. (2003) vorgeschlagen, wobei sie in ihrem Verfahren auf die Definition einer k_i -Funktion verzichten und stattdessen direkt für jede Aktivität eine anhand der jeweiligen Zielfunktion sortierte Liste der möglichen

6.1. Ein Einplanungsschema für flexible Ressourcen und nichtreguläre Zielfunktionen



(c) Betrachtete Aktivitäten im Projektnetzwerk

Abbildung 6.1. – Lokale und globale Optimalität bei der Platzierung von Aktivitäten

Platzierungen vorgeben. Im Folgenden wird jedoch anhand eines einfachen Beispiels erläutert, warum eine solche lokal-optimale Platzierung in Bezug auf den globalen Zielfunktionswert nicht immer sinnvoll ist. Im darauf anschließenden Abschnitt 6.2 wird dann eine Metaheuristik vorgestellt, die sich diese zusätzliche k_i -Funktion zu Nutze macht, um diese lokale Optimalität zu umgehen.

Beispiel zur lokal-optimalen Planung

Es wird angenommen, dass das Projektnetzwerk in Abbildung 6.1 (c) mit einer kombinierten Zielfunktion optimiert werden soll, dabei sollen einerseits die Verspätungen gegenüber den gesetzten Fertigstellungsterminen minimiert werden und andererseits Zeitpuffer hinter kritische Aktivitäten eingeplant werden (vgl. Zielfunktion (3.20)). Die Einhaltung der Termine wird dabei als deutlich wichtiger angesehen, Zeitpuffer sollen nur dann eingeplant werden, wenn dies nicht zu einer höheren Verspätung von Aktivitäten mit Termin führt. Die Gewichtungsfaktoren der Zielfunktion werden daher auf $w^T = 10, w^P = 1$ gesetzt. In dem Beispiel werden zur Vereinfachung lediglich die Aktivitäten 2, 4, 6 und 10 betrachtet. Es wird weiterhin angenommen, dass nur für die Aktivität 10 ein Fertigstellungstermin von $t_{10}^D = 10$ festgelegt wurde und die Aktivität 2 als einzige kritische Aktivität markiert wurde, sodass also hinter ihr, wenn möglich, ein Zeitpuffer eingeplant werden soll. Der Planungshorizont wird vom Zeitpunkt 0 bis zum Zeitpunkt 15 angenommen. Um zwischen die Aktivitäten

2 und 4 einen Puffer einzuplanen, muss Aktivität 2 so früh wie möglich und Aktivität 4 so spät wie möglich eingeplant werden, d.h. $k_2(s_2, d_2) = -s_2 - \epsilon * d_2$ und $k_4(s_4, d_4) = s_4$. Die Aktivität 6 ist für die Zielfunktion ohne Relevanz, da sie weder einen Termin hat noch hinter einer kritischen Aktivität liegt, sie wird daher einfach so früh wie möglich eingeplant, um den nachfolgenden Aktivitäten möglichst viel Freiheit hinsichtlich ihrer Platzierung zu lassen. Aktivität 10 wird dann auch möglichst früh eingeplant, wobei eine Einplanung vor ihrem Fertigstellungstermin $t_{10}^D = 10$ keine zusätzliche Verbesserung des Zielfunktionswerts bedeutet, also gilt hier für die Platzierungen $k_{10}(s_{10}, d_{10}) = -\max\{0, s_{10} + d_{10} - 10\}$.

Durch die Vorrangbeziehungen werden die Aktivitäten 2, 4, 6 und 10 bei jeder gültigen Sortierung der Aktivitätenliste immer in dieser Reihenfolge eingeplant, wobei ggf. noch andere Aktivitäten dazwischen eingeplant werden können - der Puffer zwischen den Aktivitäten 2 und 4 wird also immer vor der Entscheidung über die Verspätung von Aktivität 10 geplant. Würde man jetzt versuchen, die Aktivitäten immer direkt möglichst nah an ihre lokal besten Positionen zu planen, dann würde sich ein Plan wie in Abbildung 6.1 (a) ergeben. Die Aktivität 4 würde bei ihrer Einplanung so weit wie möglich nach hinten bis zu ihrem spätesten Fertigstellungszeitpunkt geschoben, dadurch würde der geforderte Zeitpuffer zwischen den Aktivitäten 2 und 4 mit 6 Zeitperioden maximal. Anschließend könnten die Aktivitäten 6 und 10 (Aktivität 10 ist wegen ihrer Dauer von $d = 0$ im Plan nicht sichtbar) nur zu den Zeitpunkten 11 bzw. 15 starten, das Projekt hätte damit eine Verspätung von 5 Zeitperioden, der globale Zielfunktionswert wäre $z = 10 * 5 - 1 * 6 = 44$. Hätte man dagegen die Aktivität 4 zunächst nur eine Zeitperiode hinter ihrer frühesten Startzeit gestartet, wäre der Zeitpuffer mit dieser einen Zeitperiode zwar deutlich kleiner, die nachfolgenden Aktivitäten könnten dafür jedoch noch alle vor/bis zu ihren Fertigstellungsterminen eingeplant werden, es gäbe keine Verspätung. Der Zielfunktionswert wäre mit $z = 10 * 0 - 1 * 1 = -1$ deutlich besser und in diesem Fall sogar optimal.

Zwischenfazit zur lokal-optimalen Planung

Das serielle Einplanungsschema probiert sowohl in seiner ursprünglichen Variante (vgl. Kapitel 3.3.1) als auch in der hier beschriebenen Variante für flexibel planbare Ressourcenbedarfe bei der Einplanung einer Aktivität die möglichen Platzierungen in einer zuvor vorgegebenen Reihenfolge durch, bis eine gültige Platzierung gefunden wurde. Über das Festlegen dieser Reihenfolge, in der die Platzierungen ausprobiert werden, kann ausgedrückt werden, welche Platzierungen einer Aktivität besonders attraktiv sind und daher zuerst ausprobiert werden sollen. In den Abschnitten 6.3 und 6.4 wird gezeigt, wie sich für verschiedene Zielfunktionen solche Platzierungsreihenfolgen ableiten lassen. Damit ist es mit diesem Einplanungsschema generell möglich, zum einen konstante und flexibel planbare Ressourcenbedarfe zu berücksichtigen (als Erweiterung von Kolisch u. a. (2003)) und zum anderen beliebige zeitbasierende Zielfunktionen abbilden zu können (als Erweiterung von Neumann u. a. (2003)). Für diese

Zielfunktionen zeigt sich jedoch, dass es aufgrund der seriellen Einplanung der Aktivitäten nicht so einfach möglich ist, bei der Einplanung einer Aktivität zu wissen, wie viel Rücksicht bei ihrer Platzierung auf später noch einzuplanende Aktivitäten genommen werden muss, um auch insgesamt einen guten Plan zu erhalten. Ein kleines Beispiel hat gezeigt, dass es für ein gutes Planungsergebnis nötig sein kann, eine Aktivität nicht immer direkt lokal-optimal einzuplanen, sondern bewusst eine zunächst etwas schlechtere Platzierung zu wählen, um anschließend andere, aus Sicht der Zielfunktion höherwertige Aktivitäten besser einplanen zu können. Dazu wäre es wegen der seriellen Planung allerdings nötig, dass schon bei der Einplanung einer Aktivität bekannt ist, in welchem Maße auf eine bessere Platzierung bewusst verzichtet werden soll, um spätere Aktivitäten nicht zu behindern. Ein Ansatz, wie dieses Problem gelöst werden kann, wird im Folgenden präsentiert.

Erweiterung der Repräsentation

Aus dem einfachen Beispiel zu Abbildung 6.1 lassen sich eine Reihe von qualitativen Aussagen zur Planung von Projektablaufplänen mit dem seriellen Einplanungsschema und nicht-regulären Zielfunktionen ableiten:

- Die Menge aller Aktivitäten lässt sich generell in zwei disjunkte Untermengen einteilen: Die Aktivitäten, deren Platzierung einen direkten Einfluss auf den Zielfunktionswert hat und die Aktivitäten, die einfach nur innerhalb aller Restriktionen eingeplant werden müssen.
- Durch die serielle Einplanung der Aktivitäten ist es möglich, dass die Platzierungsmöglichkeiten einer Aktivität durch bereits zuvor eingeplante Aktivitäten aufgrund von Vorrangbeziehungen und/oder noch verfügbarer Ressourcen eingeschränkt werden, zu diesem Zeitpunkt ist es aber nicht mehr möglich, zuvor eingeplante Aktivitäten nochmal zu verschieben.
- Aktivitäten ohne Einfluss auf den Zielfunktionswert sollten daher so eingeplant werden, dass sie die Platzierungsmöglichkeiten nachfolgender Aktivitäten möglichst wenig einschränken. Als wenig einschränkende Platzierung wird eine möglichst frühe Platzierung angenommen, wobei bei einer flexiblen Dauer und flexibel planbaren Ressourcenbedarfen an dieser Stelle noch nicht klar ist, ob für die nachfolgenden Aktivitäten eine möglichst kurze Dauer aber dafür ein hoher Ressourcenbedarf pro Zeitperiode oder eine längere Dauer mit einem dafür niedrigeren Ressourcenbedarf pro Zeitperiode besser ist.
- Bei Aktivitäten mit Einfluss auf den Zielfunktionswert muss abgewogen werden zwischen einer lokal-optimalen Einplanung und einer Einplanung, durch die die Platzierungsmöglichkeiten späterer Aktivitäten nicht zu sehr eingeschränkt werden. Wie genau diese Abwägung aussieht, kann im Einzelfall im Moment der

Einplanung (wie bei der vorherigen Aussage zu den flexiblen Dauern) noch nicht gesagt werden, da hier ebenfalls noch nicht bekannt ist, wie die nachfolgenden Aktivitäten eingeplant werden können und was daher für diese das Beste ist.

Anhand dieser Aussagen lassen sich somit drei Einflussfaktoren erkennen, durch die sich entscheidet, wie gut letztendlich der Zielfunktionswert eines Projektplans ist, dessen Aktivitäten mit dem zuvor vorgestellten erweiterten Einplanungsschema (Algorithmus 1) platziert wurden.

1. Die Reihenfolge der Einplanung der Aktivitäten, d.h. genau wie beim klassischen (F)RCPSPP die Sortierung der Aktivitäten in der Aktivitätenliste (vgl. Kapitel 3.3.2).
2. Für Aktivitäten mit flexibler Dauer und flexibel planbaren Ressourcenbedarfen die Abwägung zwischen kurzer und langer Dauer und damit unterschiedlichen Ressourcenprofilen.
3. Für zielfunktionsrelevante Aktivitäten die Abwägung zwischen einer lokal-optimalen Platzierung und einer Platzierung, die die Einplanungsmöglichkeiten späterer Aktivitäten nicht zu sehr einschränkt.

Die bekannte und in Kapitel 3 oft beschriebene Lösungsrepräsentation als sortierte Aktivitätenliste berücksichtigt dabei nur den ersten Punkt dieser Aufzählung. Diese sortierte Aktivitätenliste wird wie in Kapitel 3.3.1 mit τ bezeichnet. Im Folgenden wird diese Repräsentation erweitert und das serielle Einplanungsschema darauf angepasst, um auch die weiteren beiden Punkte berücksichtigen zu können.

Der zweite Einflussfaktor, die Dauer einer Aktivität, lässt sich wie folgt abbilden: Die mögliche Dauer einer Aktivität kann einen Wert aus der Menge $\{\underline{d}_i, \dots, \overline{d}_i\}$ annehmen. In Abschnitt 6.1 wurde erläutert, dass bei dem Einplanungsschema von Kolisch u. a. (2003) eine Aktivität immer so kurz wie möglich eingeplant wurde, dies kann über die lokale Fitnessfunktion $k_i(s_i, d_i) = -s_i - \epsilon * d_i$ erreicht werden. Um eine Aktivität bewusst länger einzuplanen, als es eventuell nötig wäre (und dafür weniger Ressourcen pro Zeitperiode zu verbrauchen), wird jetzt für jede Aktivität ein Offsetwert $d_i^O \in \{0, \dots, \overline{d}_i - \underline{d}_i\}$ definiert. Die Definition der Menge aller möglichen Platzierungen einer Aktivität wird nun wie folgt abgeändert:

$$P_i = \{(s_{ix}, d_{iy}) | s_{ix} \in \{EST_i, \dots, LST_i\} \wedge d_{iy} \in \{\underline{d}_i + d_i^O, \dots, \overline{d}_i\} \wedge s_{ix} + d_{iy} \leq LFT_i\}$$

Wird jetzt für eine Aktivität der Offsetwert $d_i^O > 0$ gesetzt, so sind die Platzierungen mit einer Dauer zwischen \underline{d}_i und $\underline{d}_i + d_i^O - 1$ nicht mehr in der Menge der möglichen Platzierungen enthalten und werden dementsprechend auch nicht mehr durch die k_i -Funktion bewertet und eventuell als Platzierung für die Aktivität ausprobiert. Das folgende Tupel beschreibt dann die Liste der Offsetwerte für alle Aktivitäten:

$$O = (d_1^O, \dots, d_N^O)$$

6.1. Ein Einplanungsschema für flexible Ressourcen und nichtreguläre Zielfunktionen

Um zu steuern, wie dicht eine Aktivität an ihr lokales Optimum geplant wird, wird für jede Aktivität zusätzlich zu ihrer lokalen Fitnessfunktion k_i ein lokaler Fitnesszielwert $k_i^* \in [\min(k_i), \max(k_i)]$ definiert. Die Sortierungsvorschrift für die Liste der möglichen Platzierungen Θ_i wird nun wie folgt geändert:

$$|k_i^* - k_i(s_i^1, d_i^1)| < |k_i^* - k_i(s_i^2, d_i^2)| \rightarrow \text{Idx}(s_i^1, d_i^1) < \text{Idx}(s_i^2, d_i^2) \quad (6.1)$$

Eine mögliche Platzierung wird also desto weiter vorne in die Liste einsortiert, je kleiner der Abstand ihres lokalen Fitnesswertes zum Fitnesszielwert ist. Die Menge aller Aktivitäten S^N wird jetzt aufgeteilt in die Menge der zielfunktionsrelevanten Aktivitäten $\phi \subseteq S^N$ sowie alle verbleibenden Aktivitäten $S^N \setminus \phi$. Diese verbleibenden Aktivitäten sollen wie zuvor erläutert so früh wie möglich eingeplant werden, um nachfolgende Aktivitäten so wenig wie möglich einzuschränken. Ihre lokale Fitnessfunktion ist somit immer $k_i(s_i, d_i) = -s_i - \epsilon * d_i$ und ihr Fitnesszielwert immer $k_i^* = -EST_i - \epsilon * \underline{d_i}$. Für alle zielfunktionsrelevanten Aktivitäten $i \in \phi$ wird die k_i -Funktion entsprechend der Zielfunktion angepasst (vgl. Abschnitt 6.3) und über die Festlegung des Fitnesszielwerts k_i^* kann nun bestimmt werden, in wie weit versucht werden soll, die Aktivität an ihr lokales Optimum zu planen. Das Tupel

$$K^* = (k_1^*, \dots, k_N^*)$$

beinhaltet demnach die Fitnesszielwerte aller Aktivitäten.

Zusammenfassend bezeichnet also das Tupel

$$\sigma = (\tau, O, K^*) \quad (6.2)$$

die komplette Repräsentation einer Lösung, die dann mit dem Algorithmus 2 eindeutig in einen Projektablaufplan umgewandelt werden kann, der anschließend anhand einer Zielfunktion bewertet werden kann.

Der Algorithmus 2 iteriert über alle Aktivitäten in der Reihenfolge, die durch die Aktivitätenliste τ festgelegt wurde (ab Zeile 1). Für jede Aktivität wird zunächst neu die Menge ihrer möglichen Positionen P_i berechnet, da diese von den aktuellen Offsetwerten O der Aktivitätendauern abhängt (Zeile 2). Anschließend wird durch Sortieren von P_i anhand der Fitnesszielwerte die Liste Θ_i bestimmt, wobei für die Sortierung wie zuvor beschrieben die Sortierungsregel (6.1) angewendet wird (Zeile 3). Die Liste Θ_i enthält jetzt also alle möglichen Positionen für die Aktivität i absteigend nach ihrer Attraktivität sortiert. Diese Liste wird nun von Anfang bis Ende durchgegangen und für jede mögliche Platzierung wird durch den Aufruf der Einplanungsfunktion (Algorithmus 1) geprüft, ob die Aktivität an dieser Stelle eingeplant werden kann (Zeile 8). Konnte eine Aktivität an keiner ihrer möglichen Platzierungen eingeplant werden, so kann der Ablaufplan für das aktuelle σ nicht aufgebaut werden und es wird ein Fehler zurückgegeben (Zeile 11). Die Einplanung war erfolgreich, wenn für alle Aktivitäten eine gültige Platzierung gefunden werden konnte (Zeile 13).

6. Eine Heuristik zur flexiblen Projektablaufplanung mit nichtregulären Zielfunktionen

Algorithmus 2 : Erweitertes Einplanungsschema

Input : Lösungsrepräsentation (τ, O, K^*)

Data : Ressourcenbedarfe $\underline{r}_{ik}, \overline{r}_{ik}, w_{ik} \forall (i, k) \in F$, Verfügbarkeit der Ressourcen a_{kt}

Result : Info ob die Lösungsrepräsentation erfolgreich in einen Ablaufplan umgewandelt werden konnte

```

1 foreach  $i$  in  $\tau$  do
2    $P_i \leftarrow$ 
      $\{(s_{ix}, d_{iy}) | s_{ix} \in \{EST_i, \dots, LST_i\} \wedge d_{iy} \in \{\underline{d}_i + d_i^O, \dots, \overline{d}_i\} \wedge s_{ix} + d_{iy} \leq LFT_i\}$ 
3    $\Theta_i \leftarrow \text{sort}(P_i, k_i^*)$ 
4    $\text{idx} \leftarrow 1$ 
5    $\text{ok} \leftarrow 0$ 
6   repeat
7      $(s_i, d_i) \leftarrow \Theta_i[\text{idx}]$ 
8     if  $\text{einplanung}((s_i, d_i), a_{kt}) = OK$  then  $\text{ok} \leftarrow 1$ 
9      $\text{idx} \leftarrow \text{idx} + 1$ 
10  until  $\text{ok} = 1 \vee \text{idx} > |\Theta_i|$ 
11  if  $\text{ok} = 0$  then return FEHLER
12 end
13 return OK

```

6.2. Ein genetischer Algorithmus zur Steuerung des seriellen Einplanungsschemas

Mit der im vorherigen Abschnitt definierten Repräsentationsform $\sigma = (\tau, O, K^*)$ wird eine mögliche Lösung für das Problem $FPS|prec| \cdot$ beschrieben, die mit dem Algorithmus 2 in einen Projektablaufplan dekodiert werden kann. Schon bei der klassischen Repräsentationsform als reine Aktivitätenliste τ gab es sehr viele Möglichkeiten zum Aufbau dieser Liste, sodass eine explizite Enumeration aller Möglichkeiten zum Finden der besten Lösung nicht in Frage kommt. Stattdessen wurden erfolgreich Metaheuristiken zur Suche nach einer möglichst guten Sortierung eingesetzt (vgl. Kapitel 3.3.3). Durch die Hinzunahme der Tupel O und K^* vervielfacht sich nochmal die Anzahl an möglichen Lösungen, die durch σ dargestellt werden können. In diesem Abschnitt soll daher ein genetischer Algorithmus (GA) auf Basis des erfolgreichen, in Kapitel 3.3.3 vorgestellten GA von Hartmann (1998) entwickelt werden, mit dem effizient der durch (τ, O, K^*) aufgespannte Lösungsraum nach guten Lösungen durchsucht werden kann.

6.2.1. Allgemeiner Aufbau

Der in dieser Arbeit entwickelte genetische Algorithmus ist hier in Abbildung 6.2 visualisiert und wird in diesem und den nächsten Abschnitten genauer erklärt. Der Grundaufbau des GA zur Durchsuchung des Lösungsraums (τ, O, K^*) orientiert sich dabei an den bisherigen Ansätzen aus der Literatur (vgl. Kapitel 3.3.3).

In einem GA werden zu jedem Zeitpunkt immer mehrere mögliche Lösungen betrachtet und verändert. Die aktuelle Menge möglicher Lösungen wird dabei als *Population* bezeichnet, eine einzelne Lösung aus dieser Menge \mathcal{P} heißt *Individuum*. Bevor der eigentliche GA angewendet werden kann, muss zunächst mit einer Konstruktionsheuristik die initiale Population, d.h. eine Menge gültiger Lösungen, erzeugt werden (vgl. Abschnitt 6.2.2). Anschließend wird über mehrere Iterationen versucht, diese Lösungen durch zufällige kleine Änderungen zu verbessern.

Jede dieser Iterationen startet mit der Kreuzung von Individuen. Kreuzung bedeutet, dass die Lösungsrepräsentationen von zwei zufällig ausgewählten Individuen miteinander kombiniert werden, sodass zwei neue Individuen entstehen (vgl. Abschnitt 6.2.3). Der Kreuzungsoperator wird so lange angewendet, bis sich durch die jeweils neu hinzugekommenen Individuen die Größe der Population verdoppelt hat. Der Gedanke hinter diesem Schritt ist, dass einzelne Abschnitte der Lösungsrepräsentation schon zu einem sehr guten Teilergebnis bei der Dekodierung des Plans führen, andere Bereiche dieses Plans jedoch noch nicht so gut sind. Eventuell gelingt es mit der Kreuzung, dass ein guter Abschnitt aus der Lösung von einem Individuum mit einem anderen guten Lösungsabschnitt eines anderen Individuums kombiniert wird und so insgesamt eine noch bessere Lösung entsteht.

Anschließend wird auf alle durch den Kreuzungsoperator neu erzeugten Individuen einzeln der Mutationsoperator angewendet (vgl. Abschnitt 6.2.4). Dieser führt zufällige

6. Eine Heuristik zur flexiblen Projektablaufplanung mit nichtregulären Zielfunktionen

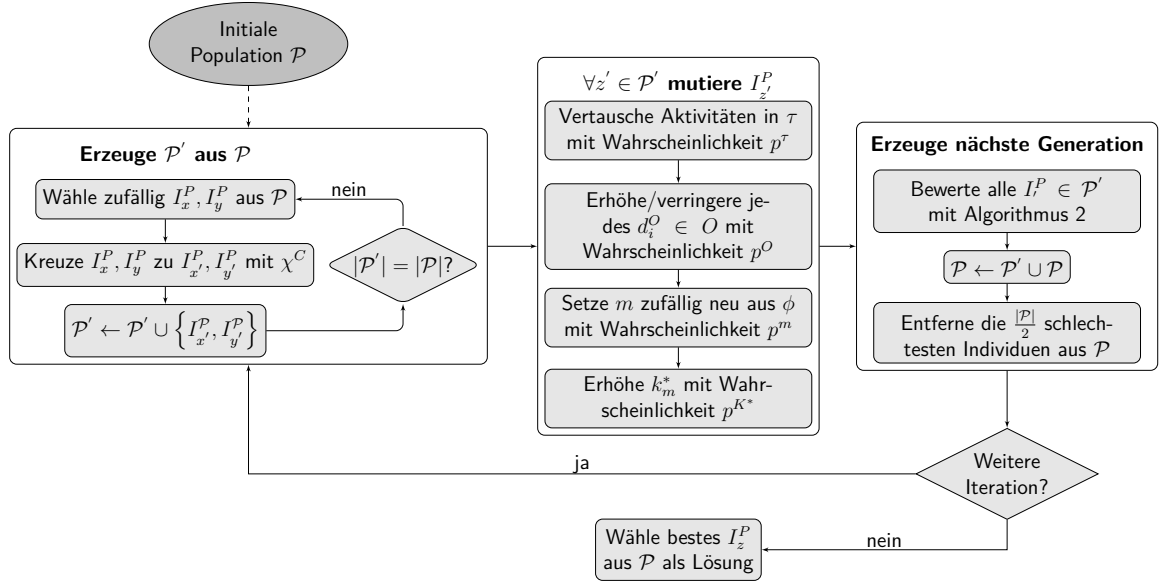


Abbildung 6.2. – Ablaufschema des genetischen Algorithmus

Änderungen an der Lösungsrepräsentation eines Individuums durch und soll dadurch neue Ausprägungen der Repräsentation erzeugen, die alleine durch den Kreuzungsoperator nicht erzeugt werden könnten. Im nächsten Schritt müssen alle neu erzeugten und anschließend veränderten Individuen bewertet werden, d.h. ihre Lösungsrepräsentation muss zu einem konkreten Projektablaufplan dekodiert werden, damit diese anschließend mit einer Zielfunktion bewertet werden kann. Diese Dekodierung wird mit dem erweiterten Einplanungsschema durchgeführt, das im vorangegangenen Abschnitt 6.1 vorgestellt wurde (Algorithmus 2).

Nachdem durch die Bewertung auch von den neu erzeugten Individuen der Zielfunktionswert bekannt ist, muss die durch den Kreuzungsoperator verdoppelte Population wieder auf ihre ursprüngliche Größe reduziert werden, indem die besten Individuen ausgewählt werden (vgl. Abschnitt 6.2.5). Anschließend kann entschieden werden, ob eine weitere Iteration durchgeführt werden soll oder ob der Algorithmus terminieren soll. Im Gegensatz zu exakten Lösungsverfahren gibt es bei einer solchen Metaheuristik keine Information über eine untere Schranke bezüglich des erreichbaren Zielfunktionswerts. Kriterium für die Terminierung könnten daher entweder eine zuvor definierte Anzahl an Iterationen sein oder das Erreichen einer bestimmten Zeitspanne, die seit dem Start des Algorithmus vergangen ist.

In Gleichung (6.2) wurde die Lösungsrepräsentation (τ, O, K^*) definiert, welche vom erweiterten seriellen Einplanungsschema (Algorithmus 2) in einen kompletten Projektablaufplan dekodiert werden kann. Diese Repräsentation enthält die Reihenfolge τ der Aktivitäten für deren Einplanung, die Offsetwerte O für die Erhöhung der minimalen Dauer der Aktivitäten sowie die lokalen Fitnesszielwerte K^* aller Aktivitäten

für die Abwägung zwischen einer möglichst frühen bzw. lokal-optimalen Planung von zielfunktionsrelevanten Aktivitäten $i \in \phi$. Während es aus Sicht des Einplanungsschemas nur darauf angekommen ist, aus der Lösungsrepräsentation eindeutig und schnell eine Lösung dekodieren zu können, ist es aus Sicht einer darauf aufbauenden Metaheuristik auch noch wichtig, eine solche Lösungsrepräsentation effektiv und effizient verändern zu können, um möglichst schnell bessere Lösungen zu finden. Aus diesem Grund sollen die folgenden zwei Alternativen zur Darstellung eines Individuums j der GA-Population als Erweiterung der Repräsentation (6.2) näher untersucht werden:

$$\text{Alternative 1: } I_j^P = (\tau, O, K^*, m) \quad (6.3)$$

$$\text{Alternative 2: } I_j^P = (V, O, K^*, m) \quad (6.4)$$

In beiden Varianten werden die Tupel O zur Speicherung der minimalen Offset-Werte der Dauern und K^* zur Speicherung der lokalen Fitnesszielwerte direkt aus der (τ, O, K^*) -Repräsentation übernommen, sodass die in den weiteren Abschnitten beschriebenen Operatoren direkt darauf arbeiten werden. Die in beiden Varianten zusätzlich eingeführte Variable $m \in \phi$ zeigt auf die zielfunktionsrelevante Aktivität, deren lokaler Fitnesszielwert bei der nächsten Mutation verbessert werden soll. Eine genauere Erklärung hierzu folgt in Abschnitt 6.2.4.

Die Varianten unterscheiden sich letztendlich in der Repräsentation der Einplanungsreihenfolge der Aktivitäten für das serielle Einplanungsschema. In der ersten Variante (6.3) wird diese Reihenfolge direkt durch eine sortierte Liste der Aktivitäten dargestellt, die im weiteren Verlauf beschriebenen GA-Operatoren müssen dazu sicherstellen, dass die Einhaltung der Vorrangbeziehungen (vgl. Restriktion (3.10)) bei Veränderungen der Liste gewährleistet ist.

Bei der zweiten Variante (6.4) wird über das Tupel $V = \{v_1, \dots, v_i\}$ jeder Aktivität i ein beliebiger Prioritätswert $v_i \in [0, 1]$ zugewiesen. Die Ableitung einer Sortierung erfolgt dann über die Prioritätsregel, dass aus der Kandidatenmenge aller Aktivitäten immer diejenige mit dem höchsten Prioritätswert v_i als nächstes eingeplant wird¹. Über die Veränderung eines $v_i \in V$ wird somit eventuell die Position der Aktivität i in der anschließend abgeleiteten Aktivitätenliste beeinflusst, die Einhaltung der Vorrangbeziehungen ist jedoch im Gegensatz zur ersten Variante immer automatisch sichergestellt.

Hartmann (1998) hat zur Repräsentation der Sortierung der Aktivitäten beide Möglichkeiten untersucht und kam zu dem Ergebnis, dass sein neu vorgeschlagener Ansatz direkt auf der Aktivitätenliste τ zu arbeiten, zu etwas besseren Lösungen führt, als die Repräsentation durch Prioritätswerte (im Allgemeinen bei genetischen Algorithmen auch als Random Key-Repräsentation bezeichnet), für die er als Referenz auf Lee und Kim (1996) verweist. Bei diesem Vergleich probiert Hartmann (1998) jedoch

¹Siehe Kapitel 3.3.2 für eine genauere Erläuterung zur Ableitung von einer Sortierung mit Prioritätsregeln

nur sehr beschränkt verschiedene Wahrscheinlichkeiten für den Mutationsoperator aus. Dadurch, dass bei der Listenrepräsentation jedoch bei einer Mutation immer die Position der Aktivität in der Aktivitätenliste geändert wird, dies bei der Repräsentation durch Prioritätswerte jedoch nicht zwingend der Fall sein muss, wird vermutet, dass die Repräsentation durch Prioritätswerte mit anderen Parametern möglicherweise ähnlich gute Ergebnisse erzeugen kann wie die Repräsentation als direkte Aktivitätenliste. Hinzu kommt, dass durch die erweiterte (τ, O, K^*) -Repräsentation der Lösungsraum erweitert wurde, weshalb es eventuell nicht möglich ist, die Ergebnisse von Hartmann (1998) für das RCPSP direkt auf das hier behandelte FRCPSPP zu übertragen. Aus diesen Gründen erscheint ein erneuter Vergleich beider Varianten als sinnvoll und nötig, dieser wird in Kapitel 7.3 durchgeführt.

6.2.2. Generierung einer Menge initialer Lösungen

Der genetische Algorithmus arbeitet auf einer Menge vorhandener Lösungen, die in jeder Iteration zufällig verändert werden, wodurch sich hoffentlich einige dieser Lösungen verbessern. Wie im vorherigen Abschnitt beschrieben ist es dafür nötig, dass es bereits zu Anfang eine Menge von gültigen Lösungen gibt, die dann als erste Generation der Population des GA benutzt werden. Um eine neue, gültige Lösung für diese initiale Lösungsmenge zu erzeugen, wird das in der Praxis bewährte Random Sampling-Verfahren zum Erzeugen zufälliger Aktivitätenlisten (vgl. Kapitel 3.3.2) wie folgt für die hier entwickelte Lösungsrepräsentation erweitert:

1. Erzeuge eine zufällige Einplanungsreihenfolge für die Aktivitäten:
 - Wird die Repräsentationsform (6.4) verwendet, werden dazu alle Prioritätswerte $v_i \in V$ auf jeweils einen zufälligen Wert zwischen 0 und 1 gesetzt.
 - Wird stattdessen die Repräsentationsform (6.3), d.h. Repräsentation der Sortierung als direkte Aktivitätenliste τ , verwendet, so wird zunächst analog zur Repräsentation (6.4) eine temporäre Liste von Prioritätswerten für jede Aktivität erzeugt und die Elemente dieser Liste mit zufälligen Werten zwischen 0 und 1 gesetzt. Anschließend wird wie im vorangegangenen Abschnitt beschrieben durch Interpretation dieser Werte als Prioritätsregel eine sortierte Aktivitätenliste τ abgeleitet.
2. Setze m auf eine beliebige Aktivität aus der Menge der zielfunktionsrelevanten Aktivitäten ϕ .
3. Setze alle Offsetwerte für die minimalen Dauern der Aktivitäten $d_i^O = 0 \quad \forall d_i^O \in O$.
4. Setze die lokalen Fitnesszielwerte aller Aktivitäten i auf $k_i^* = -EST_i - \epsilon * d_i$. Setze unabhängig von der tatsächlich anzuwendenden Zielfunktion die Fitness-

funktionen aller Aktivitäten i temporär auf $k_i(s_i, d_i) = -s_i - \epsilon * d_i$, um alle Aktivitäten zunächst so früh wie möglich einzuplanen.

5. Mit den Schritten 1–4 ist eine mögliche Lösungsrepräsentation (τ, O, K^*, m) bzw. (V, O, K^*, m) komplett, bei dieser wird jedoch zunächst durch die möglichst frühe Einplanung aller Aktivitäten von einer regulären Zielfunktion ausgegangen. Um nun unter einer anderen Zielfunktion zu optimieren, dekodiere die daraus ableitbare Repräsentation (τ, O, K^*) mit Algorithmus 2 zu einer Lösung, sodass anschließend zu jeder Aktivität eine gültige Platzierung (s_i, d_i) bekannt ist.
6. Setze die Fitnessfunktionen k_i für alle Aktivitäten $i \in \phi$ wieder entsprechend der tatsächlich zu verwendenden Zielfunktion (vgl. Abschnitt 6.3). Setze $k_i^* = k_i(s_i, d_i) \forall i \in \phi$, wobei (s_i, d_i) die in Schritt 5 ermittelten Positionen der Aktivitäten beschreiben.

Nach Schritt 4 bei einer Optimierung unter regulären Zielfunktionen oder nach Schritt 6 bei einer Optimierung unter nicht-regulären Zielfunktionen ist eine gültige Lösungsrepräsentation (τ, O, K^*, m) bzw. (V, O, K^*, m) komplett und kann zur Population \mathcal{P} hinzugefügt werden. Diese Schritte werden so lange wiederholt, bis die Population \mathcal{P} eine zuvor definierte Anzahl an Individuen enthält.

6.2.3. Operatoren für die Kreuzung von Individuen

Mit dem Kreuzungsoperator sollen aus zwei Eltern-Individuen $I_x^{\mathcal{P}}$ und $I_y^{\mathcal{P}}$ der Population \mathcal{P} zwei neue Kind-Individuen $I_x^{\mathcal{P}}$ und $I_y^{\mathcal{P}}$ erzeugt werden. Dabei werden die Eigenschaften beider Individuen zufällig kombiniert und auf die beiden abgeleiteten Individuen aufgeteilt mit dem Ziel, dass bei genügend oft durchgeführten zufälligen Kreuzungen irgendwann ein Kind-Individuum entsteht, dass die guten Eigenschaften beider Eltern-Individuen enthält und dafür weniger schlechte Eigenschaften.

Auswahl der Individuen

Bei der Anwendung des Kreuzungsoperators auf \mathcal{P} muss im ersten Schritt entschieden werden, welche zwei Elemente als Eltern-Individuen ausgewählt werden. Hierzu gibt es unabhängig von der konkreten Anwendung auf das RCPSP verschiedene Ansätze. So schlägt z.B. Holland (1975) vor, dass die Individuen zufällig ausgewählt werden sollen, dass jedoch die Wahrscheinlichkeit für die Auswahl eines Individuums proportional abhängt vom seinem relativen Zielfunktionswert gegenüber anderen Individuen. Damit sollen Individuen mit einer bereits vergleichsweise guten Lösung bei der Auswahl bevorzugt werden. Andere Strategien sind z.B., dass ein Individuum mit einer guten Lösung mit einem Individuum mit einer schlechten Lösung kombiniert wird.

Zum Lösen des RCPSP mit einem GA wurden jedoch meistens die Eltern-Individuen rein zufällig aus der Menge \mathcal{P} ausgewählt (vgl. z.B. Hartmann (1998), Gonçalves

u. a. (2008)), diese zufällige Auswahl erwies sich auch in eigenen Voruntersuchungen als beste Strategie. Es wird vermutet, dass dies mit den speziellen Eigenschaften einer Aktivitätenliste zusammenhängt. Wie in Kapitel 3.3.3 durch Abbildung 3.7 erklärt wurde, kann es durch die Vorrangbeziehungen zwischen den Aktivitäten zu der Situation kommen, dass die Sortierung einzelner Abschnitte der Aktivitätenliste einen großen Einfluss auf den resultierenden Zielfunktionswert hat. Ist nun so ein kritischer Abschnitt schlecht sortiert, so hat das Individuum einen schlechten Zielfunktionswert. Dies schließt jedoch nicht aus, dass es gleichzeitig trotzdem auch sehr gut sortierte Abschnitte in der Aktivitätenliste geben kann, die sich möglicherweise nach einer Kreuzung besser auf die gesamte Lösung auswirken können. Für die Kreuzung werden daher zwei Individuen $I_x^{\mathcal{P}}$ und $I_y^{\mathcal{P}}$ zufällig aus der Menge \mathcal{P} ausgewählt.

Kreuzung mit dem n-Punkt-Operator

Die in den Repräsentationen vorkommenden Tupel V , K^* und O weisen jeder Aktivität $i \in S^N$ einen bestimmten Wert zu. Sei α eines dieser Tupel aus dem Individuum $I_x^{\mathcal{P}}$ und β das gleiche Tupel aus $I_y^{\mathcal{P}}$. Zur Ableitung der beiden Tupel α' und β' für die zwei Kind-Individuen $I_x^{\mathcal{P}}$ und $I_y^{\mathcal{P}}$ werden jetzt zufällig n Indizes λ bestimmt und aufsteigend sortiert, sodass gilt $1 \leq \lambda_1 < \lambda_2 < \dots < \lambda_n < N$. Anschließend werden, wenn n eine gerade Zahl ist, die Tupel wie folgt kombiniert:

$$\begin{aligned}\alpha' &= \alpha[1, \dots, \lambda_1] \beta[\lambda_1 + 1, \dots, \lambda_2] \cdots \alpha[\lambda_n + 1, \dots, N] \\ \beta' &= \beta[1, \dots, \lambda_1] \alpha[\lambda_1 + 1, \dots, \lambda_2] \cdots \beta[\lambda_n + 1, \dots, N]\end{aligned}$$

Für ungerade n gilt analog:

$$\begin{aligned}\alpha' &= \alpha[1, \dots, \lambda_1] \beta[\lambda_1 + 1, \dots, \lambda_2] \cdots \beta[\lambda_n + 1, \dots, N] \\ \beta' &= \beta[1, \dots, \lambda_1] \alpha[\lambda_1 + 1, \dots, \lambda_2] \cdots \alpha[\lambda_n + 1, \dots, N]\end{aligned}$$

Es werden also für die Aktivitäten $i = 1$ bis $i = \lambda_1$ die Werte des Tupels des ersten Eltern-Individuums genommen, für die Aktivitäten $i = \lambda_1 + 1$ bis $i = \lambda_2$ anschließend die Werte des Tupels des zweiten Eltern-Individuums. Dies wird so lange alternierend wiederholt, bis auch für die letzte Aktivität N der Wert von einem der beiden Eltern-Tupel gewählt wurde. Für das zweite Kind-Tupel β' werden dann in den selben Abschnitten, jedoch genau von den jeweils anderen Eltern-Tupeln die Elemente entnommen.

Diese Art der Kreuzung der Tupel wurde in der Literatur (vgl. Lee und Kim (1996), Hartmann (1998)) bei der Repräsentation der Sortierung der Aktivitäten durch Prioritätswerte verwendet und an dieser Stelle auf die weiteren Tupel K^* und O ausgeweitet. Dabei werden in Kapitel 7.3.1 für n folgende Werte untersucht, die so auch schon in der aufgeführten Literatur verwendet wurden:

- $n = 1$ (als *One-Point Crossover* bezeichnet)

- $n = 2$ (als *Two-Point Crossover* bezeichnet)
- $n = N - 1$ (als *Uniform Crossover* bezeichnet)

Wird als Repräsentationsform für die Sortierung der Aktivitäten stattdessen, wie von Hartmann (1998) vorgeschlagen, direkt eine Aktivitätenliste τ verwendet, so können zwei Eltern-Listen τ_1 und τ_2 nicht mehr wie oben beschrieben kombiniert werden, da ein Element der Liste nun nicht mehr einer Aktivität eine Eigenschaft zuweist, sondern das Element selber die Aktivität bezeichnet und sich die Information der Sortierung aus der Position des Elements innerhalb der Liste ergibt. Hartmann (1998) definiert den n -Punkt-Operator für zwei Listen dann wie folgt:

Es werden wie zuvor zufällig n Indizes λ bestimmt und aufsteigend sortiert, sodass gilt $1 \leq \lambda_1 < \lambda_2 < \dots < \lambda_n \leq N$. Die Liste τ'_1 wird nun so aufgebaut, dass zunächst die erste Eltern-Liste τ_1 von vorne an durchgegangen wird und in der Reihenfolge so lange die Elemente von dieser Liste entnommen werden, bis die Positionen $1, \dots, \lambda_1$ der Kind-Liste τ'_1 besetzt sind. Die Positionen $\lambda_1 + 1, \dots, \lambda_2$ werden dann mit den ersten $\lambda_2 - \lambda_1$ Elementen aus τ_2 besetzt, die zu dem Zeitpunkt noch nicht in τ'_1 enthalten sind. Dies wird abwechselnd mit τ_1 bzw. τ_2 als Quelle so lange durchgeführt, bis alle Positionen in τ'_1 besetzt sind. τ'_2 wird dann analog bestimmt, wobei hier für die ersten λ_1 Positionen τ_2 als Quelle genommen wird. Hartmann (1998) hat bewiesen, dass durch diese Art der Rekombination der Listen die Vorrangbeziehungen zwischen den Aktivitäten erhalten bleiben, sodass also immer gültige neue Aktivitätenlisten erzeugt werden.

Zuletzt muss bei beiden Repräsentationsformen noch der Parameter m an die Kind-Elemente weitergegeben werden. Dafür wird definiert, dass für das Kind-Individuum $I_{x'}^{\mathcal{P}}$ zufällig mit einer Wahrscheinlichkeit von 50% das m aus dem Eltern-Individuum $I_x^{\mathcal{P}}$ entnommen wird, ansonsten aus $I_y^{\mathcal{P}}$. Für das zweite Kind-Individuum $I_{y'}^{\mathcal{P}}$ wird aufbauend auf der zuvor getroffenen Entscheidung m aus dem anderen Eltern-Individuum entnommen.

Zur weiteren Unterscheidung von Eltern- und Kind-Individuen werden jetzt die beiden erzeugten Kind-Individuen $I_{x'}^{\mathcal{P}}$ und $I_{y'}^{\mathcal{P}}$ zu einer temporären Population \mathcal{P}' hinzugefügt, die dann durch die nächsten Schritte im GA weiter verarbeitet wird:

$$\mathcal{P}' \leftarrow \mathcal{P}' \cup \{I_{x'}^{\mathcal{P}}, I_{y'}^{\mathcal{P}}\}$$

Kreuzung mit dem Gewichtungsoperator

Der Wert eines Elements aus einem der beiden Tupel K^* und O beschreibt die Verschiebung der Position der Aktivität anhand einer Skala mit einer festen oberen und unteren Grenze. Im einen Fall wird über den anvisierten lokalen Fitnesszielwert einer Aktivität i zwischen dem schlechtesten und dem besten Fitnesszielwert $[\min(k_i(s_i, d_i)), \max(k_i(s_i, d_i))]$, $\forall (s_i, d_i) \in P_i$ entschieden, im anderen Fall über den Offsetwert für die minimal erlaubte Dauer der Aktivität im Bereich $\{0, \dots, \bar{d}_i - \underline{d}_i\}$.

Betrachtet man weiterhin das Tupel der Prioritätswerte V , so beschreibt dort ein einzelner Wert v_i zwar nicht direkt die Position der Aktivität i in der anschließend abgeleiteten Aktivitätenliste, da sich diese Position erst durch den Vergleich von v_i mit den Prioritätswerten von anderen Aktivitäten ergibt. Da bei der zufälligen Besetzung von v_i jedoch von einer Gleichverteilung der Zufallswerte im Bereich $[0, 1]$ ausgegangen wird, ist bei einem hohen v_i die Wahrscheinlichkeit größer, dass die Aktivität i eher als andere Aktivitäten eingeplant wird.

Bei allen Ausprägungen des n-Punkt-Operators wird bei der Erzeugung des Kind-Individuums für jedes Element aus einem dieser Tupel immer genau der Wert des entsprechenden Elements aus dem Tupel von einem der beiden Eltern-Individuen genommen. So werden zwar je nach gewähltem n des Operators die Elemente des Tupels aus beiden Eltern-Individuen zusammengestellt, die Entscheidung über den Wert eines konkreten Elements bleibt jedoch immer eine binäre Entscheidung zwischen dem Wert des einen oder dem anderen Eltern-Individuums. Hier stellt sich die Frage, in wie weit es sinnvoll sein könnte, auch auf der Ebene einzelner Werte die Eigenschaften beider Eltern-Elemente zu kombinieren. Dafür wird im Folgenden der Gewichtungsoperator definiert, der anschließend in Kapitel 7.3.1 näher untersucht und mit den n-Punkt-Operatoren verglichen wird.

Seien I_x^P und I_y^P die zwei zu kreuzenden Eltern-Individuen und $\lambda \in [0, 1]$ eine Zufallszahl, die die Gewichtung zwischen I_x^P und I_y^P für die Kind-Individuen beschreibt. Sei weiterhin α eines der Tupel V, O oder K^* aus I_x^P und β das entsprechende Tupel aus I_y^P . Jedes Element $\theta_i^{\alpha'} \in \alpha'$ des ersten Kind-Individuums wird nun aus den beiden entsprechenden Eltern-Elementen θ_i^α und θ_i^β wie folgt bestimmt:

$$\theta_i^{\alpha'} = \lambda * \theta_i^\alpha + (1 - \lambda) * \theta_i^\beta$$

Analog dazu ergibt sich $\theta_i^{\beta'}$ wie folgt:

$$\theta_i^{\beta'} = (1 - \lambda) * \theta_i^\alpha + \lambda * \theta_i^\beta$$

Beispiel: Hatte eine Aktivität i in I_x^P einen Offset für die minimale Dauer von $d_i^O = 0$ und in I_y^P von $d_i^O = 10$, so ergibt sich bei einer Gewichtung von 70:30 zwischen den beiden Individuen ($\lambda = 0,7$) folgendes Ergebnis:

- Für I_x^P : $d_i^O = 0,7 * 0 + 0,3 * 10 = 3$
- Für I_y^P : $d_i^O = 0,3 * 0 + 0,7 * 10 = 7$

6.2.4. Operatoren für die Mutation

Der Mutationsschritt in einem genetischen Algorithmus dient dazu, zufällige lokale Änderungen an einer vorhandenen Lösung durchzuführen, um diese so hoffentlich insgesamt zu verbessern. Auf alle Individuen der Menge \mathcal{P}' , die also in der aktuellen Iteration durch Anwendung des Kreuzungsoperators entstanden sind, werden anschließend die Mutationsoperatoren angewendet. Im Folgenden wird für die möglichen Bestandteile einer Lösung der jeweilige Mutationsoperator definiert.

Aktivitätenliste τ

Wie in Abschnitt 6.2.1 erläutert, wurde die Aktivitätenliste τ von Hartmann (1998) zur Repräsentation der Sortierung der Aktivitäten vorgeschlagen und als Vergleichsmöglichkeit in diese Arbeit übernommen. Dieser Mutationsoperator für τ entspricht deshalb ebenfalls dem Vorschlag von Hartmann (1998).

Am Anfang der Liste begonnen, wird nacheinander für jede Position aus τ folgende Operation durchgeführt: Sei k die Position von i in τ und j die Aktivität an Position $k+1$. Wenn $(i, j) \notin A$, dann tauschen i und j mit einer Wahrscheinlichkeit von p^τ ihre Positionen in der Liste, die Restriktion (3.10) zur Einhaltung der Vorrangbeziehungen zwischen den Aktivitäten wird durch diesen Tausch nicht verletzt.

Prioritätswerte $v_i \in V$

Jedes $v_i \in V$ wird mit einer Wahrscheinlichkeit von p^V auf einen zufälligen neuen Wert aus dem Intervall $[0, 1]$ gesetzt. Auf die Einhaltung von Vorrangbeziehungen muss an dieser Stelle keine Rücksicht genommen werden, dies wird automatisch bei der Dekodierung von V in eine Aktivitätenliste sichergestellt (vgl. Abschnitt 6.2.1).

An dieser Stelle wird besonders deutlich, worin sich die beiden Repräsentationsformen τ und V zur Beschreibung der Sortierung der Aktivitäten und die dazugehörigen Mutationsoperatoren unterscheiden. Sei $\pi \subset S^N$ eine Menge von Aktivitäten, zwischen denen keine Vorrangbeziehungen definiert sind, die also in jeder beliebigen Reihenfolge eingeplant werden können. Um jetzt beispielsweise die erste Aktivität aus π an die letzte Position zu bringen, muss bei der Repräsentationsform τ $|\pi|$ Mal hintereinander das Ereignis zum Tausch von zwei Aktivitäten eintreten. Für den Einzelfall lässt sich außerdem sagen, dass sich bei jedem einzelnen Eintreten des Ereignisses mit der Wahrscheinlichkeit p^τ auf jeden Fall die Position der Aktivitäten in der Liste ändern. Bei der Repräsentation über Prioritätswerte ist dieses Verhalten qualitativ gesehen genau entgegengesetzt. Bei einem einzelnen Eintreten des Ereignisses, d.h. bei einem einzigen Austausch eines $v_i \in V$ ist nicht sichergestellt, dass sich dadurch auch die Position der Aktivität i in der anschließend abgeleiteten Reihenfolge für die Einplanung ändert. Liegt der zufällig gezogene neue Wert für v_i nah genug am vorherigen Wert, so wird die Aktivität i ihre Position behalten. Es ist jetzt jedoch auch möglich, dass mit einem einzigen Austausch von v_i die Aktivität i gleich um mehrere Positionen verschoben

wird, z.B. wenn v_i vorher der kleinste Prioritätswert aller Aktivitäten aus π war und jetzt der größte Prioritätswert ist.

Die Repräsentationsform τ mit dem dazugehörigen Mutationsoperator bewirkt also eher kleinere Änderungen hinsichtlich der Einplanungsreihenfolge der Aktivitäten bei einer niedrigen Wahrscheinlichkeit p^τ . Wird p^τ dagegen größer gewählt, werden alle Aktivitäten häufiger verschoben und die gesamte Liste ist bei mehrmaligem Anwenden des Mutationsoperators weniger stabil. Dagegen hat bei der Repräsentation V die Wahrscheinlichkeit p^V keinen Einfluss darauf, um wie viele Positionen eine Aktivität verschoben werden kann. Ein kleines p^V führt also bei mehrmaliger Anwendung eher zu einer stabilen Liste, wobei eine einzelne Aktivität trotzdem deutlich ihre Position verändern kann. Welche dieser Varianten mit welchen Wahrscheinlichkeiten zu besseren Ergebnissen führt, wird in Kapitel 7.3.1 genauer untersucht.

Offsetwerte für minimale Dauer $d_i^O \in O$

Jedes $d_i^O \in O$ wird mit einer Wahrscheinlichkeit von p^O verändert. Soll ein d_i^O verändert werden, so wird es mit einer Wahrscheinlichkeit von 50% um 1 erhöht, andernfalls um 1 verringert. Würde der neue Wert von d_i^O nicht mehr in der Menge $\{0, \dots, \bar{d}_i - d_i\}$ enthalten sein, so wird die Änderung nicht durchgeführt.

Lokale Fitnesszielwerte $k_i^* \in K^*$

In Abschnitt 6.1 wurde erläutert, wie die lokalen Fitnesszielwerte verwendet werden können, um die zielfunktionsrelevanten Aktivitäten nicht sofort auf ihre lokal bestmögliche Position einzuplanen. Dadurch soll eine frühzeitige Terminierung des Algorithmus in einem lokalen, aber nicht globalen Optimum, vermieden werden. Bei der Initialisierung des GA werden zunächst alle lokalen Fitnesszielwerte passend zu den Platzierungen gesetzt, die die Aktivitäten bei frühestmöglicher Einplanung erreichen konnten (vgl. Abschnitt 6.2.2). Mit dem Mutationsoperator auf K^* wird jetzt gezielt ein einzelnes k_i^* verändert, um anschließend durch Dekodierung der Lösung zu evaluieren, ob durch diese kleine Änderung tatsächlich auch global ein besserer Zielfunktionswert erreicht werden konnte. Das ist genau dann der Fall, wenn die zu k_i^* gehörende Aktivität i jetzt lokal besser platziert werden kann, dadurch aber keine anderen zielfunktionsrelevanten Aktivität derart schlechter platziert werden müssen, dass der negative Einfluss der nun schlechter platzierten Aktivitäten auf den Zielfunktionswert größer ist, als der Einfluss der einen besseren Platzierung von i .

Um nun gezielt einzelne zielfunktionsrelevante Aktivitäten zu verbessern, wurde bei der Definition der Repräsentationen die zusätzliche Variable $m \in \phi$ eingeführt. Der Mutationsoperator auf K^* wird so definiert, dass er bei seiner Anwendung immer nur k_m^* verändert, also nur den lokalen Fitnesszielwert der Aktivität m . Der Operator wird mit einer Wahrscheinlichkeit von p^{K^*} auf K^* angewendet und tritt dieses Ereignis ein, so wird $k_m^* = \min \{k_i(s_i, d_i) | (s_i, d_i) \in P_i \wedge k_i(s_i, d_i) > k_m^*\}$ gesetzt (sofern es eine

Position gibt, für die die k_i -Funktion einen größeren Wert als k_m^* liefert). Da, wie im nächsten Absatz gezeigt, die Variable m nicht in jeder Iteration verändert wird, wird auf diese Weise in einem Individuum gespeichert, welche zielfunktionsrelevante Aktivität sich bei der aktuellen Einplanungsreihenfolge der Aktivitäten gut verbessern lässt. Wird m nämlich nicht verändert aber die eben beschriebene kleine Erhöhung von k_m^* führt global zu einem besseren Zielfunktionswert, so wird das aktuelle Individuum wahrscheinlich für die nächste Generation ausgewählt (vgl. Abschnitt 6.2.5), d.h. in der nächsten Iteration wird wieder versucht, dieses k_m^* noch weiter zu erhöhen, um ggf. eine noch bessere Lösung zu erhalten. Hat sich die Lösung dagegen verschlechtert, so ist es wahrscheinlich, dass dieses Individuum nicht für die nächste Generation ausgewählt wird. Hat sich die Lösung nicht verändert, z.B. weil die Aktivität m nicht auf die durch das neue k_m^* beschriebene bessere Position eingeplant werden konnte, jedoch auch keine anderen Aktivitäten verändert wurden, so ist es möglich, dass das Individuum in die nächste Generation gewählt wird und dann ggf. nach einer Mutation von m versucht wird, eine andere Aktivität besser zu platzieren.

Zu verändernde zielfunktionsrelevante Aktivität $m \in \phi$

Wie im vorherigen Absatz erklärt wurde, wird über die Variable m an die Kind-Individuen weitergegeben, von welcher Aktivität der lokale Fitnesszielwert durch die nächste Mutation verändert werden darf. Dazu wird zur Mutation von m dieses mit einer Wahrscheinlichkeit von p^m auf eine zufällig ausgewählte Aktivität aus der Menge ϕ gesetzt.

6.2.5. Selektionsphase und nächste Iteration

Nach Anwendung des Kreuzungsoperators und des Mutationsoperators kann die temporäre Population der eigentlichen Population hinzugefügt werden ($\mathcal{P} \leftarrow \mathcal{P} \cup \mathcal{P}'$), wodurch sich die Anzahl der Individuen in \mathcal{P} verdoppelt. Damit daraus über mehrere Iterationen des GA hinweg kein exponentielles Wachstum wird, muss \mathcal{P} am Ende jeder Iteration durch das Entfernen von Individuen wieder auf seine ursprüngliche Größe reduziert werden. Da sich durch die Mutation die Lösung und damit auch der Zielfunktionswert einiger Individuen geändert haben könnte, werden hier zunächst alle Individuen aus \mathcal{P}' mit dem Algorithmus 2 dekodiert, sodass ihr Zielfunktionswert aufgrund der dabei ermittelten Platzierungen der Aktivitäten bestimmt werden kann. Anschließend werden die $|\mathcal{P}'|$ Individuen mit den besten Zielfunktionswerten aus \mathcal{P} für die nächste Generation der Population ausgewählt, alle anderen Individuen werden verworfen. Diese einfache und in zahlreichen in dieser Arbeit referenzierten Veröffentlichungen verwendete Strategie erwies sich auch in eigenen Tests unabhängig von anderen Parametern immer als erfolgreicher als z.B. die proportional-zufällige Auswahl der Individuen (vgl. z.B. Holland (1975)), weshalb hier auf eine detailliertere Untersuchung von Alternativen verzichtet wird.

Optional: Aktualisierung aller k_i^*

Bei der Erläuterung der Mutationsoperatoren in Abschnitt 6.2.4 wurden bereits die Folgen für ein Individuum erläutert, wenn das aktuelle k_m^* verändert wird. Durch diese mögliche Verschiebung einer Aktivität können ggf. auch andere Aktivitäten nicht mehr an ihre vorherige Positionen geplant werden, ihre tatsächliche Position weicht also von der durch ihr k_i^* anvisierte Position ab. Ebenso durch Änderungen an der Einplanungsreihenfolge der Aktivitäten oder der Veränderung der Offsetwerte für die minimalen Dauern können Aktivitäten ihre Position verändert. Über mehrere Iterationen kann es also dazu kommen, dass immer mehr Werte von K^* immer deutlicher von den Werten der k_i -Funktionen zu den tatsächlichen Positionen abweichen. Es könnte jetzt zwar sein, dass durch fortwährende Änderung der Einplanungsreihenfolge nach einiger Zeit eine Reihenfolge gefunden wird, mit der es wieder möglich ist, die zielfunktionsrelevanten Aktivitäten möglichst nah an ihre anvisierten Positionen einzuplanen. Wenn dies jedoch nicht eintritt, ist der in Abschnitt 2 beschriebene Effekt des Mutationsoperators nicht mehr gegeben, dass durch die Variable m in den Individuen an die nächste Generation weitergegeben wird, welche zielfunktionsrelevante Aktivität sich gerade tatsächlich noch verbessern lässt. Aus diesem Grund wird als mögliche Option für den Algorithmus vorgeschlagen, nach der Selektion bei allen für die nächste Generation ausgewählten Individuen das Tupel K^* zu aktualisieren, sodass $k_i^* = k_i(s_i, d_i) \forall i \in \phi$ gesetzt wird, wobei (s_i, d_i) die Position beschreibt, an die die Aktivität bei der Evaluation der Lösung zuletzt tatsächlich eingeplant werden konnte. Dadurch entspricht K^* bei der nächsten Iteration immer den zuletzt erreichten Positionen der Aktivitäten. Ob diese Erweiterung des GA zu besseren Ergebnissen führt oder ob es besser ist, auf die Aktualisierung zu verzichten, wird in Kapitel 7.3.2 genauer untersucht.

6.3. Anpassung an zeitbezogene Zielfunktionen

In den vorherigen Abschnitten dieses Kapitels wurde ein genetischer Algorithmus für ein erweitertes serielles Einplanungsschema vorgestellt, mit denen das Problem $FPS|prec|$ prinzipiell für unterschiedliche Zielfunktionen gelöst werden kann. Dazu müssen vor der Optimierung die Menge ϕ der zielfunktionsrelevanten Aktivitäten sowie die k_i -Funktionen dieser Aktivitäten abhängig von der tatsächlich zu verwendenden Zielfunktionen entsprechend definiert werden. In diesem Abschnitt wird gezeigt, wie ϕ und $k_i(s_i, d_i)$ für einige konkrete Zielfunktionen aussehen können.

6.3.1. Minimierung der Projektlaufzeit

Die Minimierung der Projektlaufzeit sowohl für ein Projekt (Gleichung (6.5)) als auch für mehrere Projekte (Gleichung (6.6)) ist eine reguläre Zielfunktion, deren optimale Lösung durch frühestmögliche Einplanung aller Aktivitäten mit der richtigen Einplanungsreihenfolge erreicht werden kann (vgl. Kapitel 3.3.2).

$$\min f_n \tag{6.5}$$

$$\min \sum_{i \in S^P} f_i \tag{6.6}$$

Im Einzelprojektfall wird dafür der Fertigstellungszeitpunkt der letzten Blindaktivität im Aktivitätennetzwerk minimiert, im Multiprojektfall die Summe der Fertigstellungszeitpunkte der Blindaktivitäten am Ende jedes einzelnen Projekts (vgl. Abbildung 3.3). f_n beschreibt dabei den Fertigstellungszeitpunkt der letzten Blindaktivität im gesamten Aktivitätennetzwerk, die Menge S^P enthält von jedem Projekt die Blindaktivität am Ende des Projektaktivitätennetzwerks.

Da per Definition (vgl. Ausdruck (6.1) und anschließende Erläuterung) alle nichtzielfunktionsrelevanten Aktivitäten aufgrund ihrer k_i -Funktion immer so früh wie möglich eingeplant werden, werden dadurch reguläre Zielfunktionen bereits hinreichend abgebildet. Eine Abwägung und schrittweise Änderung der Platzierungen verschiedener Aktivitäten durch den Mutationsoperator ist somit nicht nötig. Zur Umsetzung von (6.5) und (6.6) kann daher $\phi = \{ \}$ gesetzt werden.

6.3.2. Minimierung der Verspätung von Aktivitäten oder Projekten

Bei der Betrachtung von mehreren Projekten kann es für diese individuelle Fertigstellungstermine geben, die im Rahmen der Planung eingehalten werden sollten. Dieses Konzept kann dahingehend verallgemeinert werden, dass unabhängig von einer Partitionierung des Aktivitätennetzwerks anhand verschiedener Projekte stattdessen einzelne Aktivitäten einen Fertigstellungstermin t_i^D haben können. Wenn D die Menge aller Aktivitäten mit Fertigstellungsterminen ist, dann wird mit der Zielfunktion (6.7) die Summe aller Verspätungen minimiert, mit der Zielfunktion (6.8) wird zusätzlich versucht zu verhindern, dass eine Aktivität vor ihrem Fertigstellungstermin endet.

$$\min \sum_{i \in D} \max \{0, f_i - t_i^D\} \tag{6.7}$$

$$\min \sum_{i \in D} |f_i - t_i^D| \tag{6.8}$$

Um mit Algorithmus 2 einen Projektablaufplan unter einer dieser Zielfunktionen zu optimieren, wird $\phi = D$ gesetzt. Für die Zielfunktion (6.7) wird die lokale Fitnessfunktion der Aktivitäten wie folgt angepasst:

$$k_i(s_i, d_i) = -\max \{0, f_i - t_i^D\} \quad \forall i \in D$$

Damit wird ausgedrückt, dass auch wenn eine Fertigstellung von Aktivitäten vor ihrem Fertigstellungstermin zu keinem schlechteren Zielfunktionswert führt, dieses auch kei-

nerlei Vorteile bringt und so jede mögliche Position mit einem Fertigstellungszeitpunkt bis zum Fertigstellungstermin prinzipiell als gleich gut angesehen werden soll. Bei der Zielfunktion (6.8) wird dagegen die lokale Fitnessfunktion folgendermaßen angepasst:

$$k_i(s_i, d_i) = -|f_i - t_i^D| \quad \forall i \in D$$

Ebenfalls ist es möglich, dass diese beiden Varianten gemischt werden, also die k_i -Funktionen mancher Aktivitäten mit Fertigstellungstermin nur zur Einhaltung des Termins konfiguriert werden und für andere Aktivitäten so eingestellt werden, dass der Termin genau erreicht werden soll.

6.3.3. Einhaltung von Zeitfenstern

Ähnlich zur Einhaltung eines Zeitpunkts der Fertigstellung einer Aktivität ist die Einhaltung eines Zeitfensters \underline{t}_i^W bis \overline{t}_i^W . Wenn die Menge W die Aktivitäten mit definiertem Zeitfenster enthält, dann kann durch die folgende Modifizierung der k_i -Funktion erreicht werden, dass die Optimierung versucht, diese Zeitfenster so gut wie möglich einzuhalten:

$$k_i(s_i, d_i) = -(\max(0, \underline{t}_i^W - f_i) + \max(0, f_i - \overline{t}_i^W)) \quad \forall i \in W \quad (6.9)$$

Als Alternative wäre z.B. denkbar, das Zeitfenster nicht für den Fertigstellungszeitpunkt der Aktivität zu definieren, sondern für den gesamten Ausführungszeitraum von dieser. In dem Fall sollte also $\underline{t}_i^W \leq s_i \leq f_i \leq \overline{t}_i^W$ eingehalten werden, was durch die folgende k_i -Funktion abgebildet werden kann:

$$k_i(s_i, d_i) = -(\max(0, \underline{t}_i^W - s_i) + \max(0, f_i - \overline{t}_i^W)) \quad \forall i \in W$$

6.3.4. Robuste Planung mit Zeitpuffern

Um bei der Planung bewusst zu berücksichtigen, dass die spätere Ausführung einer Aktivität ggf. mit Unsicherheiten behaftet ist und sich die Ausführung somit verzögern kann, kann hinter solchen kritischen Aktivitäten ein Zeitpuffer eingeplant werden. Aus Sicht der Planung bedeutet das, dass eine solche Aktivität i so früh wie möglich platziert wird und alle direkten Nachfolger der Aktivität so spät wie möglich. Wenn C die Menge dieser kritischen Aktivitäten bezeichnet, dann kann die Einplanung von Zeitpuffern mit der Zielfunktion (6.10) erreicht werden.

$$\max_{i \in C} \sum_{j \in S^N | (i,j) \in A} \min \{s_j - f_i\} \quad (6.10)$$

Zur Planung mit Algorithmus 2 müssen als zielfunktionsrelevante Aktivitäten nur die Nachfolgeaktivitäten der kritischen Aktivitäten betrachtet werden, da die kritischen

Aktivitäten C ohnehin auch schon mit den Standardeinstellungen des Algorithmus so früh wie möglich eingeplant werden:

$$\phi = \{j \in S^N | \exists(i, j) \in A \wedge i \in C\}$$

Um diese Aktivitäten nun so spät wie möglich einzuplanen, wird ihre lokale Fitnessfunktion wie folgt geändert:

$$k_j(s_j, d_j) = s_j \quad \forall j \in \{l \in S^N | \exists(i, l) \in A \wedge i \in C\}$$

6.3.5. Kombination von Zielfunktionen

In Kapitel 3.5.1 wurde bereits die Berücksichtigung von mehreren Zielen bei der Optimierung diskutiert, dabei wurden die zwei Varianten *Paretofront* und *gewichtete Zielfunktion* angesprochen. Zum Aufbau einer Paretofront wird der zu optimierende Plan unter allen anzuwendenden Zielfunktionen einmal optimiert, dazu sind demnach keine speziellen Anpassungen bei den zuvor vorgestellten Zielfunktionen nötig. Soll dagegen die Optimierung mit einer einzelnen Zielfunktion durchgeführt werden, die aus gewichteten Unterfunktionen besteht, wird für die Umsetzung mit Algorithmus 2 folgendes Vorgehen vorgeschlagen: Die Menge ϕ enthält alle Aktivitäten, deren k_i -Funktion im Folgenden modifiziert wird. Müsste die k_i -Funktion einer Aktivität aufgrund mehrerer Unterzielfunktionen unterschiedlich modifiziert werden, so wird die Modifizierung derjenigen Unterzielfunktion f_a angewendet, die den höchsten Gewichtungsfaktor w_a in der gesamten Zielfunktion hat.

Als Beispiel für eine kombinierte Zielfunktion wird die Minimierung von Verspätungen für Aktivitäten mit Fertigstellungstermin in Kombination mit dem Einbau von Zeitpuffern hinter kritischen Aktivitäten untersucht. Die entsprechende Zielfunktion ist in Gleichung (6.11) dargestellt.

$$\min w_T * \sum_{i \in D} \max(0, f_i - t_i^D) - w_B * \sum_{i \in S^N} \min_{(k,j) \in A | k=i} (f_j - d_j) - f_i \quad (6.11)$$

Es wird angenommen, dass $w_T > w_B$, d.h. die Einhaltung der Termine ist wichtiger als die Einplanung von Zeitpuffern. Die Menge der zielfunktionsrelevanten Aktivitäten wird dafür wie folgt definiert:

$$\phi = D \cup \{l \in S^N | \exists(i, l) \in A \wedge i \in C\}$$

Zunächst werden die k_i -Funktionen aller Aktivitäten angepasst, die auf kritische Aktivitäten folgen:

$$k_j(s_j, d_j) = s_j \quad \forall j \in \{l \in S^N | \exists(i, l) \in A \wedge i \in C\}$$

6. Eine Heuristik zur flexiblen Projektablaufplanung mit nichtregulären Zielfunktionen

Anschließend werden die k_i -Funktionen der Aktivitäten mit einem Fertigstellungstermin modifiziert und dabei ggf. vorher angewendete Modifizierungen überschrieben:

$$k_i(s_i, d_i) = -\max\{0, f_i - t_i^D\} \quad \forall i \in D$$

Während die Reihenfolge der Anwendung der Modifizierungen der k_i -Funktion anhand der Gewichtungen der Unterzielfunktionen ein allgemein anwendbarer Ansatz zur Berücksichtigung beliebiger Zielfunktionen ist, kann bei Kenntnis der konkreten Unterzielfunktionen auch eine genauere Anpassung denkbar sein. Hat eine Aktivität z.B. einen Fertigstellungstermin und ist gleichzeitig Nachfolger einer kritischen Aktivität, dann sollte der Startzeitpunkt der Aktivität so spät wie möglich liegen, so lange dadurch der Fertigstellungszeitpunkt nicht den Fertigstellungstermin überschreitet. Dies kann über die Einplanung in ein Zeitfenster abgebildet werden, wobei der Start des gewünschten Zeitfenster $\underline{t}_i^W = t_i^D - \underline{d}_i$ und das Ende auf $\overline{t}_i^W = t_i^D$ gesetzt werden.

$$k_i(s_i, d_i) = -(w_B * \max(0, \underline{t}_i^W - s_i) + w_T * \max(0, f_i - \overline{t}_i^W))$$

Die Gewichtungsfaktoren der Unterzielfunktionen gehen jetzt direkt in die k_i -Funktion mit ein, um dort zu modellieren, dass eine Positionierung hinter dem Fertigstellungstermin schlechter ist als eine Positionierung vor diesem. Die optimale Platzierung der Aktivität wäre demnach die mit der kürzesten Dauer und dem Fertigstellungszeitpunkt am Fertigstellungstermin.

6.4. Anpassung an weitere Zielfunktionen

Der Algorithmus 2 kann einen Projektablaufplan unter verschiedenen Zielfunktionen optimieren, wenn diese Zielfunktionen zeitbasiert sind, d.h. mit ihnen die absolute oder die relative Position von einzelnen Aktivitäten bewertet werden. Im vorherigen Abschnitt 6.3 wurden dafür mögliche Zielfunktionen vorgestellt. Die Analyse gängiger Zielfunktionen in Kapitel 3.5.1 hat jedoch gezeigt, dass es in der Projektablaufplanung auch Zielfunktionen gibt, die aufgrund dieser Einschränkung von Algorithmus 2 nicht direkt unterstützt werden. Solche Zielfunktionen liegen jedoch außerhalb des in Kapitel 4 abgegrenzten Bereichs dieser Arbeit und wurden daher beim Entwurf der Optimierungsmethode und auch bei dessen Evaluation in Kapitel 7.3 nicht näher untersucht. Dennoch sollen im Folgenden zwei mögliche Ansätze als Ideen für weitere Forschung vorgestellt werden, mit denen der Bereich der abdeckbaren Zielfunktionen von Algorithmus 2 erweitert werden kann.

Dynamische Anpassung der k_i -Funktionen

Unter der Prämisse einer möglichst gleichmäßigen Auslastung der vorhandenen Ressourcen (vgl. Zielfunktion (3.18)) kann es nötig sein, dass zur Bewertung der möglichen

Platzierungen einer Aktivität nicht nur Start- und Fertigstellungstermine der Platzierungen selber bekannt sein müssen, sondern auch die Positionen anderer Aktivitäten berücksichtigt werden müssen. Dies stellt nicht nur für das in dieser Arbeit entwickelte Konzept der Einplanung über die k_i -Funktionen eine Herausforderung dar, sondern ist generell bei einer seriellen Einplanung von Aktivitäten schwierig zu berücksichtigen, da bei der Einplanung einer Aktivität nur die Positionen der anderen Aktivitäten bekannt sind, die aufgrund der Einplanungsreihenfolge bereits schon vorher eingeplant wurden. Beispiel: pro Zeitperiode sollen, wenn möglich, zwei Aktivitäten ausgeführt werden. In $t = 4$ ist bis jetzt nur eine Aktivität eingeplant und die nächste einzuplanende Aktivität könnte zu diesem Zeitpunkt starten. Sie wird also zu diesem Zeitpunkt eingeplant, $s_i = 4$ wäre für die Aktivität eine bevorzugte Platzierung. Wären in $t = 4$ bereits zwei Aktivitäten eingeplant, so würde $s_i = 4$ dagegen zu einer weniger attraktiven Platzierung.

Um solche Informationen in der Einplanung mit k_i -Funktionen zu berücksichtigen, wäre es denkbar, die k_i -Funktion jeder Aktivität i vor der Einplanung von i anhand der zu diesem Zeitpunkt bereits bekannten Positionen der zuvor eingeplanten Aktivitäten zu aktualisieren. Damit könnte eine Logik, wie in dem einfachen Beispiel zur gleichmäßigen Verteilung der Aktivitäten angesprochen, recht einfach umgesetzt werden. Sollte die ständige Anpassung der k_i -Funktionen bei der Einplanung dazu führen, dass die Lösung eines Individuums sehr instabil über mehrere Iterationen des genetischen Algorithmus ist, so wäre eine weitere Möglichkeit, nicht alle k_i -Funktionen direkt während der Einplanung anzupassen, sondern nur die Funktionen einzelner Aktivitäten immer nach einer bestimmten Anzahl an Iterationen anzupassen und dabei auch auszunutzen, dass zu diesem Zeitpunkt die Positionen aller Aktivitäten in der aktuellen Lösung bekannt sind.

Optimierung der Ressourcenallokation

Die Zielfunktion (3.19) beschreibt eine Glättung des Nutzungsprofils einer Ressource im Zeitverlauf, damit größere Änderungen der Ressourcennutzung in kurzer Zeit vermieden werden. Während sich dieses Nutzungsprofil beim klassischen RCPSP wegen der stets konstanten Ressourcenbedarfe nur aus den Platzierungen der Aktivitäten ergab, bieten sich die flexibel planbaren Ressourcenbedarfe des FRCPS an, um über sie auch im Zeitverlauf der Ausführung einer Aktivität durch unterschiedlich hohe Ressourcenallokation das globale Nutzungsprofil einer Ressource weiter zu beeinflussen. Durch diese flexibel planbaren Ressourcenbedarfe ist es außerdem denkbar, dass auch für eine einzelne Aktivität bestimmte Ressourcennutzungsprofile angestrebt werden, um z.B. über den Zeitverlauf der Ausführung der Aktivität gleichmäßig Ressourcen zu verbrauchen oder bei mehreren flexibel planbaren Bedarfen einer Aktivität die Nutzungsprofile der beiden Ressourcen aneinander anzugleichen.

Die flexibel planbaren Ressourcenbedarfe werden bei der Einplanung einer Aktivität durch Algorithmus 1 noch nicht besonders berücksichtigt. Es wird lediglich geprüft,

ob es prinzipiell für eine mögliche Platzierung eine gültige Ressourcenallokation gibt und wenn dies der Fall ist, werden die benötigten Ressourcen im Greedy-Verfahren so früh wie möglich innerhalb des Ausführungszeitraums allokiert. Es wird angenommen, dass die Zielfunktion der Optimierung so aufgebaut ist, dass die Verteilung der Ressourcen einem anderen zeitbasierten Ziel untergeordnet ist oder es zumindest möglich ist, anhand der Zielfunktion über die im vorherigen Absatz angesprochene dynamische Anpassung der k_i -Funktionen eine Bewertung der möglichen Positionen durchzuführen. Formal gilt also $f(S) = f(S^A) + \epsilon * f(S^R)$, wobei S den gesamten Ablaufplan bezeichnet, S^A nur die Positionen der Aktivitäten im Plan und S^R die Ressourcenallokation. Jetzt ist folgendes Vorgehen denkbar: der Projektablaufplan wird mit dem genetischen Algorithmus zunächst nur unter der Zielfunktion $f(S^A)$ optimiert. Ist hier ein zufriedenstellender durchschnittlicher Zielfunktionswert über alle Individuen der Population \mathcal{P} erreicht, so wird im Anschluss für die Lösung jedes Individuums aus \mathcal{P} das MIP-Modell (5.11)–(5.16) gelöst, wobei die Positionen der Aktivitäten im Modell auf die Positionen der Aktivitäten in der Lösung des Individuums fixiert werden. Dadurch sind alle ganzzahligen Entscheidungsvariablen fixiert und nur noch die kontinuierlichen Ressourcenallokationsvariablen r_{ikt} veränderbar, wodurch das Modell auf ein reines LP-Modell reduziert wird und es sich damit auch für größere Instanzen sehr schnell lösen lassen sollte. Dieses Modell wird jetzt unter der Zielfunktion $f(S)$ optimiert, wodurch sich ggf. eine neue Ressourcenallokation für die flexibel planbaren Bedarfe ergibt. Abschließend wird die Lösung ausgewählt, die bei dieser nachgelagerten Optimierung den besten Zielfunktionswert erreicht hat.

6.5. Alternative Ressourcenallokation

Das erweiterte serielle Einplanungsschema von Kolisch u. a. (2003) plant die flexibel planbaren Ressourcenbedarfe einer Aktivität so früh wie möglich ein und versucht die Ausführungszeit der Aktivität dadurch so kurz wie möglich zu halten. In Abschnitt 6.1 wurde die daraus resultierende mögliche Problematik erläutert, dass dadurch Ressourcen im Zeitverlauf der Aktivität am Anfang sehr stark beansprucht werden und in Folge dessen dort nicht mehr genügend Ressourcen zur Verfügung stehen, um andere Aktivitäten ebenfalls in diesem Zeitraum einzuplanen. Aufgrund der im weiteren Verlauf der Arbeit noch zu untersuchenden Vermutung, dass dies möglicherweise zu schlechteren Lösungen führt, wurde mit den Offsetwerten $d_i^O \in O$ eine künstliche Erhöhung der minimalen Dauern der Aktivitäten herbeigeführt, um so die Ressourcenallokation der flexibel planbaren Bedarfe etwas zu strecken. Da die Ressourcen jetzt jedoch trotzdem noch so früh wie möglich allokiert werden, führt dies wahrscheinlich nur dazu, dass durch die künstliche Verlängerung am Ende der Aktivität nur noch der vorgeschriebene minimale Bedarf pro Zeitperiode r_{ik} zugeordnet wird, während die Ressourcennutzung am Anfang immer noch sehr hoch sein wird.

Um eine solche asymmetrische Ressourcenallokation weiter zu verringern, wird als

Alternative zu Algorithmus 1 hier mit Algorithmus 3 eine weitere Einplanungsmethode für eine mögliche Platzierung einer Aktivität vorgeschlagen. Dabei ist es das Ziel, die Ressourcenallokation der flexibel planbaren Ressourcenbedarfe gleichmäßiger über den Zeitverlauf der Aktivität zu verteilen und damit dessen möglicherweise verlängerte Dauer besser auszunutzen. Ob dadurch tatsächlich bessere Optimierungsergebnisse erzielt werden können, wird in Kapitel 7.3.2 untersucht.

Analog zu Algorithmus 1 werden auch in Algorithmus 3 zunächst die konstanten Ressourcenbedarfe und die minimalen Mengen pro Zeitperiode der flexibel planbaren Bedarfe verplant (Zeilen 8–13). Ist ein flexibel planbarer Bedarf dann noch nicht komplett erfüllt, wird iterativ versucht, die Ressourcen für den restlichen Bedarf gleichmäßig über den gesamten Zeitraum der Aktivität zu allokatieren. In jeder Iteration (Zeilen 16–26) werden dabei alle Zeitperioden der Aktivität durchgegangen (Zeilen 18–24) und pro Zeitperiode wird maximal eine weitere Einheit der Ressource allokatiert, es sei denn, dass 1. der gesamte Ressourcenbedarf bereits erfüllt ist oder 2. in dieser Zeitperiode nicht mehr genügend Ressourcen zur Verfügung stehen oder 3. für diese Zeitperiode bereits die maximal erlaubte Menge \bar{r}_{ik} allokatiert wurde (Zeile 19). Für jede Iteration wird sich gemerkt, wie viele weitere Ressourceneinheiten jetzt zugeordnet werden konnten (Zeilen 17 und 23). Konnten in einer ganzen Iteration keine weiteren Ressourcen zugeordnet werden, so kann die Aktivität wegen zu wenig verfügbarer Ressourcen nicht an dieser Position eingeplant werden und die Methode wird mit einem Fehler abgebrochen (Zeile 25). Konnten jedoch weitere Ressourcen zugeordnet werden, so wird anschließend geprüft, ob der gesamte Ressourcenbedarf w_{ik} jetzt erfüllt ist. Ist dies nicht der Fall, so wird die nächste Iteration für weitere Ressourcenallokationen gestartet (Zeile 26).

Grundsätzlich ist bei dieser alternativen Einplanung zu überlegen, wie viel Ressourceneinheiten pro Iteration und Zeitperiode maximal eingeplant werden sollen (in Zeile 19 auf den Wert 1 festgelegt). Ist dieser Wert sehr klein gewählt und der gesamte Ressourcenbedarf jedoch sehr hoch, so werden sehr viele Iterationen nötig, bis der gesamte Bedarf komplett erfüllt wurde. Das kann sich dann negativ auf die Laufzeit des Algorithmus auswirken. Wird dieser Wert dagegen zu groß gewählt, d.h. nah am maximalen Ressourcenbedarf pro Zeitperiode \bar{r}_{ik} , dann wird ein Großteil der benötigten Ressourcen wahrscheinlich in der ersten Iteration direkt am Anfang der Aktivität allokatiert und es ergäbe sich keine große Veränderung im Ressourcennutzungsprofil gegenüber Algorithmus 1. An dieser Stelle wurde deshalb zunächst maximal eine Ressourceneinheit pro Iteration und Zeitperiode allokatiert, da sich bei den für die Testläufe von der PSPLIB abgeleiteten Testinstanzen (vgl. Kapitel 7.1) der durchschnittliche Ressourcenbedarf pro Zeitperiode je nach Aktivität im Bereich von 3–10 Ressourceneinheiten bewegt. Betrachtet man dagegen die Testinstanzen der Fallstudie aus Kapitel 8.1, kommen dort Ressourcenbedarfe von 36.000 – 216.000 Ressourceneinheiten pro Zeitperiode vor. In diesem Fall sollte die maximale Menge an allokatierten Ressourceneinheiten pro Iteration und Zeitperiode deutlich größer gewählt werden.

Algorithmus 3 : Einplanung einer Aktivität auf eine vorgegebene Platzierung (Alternative zu Algorithmus 1)

Input : Gewünschte Platzierung (s_i, d_i) , aktuelle Ressourcenverfügbarkeit a_{kt}

Data : Ressourcenbedarfe $w_{ik} \forall (i, k) \in F, \underline{r}_{ik}, \overline{r}_{ik} \forall i \in S^N, k \in S^K$

Result : Information ob die Aktivität platziert werden konnte, aktualisierte Ressourcenverfügbarkeit a_{kt} bei erfolgreicher Platzierung

```

1  if  $s_i < EST_i \vee s_i > LST_i \vee d_i < \underline{d}_i \vee d_i > \overline{d}_i \vee s_i + d_i > LFT_i$  then
2      | return FEHLER
3  if  $s_i < \max \{f_j | \forall (j, i) \in A\}$  then return FEHLER
4   $a'_{kt} \leftarrow a_{kt}$ 
5   $r_{ikt} \leftarrow 0$ 
6  foreach  $k$  in  $S^K$  do
7      |  $w_{ik}^* \leftarrow 0$ 
8      | for  $t = s_i$  to  $s_i + d_i - 1$  do
9          | if  $a'_{kt} < \underline{r}_{ik}$  then return FEHLER
10         |  $a'_{kt} \leftarrow a'_{kt} - \underline{r}_{ik}$ 
11         |  $w_{ik}^* \leftarrow w_{ik}^* + \underline{r}_{ik}$ 
12         |  $r_{ikt} \leftarrow \underline{r}_{ik}$ 
13     | end
14     | if  $(i, k) \in F \wedge w_{ik}^* \neq w_{ik}$  then
15         | if  $w_{ik}^* > w_{ik}$  then return FEHLER
16         | repeat
17             |  $w_{temp} \leftarrow 0$ 
18             | for  $t = s_i$  to  $s_i + d_i - 1$  do
19                 |  $w^+ \leftarrow \min(1, w_{ik} - w_{ik}^*, a'_{kt}, \overline{r}_{ik} - r_{ikt})$ 
20                 |  $w_{ik}^* \leftarrow w_{ik}^* + w^+$ 
21                 |  $a'_{kt} \leftarrow a'_{kt} - w^+$ 
22                 |  $r_{ikt} \leftarrow r_{ikt} + w^+$ 
23                 |  $w_{temp} \leftarrow w_{temp} + w^+$ 
24             | end
25             | if  $w_{temp} = 0$  then return FEHLER
26         | until  $w_{ik}^* < w_{ik}$ 
27     | end
28 end
29  $a_{kt} \leftarrow a'_{kt}$ 
30 return OK

```

7. Evaluation und Vergleich der Lösungsverfahren

In den vorherigen Kapiteln dieser Arbeit wurden ein exaktes und ein heuristisches Lösungsverfahren für das Problem $FPS|prec| \cdot$ mit zeitbasierten Zielfunktionen vorgestellt. In diesem Kapitel soll die Effizienz und Effektivität dieser Verfahren anhand numerischer Ergebnisse bewertet und gegenübergestellt werden. Dazu werden zunächst die für die numerischen Tests verwendeten Testinstanzen vorgestellt und gegenüber in der Literatur vorhandenen Testinstanzen eingeordnet. Anschließend werden diese Instanzen zunächst mit dem exakten Lösungsverfahren aus Kapitel 5.2 gelöst und die Ergebnisse bewertet. Es folgt die Bewertung des heuristischen Lösungsverfahrens aus Kapitel 6, wobei hier zunächst der Fokus auf das Finden möglichst guter Parameter für den Lösungsalgorithmus gelegt wird. Anschließend werden die Testinstanzen mit diesen Parametereinstellungen heuristisch gelöst und die Ergebnisse mit denen des exakten Verfahrens verglichen. In einem weiteren Test wird evaluiert, ob es sinnvoll sein könnte, das exakte und das heuristische Lösungsverfahren miteinander zu verbinden, um so die Stärken beider Verfahren auszunutzen und noch bessere Ergebnisse zu erhalten. Zuletzt wird eine geeignete Untermenge der Testinstanzen auch mit anderen, zuvor in der Literatur vorgestellten heuristischen Verfahren gelöst und die Ergebnisse mit denen des hier entwickelten Ansatzes verglichen.

7.1. Versuchsaufbau und verwendete Testinstanzen

Die Effektivität und Effizienz der entwickelten Lösungsverfahren soll anhand von numerischen Tests demonstriert und evaluiert werden. Dabei sollen eine Reihe von Fragen beantwortet bzw. Annahmen überprüft werden, die sich so aus der Literaturrecherche von Kapitel 3 und den Zielen der Arbeit in Kapitel 4 ergeben.

1. Gilt für das FRCPSp genauso wie für das klassische RCPSP, dass es mit einem MIP-Modell und dem Branch&Bound-Verfahren nicht effizient exakt lösbar ist?
2. Ist der entwickelte genetische Algorithmus generell in der Lage, das Problem $FPS|prec| \cdot$ unter verschiedenen zeitbasierten Zielfunktionen zu lösen?
3. Ist der entwickelte genetische Algorithmus in der Lage, das Problem $FPS|prec|C_{\max}$ (und damit auch die Spezialisierung $PS|prec|C_{\max}$) effizient zu lösen, sodass der Algorithmus nicht nur als weitere Lösungsmethode für Spezialfälle angesehen werden kann, sondern als ein breit einsetzbares Lösungsverfahren für eine Reihe von Projektplanungsproblemen mit praxisrelevanten Größen?

4. Wie gut sind der entwickelte genetische Algorithmus und das erweiterte Einplanungsschema im Vergleich zu anderen heuristischen Lösungsverfahren aus der Literatur für das FRCPSP mit regulären Zielfunktionen?

Die Untersuchungen der praxisrelevanten Aspekte der Projektablaufplanung in Kapitel 2.3 haben gezeigt, dass sich viele dieser Aspekte in Form von Zielen bei der Planung ausdrücken lassen, d.h. aus Sicht der Optimierung als Zielfunktion, ggf. mit dafür benötigten weiteren Parametern für die Entitäten des Optimierungsmodells (z.B. Fertigstellungstermine für Aktivitäten). In den zuvor aufgestellten und jetzt in diesem Kapitel zu beantwortenden Fragen wird zunächst nur davon gesprochen, dass die entwickelten Lösungsmethoden grundsätzlich mit verschiedenen zeitbasierten Zielfunktionen umgehen können sollen. Nun kann es je nach betrachtetem Spezialfall der Projektablaufplanung natürlich sehr viele verschiedene denkbare Zielfunktionen geben, die alle in ihren jeweiligen Fällen auch von Relevanz sind. Zur Eingrenzung der Untersuchung in dieser Arbeit werden daher die folgenden vier Zielfunktionen definiert, die insgesamt alle Punkte der oben aufgeführten Fragen und der in Kapitel 2.3 angesprochenen praxisrelevanten Aspekte abdecken.

ZF1 Die klassische C_{\max} -Funktion (vgl. Zielfunktion (6.5)) wird zur Evaluation des genetischen Algorithmus bei der klassischen Einzelprojektplanung verwendet, außerdem wird sie zum Vergleich mit anderen, aus der Literatur bekannten Lösungsmethoden für das FRCPSP mit regulären Zielfunktionen verwendet.

$$\min f_n$$

ZF2 Um die Einsetzbarkeit in der Multiprojektplanung bzw. allgemein in der Projektplanung mit Terminen zu demonstrieren, wird die Minimierung von Verspätungen gegenüber gewünschten Fertigstellungsterminen (vgl. Zielfunktion (6.7)) auf Multiprojektplänen evaluiert.

$$\min \sum_{i \in D} \max \{0, f_i - t_i^D\}$$

ZF3 Zur Evaluation der Anwendbarkeit des genetischen Algorithmus unter kombinierten, nichtregulären Zielfunktionen wird der in Kapitel 2.3.2 beschriebene Fall der Multiprojektplanung unter Berücksichtigung von Risikoinformationen näher untersucht (vgl. Zielfunktion (6.11)). Dazu soll mit einer Gewichtung von 10:1 hauptsächlich die Einhaltung der gesetzten Termine von Aktivitäten sichergestellt werden und zusätzlich, falls möglich, Zeitpuffer hinter zuvor ausgewählte kritische Aktivitäten eingebaut werden.

$$\min 1 * \sum_{i \in D} \max (0, f_i - t_i^D) - 0, 1 * \sum_{i \in S^N} \min_{(k,j) \in A | k=i} (f_j - d_j) - f_i$$

ZF4 In dem in Kapitel 2.3.4 vorgestellten Projektplanungsbeispiel aus der Praxis soll zum einen die Einhaltung von gesetzten Terminen sichergestellt werden, außerdem sollen Aktivitäten, die in vorherigen Planungsiterationen bereits eingeplant wurden, jetzt möglichst nah an ihrer ursprünglichen Startzeit eingeplant werden. Dafür wird die folgende, aus den zwei Komponenten *Verspätungsminimierung* (vgl. Zielfunktion (6.7)) und *Einhaltung von Zeitfenstern* (angelehnt an Zielfunktion (6.9)) zusammengesetzte Zielfunktion definiert, die anschließend in der Untersuchung der Fallstudie zu diesem Praxisbeispiel (vgl. Kapitel 8) verwendet wird.

$$\min \sum_{i \in D} \max(0, f_i - t_i^D) + 0.1 * (\max(0, \underline{t_i^W} - s_i) + \max(0, s_i - \overline{t_i^W}))$$

Zur Evaluation des genetischen Algorithmus mit den Zielfunktionen ZF1–ZF3 sind Einzel- und Multiprojektpläne mit konstanten und flexibel planbaren Ressourcenbedarfen nötig, die für ZF2 und ZF3 außerdem Termine für einzelne Aktivitäten und für ZF3 auch noch ausgezeichnete Aktivitäten beinhalten müssen, hinter die dann ein Zeitpuffer eingeplant werden soll. Solche Testinstanzen stehen nach aktuellem Wissen jedoch nicht frei in der Literatur zur Verfügung. Alle bekannten Veröffentlichungen zum Thema flexibel planbare Ressourcenbedarfe (vgl. Kapitel 3.4) verweisen lediglich darauf, dass sie speziell für ihre Untersuchungen angepasste Abwandlungen von Testinstanzen aus der in Kapitel 3.1.2 vorgestellten PSPLIB-Bibliothek verwendet haben. Aus diesem Grund wurden für die Untersuchungen in diesem Kapitel ebenfalls die Testinstanzen der PSPLIB als Grundlage genommen und wie im Folgenden beschrieben an die zuvor genannten Anforderungen angepasst.

Testinstanzenmenge EP150 Zur Evaluierung der Lösungsverfahren für den Einzelprojektfall (ZF1) werden 150 Einzelprojektinstanzen (vgl. Tabelle A.1) verwendet. Grundlage dieser Instanzen sind jeweils 25 zufällig ausgewählte Instanzen aus den PSPLIB-Instanzen mit 30, 60 und 120 Aktivitäten. Aus jeder dieser 75 Instanzen mit rein konstanten Ressourcenbedarfen wurden nun jeweils 2 Instanzen mit teilweise flexibel planbaren Ressourcenbedarfen abgeleitet, wobei bei einer Instanz für 20%-50% aller Aktivitäten mindestens ein Bedarf flexibilisiert wurde und bei der anderen Instanz für 50%-80% aller Aktivitäten. Das genaue Vorgehen für diese Flexibilisierung wird im nächsten Abschnitt beschrieben.

Testinstanzenmenge MP50 Zur Evaluierung der Lösungsverfahren für den Multiprojektfall (ZF2 und ZF3) werden zunächst 50 Multiprojektinstanzen (vgl. Tabelle A.2) verwendet. Diese werden, wie im folgenden Abschnitt genauer erklärt wird, über mehrere Schritte aus den Einzelprojektinstanzen der PSPLIB erstellt. Die Beschränkung auf nur 50 Instanzen hat den Grund, dass die Instanzen dieser Menge nicht nur einmalig von allen zu testenden Lösungsverfahren gelöst

wurden, sondern auch z.B. während der Entwicklung des genetischen Algorithmus fortwährend zum Austesten verschiedener Einstellungen und anschließend für das abschließende Parametertuning (vgl. Abschnitt 7.3.1) benutzt wurden. Aufgrund von nur beschränkter Rechenkapazität war hier zunächst eine kleinere Menge von Testinstanzen nötig.

Testinstanzenmenge MP250 Zur Validierung der Ergebnisse der MP50-Instanzen werden 250 Multiprojektinstanzen (vgl. Tabelle A.3) verwendet, die auf die gleiche Art wie die MP50-Instanzen gebildet wurden.

Während sich die Einzelprojektinstanzen EP150 in ihrem Aufbau und ihrer Größe sehr an den künstlichen Instanzen der PSPLIB orientieren, sollen die Multiprojektinstanzen der Mengen MP50 und MP250 soweit wie möglich den Eigenschaften von Projektplanungsproblemen aus der Praxis, wie in Kapitel 2.2 beschrieben, nachempfunden werden. Konkret wird sich dabei an den Untersuchungen von Herroelen (2005) orientiert, welcher als Richtwert für gängige Multiprojektplanungsprobleme angibt, dass häufig etwa 3–5 Projekte gleichzeitig geplant werden müssen mit etwa 50–150 Aktivitäten. Diese Zahlen werden daher als Richtwert für die Generierung der MP50- und MP250-Instanzen verwendet. Es werden in Kapitel 2.2 auch Quellen angegeben, in denen von deutlich größeren Multiprojektplänen die Rede ist. Diese werden jedoch für die Untersuchungen in diesem Kapitel zunächst nicht berücksichtigt, da solche großen Pläne in diesen Quellen einerseits oft nur als Extrembeispiele angeführt werden und andererseits in der Fallstudie in Kapitel 8 nochmal deutlich größere Pläne betrachtet und gelöst werden.

Schritt 1: Testinstanzen kürzen

In der PSPLIB bestehen die kleinsten Einzelprojektinstanzen aus 30 Aktivitäten. Orientiert man sich nun an den zuvor genannten Zahlen für realistische Multiprojektpläne, dann würde man bereits einen Plan mit 90 Aktivitäten erhalten, wenn man nur drei dieser Instanzen zu einem Multiprojektplan zusammenfügt, ein Multiprojektplan mit 5 Projekten bestünde somit immer aus 150 Aktivitäten. Solche Multiprojektinstanzen wären immer einerseits sehr groß und andererseits sehr gleichförmig, da alle ihre einzelnen Projekte immer genau aus 30 Aktivitäten bestehen würden.

Aus diesen Gründen wurden im ersten Generierungsschritt der MP50- und MP250-Instanzen die Einzelprojektinstanzen mit 30 Aktivitäten aus der PSPLIB genommen und gekürzt. Dazu wurde jeweils zufällig eine dieser 480 Instanzen aus der PSPLIB ausgewählt und von dieser die letzten n nicht-Blindaktivitäten und ihre Ressourcenbedarfe aus dem Aktivitätennetzwerk gelöscht, sodass je nach zufällig gewähltem n ein Netzwerk mit 7–30 Aktivitäten übrig blieb. Alle verbliebenen Aktivitäten, die durch dieses Entfernen von Aktivitäten jetzt keine Nachfolgeaktivität mehr hatten, bekamen als neue Nachfolgeaktivität die Blindaktivität am Ende des Aktivitätennetzwerks zugewiesen, sodass nach dem Entfernen das Aktivitätennetzwerk immer noch gültig war.

Dies wurde so lange wiederholt, bis eine genügend große Menge von gekürzten Einzelprojektplänen mit 7–30 Aktivitäten erstellt wurde (in diesem Fall wurden 2070 solcher Pläne erstellt).

Anschließend wurde jeder dieser gekürzten Einzelprojektpläne einmal mit dem MIP-Modell von Pritsker u. a. (1969) (vgl. Kapitel 3.2) gelöst¹. Dadurch sollte einerseits eine obere Schranke $\overline{d_n^P}$ für die Projektlaufzeit abgeschätzt werden, um im nächsten Schritt sinnvoll Fertigstellungstermine setzen zu können. Andererseits sollte so die Lösungsschwierigkeit der einzelnen Instanzen bestimmt werden, um mit dieser Information beim Zusammenführen der Einzelprojektinstanzen zu Multiprojektinstanzen im nächsten Schritt eine bessere Auswahl der zu verwendenden Einzelprojektpläne treffen zu können.

Schritt 2: Gekürzte Instanzen zu Multiprojektplänen zusammenfügen

Im Anschluss an Schritt 1 werden die dort erzeugten Einzelprojektpläne zu Multiprojektplänen zusammengefügt. Ein Einzelprojektplan besteht dabei aus einem Aktivitätennetzwerk und einer Menge von verfügbaren Ressourcen. Werden nun mehrere Einzelprojektpläne zusammengefügt, so müssen die Aktivitätennetzwerke und die Ressourcenmengen dieser Pläne zu einem großen Plan zusammengefasst werden.

Das Zusammenführen von mehreren Aktivitätennetzwerken ist dabei vergleichsweise trivial, es müssen lediglich zwei neue, übergeordnete Blindaktivitäten zu Beginn und Ende des Netzwerks erstellt werden und diese mit den Blindaktivitäten am Anfang bzw. Ende von jedem der Einzelprojektnetzwerke verbunden werden. Eine anschauliche Erklärung und Visualisierung dazu ist in Kapitel 3.1.3 zu finden.

Eine Planung mehrerer Projekte in einem gemeinsamen Plan ist nur dann nötig, wenn diese Projekte um gemeinsam genutzte Ressourcen konkurrieren. Im Gegensatz zu den Aktivitätennetzwerken sollten die verfügbaren Ressourcen der Einzelprojektpläne deshalb nicht einfach alle in den Multiprojektplan kopiert werden, sodass aus je vier Ressourcenarten von zwei Einzelprojektplänen acht Ressourcenarten im Multiprojektplan würden. Für eine gemeinsame Nutzung ist es nötig, die Mengen der einzelnen Ressourcen zusammenzuführen. Diese Zusammenführung der Ressourcenverfügbarkeiten wird folgendermaßen realisiert:

$$a_k^M = a_k^A + \lambda^B * a_k^B + \lambda^C * a_k^C + \dots$$

Dabei bezeichnen A, B und C die zu Grunde liegenden Einzelprojektpläne und M den neuen Multiprojektplan. Die Verfügbarkeit der Ressource 1 im Multiprojektplan ergibt sich also aus der gewichteten Aufsummierung der einzelnen Verfügbarkeiten der Ressource 1 der Einzelprojektpläne. Nach dem gleichen Schema werden die weiteren Ressourcen kombiniert. Da alle Testinstanzen der PSPLIB mit genau 4 Ressourcen arbeiten, ist eine solche Kombination immer möglich. Der Gewichtungsfaktor $0 < \lambda < 1$

¹Lösung mit Gurobi 5.6 auf einem Intel Core i7-3770 mit 16 GB RAM, Zeitlimit = 60 Minuten

wurde eingeführt, um zu verhindern, dass die Ressourcen immer mit ihrer kompletten Verfügbarkeit des Ursprungsplans aufsummiert werden. Eine solche vollständige Aufsummierung würde zu keiner echten Konkurrenzsituation bei der anschließenden Planung führen, da dann für jedes Unterprojekt im Durchschnitt weiterhin so viele Ressourcen wie im Einzelprojektfall verfügbar wären.

Konkret läuft die Erstellung eines Multiprojektplans nun so ab, dass zunächst festgelegt wird, wie groß der neue Plan mindestens werden soll. Dazu wird die Mindestanzahl an Aktivitäten zufällig aus dem Intervall $[30, 50]$ und die Mindestanzahl an Projekten zufällig aus $[3, 5]$ bestimmt. Um die Schwierigkeit hinsichtlich der Lösbarkeit des zu erstellenden Multiprojektplans etwas zu steuern, wird die maximale Schwierigkeit, die ein Einzelprojektplan aus Schritt 1 haben darf, um jetzt ausgewählt zu werden, zufällig aus dem Intervall $[1, 4]$ bestimmt. Die Schwierigkeitsbewertung eines Plans ergibt sich aus dessen Lösungszeit mit dem exakten Lösungsverfahren, die dazugehörige Skala ist in Kapitel A.1 aufgeführt. Durch die Begrenzung der maximalen Schwierigkeit der zu wählenden Einzelprojektpläne soll verhindert werden, dass der entstehende Multiprojektplan zu schwierig zu lösen ist. Erste Tests haben gezeigt, dass dies schon oft der Fall ist, wenn nur eines der Einzelprojekte des Plans schwierig zu lösen ist. Durch eine zufällige Begrenzung der maximalen Schwierigkeit sollen so auch leicht zu lösende Multiprojektpläne geschaffen werden, sodass die resultierenden Instanzen aus MP50 und MP250 ausgewogen über alle Schwierigkeiten hinsichtlich der benötigten Lösungszeit verteilt sind.

Nachdem die Parameter für die minimale Anzahl an Aktivitäten, Projekte und maximale Schwierigkeit festgelegt wurden, werden nun so lange zufällig Pläne aus der in Schritt 1 erzeugten Menge an Plänen, die die maximale Schwierigkeit nicht überschreiten, ausgewählt, bis die ausgewählten Pläne in Summe die minimale Anzahl an Projekten und die Aktivitäten der ausgewählten Pläne in Summe die minimale Anzahl der Aktivitäten überschreiten.

Anschließend muss für jedes der so zusammengestellten Projekte des neuen Multiprojektplans ein möglicher Ausführungszeitraum, d.h. ein frühester Startzeitpunkt für die erste Blindaktivität des Projekts und ein Fertigstellungstermin für die letzte Blindaktivität des Projekts, festgelegt werden. Diese Termine sollten so gewählt sein, dass ausgehend vom ersten Projekt des Plans jedes weitere Projekt einen zeitlich überlappenden Bereich mit den bisherigen Projekten aufweist, dass also nicht zwei oder mehr von den Ausführungszeiträumen disjunkte Untermengen der Projekte entstehen, die dadurch auch getrennt optimiert werden könnten. Um so einen Ausführungszeitraum für ein Projekt festlegen zu können, muss zunächst die mögliche Ausführungsdauer dieses einzelnen Projekts bekannt sein. Dafür wird die obere Schranke für die Ausführungsdauer \overline{d}_n^P benutzt, die bereits in Schritt 1 für jeden Einzelprojektplan berechnet wurde.

Das erste Projekt im Multiprojektplan bekommt den frühesten Startzeitpunkt $\underline{s}_i = 0$ zugewiesen, es kann also sofort starten, der Fertigstellungstermin wird auf $t_i^D = \underline{s}_i + \overline{d}_i^P$

gesetzt. Jedes weitere Projekt erhält dann iterativ einen zufälligen Starttermin im Bereich von

$$\underline{s}_j \in \left[0, \min \left\{5, \max \left\{\overline{t}_i^D\right\} - 10\right\}\right]$$

d.h. vom Zeitpunkt 0 bis zu 10 Zeitperioden vor dem spätesten Fertigstellungstermin aller Projekte, die für diesen Multiprojektplan bereits einen Ausführungszeitraum zugewiesen bekommen haben. Der Fertigstellungstermin wird dann auf

$$t_j^D = \underline{s}_j + \chi * \overline{d}_j^P$$

gesetzt, wobei durch den Faktor χ der gewünschte Fertigstellungstermin bezogen auf die zuvor ermittelte Schranke der Projektlaufzeit eher nach vorne oder hinten verschoben wird. Um χ zu setzen wird für jedes Projekt zunächst zufällig entschieden, ob der Fertigstellungstermin eher früh und das Projekt damit möglichst zeitlich eng geplant werden soll oder ob der Termin bewusst etwas später gewählt wird, um für die Anwendung von ZF3 ggf. den Einbau von Zeitpuffern zu erlauben. Im Fall einer gewünschten engen, d.h. schwierigen Planung wird $\chi \in [60\%, 90\%]$ zufällig gesetzt, andernfalls ist $\chi \in [100\%, 140\%]$. Der zur Kombination der Ressourcenverfügbarkeiten zuvor vorgestellte Faktor λ wird analog im Fall einer gewünschten engen und schwierigen Planung im Bereich $\lambda \in [50\%, 80\%]$ zufällig gewählt, andernfalls im Bereich $\lambda \in [80\%, 120\%]$. Zuletzt werden in jedem Projekt zufällig zwischen 2–5 Aktivitäten als kritische Aktivitäten markiert, hinter die bei der Optimierung mit ZF3 ein Zeitpuffer eingeplant werden soll.

Das Ergebnis von Schritt 2 sind Multiprojektpläne mit 3–5 Projekten und rein konstanten Ressourcenbedarfen, bei denen für jedes Projekt ein frühestmöglicher Starttermin und ein gewünschter Fertigstellungstermin gesetzt sind. Außerdem wurden verschiedene Aktivitäten als kritisch markiert, sodass hinter sie, wenn möglich, Zeitpuffer eingeplant werden.

Schritt 3: Aktivitäten und Ressourcenbedarfe flexibilisieren

In diesem letzten Schritt wird ein Plan mit ausschließlich konstanten Ressourcenbedarfen derart modifiziert, dass einige dieser Bedarfe sowie die dazugehörigen Aktivitäten von nun an flexibel planbar sind. Dieser Schritt wird zum einen auf die PSPLIB-Instanzen mit 30 Aktivitäten zur Erzeugung der EP150-Instanzen angewendet und zum anderen auf die in Schritt 2 generierten Multiprojektinstanzen zur Generierung der MP50- und MP250-Instanzen. Dazu werden zunächst aus jedem Projekt des ursprünglichen Plans zwischen 20%–75% der Aktivitäten ausgewählt, die nun flexibilisiert werden. Von jeder dieser Aktivitäten wird eine zufällige Anzahl ihrer vier konstanten Ressourcenbedarfe in flexibel planbare Ressourcenbedarfe umgewandelt. Um einen konstanten in einen flexibel planbaren Bedarf umzuwandeln, wird zunächst die

insgesamt zu verplanende Menge an Ressourcen $w_{ik} = \underline{d}_i * \underline{r}_{ik}$ gesetzt (Merke: an dieser Stelle gilt noch $\underline{d}_i = \overline{d}_i$ sowie $\underline{r}_{ik} = \overline{r}_{ik}$). Anschließend wird $\underline{r}_{ik} = 0,25 * \underline{r}_{ik}$ und $\overline{r}_{ik} = 3 * \overline{r}_{ik}$ gesetzt.

Wurden alle ausgewählten konstanten Bedarfe einer Aktivität in flexibel planbare Bedarfe umgewandelt, dann wird zum Schluss die bis dahin konstante Dauer der Aktivität ebenfalls zu einer variablen Dauer umgewandelt. Dazu wird die minimal erlaubte Dauer \underline{d}_i zufällig auf 20%–60% der ursprünglichen Dauer gesetzt und die maximal erlaubte Dauer \overline{d}_i zufällig auf 110%–200% der ursprünglichen Dauer.

7.2. Ergebnisse des exakten Lösungsverfahrens

Zur Evaluation eines exakten Lösungsverfahrens wurden alle Instanzen aus den drei Testinstanzenmengen EP150, MP50 und MP250 durch das in Kapitel 3.2 vorgestellte MIP-Modell mit dem MIP-Solver Gurobi 5.6 gelöst. Dabei wurden die EP150-Instanzen unter der Zielfunktion ZF1 und die MP50- und MP250-Instanzen unter den Zielfunktionen ZF2 und ZF3 gelöst. Das Modell wurde dazu in einer C#-Anwendung implementiert und über die frei verfügbare Modellierungsschnittstelle *Optimization.Framework*² an Gurobi übergeben. Als Hardware wurden Workstations mit Intel Core i7-3770 Prozessoren (4x 3,4 GHz) und mindestens 16 GB Arbeitsspeicher benutzt.

Zum Aufbau des MIP-Modells (5.10)–(5.16) müssen die auf Seite 66 definierten Mengen aller Aktivitäten S^N mit ihren Ressourcenbedarfen, der verfügbaren Ressourcen S^K und der zu betrachtende Zeithorizont T bekannt sein. Innerhalb dieses Zeithorizonts werden dann die mögliche Platzierungen der Aktivitäten über die Hilfsmengen P_i als Entscheidungsvariablen im MIP modelliert und an den Solver übergeben. Während die Aktivitäten, die verfügbaren und die benötigten Ressourcen direkt in den zu lösenden Testinstanzen definiert sind, gilt dies nicht zwingend für den zu betrachtenden Zeithorizont T . In den Originalinstanzen der PSPLIB ist zwar jeweils ein Zeithorizont angegeben der sich ggf. auch noch für die direkt davon abgeleiteten EP150-Instanzen verwenden ließe, für die zusammengesetzten Multiprojektinstanzen MP50 und MP250 müsste jedoch in jedem Fall ein neuer Zeithorizont bestimmt werden.

Ein trivialer Ansatz zur Bestimmung von T wäre es, T auf einen sehr großen Wert (z.B. $T = 1000$) zu setzen, der auf jeden Fall ausreichend ist, um gültige Lösungen für das Projekt generieren zu können. Es sollte hier jedoch beachtet werden, dass sich bei einer Erhöhung von T die Größe des Modells, d.h. die Anzahl an Entscheidungsvariablen und Nebenbedingungen, überproportional erhöht. Dies ist dadurch begründet, da für jede einzelne Aktivität viele neue mögliche Platzierungen aufgrund ihrer variablen Dauer hinzukommen. Zur Bestimmung von T wird der Projektplan daher unabhängig von der tatsächlich zu optimierenden Zielfunktion zunächst einmal mit einer zufällig sortierten Aktivitätenliste (vgl. Kapitel 3.3.2) aufgebaut, da hierfür keine Angabe über

²<http://www.nuget.org/packages/Optimization.Framework>

	EP150 + ZF1			
	#A=30–90	#A=30	#A=60	#A=90
∅ Lösungszeit	1056,4 s	295,4 s	1213,0 s	1660,8 s
Std.Abweichung Lösungszeit	1605,6 s	974,6 s	1677,4 s	1732,4 s
∅ Gap	3,8%	2,6%	5,9%	3,1%
∅ Gap ohne optimale Lösungen	26,2%	42,7%	26,6%	19,6%
# optimale Lösung	108	46	34	28
# keine Lösung	20	1	5	14

Tabelle 7.1. – Zusammengefasste Ergebnisse: EP150 gelöst per MIP unter ZF1, Zeitlimit = 1 Stunde

einen Zeithorizont nötig ist. Anschließend wird anhand der dabei bestimmten, gültigen Lösung $T = f_n * 1,5$ gesetzt, sodass für die Optimierung ein 50% längerer Zeithorizont zur Verfügung steht, als für die erfolgreiche Platzierung der spätesten Aktivität in der heuristischen Lösung benötigt wurde. Eigene Tests haben gezeigt, dass diese zusätzlichen 50% in allen Fällen ausreichend waren und nie vollständig ausgenutzt wurden, auch wenn bei der optimalen Lösung aufgrund der verwendeten Zielfunktion die letzte Aktivität später endete als bei der heuristisch gefundenen Lösung. Dennoch ist im Fall der EP150-Instanzen der so bestimmte Zeithorizont immer noch teilweise deutlich kürzer als der in den zu Grunde liegenden PSPLIB-Instanzen.

Ergebnisse für EP150

Die EP150-Instanzen wurden wie am Anfang dieses Abschnitts beschrieben unter der Zielfunktion ZF1 gelöst, dabei wurde die maximale Lösungszeit auf eine Stunde beschränkt. Die Ergebnisse dieser Optimierung sind im Anhang in Tabelle B.1 aufgeführt und hier in Tabelle 7.1 zusammengefasst.

Über alle 150 Instanzen aggregiert liegt die durchschnittliche Lösungszeit mit knapp 18 Minuten bei einem zunächst akzeptablen, wenn auch für einen tatsächlichen Praxiseinsatz recht hohen Wert. Besonders auffällig ist hier jedoch die sehr hohe Standardabweichung der Lösungszeit. Ein Blick in die detaillierten Lösungsergebnisse zeigt, dass für die meisten Instanzen gilt, dass sie entweder sehr schnell in nur wenigen Sekunden optimal gelöst werden können oder aber die erlaubte Lösungszeit von einer Stunde voll ausgenutzt wurde und in dieser Zeit entweder gar keine gültige Lösung gefunden wurde oder diese noch weit von ihrem Optimum entfernt war.

Um diese Schwankungen noch genauer zu untersuchen, werden in Tabelle B.1 noch drei weitere Aggregationen aufgeführt, in die jeweils nur alle Instanzen mit 30, mit 60 oder mit 90 Aktivitäten einfließen. Dabei zeigen sich vor allem zwei Effekte:

1. Die Größe des zu optimierenden Projektplans, d.h. die Anzahl der zu betrachtenden Aktivitäten, hat einen deutlichen Einfluss auf die durchschnittliche Lösungszeit. Kleine Pläne lassen sich tendenziell besser lösen als große Pläne.
2. Die Standardabweichung der Lösungszeit ist zwar ebenfalls ansteigend mit steigender Anzahl an Aktivitäten, sie liegt aber auch bei den kleinsten Instanzen mit 30 Aktivitäten mit einem Wert von etwas über 16 Minuten noch immer recht hoch. Die detaillierten Ergebnisse in Tabelle B.1 bestätigen, dass auch für diese Instanzen gilt, dass sich viele von ihnen sehr schnell lösen lassen und andere dafür die komplette zur Verfügung stehende Lösungszeit benötigen.

Daraus lässt sich ableiten, dass es zwar prinzipiell auch von der Größe des Plans abhängig ist, ob sich dieser gut per MIP und Branch&Bound lösen lässt, es aber hier auch noch weitere Einflussfaktoren zu geben scheint. Es kann vorkommen, dass ein Plan mit nur 30 Aktivitäten eine sehr lange Lösungszeit benötigt, während ein anderer Plan mit 90 Aktivitäten in wenigen Sekunden optimal gelöst wird. Da an dieser Stelle in allen Plänen mit vier Ressourcen geplant wird und sich Anzahl und Art der konstanten und flexibel planbaren Ressourcenbedarfe zwischen den Plänen nicht besonders unterscheiden, kommt als solcher Einflussfaktor nur noch die Struktur des Aktivitätennetzwerks in Frage, d.h. wie die Aktivitäten durch Vorrangbeziehungen miteinander vernetzt sind.

Ergebnisse für MP50

Die MP50-Instanzen wurden wie am Anfang dieses Abschnitts beschrieben unter den Zielfunktionen ZF2 und ZF3 gelöst, dabei wurde die maximale Lösungszeit auf eine Stunde beschränkt. Die Ergebnisse dieser Optimierung sind im Anhang in Tabelle B.2 aufgeführt und hier in Tabelle 7.2 zusammengefasst.

In der Zusammenfassung wird zum einen über alle gelösten Pläne jeweils für die Zielfunktionen ZF2 und ZF3 aggregiert, zusätzlich wurde für ZF2 nochmal separat anhand der Anzahl an Projekten im Plan aggregiert, um zu untersuchen, ob dies einen Einfluss auf die Lösbarkeit hat. Zunächst kann gesagt werden, dass es zwischen den Zielfunktionen ZF2 und ZF3 keinen nennenswerten Unterschied gibt. Auch wenn es bei ZF3 sieben Instanzen gegenüber drei Instanzen für ZF2 gibt, für die innerhalb einer Stunde keine gültige Lösung gefunden werden konnte, liegen die durchschnittlichen Lösungszeiten mit etwas über 45 Minuten in beiden Fällen auf einem sehr hohen Niveau und es scheint oft schwierig zu sein, in dieser Zeit überhaupt gültige Lösungen zu finden oder zu verbessern. Ein Einsatz solcher Methoden in der Praxis, bei dem mehrmals hintereinander ein Plan optimiert und verändert werden soll, erscheint dadurch äußerst unrealistisch.

Die separaten Aggregationen für Pläne mit drei, vier oder fünf Projekten lassen bei diesen Instanzen, wenn überhaupt, nur einen leichten Trend erkennen, dass Pläne mit mehr Projekten tendenziell längere Lösungszeiten benötigen. Da die Pläne mit mehr

	ZF2				ZF3
	#P=3-5	#P=3	#P=4	#P=5	#P=3-5
∅ Lösungszeit	2746,8 s	2466,0 s	3176,9 s	2710,1 s	2777,0 s
Std.Abweichung Lösungszeit	1519,1 s	1653,8 s	1159,5 s	1542,2 s	1472,9 s
∅ Gap	44,5%	37,1%	31,5%	20,3%	40,1%
∅ Gap ohne optimale Lösungen	63,5%	54,6%	65,5%	84,7%	64,6%
# optimale Lösung	12	8	2	2	12
# keine Lösung	3	0	3	0	7

Tabelle 7.2. – Zusammengefasste Ergebnisse: MP50 gelöst per MIP unter ZF2 und ZF3, Zeitlimit = 1 Stunde

Projekten jedoch in diesem Fall auch immer mehr Aktivitäten haben, unterstützt dies die im vorherigen Abschnitt aufgestellte These, dass nicht allein die Anzahl an Aktivitäten im Aktivitätennetzwerk entscheidend für die Lösungszeit ist, sondern die Abhängigkeiten der Aktivitäten untereinander ebenfalls einen großen Einfluss haben.

Begründung: Aus der detaillierten Auflistung der MP50-Testinstanzen (vgl. Tabelle A.2) ergibt sich, dass jeweils ein einzelnes Projekt in einem solchen Plan im statistischen Durchschnitt 20 ± 4 Aktivitäten hat, unabhängig davon, ob der gesamte Plan nun drei, vier oder fünf Projekte beinhaltet. Die Anzahl der Aktivitäten im gesamten Plan ergibt sich somit im Wesentlichen dadurch, wie viele Projekte der Plan beinhaltet. Ein Plan mit fünf Projekten hat also zwar tendenziell mehr Aktivitäten, diese sind aber auf die einzelnen Projekte verteilt und damit unabhängig voneinander (vgl. Abbildung 3.3). Durch diese Unabhängigkeit der Aktivitäten tritt der Effekt der Erhöhung der Lösungszeit bei mehr Aktivitäten, wie bei den EP150-Ergebnissen gemessen, hier wesentlich schwächer auf. Dies ist zwar kein Beweis, aber dennoch ein Indiz dafür, dass die Vorrangbeziehungen zwischen den Aktivitäten einen großen Einfluss auf die benötigte Lösungszeit haben. Wesentlich deutlicher lässt sich dies im nächsten Abschnitt bei der Analyse der MP250-Instanzen zeigen.

Ergebnisse für MP250

Die MP250-Instanzen wurden wie am Anfang dieses Abschnitts beschrieben unter den Zielfunktionen ZF2 und ZF3 gelöst, dabei wurde die maximale Lösungszeit auf eine Stunde beschränkt. Die Ergebnisse dieser Optimierung sind im Anhang in Tabelle B.4 aufgeführt und hier in Tabelle 7.3 zusammengefasst. Wie bei der Auswertung der MP50-Instanzen wurden die Ergebnisse für jede Zielfunktion getrennt aggregiert, außerdem wurde wieder eine zusätzliche separate Aggregation je Anzahl Projekte im Plan durchgeführt.

Betrachtet man nun zunächst für ZF2 nur die Aggregationen über alle Instanzen und vergleicht diese mit den Ergebnissen der MP50-Instanzen, dann fällt auf, dass

7. Evaluation und Vergleich der Lösungsverfahren

	ZF2				ZF3
	#P=3-5	#P=3	#P=4	#P=5	#P=3-5
∅ Lösungszeit	2873,0 s	2280,7 s	2927,8 s	3500,5 s	3073,4 s
Std.Abweichung Lösungszeit	1415,3 s	1703,7 s	1355,2 s	590,3 s	1232,8 s
∅ Gap	44,6%	39,7%	40,7%	55,6%	46,9%
∅ Gap ohne optimale Lösungen	73,8%	72,4%	65,6%	85,8%	68,1%
# optimale Lösung	53	32	19	2	29
# keine Lösung	35	0	12	23	33

Tabelle 7.3. – Zusammengefasste Ergebnisse: MP250 gelöst per MIP unter ZF2 und ZF3, Zeitlimit = 1 Stunde

hier bei den meisten Kennzahlen kein großer Unterschied besteht. Die durchschnittliche Lösungszeit und auch die Standardabweichung der Lösungszeit sind auf einem ähnlich hohen Niveau und auch der durchschnittliche Gap ist relativ gleich. Lediglich die Anzahl der Pläne, für die innerhalb von einer Stunde gar keine einzige Lösung berechnet werden konnte, ist deutlich überproportional angestiegen. Bei genauerer Betrachtung der Aufteilung der Aggregation anhand der Anzahl an Projekten in einem Plan ist zu sehen, dass dieser Anstieg ausschließlich auf die Pläne mit fünf Projekten zurückzuführen ist, hier konnte bei 23 von 71 solcher Pläne mit fünf Projekten keine Lösung gefunden werden. Bei den MP50-Instanzen konnte dagegen für alle 8 Pläne mit 5 Projekten zumindest eine gültige Lösung gefunden werden.

Auch hier wird angenommen, dass dies die These stützt, dass sowohl die Anzahl der Aktivitäten als auch deren Vernetzung durch Vorrangbeziehungen über die Schwierigkeit eines Plans entscheiden. Genau wie bei den MP50-Instanzen besteht auch bei den MP250-Instanzen ein einzelnes Projekt in einem Plan, unabhängig von der gesamten Anzahl an Projekten im Plan, aus durchschnittlich 21 ± 5 Aktivitäten. Die Chance, aus einer bestimmten Grundmenge von einzelnen Projekten (vgl. Abschnitt 7.1) mindestens ein oder zwei sehr schwierige auszuwählen, ist damit bei insgesamt fünf Projekten im Plan deutlich größer als bei nur drei Projekten. Es wird also angenommen, dass es bei der Generierung der MP50-Instanzen einfach aufgrund der wenigen Instanzen mit fünf Projekten Zufall war, dass die einzelnen Projekte alle so leicht waren, sodass für alle diese Instanzen in der zur Verfügung stehenden Lösungszeit zumindest eine gültige Lösung gefunden wurde. Damit erklärt sich auch, warum es bei den MP50-Instanzen einige Instanzen mit vier Projekten gab, die nicht gelöst werden konnten. Die Menge der MP250-Instanzen kann deshalb als repräsentativer angesehen werden, da mit steigender Anzahl an Projekten auch gleichmäßig die durchschnittliche Lösungszeit steigt und die Standardabweichung sinkt, die Anzahl der noch optimal zu lösenden Pläne sinkt, während die Anzahl der Pläne ohne Lösungen ansteigt.

	ZF2				ZF3
	#P=3-5	#P=3	#P=4	#P=5	#P=3-5
∅ Lösungszeit	31622 s	29391 s	36786 s	27624 s	31412 s
Std.Abweichung Lösungszeit	18987 s	19969 s	15068 s	20888 s	19225 s
∅ Gap	32,7%	22,7%	27,5%	15,3%	35,1%
∅ Gap ohne optimale Lösungen	48,2%	35,5%	52,8%	76,3%	38,2%
# optimale Lösung	15	9	3	3	3
# keine Lösung	1	0	1	0	1

Tabelle 7.4. – Zusammengefasste Ergebnisse: MP50 gelöst per MIP unter ZF2 und ZF3, Zeitlimit = 12 Stunden

Erhöhung der Lösungszeit für MP50

Gegenüber den Einzelprojektinstanzen EP150 konnte bei den Multiprojektinstanzen MP50 und MP250 deutlich seltener innerhalb einer Stunde eine gute Lösung, d.h. eine optimale Lösung oder zumindest eine gültige Lösung mit niedrigem Gap, gefunden werden. Aus diesem Grund wurden die MP50-Instanzen nochmal mit einer deutlich erhöhten Lösungszeit von maximal 12 Stunden gelöst. Damit soll einerseits untersucht werden, wie viel Zeit tatsächlich benötigt wird, um für solche Instanzen gute bis optimale Ergebnisse zu berechnen und andererseits sollen die so exakt ermittelten, guten Lösungen eine bessere Vergleichsbasis für die Lösungen des heuristischen Verfahrens in den nächsten Abschnitten bieten.

Die Ergebnisse dieser längeren Optimierung sind in Tabelle B.3 aufgeführt und in Tabelle 7.4 zusammengefasst. Hier zeigt sich bei einem Vergleich mit den Ergebnissen nach einer Stunde aus Tabelle 7.2, dass bei einer Erhöhung der erlaubten Lösungszeit um den Faktor 12 auch die tatsächlich benutzte durchschnittliche Lösungszeit ziemlich genau um diesen Faktor 12 gestiegen ist. Bei den meisten Plänen wurde diese erhöhte maximale Lösungszeit also voll ausgenutzt. Auf der anderen Seite konnte der durchschnittliche Gap zur optimalen Lösung zwar etwas gesenkt werden, mit durchschnittlich 32,7% für ZF2 bzw. 35,1% für ZF3 ist dieser aber immer noch weit vom tatsächlichen Optimum entfernt.

Etwas stärker als bei den Ergebnissen nach einer Stunde ist hier der Effekt zu erkennen, dass die Instanzen mit 4 Projekten mehr Lösungszeit benötigen als diejenigen mit 5 Projekten. Da dies nur bei den MP50-Instanzen zu beobachten ist, jedoch nicht bei den MP250-Instanzen, wird vermutet, dass die wenigen Instanzen mit 4 Projekten aus MP50 durchschnittlich schwieriger zu planende Einzelprojekte haben und bei den MP250-Instanzen die Schwierigkeit der Projekte aufgrund mehr Instanzen homogener verteilt ist.

7.3. Evaluation des genetischen Algorithmus

In diesem Abschnitt wird anhand der zuvor vorgestellten Testinstanzen der in Kapitel 6.2 erarbeitete genetische Algorithmus (GA) evaluiert. Da dieser GA verschiedene Parameter zur Einstellung hat, die ggf. die Lösungsqualität beeinflussen, wird zunächst getestet, welche Parameterwerte sich hierfür am besten eignen. Nachdem diese Parameter ermittelt wurden, werden darauf aufbauend die möglichen alternativen Methoden für verschiedene Unterprobleme des Algorithmus getestet und bewertet. Sind im Anschluss daran gute Konfigurationen für den GA bekannt, werden damit die Testinstanzen unter verschiedenen Zielfunktionen gelöst und mit den Ergebnissen des exakten Verfahrens verglichen.

7.3.1. Parameterbestimmung mit SMAC

Der genetische Algorithmus aus Kapitel 6.2 hat zusammen mit dem erweiterten seriellen Einplanungsschema viele Parameter, z.B. die Populationsgröße oder die Mutationswahrscheinlichkeiten für die einzelnen Werte eines Individuums, die nicht über die zu lösende Instanz vorgegeben werden, sondern unabhängig von dieser vor der Optimierung festgelegt werden müssen. Je nachdem, auf welche Werte diese Parameter gesetzt werden, kann sich jedoch das Verhalten der Optimierung ändern und damit das Optimierungsergebnis für eine einzelne Instanz besser oder schlechter werden. Hinzu kommt, dass bei den Operatoren des genetischen Algorithmus viele Entscheidungen zufällig auf Basis von vorgegebenen Wahrscheinlichkeiten getroffen werden. Das bedeutet, dass der Algorithmus nicht deterministisch arbeitet und deshalb bei mehreren Optimierungen für die selbe Instanz trotz gleicher Einstellungen unterschiedliche Ergebnisse liefern könnte. Es stellt sich also die Frage, auf welche Werte diese Parameter gesetzt werden sollen, damit bei vielen Optimierungen unterschiedlicher Pläne im Durchschnitt die besten Ergebnisse erreicht werden.

Die Parameter des genetischen Algorithmus sind mit ihren jeweiligen Wertebereichen in Tabelle 7.5 aufgeführt. Anhand dieser Wertebereiche lassen sie sich in drei verschiedene Gruppen einteilen:

1. Parameter mit nur wenigen möglichen diskreten Werten, z.B. ja/nein Entscheidungen (K^* -Aktualisierung in jeder Iteration) oder der zu benutzende Kreuzungsoperator (nur 5 mögliche Werte)
2. Parameter mit diskreten Werten und einem unbeschränkten Wertebereich (hier nur die Populationsgröße)
3. Parameter mit kontinuierlichen Werten (z.B. die Mutationswahrscheinlichkeiten)

Für die Bestimmung der besten Parameterwerte muss nun noch berücksichtigt werden, dass sich einzelne Parameter prinzipiell gegenseitig beeinflussen können, z.B.

	Beschreibung	Wertebereich
χ^R	Repräsentation der Einplanungsreihenfolge der Aktivitäten	$\chi^R \in \{1, 2\}$ 1 = Prioritätswerte 2 = Aktivitätenliste
χ^C	Zu verwendender Kreuzungsoperator (vgl. Kapitel 6.2.3; die Operatoren 2-4 stehen nur bei $\chi^R = 1$ zur Verfügung)	$\chi^C \in \{0, \dots, 4\}$ 0 = Zufällige Auswahl 1 = One Point 2 = Two Point 3 = Uniform 4 = Gewichtung
$ \mathcal{P} $	Größe der Population (d.h. Anzahl parallel zu betrachtender Individuen) im genetischen Algorithmus	$ \mathcal{P} \in \{2, \dots, \infty\}$
p^τ	Wahrscheinlichkeit für den Tausch von zwei Aktivitäten in der Aktivitätenliste	$p^\tau \in [0, 1]$
p^V	Wahrscheinlichkeit für die Zuweisung eines neuen, zufälligen Prioritätswertes v_i einer Aktivität	$p^V \in [0, 1]$
p^O	Wahrscheinlichkeit für die Erhöhung oder Verringerung des minimalen Offsetwertes d_i einer Aktivität	$p^O \in [0, 1]$
p^{K^*}	Wahrscheinlichkeit für die leichte Erhöhung des lokalen Fitnesszielwerts k_i^* einer Aktivität	$p^{K^*} \in [0, 1]$
p^m	Wahrscheinlichkeit für den Wechsel des m-Wertes eines Individuums	$p^m \in [0, 1]$
χ^S	Zu verwendender Algorithmus zur Ressourceneinplanung (vgl. Kapitel 6.1 und 6.5)	$\chi^S \in \{1, 2\}$ 1 = Greedy 2 = ausgeglichen
χ^N	Generiere in jeder Iteration vor der Anwendung aller anderer Operatoren zufällig einige neue Individuen für die Population	$\chi^N \in \{0, 1\}$ 0 = Nein 1 = Ja
χ^K	Aktualisiere K^* nach jeder Iteration (vgl. Kapitel 6.2.5)	$\chi^K \in \{0, 1\}$ 0 = Nein 1 = Ja

Tabelle 7.5. – Parameter für den genetischen Algorithmus

dass ein bestimmter Kreuzungsoperator nur dann gut funktioniert, wenn auch eine bestimmte Populationsgröße gegeben ist. Ein trivialer Ansatz zum Bestimmen einer Belegung für alle Parameter wäre deshalb, alle Kombinationen von möglichen Parameterwerten auszuprobieren und dann die beste Kombination davon auszuwählen. Während eine solche explizite Enumeration für einzelne Parameter aus der ersten Gruppe aufgrund der wenigen möglichen Werte noch als denkbare Vorgehen erscheint, gibt es bei der zweiten Gruppe schon deutlich mehr mögliche Belegungen für einen Pa-

parameter. Bei der dritten Gruppe mit kontinuierlichen Werten gibt es theoretisch für jeden Parameter unendlich viele mögliche Werte, sodass man aus praktischer Sicht darüber nachdenken müsste, wie man diese kontinuierlichen Parameter sinnvoll diskretisiert und dann testet. Trotzdem würde dies dazu führen, dass das Kreuzprodukt aller möglicher Parameterwerte immer noch sehr groß wäre, sodass man sehr viele Kombinationen von Parameterbelegungen testen müsste. Dies ist in der Regel aufgrund von nur beschränkt zur Verfügung stehenden Rechenkapazitäten und Zeit nicht umsetzbar. Würde man z.B. alle MP50-Testinstanzen aufgrund des nicht deterministischen Verhaltens nur drei Mal mit einer einzigen Parameterbelegung und 5 Minuten Lösungszeit pro Instanz optimieren, würde dies bereits 12,5 Stunden dauern.

Andere Forscher haben sich deshalb oft damit beholfen, für die kontinuierlichen Parameter nur sehr wenige mögliche Belegungen zu testen. So probierte z.B. Hartmann (1998) für die Mutationswahrscheinlichkeit der Aktivitätenliste die Werte 1%, 5% und 10% aus und kam zu dem Schluss, dass 5% etwas besser funktioniert. Damit ist allerdings noch nicht geklärt, ob eine Mutationswahrscheinlichkeit von 15% nicht zu noch besseren Ergebnissen geführt hätte oder ob die Mutationswahrscheinlichkeit von anderen Parametern abhängig ist. Auf der anderen Seite muss bedacht werden, dass die Bestimmung von guten Parameterwerten stets nur auf einer vorgegebenen Menge von Testplänen ausgeführt wird und der genetische Algorithmus nicht deterministisch arbeitet. Es wäre daher besonders bei diesen kontinuierlichen Werten ein falscher Ansatz zu untersuchen, ob nun eine minimale Änderung von z.B. der Mutationswahrscheinlichkeit von 5% auf 5,5% zu besseren Ergebnissen führt, da dies bei anderen zu lösenden Instanzen oder bei einem weiteren Optimierungslauf nicht zwingend zu der gleichen Verbesserung führt.

Besonders im Hinblick auf die kontinuierlichen Parameter und auch auf diskrete Parameter mit einem großen Wertebereich stellt sich deshalb eher die Frage, in welchem Bereich diese Parameterwerte liegen müssen. Um dies herauszufinden, wurde in dieser Arbeit ein etwas anderer Ansatz als bei den zuvor vorgestellten Veröffentlichungen gewählt. Während die Parameter mit binären Werten durch explizite Enumeration aller möglichen Belegungen getestet werden (vgl. Abschnitt 7.3.2), werden die anderen Parameter mit Hilfe des Parametertuners SMAC bestimmt.

SMAC ist eine Software, die im Rahmen eines Forschungsprojekts an der University of British Columbia entwickelt wurde (vgl. hier und im Folgenden Hutter u. a. (2010)) und die in der Lage ist, für einen beliebigen deterministischen oder nichtdeterministischen Algorithmus \mathcal{A} eine gute Parameterbelegung zu bestimmen. Dazu müssen zum einen diese Parameter mit ihren möglichen Wertebereichen bekannt sein und es muss eine Menge von Testinstanzen geben, die für das Tuning genutzt werden sollen. SMAC ruft nun \mathcal{A} für verschiedene Parameterwerte und verschiedene Instanzen auf und entscheidet dann selbstständig anhand des so erreichten Optimierungsergebnisses, welche Werte auf welchen Instanzen als nächstes getestet werden. Dabei findet jedoch keine oben beschriebene explizite Enumeration aller Parametereinstellungen statt. Stattdessen erzeugt SMAC intern ein selbstlernendes Modell (als *response surface model*

bezeichnet), in dem die getesteten Parameterwerte, die getesteten Instanzen und die damit erzeugten Ergebnisse der Optimierungsläufe verarbeitet werden. Auf Basis dieser Informationen schlägt das Modell dann gezielt bestimmte Veränderungen an den aktuellen Parameterwerten vor und berechnet eine Schätzung auf Basis der zuvor gesammelten Daten, um wie viel sich das Ergebnis der Optimierung dadurch auf bestimmten Instanzen verbessern müsste. Nach der Optimierung von mehreren Instanzen mit diesen neuen Parameterwerten wird dann abgeglichen, in wie weit die zuvor geschätzte Verbesserung tatsächlich eingetreten ist und ob die entsprechende Änderung der Parameterwerte sinnvoll war. Die Autoren von SMAC geben an, dass so auch für kontinuierliche Parameter effektiv bestimmt werden kann, auf welche Werte diese am besten gesetzt werden sollten. Für eine detailliertere Beschreibung der Funktionsweise von SMAC wird auf Hutter u. a. (2010) verwiesen.

Die Bestimmung geeigneter Parameter mit SMAC hat den Nachteil, dass der Benutzer der Software als Ergebnis zwar die passenden Werte für die Parameter angezeigt bekommt und auch, welche verschiedenen Kombinationen von Parameterwerten vorher ausprobiert worden sind, im Anschluss jedoch keine vollständige Auswertung über alle Testinstanzen gemacht werden kann, da verschiedene Instanzen für verschiedene Parameter unterschiedlich oft mit SMAC optimiert wurden. Für kontinuierliche Parameter wie die Mutationswahrscheinlichkeiten ist so ein einziger Wert als Ergebnis zufriedenstellend. Für die binären Entscheidungsparameter, wie z.B. die Repräsentationsform, wäre es jedoch interessant zu wissen, wie genau sich das durchschnittliche Optimierungsergebnis für eine Menge von Plänen ändert, wenn entweder die eine oder die andere Einstellung gewählt wurde. Aus diesem Grund wurde die Bestimmung der Parameter in zwei Abschnitte aufgeteilt. Im ersten Abschnitt wurden für die folgenden vier Kombinationen mit SMAC die besten Parametereinstellungen für χ^C , $|\mathcal{P}|$, p^τ bzw. p^V , p^O , p^{K^*} und p^m bestimmt:

1. ZF2 auf den MP50-Instanzen mit $\chi^R = 1$, $\chi^S = 1$, $\chi^N = 0$, $\chi^K = 1$
2. ZF3 auf den MP50-Instanzen mit $\chi^R = 1$, $\chi^S = 1$, $\chi^N = 0$, $\chi^K = 1$
3. ZF2 auf den MP50-Instanzen mit $\chi^R = 2$, $\chi^S = 1$, $\chi^N = 0$, $\chi^K = 1$
4. ZF3 auf den MP50-Instanzen mit $\chi^R = 2$, $\chi^S = 1$, $\chi^N = 0$, $\chi^K = 1$

Dahinter steckt die schon in Kapitel 6.2.1 diskutierte Annahme, dass die Mutationswahrscheinlichkeit p^τ bzw. p^V und ggf. auch die Wahl des Kreuzungsoperators von der Wahl der Repräsentationsform abhängen könnte. Für die weiteren Parameter χ^S , χ^N und χ^K wird eine solche Abhängigkeit als unwahrscheinlich betrachtet. Weiterhin soll damit untersucht werden, ob eventuell die Verwendung einer anderen Zielfunktion andere Parametereinstellungen erfordert. Nachdem in diesem ersten Schritt die oben genannten Parameter jeweils für diese vier Kombinationen bestimmt wurden, werden in Abschnitt 7.3.2 die hier noch fixierten Parameter χ^S , χ^N und χ^K genauer untersucht.

	$\chi^R = 1$		$\chi^R = 2$	
	ZF2	ZF3	ZF2	ZF3
$ \mathcal{P} $	344	424	435	447
χ^C	1	0	0	0
p^V/p^τ	0,0366	0,0574	0,7348	0,6468
p^m	0,3828	0,8974	0,0777	0,5215
p^{K^*}	0,7412	0,9484	0,9227	0,8340
p^O	0,2832	0,2190	0,1873	0,6318

Tabelle 7.6. – Ergebnisse der Parameterbestimmung mit SMAC

Für jede dieser vier Kombinationen wurde SMAC mit einem gesamten Zeitlimit von 15 Tagen und einem Zeitlimit für einen einzelnen Optimierungslauf von 2,5 Minuten aufgerufen. Damit war es SMAC möglich, 8640 einzelne Optimierungsläufe durchzuführen und auszuwerten. Die Länge eines Optimierungslaufs wurde hier auf 2,5 Minuten gesetzt, weil sich in vorher durchgeführten Testläufen zeigte, dass in dieser Zeit zwar schon relativ gute Ergebnisse erzielt werden können, aber die Zeit noch nicht zu lang ist, sodass eine eventuelle Verbesserung der Ergebnisse tatsächlich durch bessere Parameter und nicht durch viele Iterationen erreicht wird.

Die Ergebnisse dieser vier SMAC-Läufe sind in Tabelle 7.6 dargestellt. Es zeigt sich zunächst eine klare Tendenz bei der Populationsgröße, hier scheinen etwa 400 Individuen ein guter Richtwert zu sein. In drei von vier Fällen wurde ermittelt, dass eine zufällige Auswahl des Kreuzungsoperators χ^C zu den besten Ergebnissen führt. Warum dies bei $\chi^R = 1/\text{ZF2}$ nicht der Fall ist und stattdessen der 1-Punkt-Kreuzungsoperator ausgewählt wurde, wird im nächsten Abschnitt noch genauer untersucht. Hinsichtlich der Mutationswahrscheinlichkeit p^V bzw. p^τ für die Veränderung der Einplanungsreihenfolge der Aktivitäten zeigt sich ein sehr interessantes Ergebnis: werden als Repräsentationsform die zufälligen Prioritätswerte verwendet ($\chi^R = 1$), so liegt bei beiden Zielfunktionen die dazugehörige Mutationswahrscheinlichkeit p^V mit 3%–5% auf einem sehr niedrigen Niveau. Wird dagegen die sortierte Aktivitätenliste als Repräsentationsform verwendet, liegt die ermittelte Mutationswahrscheinlichkeit p^τ mit 65%–73% deutlich höher. Dies wird als erster Hinweis für die zuvor aufgestellte Vermutung angesehen, dass unterschiedliche Repräsentationsformen tatsächlich unterschiedliche beste Mutationswahrscheinlichkeiten haben. In wie weit sich das tatsächlich auf den Zielfunktionswert auswirkt, wird im nächsten Abschnitt genauer untersucht.

Die ermittelten Werte für p^m , d.h. für die Wahrscheinlichkeit zum Wechsel des zu mutierenden k_m^* -Werts, schwanken erheblich. Hier ist nicht klar, ob dies mit der jeweiligen Repräsentationsform zu tun hat oder ob dieser Wert keinen großen Einfluss auf das Optimierungsergebnis hat, sodass SMAC hierfür kein eindeutiges Ergebnis finden konnte. Bei dem Vergleich zwischen ZF2 und ZF3 der jeweiligen Repräsentationsformen zeigt sich jedoch klar, dass der Wert bei ZF3 immer deutlich über dem Wert für

ZF2 liegt. Da ZF2 und ZF3 auf den selben Plänen getestet wurden und bei ZF3 als zielfunktionsrelevante Aktivitäten ϕ zusätzlich zu den Aktivitäten mit Fertigstellungstermin ZF2 noch die kritischen Aktivitäten mit einem Zeitpufferbedarf hinzukommen (vgl. Abschnitt 7.1), lässt sich schlussfolgern, dass p^m umso größer sein sollte, je mehr Aktivitäten in ϕ enthalten sind.

Für p^{K^*} sieht das Ergebnis nun schon wieder eindeutiger aus, mit Werten zwischen 74%–95% wird ausgesagt, dass fast immer versucht werden soll, den über die Variable m ausgewählten lokalen Fitnesszielwert k_m^* eines Individuums während der Mutation zu verbessern. Bei p^O zeichnet sich ein nicht ganz so klares Bild, drei von vier Ergebnissen weisen ermittelte Werte zwischen 19%–28% auf, lediglich für $\chi^R = 2/\text{ZF3}$ wurde ein deutlich höherer Wert von 63% ermittelt. Es zeigt sich also, dass es prinzipiell sinnvoll ist, die minimal erlaubte Dauer der Aktivitäten künstlich zu erhöhen (ansonsten wären Werte von 0% ermittelt worden). Es ist jedoch aufgrund des einen stark erhöhten Wertes nicht ganz eindeutig, wie oft die d_i^O -Werte verändert werden sollten. Es wird also angenommen, dass der Einfluss der d_i^O auf das Optimierungsergebnis zwar schon messbar ist, dieser aber wegen des nichtdeterministischen Verhaltens relativ klein ist.

Fazit

Die Bestimmung der Parameter über die SMAC-Software hat gezeigt, dass auch innerhalb von 15 Tagen Laufzeit pro Konfiguration bestenfalls eine Tendenz für gute Parametereinstellungen angegeben werden kann. Dies wird mit dem stark nichtdeterministischen Verhalten des genetischen Algorithmus begründet, welches auch schon in einzelnen detaillierten Untersuchungen bei der Implementierung von diesem beobachtet wurde. Je nach verwendetem Initialisierungswert für den Zufallszahlengenerator wichen die erreichten Optimierungsergebnisse teilweise erheblich voneinander ab. Dabei war auffällig, dass es aus Sicht des Zielfunktionswerts in vielen Plänen an bestimmten Stellen Barrieren gibt, die schwierig zu überwinden sind. Das bedeutet, dass mit fortlaufenden Iterationen der beste erreichte Zielfunktionswert zunächst nach und nach abfällt, bis ein bestimmter Barrierewert erreicht wird. Je nach Initialisierungswert für den Zufallszahlengenerator dauert es mal kürzer und mal länger, bis diese Barriere durchbrochen wird, manchmal gelingt es auch gar nicht über die komplette Laufzeit. Wird die Barriere jedoch durchbrochen, so fällt anschließend der Zielfunktionswert mit den weiteren Iterationen wieder gleichmäßiger ab. Es ist nicht klar, welche Eigenschaften im Plan dieses Verhalten verursachen, es wird jedoch vermutet, dass bei bestimmten Vernetzungen im Aktivitätennetzwerk erst eine dazu bestmöglich passende Sortierung für einen Teil der Aktivitätenliste gefunden werden muss, bevor weitere Verbesserungen möglich werden (vgl. Abbildung 3.7).

Eine klare Empfehlung, welche Parametereinstellung jetzt am besten ist, ist an dieser Stelle noch nicht möglich. SMAC hat zwar für alle vier Konfigurationen Einstellungswerte ermitteln können, jedoch wurden dafür aufgrund der Arbeitsweise von SMAC

unterschiedliche Pläne von MP50 unterschiedlich oft optimiert. Eine Aussage darüber, wie gut nun die einzelnen Konfigurationen aus Sicht des erreichten Zielfunktionswertes sind und vor allem, welche Konfiguration hier die bessere ist, ist so noch nicht möglich. Um dies sagen zu können, werden im nächsten Abschnitt nochmal detailliertere Testläufe mit allen vier Konfigurationen und mit den hier noch fixierten Parametern χ^S , χ^N und χ^K durchgeführt und ausgewertet.

7.3.2. Evaluation weiterer Algorithmusvarianten

Im vorherigen Abschnitt 7.3.1 wurden die Parameter χ^C , $|\mathcal{P}|$, p^τ bzw. p^V , p^O , p^{K^*} und p^m für die beiden Zielfunktionen ZF2 und ZF3 jeweils für $\chi^R = 1$ und $\chi^R = 2$ bestimmt. Dabei wurden die drei verbliebenen Parameter $\chi^S = 1$, $\chi^N = 0$, $\chi^K = 1$ (vgl. Tabelle 7.5) zunächst entsprechend fixiert. Im Folgenden soll diese Fixierung nun aufgehoben werden bzw. es soll untersucht werden, wie sich die möglichen Einstellungen dieser drei Parameter auf das Ergebnis der Optimierung auswirken. Da jeder der Parameter zwei mögliche Werte annehmen kann, ergeben sich $2^3 = 8$ mögliche Kombinationen. Diese acht Kombinationen werden nun mit jeder der vier gefundenen Parameterbelegungen aus Tabelle 7.6 getestet, indem mit jeder der sich so ergebenden 32 Einstellungsvarianten alle MP50-Instanzen drei Mal gelöst werden, wobei für jeden einzelnen Optimierungslauf ein Zeitlimit von 5 Minuten gesetzt wird.

Die Ergebnisse dieser Optimierungsläufe sind in den Tabellen in Anhang C.1 aufgeführt und hier in Tabelle 7.7 zusammengefasst. Dabei werden für jede sich ergebende Kombination aus den mit SMAC getesteten Konfigurationen und den acht Belegungsmöglichkeiten der restlichen Parameter sowohl der Mittelwert des erreichten Zielfunktionswerts über alle Instanzen und alle drei einzelnen Optimierungsläufe angegeben, als auch der Mittelwert über alle Instanzen aus dem jeweils besten Zielfunktionswert über die drei Optimierungsläufe pro Instanz. Dadurch wird gezeigt, wie deutlich sich jeweils das nichtdeterministische Verhalten des Algorithmus auswirkt.

Zu den vier im vorherigen Abschnitt mit SMAC getesteten Konfigurationen wurden hier noch zwei weitere, mit ¹ und ² markierte Abwandlungen von $\chi^R = 1/\text{ZF2}$ getestet. Bei ¹ wurde der Kreuzungsoperator $\chi^C = 0$ gesetzt, dieser war bei dieser Konfiguration im Gegensatz zu allen anderen Konfigurationen von SMAC auf 1 gesetzt worden. Damit soll überprüft werden, ob $\chi^C = 1$ in diesem Fall tatsächlich zu besseren Ergebnissen führt oder SMAC hier möglicherweise nicht die Zeit ausgereicht hat, um andere Belegungen zu testen. Bei ² wurde für die Repräsentationsform $\chi^R = 1$ die ursprünglich für $\chi^R = 2$ ermittelte sehr hohe Mutationswahrscheinlichkeit $p^V = 0,73$ gesetzt. Aus Sicht der Literatur ist eine solch hohe Mutationswahrscheinlichkeit ungewöhnlich, so testete z.B. Hartmann (1998) nur Wahrscheinlichkeiten im Bereich von 1%–10% für beide Repräsentationsformen. Es soll daher nun geprüft werden, ob sich eine solch hohe Mutationswahrscheinlichkeit entgegen der SMAC-Ergebnisse auch für $\chi^R = 1$ eignet, oder ob dies tatsächlich nur bei $\chi^R = 2$ zu besseren Ergebnissen führt.

In jeder Zeile von Tabelle 7.7 wurden die Zellen mit den besten Ergebnisse fett

	$\chi^{K^*} = 0$								$\chi^{K^*} = 1$							
	$\chi^N = 0$				$\chi^N = 1$				$\chi^N = 0$				$\chi^N = 1$			
	$\chi^S = 1$	$\chi^S = 2$	$\chi^S = 1$	$\chi^S = 2$	$\chi^S = 1$	$\chi^S = 2$	$\chi^S = 1$	$\chi^S = 2$	$\chi^S = 1$	$\chi^S = 2$	$\chi^S = 1$	$\chi^S = 2$	$\chi^S = 1$	$\chi^S = 2$	$\chi^S = 1$	$\chi^S = 2$
	\emptyset	Min.	\emptyset	Min.	\emptyset	Min.	\emptyset	Min.	\emptyset	Min.	\emptyset	Min.	\emptyset	Min.	\emptyset	Min.
$\chi^R = 1, \text{ZF2}$	38,8	37,3	37,8	36,4	38,9	37,4	37,4	36,0	40,7	38,8	39,2	37,8	40,9	39,0	38,9	37,4
$\chi^R = 2, \text{ZF2}$	36,1	34,9	35,5	34,5	35,9	34,7	35,7	34,8	38,7	37,2	37,7	36,4	38,2	36,8	37,6	36,0
$\chi^R = 1, \text{ZF2},^1$	39,4	38,2	38,3	37,0	39,1	37,9	38,0	36,8	41,9	40,4	39,7	38,3	41,2	39,7	40,4	38,8
$\chi^R = 1, \text{ZF2},^2$	48,9	48,0	46,2	45,2	49,2	48,1	46,3	45,3	58,4	57,1	54,4	53,1	56,2	54,8	53,1	51,7
$\chi^R = 1, \text{ZF3}$	39,2	37,6	37,8	36,5	39,1	37,7	37,9	36,6	48,8	46,3	47,0	45,0	47,9	45,8	45,3	43,4
$\chi^R = 2, \text{ZF3}$	38,6	37,1	38,2	36,9	38,8	37,1	37,7	36,5	50,9	48,5	48,2	46,5	49,1	47,2	47,1	45,1

Tabelle 7.7. – Zusammengefasste Ergebnisse der Algorithmevaluation, Mittelwert über alle durchschnittlichen und besten Zielfunktionswert je Konfiguration aus den Tabellen C.1–C.6

markiert. Es wird sofort ersichtlich, dass $\chi^{K^*} = 0$ eindeutig immer zu besseren Ergebnissen führt. Eine Aktualisierung von K^* nach jeder Iteration des Algorithmus, wie in Kapitel 6.2.5 diskutiert, sollte somit nicht durchgeführt werden. Weiterhin ist eindeutig zu erkennen, dass die in Kapitel 6.5 vorgestellte alternative Ressourcenallokation ($\chi^S = 2$) immer zu besseren Ergebnissen führt als die Greedy-Allokation nach Kolisch u. a. (2003) (vgl. Kapitel 6.1). Die Verbesserung liegt hier, abhängig von der Wahl der anderen Parameter, zwischen 1,1% und 5,8%. Nicht eindeutig lässt sich dagegen sagen, ob es sinnvoll ist, in jeder Iteration zufällig neue Individuen zu generieren ($\chi^N = 1$). Bei drei Konfigurationen führte dies zu leicht besseren Ergebnissen, bei den anderen drei Konfigurationen war es jeweils besser, auf die fortlaufende Generierung neuer zufälliger Individuen zu verzichten. Eine pauschale Aussage kann also nicht getroffen werden, es hängt von den restlichen Parametern ab, was hier besser ist.

Unter den getesteten SMAC-Konfigurationen ist bei ZF2 die Repräsentation als Aktivitätenliste nach Hartmann (1998) ($\chi^R = 2$) etwas besser als die Repräsentation mit Prioritätswerten. Bei ZF3 ist dagegen fast gar kein Unterschied festzustellen, bei den aggregierten durchschnittlichen Zielfunktionswerten liegt hier $\chi^R = 1$ minimal vorne. Die Überprüfung der zusätzlichen Alternativen ¹ und ² hat gezeigt, dass diese bei jeder Parameterbelegung schlechter sind als die Konfiguration $\chi^R = 1/\text{ZF2}$ mit den von SMAC vorgeschlagenen Werten. Während es bei ¹, d.h. der zufälligen Auswahl des Kreuzungsoperators, nur zu etwas schlechteren Ergebnissen kommt, sind die Ergebnisse von ², d.h. einer deutlich erhöhten Mutationswahrscheinlichkeit, wesentlich schlechter. Dies wird als Bestätigung angesehen, dass die von SMAC gefundenen Parameterbelegungen zu den vorgegebenen Parametern tatsächlich gut zu passen scheinen. Da diese aufgrund des im vorherigen Abschnitt diskutierten nichtdeterministischen Verhaltens jedoch nur als Tendenz angesehen werden können, werden für

alle weiteren Testläufe die folgenden gerundeten Parametereinstellungen verwendet:

$$\begin{array}{llll} \chi^R = 2 & |\mathcal{P}| = 440 & \chi^C = 0 & \chi^{K^*} = 0 \\ \chi^N = 0 & \chi^S = 2 & p^\tau = 0,7 & p^{K^*} = 0,9 \end{array}$$

Bei der Optimierung unter einer regulären Zielfunktion (hier ZF1 oder ZF2) wird außerdem $p^m = 0,08$ gesetzt und $p^O = 0,2$. Wird dagegen ein Plan unter einer nicht-regulären Zielfunktion (hier ZF3 oder ZF4) optimiert, wird $p^m = 0,5$ und $p^O = 0,65$ gesetzt, da es dann, wie zuvor diskutiert, einerseits mehr zielfunktionsrelevante Aktivitäten ϕ gibt und andererseits die Dauer der Aktivitäten mehr variieren kann, da nicht immer eine kurze Dauer zu einem guten Zielfunktionswert führen muss.

7.3.3. Vergleich mit dem exakten Verfahren

Nachdem im vorherigen Abschnitt die besten Parametereinstellungen des in Kapitel 6 entwickelten genetischen Algorithmus anhand vieler Testläufe ermittelt wurden, wird der Algorithmus mit diesen Einstellungen jetzt dazu benutzt, die Instanzen aus EP150, MP50 und MP250 zu optimieren und die dabei erreichten Ergebnisse mit denen des exakten Lösungsverfahrens zu vergleichen. Dabei wird der genetische Algorithmus mit einer Laufzeit von 5 Minuten jede Testinstanz unter den jeweiligen Zielfunktionen drei Mal optimieren. Zum Vergleich mit dem exakten Verfahren wird jeweils nur der beste erreichte Zielfunktionswert dieser drei Läufe herangezogen, da davon ausgegangen wird, dass durch den technischen Fortschritt mittlerweile auch Standard-Mittelklasse Computer einen Prozessor mit mehreren Kernen haben und es somit auch im Praxiseinsatz ohne Probleme möglich ist, diese drei (oder je nach Hardwareausstattung sogar mehr) Testläufe auf einer Instanz parallel auszuführen und dann insgesamt das Individuum mit dem besten Zielfunktionswert als Lösung auszugeben. Als Vergleichswerte werden sowohl der Zielfunktionswert als auch die beste untere Schranke benutzt, die mit dem MIP innerhalb von einer Stunde Lösungszeit ermittelt werden konnten (vgl. Abschnitt 7.2). Gegen diese Werte wird nicht nur das Ergebnis des genetischen Algorithmus nach 5 Minuten Laufzeit verglichen, sondern es wurden zusätzlich während der Testläufe die jeweils besten gefundene Zielfunktionswerte nach einer Sekunde (= Startlösung des GA), 30 Sekunden, 1 Minute und 3 Minuten gespeichert. Dadurch wird ersichtlich, wie sich eine Lösung im Zeitverlauf verbessert.

Die Ergebnisse dieser Optimierungen sind in den Tabellen in Anhang C.2 aufgeführt und hier in Tabelle 7.8 zusammengefasst. Mit dem Vergleich des Gaps zwischen der besten GA-Lösung und der Lösung des exakten Verfahrens (Zeilen *Gap Obj*) zeigt sich, dass im Durchschnitt bei allen Testinstanzen der GA nach 2 Minuten Laufzeit mindestens das Ergebnis des exakten Verfahrens nach einer Stunde erreichen konnte. Ebenfalls eindeutig zeigt sich, dass es mit einem heuristischen Ansatz deutlich einfacher ist, überhaupt eine Lösung zu finden, so konnte die Anzahl der nicht gelösten Pläne für EP150 und MP250 deutlich gesenkt werden.

Der GA verbessert vorhandene gültige Lösungen im Zeitverlauf durch Anwendung lokaler Operatoren. Dadurch wird ein Individuum der Lösungspopulation nur selten

		EP150/ZF1	MP50/ZF2	MP50/ZF3	MP250/ZF2	MP250/ZF3
MIP	LB	56,70	16,54	14,90	16,98	16,21
	Obj	58,92	43,40	44,86	100,43	112,45
	Gap	3,85%	33,89%	36,58%	56,97%	60,58%
	# keine Lösung	20	0	0	35	33
	# opt. Lösung	108	15	11	53	40
GA 1 Sek.	Gap LB	9,96%	60,07%	65,49%	70,23%	73,32%
	Gap Obj	0,19%	33,45%	36,23%	-19,32%	-37,55%
GA 30 Sek.	Gap LB	6,79%	38,52%	44,06%	55,09%	61,62%
	Gap Obj	-3,12%	-1,19%	8,37%	-86,49%	-102,04%
GA 1 Min.	Gap LB	6,53%	37,23%	43,54%	54,02%	59,31%
	Gap Obj	-3,30%	-4,16%	4,43%	-96,09%	-116,85%
GA 2 Min.	Gap LB	6,33%	36,21%	41,98%	53,18%	58,63%
	Gap Obj	-3,47%	-6,05%	0,13%	-102,40%	-129,03%
GA 5 Min.	Gap LB	6,13%	35,70%	41,43%	52,56%	58,00%
	Gap Obj	-3,58%	-7,54%	-2,34%	-108,72%	-141,85%
	# keine Lösung	0	0	0	16	16
	# opt. Lösung	89	10	3	42	15

Tabelle 7.8. – Zusammengefasste Ergebnisse des Vergleichs zwischen exaktem und heuristischem Lösungsverfahren aus den Tabellen C.7–C.11

von einer Iteration auf die andere sprunghaft deutlich besser (so wie es teilweise beim Lösen eines MIP-Problems zu beobachten ist), sondern es verbessert sich langsam, dafür jedoch im Vergleich zur MIP-Lösung eher stetig. Die Auswertung im Zeitverlauf zeigt deutlich, dass die meisten Verbesserungen in den ersten 30 Sekunden der Laufzeit gefunden werden. Im weiteren Zeitverlauf werden zwar immer mal wieder bessere Lösungen gefunden, jedoch längst nicht mehr so häufig wie am Anfang. Die Anzahl der gefundenen optimalen Lösungen festigt diesen Eindruck, da in allen Fällen mit dem exakten Verfahren mehr Instanzen optimal gelöst werden konnten.

Bei der Auswertung der Ergebnisse des exakten Verfahrens im vorherigen Abschnitt hat sich gezeigt, dass unter den MP50-Instanzen im Vergleich mit den MP250-Instanzen besonders die Instanzen mit 5 Einzelprojekten überdurchschnittlich leicht exakt zu lösen sind. Der Gap der GA-Ergebnisse im Vergleich zu den besten MIP-Ergebnissen zeigt, dass der GA besonders bei solchen schwierig zu lösenden Plänen vergleichsweise sehr gute Ergebnisse liefert. Während es bei den MP50-Instanzen trotz eines noch recht hohen Gaps von 35,7% bzw. 41,4% nur möglich ist die MIP-Ergebnisse knapp zu verbessern, erreicht der GA bei den schwierigeren MP250-Instanzen mehr als doppelt so gute Ergebnisse wie das exakte Verfahren.

Zur Erzeugung der bisher präsentierten Ergebnisse wurden die zu optimierenden Instanzen drei Mal mit je 5 Minuten Laufzeit gelöst und anschließend die besten Ergebnisse mit denen des exakten Verfahrens verglichen. Hier stellt sich die Frage, in

wie weit eine deutliche Erhöhung dieser Laufzeit sinnvoll ist. Ist es möglich, in einem einzigen Optimierungslauf durch mehr Laufzeit entsprechend bessere Ergebnisse zu erzielen? Und wenn es durch beschränkte Hardware nicht möglich ist, mehrere Optimierungsläufe parallel auszuführen, ist es dann sinnvoller, einen längeren oder mehrere kürzere Optimierungsläufe pro Instanz durchzuführen? Um diese Fragen zu beantworten, wurden die MP50-Instanzen nochmal mit dem GA mit einer deutlich höheren Laufzeit von 30 Minuten gelöst, die Ergebnisse sind in den Tabellen C.12 (für ZF2) und C.13 (für ZF3) aufgeführt. Es ist erkennbar, dass der GA auch nach längerer Laufzeit noch in der Lage ist, einzelne gefundene Lösungen weiter zu verbessern. Im Durchschnitt zeigt sich jedoch für ZF2, dass die hier in Tabelle 7.8 dargestellten aggregierten Ergebnisse nach dreimal 5 Minuten mit -7,54% im Vergleich zum besten MIP-Ergebnis immer noch besser sind als der Durchschnitt über alle Ergebnisse nach einmal 30 Minuten mit -6,5%. Bei ZF3 sind dagegen die Ergebnisse der längeren Optimierung etwas besser (-5,1% gegenüber -2,34%), jedoch deutlich unterproportional zur zusätzlich eingesetzten Laufzeit unter der Annahme einer zuvor parallelen Ausführung. Insgesamt ist also immer zunächst eine mehrfache Optimierung einer Erhöhung der Laufzeit vorzuziehen. Wenn es hardwaretechnisch möglich ist, können auch mehrere parallele Läufe mit längerer Laufzeit durchgeführt werden, dies sollte dann die besten Ergebnisse bringen. Können mehrere Läufe nur sequentiell durchgeführt werden, sollte im Einzelfall eine Abwägung zwischen der Anzahl der durchzuführenden Optimierungen und der Laufzeit pro Optimierung getroffen werden. Dafür kann aufgrund der hier präsentierten Ergebnisse noch keine allgemeine Aussage getroffen werden.

Zusammenfassend lässt sich sagen, dass es mit dem heuristischen Verfahren möglich ist, innerhalb kurzer Zeit schnell gute Lösungen zu finden. Sind die Pläne einfach zu lösen, liegt es hier auf einem ähnlichen Niveau wie das exakte Verfahren, bei schwierigen Plänen ist es deutlich besser. Dagegen ist das exakte Verfahren dann im Vorteil, wenn die Lösungszeit nur eine untergeordnete Rolle spielt und stattdessen möglichst die optimale Lösung gefunden werden soll. Diese Vor- und Nachteile werden im nächsten Abschnitt nochmal genauer untersucht.

7.4. Kombination von exaktem und heuristischem Verfahren

Die Abschnitte 7.2 und 7.3 haben die verschiedenen Stärken und Schwächen des entwickelten exakten und des heuristischen Lösungsansatzes für das FRCPSP gezeigt. Während es mit dem MIP-Modell und einem Branch&Bound-Solver möglich ist, leichte Instanzen in kurzer Zeit optimal zu lösen, findet der GA auch für schwierige Instanzen schnell gute Lösungen. Auf der anderen Seite werden mit dem MIP-Modell bei etwas schwierigeren Instanzen keine oder nur schlechte Lösungen nach sehr langer Laufzeit gefunden, diese sind dann jedoch meistens noch weit von einer möglichen optimalen Lösung entfernt. Nachteil am GA ist, dass er einerseits keine untere Schranke berechnet und deshalb keine Information darüber hat, wie gut die aktuelle Lösung tatsächlich

7.4. Kombination von exaktem und heuristischem Verfahren

		EP150/ZF1	MP50/ZF2	MP50/ZF3	MP250/ZF2	MP250/ZF3
MIP 1 h	LB	56,7	16,5	14,9	17,0	16,2
	Obj	58,9	43,4	44,9	100,4	112,5
	Gap	3,8%	33,9%	36,6%	57,0%	60,6%
	# opt.	108	15	11	53	40
GA 5 Min.	Obj	62,5	34,5	36,9	43,2	44,6
	Gap LB	6,1%	35,7%	41,4%	52,6%	58,0%
	Gap Obj	-3,6%	-7,5%	-2,3%	-108,7%	-141,8%
	# opt.	89	10	3	42	15
GA + MIP 5 Min	LB	56,3	11,8	11,1	14,8	13,9
	Obj	62,6	35,5	36,2	44,7	46,3
	Gap LB	6,8%	48,8%	51,0%	53,8%	59,0%
	Gap Obj	-3,2%	-6,9%	-6,1%	-106,9%	-129,2%
	# opt.	105	12	11	50	39

Tabelle 7.9. – Zusammengefasste Ergebnisse der Optimierungen mit dem heuristischen Verfahren als Konstruktionsheuristik für das exakte Verfahren aus den Tabellen C.17–C.21

ist. Außerdem findet er in deutlich weniger Fällen die optimale Lösung, selbst wenn schnell viele verbesserte Lösungen gefunden werden. Mit steigender Laufzeit wird das Verhältnis aus zusätzlich investierter Laufzeit und damit gewonnener Verbesserung einer Lösung signifikant schlechter.

Es wurde deshalb untersucht, in wie weit es möglich ist, das exakte und das heuristische Verfahren zu kombinieren, um möglichst viele Vorteile dieser Verfahren zu erhalten und möglichst viele Nachteile zu beseitigen. Dabei wurde der GA benutzt, um eine Startlösung für den MIP-Solver zu berechnen. Eine zu lösende Instanz wird nun zunächst 5 Minuten lang von dem GA gelöst. Die beste, dabei gefundene Lösung wird anschließend als Startlösung an den MIP-Solver übergeben, damit dieser bereits eine gültige ganzzahlige Lösung kennt und somit bereits eine (möglichst gute) obere Schranke für den weiteren Lösungsprozess hat. Das Zeitlimit zum Lösen des MIP-Modells wurde nun ebenfalls auf 5 Minuten festgelegt.

Die Ergebnisse dieser Berechnungen sind in den Tabellen in Abschnitt C.4 aufgeführt und hier in Tabelle 7.9 zusammengefasst. Es zeigt sich zunächst, dass die beste untere Schranke (Zeilen *LB*) bei der Kombination aus GA und MIP in allen Fällen teilweise deutlich schlechter ist als bei der alleinigen Lösung des MIP-Modells. Dies ist kein überraschendes Ergebnis, da die durch den GA generierte Startlösung nur die obere, jedoch nicht die untere Schranke verbessert. Durch die deutlich kürzere Laufzeit werden für das exakte Modell somit auch nicht so gute untere Schranken gefunden. Die beste gefundene Lösung konnte bei der Kombination aus MIP und GA gegenüber der Lösung nur mit GA nicht signifikant verbessert werden, mal liegen die Ergebnisse hier etwas über denen der reinen GA-Lösung, mal etwas darunter. Deutlich erkennbar

ist jedoch, dass in allen Fällen die Anzahl der optimal gelösten Pläne gegenüber der reinen GA-Lösung deutlich gesteigert werden konnte. Nach insgesamt 10 Minuten GA und MIP liegt diese nun fast auf dem Niveau, welches das reine MIP erst nach einer Stunde erreicht hat. Die detaillierten Ergebnisse im Anhang zeigen jedoch, dass dies nur für die Pläne gilt, die sowieso auch nur mit dem MIP einfach zu lösen waren. Schwierige Pläne erfahren durch das nachgelagerte, kurz laufende MIP dagegen kaum eine weitere Verbesserung gegenüber der GA-Lösung.

Zusammengefasst kann aus praktischer Sicht eine solche Kombination von MIP und GA durchaus sinnvoll sein, da so mit moderater Erhöhung der Lösungszeit von 5 auf 10 Minuten

- für einfach zu lösende Pläne schnell die optimale Lösung gefunden wird und
- für schwer zu lösende Pläne zumindest eine gute gültige Lösung sowie eine untere Schranke angegeben werden können.

7.5. Vergleich mit anderen Heuristiken

In den vergangenen Abschnitten dieses Kapitels wurde der genetische Algorithmus für das $FPS|prec|$ -Problem ausführlich anhand von Testinstanzen evaluiert und mit einem exakten Lösungsverfahren verglichen. Letztendlich stellt sich nun noch die Frage, wie gut diese Heuristik gegenüber anderen, aus der Literatur bekannten Verfahren arbeitet. Die Literaturrecherche in Kapitel 3 hat gezeigt, dass es zwar schon ein paar Ansätze zur Lösung des FRCPSP unter regulären Zielfunktionen gibt, dieses Problem aber anscheinend noch nie unter nichtregulären Zielfunktionen gelöst wurde. Aus diesem Grund wird der Vergleich in diesem Abschnitt auf die regulären Zielfunktionen beschränkt, d.h. die EP150-Testinstanzen werden unter ZF1 und die MP50- und MP250-Testinstanzen unter ZF2 gelöst.

Als Lösungsverfahren wurden dazu zum einen der *Random Sampling*-Ansatz von Kolisch u. a. (2003) implementiert und zum anderen verschiedene Prioritätsregeln von Fündeling und Trautmann (2010). Ein Vergleich mit anderen Metaheuristiken ist nicht möglich, da es zum Zeitpunkt des Erstellens dieser Arbeit noch keine veröffentlichten Metaheuristiken gab, die das FRCPSP lösen konnten.

Bei dem Random Sampling-Verfahren (vgl. Kapitel 3.3.2) werden eine Menge zufälliger Aktivitätenlisten generiert und jeweils zu einem Projektablaufplan dekodiert. Nach einer zuvor definierten Laufzeit oder einer Anzahl an zu erzeugenden Aktivitätenlisten wird der Projektablaufplan von der Aktivitätenliste als Lösung angenommen, der den besten Zielfunktionswert erreicht hat.

Bei einer Lösung mit Prioritätsregeln werden bestimmte Metriken auf Basis der zu optimierenden Instanzen definiert, anhand derer die Einplanungsreihenfolge der Aktivitäten festgelegt wird (vgl. Abbildung 3.6). Eine darüber erzeugte Aktivitätenliste ist für eine bestimmte Instanz somit immer eindeutig und es wird hier auch immer nur

genau eine Aktivitätenliste und somit maximal eine Lösung erzeugt. Eine Begrenzung anhand von durchgeführten Iterationen oder Laufzeit ist dadurch bei diesem Verfahren überflüssig. Wie bei der Literaturrecherche erläutert, wurden von verschiedenen Forschern sehr viele verschiedene Prioritätsregeln für das RCPSP definiert und getestet, einen guten Überblick gibt hier z.B. Kolisch (1996a). Da jedoch auch schon für das RCPSP festgestellt wurde, dass Prioritätsregeln in fast allen Fällen Metaheuristiken unterlegen sind, wird hier auf eine umfangreichere Analyse verzichtet. Stattdessen werden exemplarisch nur die folgenden drei Prioritätsregeln getestet, die auch schon Fündeling und Trautmann (2010) für das FRCPSPP vorgeschlagen haben:

LPF (Longest Path Following) Bei mehreren möglichen Aktivitäten zur Einplanung wird für jede dieser Aktivitäten zunächst der kürzeste Pfad an Nachfolgeaktivitäten bestimmt, mit dem die jeweilige Aktivität über Vorrangbeziehungen mit dem Ende des Aktivitätennetzwerks verbunden ist. Zur Einplanung wird nun die Aktivität gewählt, die den längsten dieser Pfade hat. Die minimale Länge einer Aktivität berechnen Fündeling und Trautmann (2010) dabei unter Annahme von nur einem Ressourcenbedarf und keiner Beschränkung der Dauer über den Ausdruck $\lceil w_i / \bar{r}_i \rceil$, die gesamte Pfadlänge einer Aktivität i ergibt sich dann wie folgt:

$$\pi^{LPF}(i) := \lceil w_i / \bar{r}_i \rceil + \max_{j \in S^N \wedge (i,j) \in A} \pi^{LPF}(j)$$

Da es bei dem Modell in dieser Arbeit mehrere Ressourcenbedarfe pro Aktivität geben kann und auch eine minimal erlaubte Dauer gesetzt sein kann, wird für den Methodenvergleich die Berechnung der minimalen Länge einer Aktivität durch den Ausdruck $\max \{ \underline{d}_i, \max_{k \in S^K} \lceil w_{ik} / \bar{r}_{ik} \rceil \}$ ersetzt.

MTS (Most Total Successors) Bei mehreren möglichen Aktivitäten zur Einplanung wird die Aktivität ausgewählt, die die meisten nachfolgenden Aktivitäten hat. Dadurch sollen die Aktivitäten möglichst früh eingeplant werden, auf deren Einplanung sonst viele nachfolgende Aktivitäten warten müssten.

$$\pi^{MTS}(i) := |\{j \in S^N \wedge (i,j) \in A\}| + \sum_{j \in S^N \wedge (i,j) \in A} \pi^{MWR}(j)$$

MWR (Most Work Content Remaining) Bei mehreren möglichen Aktivitäten zur Einplanung wird die Aktivität ausgewählt, für welche, zusammen mit ihren Nachfolgern, insgesamt der größte Ressourcenbedarf eingeplant werden muss. Fündeling und Trautmann (2010) berechnen diese noch zu verplanende Ressourcenmenge für eine Aktivität wie folgt:

$$\pi^{MWR}(i) := w_i + \sum_{j \in S^N \wedge (i,j) \in A} \pi^{MWR}(j)$$

	GA (1 Sek)	GA (30 Sek)	GA (5 Min)	RS (5 Min)	PR^{LPF}	PR^{MTS}	PR^{MWR}
EP150	66,5	63,3	62,5	66,2	67,5	70,1	70,1
MP50	56,1	37,3	34,5	56,5	110,2	124,3	130,0
MP250	71,2	47,8	43,2	67,4	144,9	152,3	157,3

Tabelle 7.10. – Zusammengefasste Ergebnisse des Vergleichs zwischen GA und weiteren Heuristiken aus den Tabellen C.14–C.16. Es wird der durchschnittliche Zielfunktionswert über alle Instanzen angegeben.

Da sich auch hier wieder wie bei der LPF-Prioritätsregel das Problem ergibt, dass es jetzt mehrere Ressourcenbedarfe pro Aktivität geben kann, wird bei diesem Vergleich mit dem Ausdruck $\sum_{k \in S^K} \left\{ \begin{array}{ll} w_{ik}, & \text{falls } (i, k) \in F \\ \frac{w_{ik}}{r_{ik}} * \frac{d_i + \bar{d}_i}{2}, & \text{sonst} \end{array} \right\}$ gerechnet.

Die Ergebnisse dieses Vergleichs sind in den Tabellen C.14–C.16 aufgeführt und hier in Tabelle 7.10 zusammengefasst. Es wird pro Instanzmenge und Lösungsverfahren der durchschnittlich erreichte Zielfunktionswert über alle Instanzen der jeweiligen Menge angegeben. Es zeigt sich, dass der GA bereits nach nur 30 Sekunden Laufzeit deutlich bessere Lösungen als alle anderen Verfahren liefern kann. Während der Unterschied bei den vergleichsweise leichten Einzelprojektplanen noch nicht so groß ist, schneiden besonders die Prioritätsregeln bei den komplexeren und damit schwieriger zu lösenden Multiprojektplanen wesentlich schlechter ab. Interessant zu sehen ist außerdem, dass der GA nach einer Sekunde, d.h. mit der initialen Population, und das Random Sampling-Verfahren nach 5 Minuten fast gleichauf liegen. Da die initiale Population des GA mit dem Random Sampling-Verfahren generiert wurde (vgl. Kapitel 6.2.2) lässt sich daraus ableiten, dass mit dem Random Sampling-Verfahren auch nach längerer Laufzeit nur selten noch verbesserte Lösungen gefunden werden. Das Random Sampling-Verfahren bietet deshalb insgesamt keinerlei Vorteile gegenüber dem GA, außer dass es in der Lage ist, neue Lösungen für eine initiale GA-Population zu generieren, die besser sind als eventuelle Lösungen durch Prioritätslisten. Die Prioritätslisten können letztendlich zumindest für den Einzelprojektplan als Alternative für solche Fälle angesehen werden, in denen selbst einige Sekunden Laufzeit aus irgendwelchen Gründen noch zu lang sind und sofort eine einzige Lösung benötigt wird.

7.6. Fazit

In den vorangegangenen Abschnitten dieses Kapitels wurden die zwei entwickelten Lösungsverfahren für das $FPS|prec|$ -Problem ausführlich anhand von insgesamt 450 künstlichen Testinstanzen evaluiert und mit bekannten Verfahren aus der Literatur

verglichen. Dabei zeigte sich zunächst, dass das mit einem Branch&Bound-Solver gelöste MIP-Modell (5.11)–(5.16) zwar in der Lage ist, kleine bis mittelgroße Einzelprojektinstanzen (30–60 Aktivitäten) oft innerhalb weniger Minuten optimal zu lösen. Ein weiterer Vorteil dieses Ansatzes ist auch, dass in einem solchen MIP-Modell vergleichsweise einfach andere Zielfunktionen oder auch weitere Restriktionen umgesetzt werden können. Je mehr Aktivitäten jedoch ein Plan enthält und je komplexer diese Aktivitäten miteinander vernetzt sind - sei es durch viele Vorrangbeziehungen innerhalb der Aktivitäten eines Projekts im Plan oder durch die Berücksichtigung mehrerer Projekte im Plan - desto schwieriger wird es für diesen exakten Ansatz, gute bzw. teilweise überhaupt gültige Lösungen selbst nach einer Stunde Lösungszeit oder mehr zu finden. Dadurch ist das MIP-Modell als alleiniges Lösungsverfahren eher ungeeignet für den praktischen Einsatz, da der Planer, wenn er aufgrund eines einfachen Plans nicht sehr schnell eine gute Lösung geliefert bekommt, nicht weiß, ob und nach welcher Zeit er überhaupt eine Lösung bekommt. Dennoch ist dieses Verfahren aus Sicht der Forschung in dieser Arbeit relevant, da es mit ihm im Gegensatz zu der entwickelten Heuristik möglich ist, untere Schranken für die zu lösenden Instanzen zu berechnen, um mit diesen bewerten zu können, wie gut die mit der Heuristik berechneten Lösungen tatsächlich sind.

Es wurde gezeigt, dass der entwickelte genetische Algorithmus (GA) in der Lage ist, das $FPS|prec|$ -Problem unter verschiedenen zeitbasierten Zielfunktionen zu lösen. Während der GA bei leicht zu lösenden Plänen unabhängig von der Lösungszeit im Vergleich zum MIP-Modell nur selten die optimale Lösung findet, sind dessen Lösungen unabhängig vom zu optimierenden Plan jedoch in den allermeisten Fällen auf einem konstant guten Niveau. Das führt dazu, dass der GA besonders bei schwierigen Plänen deutlich bessere Lösungen in wesentlich kürzerer Zeit findet, als es mit dem MIP-Modell möglich ist. Innerhalb von einigen Sekunden sind hier bereits erste gute Lösungen gefunden, nach nur 1–2 Minuten Laufzeit wurden die Ergebnisse der einstündigen Optimierung mit dem MIP-Modell spätestens erreicht und in den meisten Fällen sogar deutlich unterboten. Dadurch ist der GA sehr gut für einen Einsatz in der Praxis geeignet, da es dort nicht zwingend auf optimale Lösungen ankommt, sondern auf gute Lösungen innerhalb kurzer Zeit unabhängig von der Größe und Schwierigkeit des zu lösenden Plans (vgl. Kapitel 2.3). Für den Fall, dass in möglichst kurzer Lösungszeit soweit es geht auch optimale Lösungen gefunden werden sollen, konnte gezeigt werden, dass es sinnvoll ist, den GA zur Generierung einer guten Startlösung für den Branch&Bound-Algorithmus zu benutzen. Dieser versucht anschließend mit einem geringen Zeitlimit von wenigen Minuten nochmal diese vorhandene Lösung durch Lösung des MIP-Modells zu verbessern oder deren Optimalität zu beweisen.

Ein Vergleich mit anderen, aus der Literatur bekannten Verfahren für das $FPS|prec|$ -Problem war aufgrund von deren Beschränkung nur für reguläre Zielfunktionen möglich. Hier zeigte sich, dass der GA in allen Fällen deutlich überlegen ist. Aus Sicht der Forschung lässt sich festhalten, dass es mit dem GA nun auch für das FRCPSP eine Metaheuristik gibt, die in der Lage ist, sehr gute Lösungen in kurzer Zeit zu berechnen.

Eine solche Metaheuristik wurde zuvor nur für das RCPSP mit konstanten Ressourcenbedarfen entwickelt. Da bei der Modellformulierung in Kapitel 5.1 darauf geachtet wurde, dass das $PS|prec|\cdot$ -Problem vollständig in $FPS|prec|\cdot$ enthalten ist, ist der entwickelte GA auch in der Lage, klassische RCPSP-Instanzen mit rein konstanten Ressourcenbedarfen unter beliebigen zeitbasierten Zielfunktionen zu lösen.

8. Fallstudie: Strategische Bauplanung für unterirdische Gas- und Ölspeicher

In den vorangegangenen Kapiteln wurde ein exaktes und ein heuristisches Lösungsverfahren für das $FPS|prec|$ -Problem entwickelt, welches aufgrund seiner Flexibilität unterschiedliche Planungsaspekte in Form von anpassbaren Zielfunktionen sowie verschiedene konstante und flexible Ressourcenmodelle unterstützt. Nachdem diese Verfahren anschließend mit synthetischen Projektplanungsinstanzen erfolgreich evaluiert wurden, soll in diesem Kapitel gezeigt werden, dass damit auch konkrete praktische Planungsprobleme gelöst werden können. Dazu wird im Folgenden das bereits in Kapitel 2.3.4 vorgestellte Multiprojektplanungsbeispiel aus der Praxis in ein Optimierungsmodell überführt und anschließend mit den beiden Lösungsverfahren gelöst. Es werden weiterhin die Besonderheiten dieses Anwendungsfalls im Vergleich zu den synthetischen Testinstanzen diskutiert, die sich dann auch in den hier erreichten Ergebnissen widerspiegeln.

8.1. Aufbau des Multiprojektplans

In Kapitel 2.3.4 wurden die praktischen Aspekte einer Projektplanung zum Bau unterirdischer Erdöl- und Erdgasspeicher erläutert, die sich so im Rahmen eines Beratungsprojekts ergeben haben. An dieser Stelle wird nun gezeigt, wie diese Planung in dem Modell (5.1)–(5.9) abgebildet werden kann. Zeitlich und aus Sicht der eingesetzten Ressourcen findet diese Planung auf strategischer Ebene statt. Das bedeutet, dass eine Zeitperiode im Modell einem Monat in der Wirklichkeit entspricht, der betrachtete Planungshorizont entspricht knapp 15 Jahre oder genauer gesagt $T = 176$ Zeitperioden ($S^T = \{0, \dots, 176\}$). Dabei wird eine rollierende Planung angenommen. Das bedeutet, dass die fünf in Abschnitt 8.2 optimierten Projektpläne die selbe Planung zu unterschiedlichen Startzeitpunkten darstellen. Dadurch sind einzelne Projekte des Plans in den verschiedenen Plänen unterschiedlich weit fortgeschritten, wodurch bestimmte Aktivitäten der Projekte gar nicht mehr geplant werden müssen, da sie aus Sicht des Planungszeitraums in der Vergangenheit liegen oder wodurch andere Aktivitäten einen gewünschten Ausführungszeitraum haben, der bereits in vorherigen Planungsiterationen festgelegt wurde.

Weiterhin impliziert diese strategische Planung, dass dabei nur die Ressourcen geplant werden müssen, die auf dieser Ebene tatsächlich von Bedeutung sind. So wird es im Folgenden einige Aktivitäten pro Projekt geben, die lediglich eine Dauer haben, jedoch keine Ressourcenbedarfe. Diese sind dann als Platzhalter oder Hinweis

für die nachgelagerte taktische und operative Planung zu verstehen, dass in diesen Zeiträumen zu gegebener Zeit bestimmte Arbeiten eingeplant werden müssen, damit spätere Aktivitäten pünktlich starten können. Die Dauer dieser Aktivitäten wird dann von der zuständigen Planungsabteilung i.d.R. so großzügig gewählt, dass dadurch keine Ressourcenkonflikte auf den detaillierteren Planungsebenen entstehen. Trotzdem müssen diese Aktivitäten aber schon an dieser Stelle eingeplant werden, da sie einerseits Zeit benötigen und andererseits an Termine gebunden sein können, sodass sie die Platzierung nachfolgender oder vorangehender Aktivitäten beeinflussen können.

Die beschränkende Ressource bei der strategischen Planung ist aufgrund von Umweltauflagen die Menge des Wassers, welches zur Ausspülung des Hohlraums benutzt wird. Aus diesem Grund werden Bedarfe von dieser Ressource als flexibel planbare Bedarfe sehr genau angegeben. Insgesamt ergeben sich so für die Menge S^K des Modells die folgenden vier Ressourcen aus der betrachteten Planung:

- R1** Beschreibt die mögliche Anzahl an Bohrungen in den Untergrund, die aufgrund von nur beschränkt zur Verfügung stehender Baumaschinen zur Bohrung parallel in einer Zeitperiode durchgeführt werden können.
- R2** Beschreibt die mögliche Anzahl an Untergrundspeichern, die aufgrund von technischen Gründen parallel in einer Zeitperiode ausgespült werden können.
- R3** Beschreibt die Gesamtmenge an Wasser, welche aufgrund von Umweltauflagen maximal pro Zeitperiode zur Ausspülung der Hohlräume genutzt werden darf.
- R4** Beschreibt die mögliche Anzahl an Untergrundspeichern, die nach ihrer erfolgten Ausspülung aufgrund von nur beschränkt zur Verfügung stehender Baumaschinen parallel in einer Zeitperiode für die spätere Verwendung fertiggestellt werden können.

Es fällt sofort auf, dass die Beschreibung der Ressourcen R1, R2 und R4 impliziert, dass es sich hier um diskrete Ressourceneinheiten handelt. Dies steht zunächst im Widerspruch dazu, dass in dem in dieser Arbeit aufgestellten Planungsmodell jedoch nur kontinuierliche Ressourcenverfügbarkeiten und -bedarfe abgebildet werden können. Dies ist in diesem Fall jedoch kein Problem, da die Bedarfe an diesen Ressourcen immer konstant und ganzzahlig sind. Somit ergeben sich bei der späteren Optimierung auch immer nur ganzzahlige Zuweisungen, ohne dass es dafür eine spezielle Restriktion zur Sicherstellung dieser Ganzzahligkeit gibt.

Den Ressourcenverfügbarkeiten sind die Aktivitäten mit ihren Ressourcenbedarfen gegenübergestellt, die zur erfolgreichen Umsetzung der Projekte durchgeführt werden müssen. Jeder einzelne dieser unterirdischen Speicher wird als einzelnes Bauprojekt betrachtet und damit auch im hier aufgestellten Projektplan als einzelnes Projekt geplant. Zur Abbildung eines solchen Projekts werden in der hier betrachteten strategischen Planung die folgenden acht Aktivitäten definiert:

- A1** Der erste Schritt ist die Vorplanung des Speicherbaus. Diese Aktivität hat nur eine festgelegte Dauer und wird auf strategischer Ebene ohne Ressourcenbedarf geplant. Im Ausführungszeitraum dieser Aktivität werden in detaillierteren Planungsstufen administrative und organisatorische Tätigkeiten eingeplant, die für den operativen Baubeginn des Speichers erforderlich sind.
- A2** Nach der Vorplanung findet der Grunderwerb statt. Auch diese Aktivität braucht auf dieser Planungsebene keine Ressourcen und wird nur durch eine fixierte Dauer repräsentiert. Im Zeitraum der Ausführung dieser Aktivität müssen später die Rechte an dem Stück Land erworben werden, unter dem der Untergrundspeicher gebaut werden soll.
- A3** Zu Beginn der eigentlichen Bauphase des Speichers muss ein entsprechender Bauplatz errichtet werden. Die benötigte Zeit für die dabei anfallenden Arbeiten wird durch die Aktivität A3 ohne Ressourcen abgebildet.
- A4** Auf dem Bauplatz wird anschließend ein mehrere hundert Meter tiefes Loch in den Erdboden gebohrt, bis eine Salzschrift zur anschließenden Ausspülung erreicht ist. Da die nötigen Baumaschinen für diese Bohrung sehr teuer sind und deshalb nur sehr wenige davon zur Verfügung stehen, müssen hier schon auf strategischer Ebene Ressourcen verplant werden. In jeder Zeitperiode dieser Aktivität wird deshalb genau eine Einheit von Ressource R1 benötigt.
- A5** Während der Medienanbindung wird für die anschließende Ausspülung des Hohlraums das Bohrloch verrohrt und die Rohre werden an der Erdoberfläche an die Pumpen angeschlossen, die im weiteren Verlauf das Wasser in das Rohrloch pumpen sollen. Es wird eine feste Dauer vorgegeben, jedoch kein Ressourcenbedarf.
- A6** Bei der Ausspülung wird kontinuierlich Wasser unter Druck durch das gebohrte Loch in den Erdboden bis in die Salzschrift gepresst, sodass dieses Salz dort im Wasser gelöst wird. Über ein zweites Rohr wird gleichzeitig dieses mit Salz angereicherte Wasser zurück an die Erdoberfläche gedrückt. Dieser Prozess wird so lange ohne Unterbrechung fortgesetzt, bis ein zuvor festgelegter Hohlraum in der Salzschrift ausgespült wurde. Diese zu erreichende Größe des Hohlraums wird von den Planern im Vorfeld festgelegt. Weiterhin ist relativ genau bekannt, wie das Verhältnis zwischen einer eingepumpten Menge Wasser und der daraus resultierenden Menge an gelöstem Salz, d.h. dem hinzugewonnenen Hohlraumvolumen, ist. Dadurch wird bei der Planung für diese Aktivität nicht direkt mit dem Hohlraum, sondern mit der insgesamt benötigten Menge an Wasser gerechnet, um diesen Hohlraum zu erreichen (im Modell über $w_i k$ abgebildet). Diese Wassermenge steht in Form der Ressource R3 für alle Bauprojekte in jeder Zeitperiode in einer bestimmten Höhe zur Verfügung und es kann für die Aktivität

A6 in jedem einzelnen Projekt pro Zeitperiode entschieden werden, wie viel Wasser jeweils zur Generierung von weiterem Hohlraum verwendet wird. Dabei ist durch den Planer eine Untergrenze und eine Obergrenze pro Zeitperiode vorgegeben (im Modell über r_{ik} und \bar{r}_{ik} abgebildet), zwischen denen diese zugewiesene Menge an Wasser pro Zeitperiode liegen darf. Wie in Kapitel 2.3.4 angesprochen liegt die Untergrenze r_{ik} hier bei etwa $\frac{1}{6}$ der Obergrenze \bar{r}_{ik} , wodurch der Optimierung ziemlich viel Freiraum gelassen wird. Damit dieser große Freiraum nicht zu einer zu langen oder kurzen Ausspülphase führt, wird weiterhin die minimale und maximale Dauer von A6 auf einen individuellen Zeitraum begrenzt, der meistens irgendwo zwischen 12 und 36 Zeitperioden liegt (\underline{d}_i und \bar{d}_i). Zuletzt können aufgrund technischer Vorgaben insgesamt nur eine bestimmte maximale Anzahl von Ausspülungen parallel durchgeführt werden, deshalb benötigt A6 in jeder Zeitperiode seiner Ausführung noch konstant eine Einheit von Ressource R2.

- A7** Nach der Ausspülung finden eine Reihe von weiteren technischen Maßnahmen statt, um den Untergrundspeicher für die spätere Verwendung fertigzustellen. Diese Fertigstellung wird mit einer fixierten Dauer angegeben. Da pro Zeitperiode immer nur eine begrenzte Anzahl an Speichern fertiggestellt werden können, wird konstant pro Zeitperiode eine Einheit von Ressource R4 benötigt.
- A8** Nachdem der Untergrundspeicher fertiggestellt wurde, kann er an den späteren Nutzer (z.B. große Energieunternehmen) übergeben werden. Zu diesem Zeitpunkt ist der Speicher allerdings noch von der Ausspülung voller Wasser, da man aufgrund des Höhen- und Druckunterschieds ein Medium in dieser Tiefe nur nach oben befördern kann, indem man es durch ein anderes Medium verdrängt. Wenn der Nutzer den Speicher zum ersten Mal mit Erdöl oder Erdgas befüllt, kommt dabei nochmal genau die dem Hohlraum entsprechende Menge an Wasser an die Oberfläche. Da dieses Wasser auch mit Salz angereichert ist, mindert es, genauso wie die Ausspülung bei Aktivität A6, die verfügbare Menge der Ressource R3. Die in jeder Zeitperiode ausgepumpte Menge Wasser kann durch die Optimierung in vorgegebenen Grenzen entschieden werden. Im Gegensatz zur Aktivität A6 ist bei Aktivität A8 jedoch eine feste Dauer von meist 6 Zeitperioden vorgegeben ($\underline{d}_i = \bar{d}_i = 6$).

Neben diesen Aktivitäten, die bei jedem Speicherbauprojekt durchgeführt werden müssen und somit nur dann nicht anfallen, wenn sie aufgrund des Beginns des Planungshorizonts schon in der Vergangenheit liegen, haben die Planer die Möglichkeit, pro Projekt weitere Pufferaktivitäten zu definieren. Diese belegen wie die Aktivitäten A1, A2, A3 und A5 keine Ressourcen und dienen dazu, projektspezifisch erforderliche Arbeitsschritte auch schon zeitlich in dieser Phase der Planung mit berücksichtigen zu können. Ein beispielhafter Ausschnitt aus einem möglichen Projektstrukturplan, der sich aus diesen Aktivitäten und Ressourcen ergibt, wird in Abbildung 8.1 gezeigt.

an bestimmte Zeitpunkte fixieren wollen und dann eine weitere Optimierung ausführen wollen, können auch alle anderen Aktivitäten je nach konkretem Plan einen Start- oder Fertigstellungstermin haben.

8.2. Optimierungsergebnisse

Im Rahmen dieser Fallstudie konnten die entwickelten Lösungsverfahren anhand von fünf Projektablaufplänen aus der Praxis getestet und verglichen werden. Soweit es im Rahmen dieser Veröffentlichung möglich ist, werden in Tabelle 8.1 die wesentlichen Kennzahlen dieser Pläne aufgeführt und die Optimierungsergebnisse dargestellt.

Jeder dieser Pläne ist dabei von der Struktur her so aufgebaut wie im letzten Abschnitt erklärt und in Abbildung 8.1 dargestellt. Es wurde bereits erklärt, dass die Planung iterativ abläuft, d.h. es wird eine Optimierung durchgeführt und das Ergebnis wird anschließend von der Planungsabteilung und weiteren Experten bewertet. Im Rahmen dieser Bewertung werden eventuell einzelne Aktivitäten verschoben oder über einen Starttermin auf einen bestimmten Zeitpunkt fixiert, anschließend wird eine erneute Optimierung gestartet. Die Zeile *It.* gibt an, in der wievielten Planungsiteration sich die jeweilige Instanz befunden hat. *#P* und *#A* beschreiben die Anzahl an Projekten und Aktivitäten in der Instanz, wobei die Blindaktivitäten am Anfang und am Ende jedes Projekts hier nicht mitgezählt wurden. Während die Struktur eines einzelnen Projekts durch eine rein serielle Anordnung der Aktivitäten bei diesen Instanzen deutlich weniger komplex ist als es bei den PSPLIB-Instanzen und damit auch bei den betrachteten Testinstanzen in Kapitel 7 der Fall ist, ist die zu bewältigende Menge an Aktivitäten und Projekten hier um ein vielfaches größer. Die Zeile *#FB* gibt an, wie viele flexibel planbare Ressourcenbedarfe in der jeweiligen Instanz vorhanden sind. Auch diese liegen mit 83–90 Bedarfen etwas über der Anzahl an flexibel planbaren Bedarfen, die in den MP50- und MP250-Instanzen betrachtet wurden (vgl. Tabelle A.2 und A.3). Die Zeile *#S* gibt an, für wie viele der Aktivitäten ein Starttermin gesetzt war und in *#T* wird die Anzahl der Aktivitäten mit einem gesetzten Fertigstellungstermin genannt.

Im nächsten Abschnitt der Tabelle werden dann die Ergebnisse der Optimierung mit dem exakten Lösungsverfahren gezeigt. Dazu wurde jede der Instanzen mit dem MIP-Modell aus Kapitel 5.2 mit Hilfe von Gurobi 5.6 gelöst. Als Hardware wurde ein Intel Core i7-3770 Prozessor mit 32 GB Arbeitsspeicher verwendet und das Zeitlimit wurde auf 5 Stunden gesetzt. Zunächst wird die Initialisierungszeit angegeben, also die Zeit, die benötigt wurde, um das Modell aus der Software heraus an Gurobi zu übergeben. Während diese Zeit bei den vorherigen Testläufen im letzten Kapitel vernachlässigbar gering war und deshalb nicht separat aufgeführt wurde, liegt sie hier aufgrund der Größe der Pläne zwischen 3:30 Minuten und 6:04 Minuten und sollte daher mit berücksichtigt werden, um die benötigte Lösungszeit zu bewerten. In der nächsten Zeile wird die Zeit angegeben, die tatsächlich für die Optimierung der jeweiligen Instanz

Name		C1	C2	C3	C4	C5
Instanz	It.	4	3	1	11	9
	#P	96	96	101	101	101
	#A	760	862	888	893	893
	#FB	83	84	87	90	90
	#S	68	70	78	80	80
	#T	131	139	158	172	172
MIP	Initialisierungszeit	0:03:28	0:03:44	0:05:51	0:06:03	0:06:04
	Optimierungszeit	00:33:21	00:31:05	01:05:54	01:47:01	01:18:22
	∅ Abweichung S	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
	∅ Abweichung T	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
	Zeilen	144.540	147.502	194.880	201.394	201.358
	Spalten	308.461	336.520	472.918	478.378	477.640
	Arbeitsspeicher	10,2 GB	11,8 GB	17,3 GB	20,1 GB	18,3 GB
GA	Optimierungszeit	0:15:00	0:15:00	0:15:00	0:15:00	0:15:00
	∅ Abweichung S	1,09	0,73	0,87	1,45	1,05
	∅ Abweichung T	0,02	0,00	0,06	0,09	0,06

Tabelle 8.1. – Instanzen und Optimierungsergebnisse der Fallstudie

benötigt wurde. Addiert man die Initialisierungszeit und die Optimierungszeit, so ergibt sich eine Spanne von knapp 35 Minuten als kürzeste Lösungszeit bei Instanz C2 und etwas unter 2 Stunden als längste Lösungszeit bei C4. In diesem Praxisfall wäre das aus Sicht der Planer definitiv zu lange gewesen, da so aus organisatorischer Sicht der Planungsabteilung kaum noch eine flüssige iterative Planung möglich wäre.

In den nächsten beiden Zeilen wird das eigentliche Optimierungsergebnis dargestellt. Es wird die durchschnittliche Abweichung einer Aktivität von ihrem gesetzten Starttermin und die durchschnittliche Abweichung einer Aktivität von ihrem gesetzten Fertigstellungstermin angegeben. Erfreulich zu sehen ist, dass hier alle 5 Instanzen optimal gelöst werden konnten. Dies wirft aufgrund der genannten Anforderungen in Kapitel 2.3.4 die berechnete Frage auf, ob hier nicht ein etwas erhöhtes relatives Gap als Abbruchkriterium eine kürzere Lösungszeit ermöglicht hätte, um hier eine nicht optimale aber zumindest sehr gute Lösung zu finden. Dies wurde auch getestet, führte jedoch bei allen 5 Instanzen leider nicht zum Erfolg. Beim Lösen dieser Instanzen verhielt sich der MIP-Solver immer so, dass sehr lange gar keine Lösung gefunden wurde, dann jedoch oft innerhalb einer vergleichsweise kurzen Zeitspanne einige Lösungen bis hin zur optimalen Lösung gefunden wurden. Dies wäre ein weiterer Nachteil bei einem Einsatz in der Praxis, da es so für eine lange Zeit keinerlei Fortschrittsmeldungen vom Solver gibt und der Benutzer teilweise nach einer halben oder ganzen Stunde nicht weiß, ob die Optimierung gleich abgeschlossen ist oder ob er noch eine weitere

Stunde warten muss. In den weiteren drei Zeilen werden die Dimensionen des MIP-Modells und der Bedarf an Arbeitsspeicher während der Optimierung aufgeführt. Hier zeigt sich, dass die oben genannte leistungsstarke Hardware tatsächlich nötig ist, um Modelle dieser Größenordnung zu lösen.

Im Vergleich dazu werden in den letzten drei Zeilen der Tabelle die Optimierungsergebnisse des genetischen Algorithmus aus Kapitel 6 angegeben. Dieser hat jede der Instanzen drei Mal parallel für 15 Minuten optimiert und es werden, wie auch in Kapitel 7.3, die Ergebnisse des besten dieser drei Läufe angegeben. Da es sich bei der hier benutzten Zielfunktion ZF4 um eine nichtreguläre Zielfunktion handelt, wurden weitestgehend die in Kapitel 7.3.2 bestimmten Einstellungen der ebenfalls nichtregulären Zielfunktion ZF3 verwendet. Lediglich die Populationsgröße $|\mathcal{P}|$ wurde auf 50 Individuen herabgesetzt. Dies war nötig geworden, da sich gezeigt hat, dass die Laufzeit für eine Iteration des GA aufgrund der hier stark gesteigerten Anzahl an Aktivitäten pro Testinstanz deutlich angestiegen war. Dadurch konnten innerhalb des gesetzten Zeitlimits nicht mehr genug Iterationen durchgeführt werden, um gute Lösungen zu generieren. Es sind jedoch besonders bei so vielen Aktivitäten und damit sehr langen Aktivitätenlisten mindestens einige tausend Iterationen nötig, um gute Lösungen zu finden. Dies konnte durch die Absenkung von $|\mathcal{P}|$ erreicht werden, da so die längere Laufzeit für ein Individuum durch eine geringere Anzahl an Individuen kompensiert wird.

Es zeigt sich, dass hier mit teilweise deutlich weniger Lösungszeit sehr gute, jedoch nicht optimale Lösungen gefunden werden konnten. Die in der Zielfunktion weniger stark gewichteten Starttermine der Aktivitäten konnten im Durchschnitt bis auf eine Zeitperiode genau eingehalten werden, die gesetzten Fertigstellungstermine konnten dagegen fast immer komplett eingehalten werden. Vergleicht man diese Durchschnittswerte mit der absoluten Anzahl an Aktivitäten mit Fertigstellungstermin (Zeile $\#T$) zeigt sich, dass es hier nur sehr wenige Aktivitäten gibt, die überhaupt um eine Zeitperiode verspätet waren.

Damit wurde gezeigt, dass es auch mit solchen allgemein einsetzbaren Verfahren, wie dem in dieser Arbeit entwickelten genetischen Algorithmus, möglich ist, solche speziellen Probleme der ressourcenbeschränkten Projektablaufplanung in kurzer Zeit sehr gut zu lösen. Gegenüber dem exakten Ansatz kommen folgende weitere Vorteile hinzu:

- Es ist in fast allen Fällen garantiert, dass schon bei der Initialisierung des Algorithmus oder während der ersten Sekunden der Laufzeit erste gute Lösungen für das Problem vorliegen.
- Der Benutzer kann im Zeitverlauf sehen, wie der Algorithmus die Lösungen schrittweise weiter verbessert und jederzeit die Optimierung abbrechen, wenn eine seiner Meinung nach ausreichend gute Lösungsqualität erreicht wurde.

- Es ist keine Lizenz für einen MIP-Solver nötig, die i.d.R. mit hohen Investitionskosten verbunden ist.
- Es ist deutlich weniger leistungsfähige Hardware nötig. Der Arbeitsspeicherbedarf beim Lösen mit dem GA lag in allen Fällen bei wenigen hundert MB und wäre damit problemlos auf jedem aktuellen Standardcomputer möglich. Auf eine separate Auflistung des Verbrauchs wurde deshalb bei den GA-Ergebnissen verzichtet. Der Arbeitsspeicherbedarf zur Lösung des MIP-Modells lag mit bis zu 20 GB pro Instanz signifikant höher, sodass bei aktuellem Stand der Technik speziell aufgerüstete Hardware nötig ist, um diese Modelle lösen zu können.

Der entwickelte GA kann somit als Standardlösungsverfahren für Einzel- und Multiprojektpläne mit konstanten oder flexibel planbaren Ressourcenbedarfen im breiten Praxiseinsatz empfohlen werden, da er in der Lage ist, in kurzer Zeit mit geringen Ressourcen sehr gute Optimierungsergebnisse unter verschiedenen Zielsetzungen der Planung zu berechnen.

9. Zusammenfassung und Ausblick

In dieser Arbeit wurde das ressourcenbeschränkte Projektplanungsproblem mit flexiblen und konstanten Ressourcenbedarfen betrachtet und mit neu entwickelten Lösungsmethoden unter verschiedenen Zielfunktionen gelöst. Durch diese neuen Lösungsmethoden ist es jetzt möglich, unterschiedliche Projektplanungsprobleme mit verschiedenen Anforderungen einheitlich in einem Modell abzubilden und zu lösen, ohne dass eine Anpassung der Lösungsmethode nötig ist. Im Folgenden sollen nun noch einmal die Ergebnisse und Erkenntnisse der einzelnen Kapitel der Arbeit zusammengefasst werden. Anschließend wird ein Ausblick auf mögliche weitere Forschung gegeben, die aus Sicht des Autors auf Basis dieser erreichten Ergebnisse für sinnvoll erachtet wird.

9.1. Kritische Würdigung der Ergebnisse

Die vorliegende Arbeit teilt sich in neun Kapitel auf. Zunächst bekam der Leser in Kapitel 1 eine Übersicht über die Inhalte der einzelnen Kapitel und die betrachtete Problemstellung der Arbeit. Es wurde aufgezeigt, dass trotz umfangreicher Forschung im Bereich der ressourcenbeschränkten Projektablaufplanung noch immer sehr viele Projekte in der Praxis aufgrund von unzureichender Planung nicht erfolgreich durchgeführt werden.

Um mögliche Gründe für diese Diskrepanz herauszufinden, wurden in Kapitel 2 die Anforderungen der Praxis bei einer solchen ressourcenbeschränkten Projektablaufplanung erläutert. Dazu wurden zunächst die wesentlichen Begriffe und Abläufe aus dem Projektmanagement und der Projektablaufplanung erläutert. Im weiteren Verlauf wurden dann die Ergebnisse verschiedener Studien zusammengefasst, die gezeigt haben, dass es offensichtlich eine zunehmende Lücke zwischen den immer komplexer werdenden Anforderungen aus der Praxis und den entwickelten Lösungsmethoden und Modellen aus der Forschung gibt. Während in der Forschung häufig Projektpläne mit nur einem einzelnen Projekt und einem relativ starren Ressourcenmodell mit dem Ziel der Minimierung der Durchlaufzeit optimiert werden, erfordert die Praxis oft die Betrachtung von mehreren Projekten bei einem flexibel anpassbaren Ressourcenmodell zur Lösung unter unterschiedlichen individuellen Planungszielen. Es zeigte sich außerdem, dass es auch hinsichtlich der Anwendung der Optimierungsmethoden Unterschiede gegenüber anderen Anwendungsbereichen der Operations Research-Forschung gibt: Viele andere OR-Themen, wie z.B. die Umlaufplanung von Flugzeugen, Schiffen oder Bussen, die Planung von Trinkwassernetzen oder das Layout von Lagern, sind wichtige und hochkomplexe, aber nur vergleichsweise selten durchgeführte Planungsaufgaben. Diese werden deshalb oft auch von Personen mit entsprechendem Wissen

über mathematische Optimierung durchgeführt, eine Verbesserung der gefundenen Lösung um einige Prozent kann dabei bedeuten, dass in der Praxis deutliche Einsparungen möglich sind. Dem gegenüber steht die Projektablaufplanung als Teilgebiet des Projektmanagements. Hier werden in den meisten Fällen nur die Lösungsmethoden, die in kommerzielle Planungssoftware implementiert wurden, von Projektmanagern eingesetzt. Diese kennen zwar sehr gut das fachliche Umfeld des Projekts, sind aber i.d.R. keine OR-Experten und stehen dann vor der Herausforderung die gesammelten Informationen des Projektumfeldes in Parameter für sehr restriktive Optimierungsmodelle zu überführen. Hinzu kommt, dass selten tatsächlich eine optimale Lösung gefordert ist, da es in einem Projekt meistens viele weitere Einflussfaktoren auf die Lösung gibt, die so bei der Optimierung gar nicht berücksichtigt wurden. Stattdessen sollte es möglich sein, möglichst flexibel viele Aspekte einer Planung berücksichtigen zu können, um damit in kurzer Zeit gute Lösungen zu erzeugen, die dann weiter von den Projektmanagern und Fachabteilungen verfeinert werden.

Wird nun ein beliebiges praktisches Planungsproblem aus wissenschaftlicher Sicht untersucht, kommt es oft dazu, dass bestimmte problemspezifische Annahmen getroffen werden und es im Nachhinein schwierig oder gar unmöglich ist, die entwickelten Lösungsmethoden auf ähnliche, jedoch in einigen Punkten unterschiedliche Probleme zu übertragen. So hat auch die in Kapitel 3 präsentierte Literaturrecherche für das Problem der ressourcenbeschränkten Projektablaufplanung gezeigt, dass zwar Aspekte wie flexible Ressourcenbedarfe oder insbesondere die Berücksichtigung bestimmter Ziele bei der Planung schon einzeln untersucht wurden, die speziell dafür entwickelten heuristischen Lösungsverfahren jedoch nicht einfach auf andere Planungsprobleme der Projektablaufplanung anwendbar sind. Weiterhin deutete sich durch die betrachteten Veröffentlichungen zu exakten Lösungsverfahren bereits an diesem Punkt der Arbeit an, dass solche exakten Verfahren zwar prinzipiell in der Lage sein sollten, alle geforderten Aspekte einer Planung gemeinsam zu betrachten und zu lösen, dies aber wahrscheinlich trotz hoher Rechenkapazitäten nur für vergleichsweise kleine Projektstrukturpläne möglich sein wird.

Aus diesen Erkenntnissen, bestehend aus den zusammengefassten und abstrahierten praktischen Anforderungen auf der einen Seite und den bisherigen wissenschaftlichen Lösungsmethoden auf der anderen Seite, wurden in Kapitel 4 die Ziele dieser Arbeit abgeleitet. Es wurde als Ziel gesetzt, das RCPSP-Modell zur ressourcenbeschränkten Projektablaufplanung so zu erweitern, dass es neben den bisherigen konstanten Ressourcenbedarfen jetzt auch beliebig viele flexibel planbare Bedarfe unterstützen soll. Für dieses Modell sollte im Anschluss eine Lösungsmethode entwickelt werden, die in der Lage ist, in kurzer Zeit, d.h. wenigen Minuten, gute, jedoch nicht zwingend optimale Lösungen zu berechnen.

Zum Erreichen dieser Ziele wurde zunächst in Kapitel 5 das *Flexible Resource Constrained Project Scheduling Problem* (FRCPSPP) als Erweiterung zum bekannten RCPSP vorgestellt. Es gab in der Vergangenheit zwar schon ein paar Veröffentlichungen, die veränderte RCPSP-Modelle mit flexibel planbaren Ressourcenbedarfen vorge-

stellt hatten. Das hier entwickelte neue Modell scheint jedoch das erste zu sein, welches durch eine beliebige Anzahl von konstanten und/oder flexibel planbaren Ressourcenbedarfen pro Aktivität und flexiblen, jedoch einschränkbaren Dauern für Aktivitäten auf der einen Seite große Freiheiten bei der Modellierung von Projektplanungsproblemen bietet und trotzdem vollständig kompatibel zum klassischen RCPSP-Modell ist. Im weiteren Verlauf des Kapitels wurde für spätere Vergleiche ein MIP-Modell aufgestellt, in welches man das zuvor präsentierte konzeptionelle FRCPSM-Modell überführen kann, um es so mit einem Standard MIP-Solver zu lösen.

Da erste, hier nicht veröffentlichte Tests mit dem MIP-Modell die Vermutungen der Literaturrecherche bestätigten, dass mit einem exakten Verfahren, besonders bei der Betrachtung von mehreren Projekten in einem Plan, selbst nach einer Stunde Laufzeit keine oder nur sehr schlechte Lösungen gefunden werden können, wurde die Entwicklung eines heuristischen Lösungsverfahrens angestrebt und die Ergebnisse dieser Entwicklung wurden in Kapitel 6 präsentiert. Die geschaffene Heuristik basiert im Kern auf Ideen aus drei Veröffentlichungen, die jedoch für diesen Einsatzzweck jeweils stark weiterentwickelt wurden. So wurde die Erweiterung des seriellen Einplanungsschemas von Kolisch u. a. (2003) zur Unterstützung von flexibel planbaren Ressourcenbedarfen als Grundlage für die Einplanungsalgorithmen 1 und 3 genommen, die nun im Gegensatz zum Verfahren von Kolisch u. a. (2003) mit mehreren konstanten und flexibel planbaren Ressourcenbedarfen und Einschränkungen hinsichtlich der Dauer von Aktivitäten umgehen können. Die Idee von Neumann u. a. (2003) zur Priorisierung von möglichen Positionen der Aktivitäten zur Unterstützung von nichtregulären Zielfunktionen wurde angepasst und in Form von Algorithmus 2 mit dem neuen seriellen Einplanungsschema verbunden. Als dritte Komponente wurde der genetische Algorithmus von Hartmann (1998) als Metaheuristik zur Veränderung einer Lösungsrepräsentation des Einplanungsschemas verwendet und stark erweitert, sodass dieser nun auch die zuvor erweiterte Lösungsrepräsentation unterstützt. So ist dieser nun in der Lage, für eine zu lösende Instanz anhand einer beliebigen zeitbasierten Zielfunktion gute Lösungen zu finden.

Damit stehen nun ein exaktes und ein heuristisches Lösungsverfahren für das zuvor aufgestellte FRCPSM-Modell zur Verfügung. In wie weit sich diese Verfahren tatsächlich eignen, um dieses Modell zu lösen, wurde in Kapitel 7 evaluiert. Dafür war es zunächst nötig entsprechende Testinstanzen zu generieren, da es keine bekannten verfügbaren Instanzen gab, in denen sowohl konstante als auch flexibel planbare Ressourcenbedarfe abgebildet sind und die gleichzeitig mehrere Projekte mit weiteren Informationen, wie z.B. Fertigstellungstermine für Aktivitäten, enthalten, damit man diese Pläne unter verschiedenen Zielfunktionen optimieren könnte. Bei der Erzeugung dieser Instanzen dienten die in der Forschung sehr bekannten PSPLIB-Instanzen als Grundlage, die dann entsprechend kombiniert und um die entsprechenden Aspekte erweitert wurden. Die Bestimmung der Größe und der genauen Ausprägung der Aspekte dieser Instanzen orientierte sich an den Erkenntnissen aus der Recherche von Kapitel 2.2 und 2.3. Im weiteren Verlauf wurden diese Instanzen mit dem MIP-Modell

gelöst. Dabei bestätigte sich die Vermutung, dass es mit diesem exakten Verfahren nicht möglich ist, größere Testinstanzen zu lösen. Teilweise wurde selbst nach mehreren Stunden noch keine gültige Lösung gefunden. Es zeigte sich außerdem, dass nicht nur die Größe des Plans, d.h. die Anzahl an Aktivitäten, über die Schwierigkeit ihn zu lösen entscheidet, sondern auch, wie stark diese Aktivitäten durch Vorrangbeziehungen miteinander verknüpft sind. Dadurch ist es kaum möglich eine Aussage darüber zu treffen, bis zu welcher Größe überhaupt solche exakten Verfahren sinnvoll einsetzbar sind. Anschließend wurde der entwickelte genetische Algorithmus (GA) als heuristisches Lösungsverfahren getestet. Dazu wurden zunächst die Parameter bestimmt, z.B. verschiedene Mutationswahrscheinlichkeiten oder die Größe der betrachteten Population, die der GA zum Lösen eines Plans benötigt. Während einige Parameter mit binären Werten über das Durchprobieren aller möglichen Belegungen im Rahmen von vielen Optimierungsläufen bestimmt wurden, wurde besonders zur Bestimmung der Parameter mit kontinuierlichen Werten die Software SMAC eingesetzt, die im Rahmen eines Forschungsprojekts an einer anderen Universität entstanden ist. Unter Einsatz der so gefundenen besten Parameterbelegungen wurden dann die generierten Testinstanzen unter verschiedenen Zielfunktionen optimiert und die so gewonnenen Ergebnisse mit denen des exakten Verfahrens verglichen. Dabei zeigte sich, dass das exakte Verfahren zwar besonders häufig bei leicht zu lösenden Plänen schnell die optimale Lösung findet, der GA jedoch schon bei etwas schwierigeren Instanzen im Vorteil ist und so insgesamt die durchschnittlich besseren, wenn auch weniger häufig optimalen Lösungen liefert. Dieser Vergleich zeigte außerdem, dass der GA auch grundsätzlich in der Lage ist, Projektablaufpläne unter zeitbasierten, nichtregulären Zielfunktionen zu optimieren. Ein anschließender Vergleich mit bekannten Lösungsmethoden für das FRCPSP unter regulären Zielfunktionen zeigte, dass der GA hier allen bisher eingesetzten Heuristiken für dieses Problem überlegen ist. In einem weiteren Versuch wurde der GA als Konstruktionsheuristik für das MIP-Modell benutzt, welches jedoch nur ein sehr geringes Zeitlimit zum Lösen bekam. Dadurch konnten vergleichsweise leichte Pläne deutlich öfter optimal gelöst werden, als wenn sie nur mit dem GA gelöst worden wären. Für schwierige Pläne wurden zunächst mit dem GA gute Lösungen gefunden und dann mit dem MIP eine untere Schranke berechnet. Insgesamt zeigte sich, dass der GA besonders bei großen, schwierig zu lösenden Plänen gute Ergebnisse liefert, er dabei jedoch ein sehr stark nichtdeterministisches Verhalten zeigt. Oft ist es zum Finden besserer Lösungen daher sinnvoll, zusätzliche Rechenkapazität in die parallele oder serielle Ausführung mehrerer kürzerer Optimierungen auf derselben Instanz zu investieren, anstatt mit dieser Kapazität die Lösungszeit einer einzigen Optimierung zu erhöhen.

Nachdem bisher zur Evaluierung der beiden Lösungsverfahren nur synthetische Testinstanzen verwendet wurden, wurde diese Evaluation in Kapitel 8 im Rahmen einer Fallstudie mit Projektablaufplänen aus einem Praxisprojekt fortgesetzt. Dabei lag die Herausforderung in der, im Vergleich zu den synthetischen Instanzen, enorm gesteigerten Größe eines Plans von teilweise über 100 Projekten und etwa 900 Aktivitäten.

Auch wenn es aufgrund der hier sehr einfachen Projektstrukturen möglich war, alle betrachteten Instanzen optimal mit dem MIP-Modell zu lösen, so war dafür doch einerseits teilweise eine sehr lange Lösungszeit von bis zu zwei Stunden nötig und andererseits musste auch die eingesetzte Hardware aufgrund eines Speicherverbrauchs von bis zu 20 GB Arbeitsspeicher sehr leistungsfähig sein. Die Lösung mit dem GA zeigte auch hier deutliche Vorteile. Innerhalb von konstant 15 Minuten Laufzeit und einem deutlich geringeren Ressourcenverbrauch konnten alle Instanzen immer nahe an ihrem möglichen optimalen Ergebnis gelöst werden. Damit entspricht der GA somit deutlich genauer den Anforderungen an eine Lösungsmethode für den Praxiseinsatz, wie sie zu Beginn der Arbeit definiert wurden.

Im Rahmen der zwei Evaluationskapitel konnte gezeigt werden, dass die gesetzten Ziele der Arbeit vollständig erreicht wurden. Mit dem entwickelten GA wurde eine sehr konkurrenzfähige Lösungsheuristik für das FRCPSP unter verschiedenen zeitbasierten Zielfunktionen für die Einzel- und Multiprojektplanung geschaffen. Ideen für darauf aufbauende Schritte und weitere Forschung werden im folgenden Abschnitt aufgezeigt.

9.2. Ausblick auf weitere Forschung

Im Rahmen dieser Arbeit wurden die Möglichkeiten der ressourcenbeschränkten Projektablaufplanung sowohl durch eine Modellerweiterung, als auch durch neue Lösungsmethoden für dieses Modell an vielen Stellen erweitert. Dadurch wurde ein größerer Schritt hinsichtlich bisher nicht erforschter Aspekte bei dieser Planung gemacht, weshalb der Fokus weiterer Forschung zunächst darauf liegen sollte, die hier gewonnenen Erkenntnisse und Ergebnisse zu verifizieren und abzusichern.

Der in Kapitel 6 entwickelte genetische Algorithmus als heuristisches Lösungsverfahren wurde mit dem Anspruch entwickelt, einen Projektablaufplan unter beliebigen zeitbasierten Zielfunktionen optimieren zu können, weil sich bei der Literaturrecherche in Kapitel 3.5.2 gezeigt hat, dass in der Vergangenheit so gut wie immer beim Einsatz einer nichtregulären Zielfunktion ein speziell für die jeweilige Zielfunktion angepasstes Lösungsverfahren zum Einsatz kam. In Kapitel 7.5 wurde gezeigt, dass der entwickelte GA für reguläre Zielfunktionen tatsächlich bessere Ergebnisse liefert, als zuvor bekannte Verfahren aus der Literatur. Ein Vergleich mit nichtregulären Zielfunktionen schien jedoch in dieser Arbeit nicht sinnvoll möglich, da der Fokus zusätzlich noch auf flexibel planbaren Ressourcenbedarfen lag und es in der Literatur noch keine bekannten Heuristiken gibt, die Pläne mit solchen Bedarfen unter nichtregulären Zielfunktionen berechnen können. Ein Ansatz für weitere Forschung könnte demnach sein, den hier entwickelten GA auf Plänen mit nur konstanten Ressourcenbedarfen zu testen und so zu vergleichen, ob z.B. für den Einbau von Zeitpuffern oder für das Einhalten von Zeitfenstern dieses Verfahren oder eine speziell auf diese Zielfunktionen angepasste Heuristik aus der Literatur bessere Ergebnisse liefert. Weiterhin erscheint es sinnvoll, den GA auch noch mit deutlich mehr als den hier getesteten vier Zielfunktionen zu

evaluieren, wie z.B. durch eine Optimierung des Kapitalwerts oder der Projektkosten (vgl. Kapitel 3.5.1).

In Kapitel 6.4 wurde ein mögliches Konzept vorgestellt, wie mit dem GA ein Projektablaufplan auch unter nicht zeitbasierten Zielfunktionen optimiert werden könnte, z.B. mit dem Ziel der gleichmäßigen Ausnutzung der Ressourcen. Durch die Abgrenzung auf zeitbasierte Zielfunktionen fand dazu jedoch keine Evaluierung in dieser Arbeit statt, weshalb es interessant wäre, in einem weiteren Forschungsprojekt zu prüfen, ob es mit dem hier vorgestellten Konzept oder mit anderen Ansätzen möglich ist, nicht zeitbasierte Zielfunktionen mit dem hier entwickelten GA zu benutzen.

Bei der Durchführung solcher Vergleiche stellt sich immer die Frage, auf welcher Basis verglichen wird, d.h. welche Testinstanzen dafür benutzt werden. Für diese Arbeit standen keine frei verfügbaren Testinstanzen zur Verfügung, in denen die jetzt möglichen Aspekte des in Kapitel 5.1 aufgestellten FRCPSP-Modells abgebildet waren. Aus diesem Grund wurden, wie in Kapitel 7.1 beschrieben, eigene Testinstanzen auf Basis der PSPLIB-Instanzen entwickelt und verwendet. Diese neuen Einzel- und Multiprojektinstanzen sollen im Anschluss an diese Arbeit frei zur Verfügung gestellt werden, sodass sie entweder zur Überprüfung der hier erzielten Ergebnisse oder für weitere Vergleiche, wie z.B. die eben vorgeschlagenen, verwendet werden können.

Neben diesen ganzen Vergleichen mit anderen Verfahren oder unter anderen Zielen stellt sich auch die Frage, in wie weit es möglich ist, das entwickelte heuristische Lösungsverfahren weiter zu verbessern. Dazu werden die folgenden drei Ansätze vorgeschlagen:

Zunächst könnte evaluiert werden, ob es möglich ist, durch weiteres Parameter-tuning noch bessere Optimierungsergebnisse zu erzielen. In Kapitel 7.3.1 wurde die Bestimmung der Parameter auf einer relativ begrenzten Menge von Plänen durchgeführt, wodurch es natürlich fraglich ist, in wie weit die gefundenen Parameterwerte übertragbar sind. Dies könnte durch den Einsatz der vorgestellten SMAC-Software zur erneuten Bestimmung der Parameter auf einer deutlich größeren Menge von Plänen geprüft werden, z.B. den EP250-Instanzen und zusätzlich den EP150-Instanzen. Ebenso wäre es besonders aufgrund des starken nichtdeterministischen Verhaltens der Optimierung und der vielen möglichen Pläne denkbar, eine Online-Parameterbestimmung durchzuführen. Das bedeutet, dass geeignete Parameter auf einer vergleichsweise kleinen Menge an Plänen bestimmt werden und dann immer neue Pläne zur Verifizierung oder Veränderung der gefundenen Werte hinzukommen. Je mehr Pläne so zur Parameterbestimmung betrachtet werden, desto weniger würden die gefundenen Parameterwerte verändert, falls sie auf einem einzigen neuen Plan nicht gut funktionieren.

Als zweiter Ansatz zur Verbesserung der Lösungsheuristik wird vorgeschlagen die verschiedenen Erweiterungen der letzten Jahre für das serielle Einplanungsschema des RCPSP zu untersuchen und zu schauen, in wie weit sich diese auch auf das hier entwickelte erweiterte Einplanungsschema für beliebige zeitbasierte Zielfunktionen anwenden lassen. So wurde in Kapitel 3.3.3 angesprochen, dass Hartmann und Kolisch

(2000) einige grundlegende Metaheuristiken evaluiert haben und mehrere Jahre später in der Veröffentlichung von Kolisch und Hartmann (2006) dann unter anderem einige Erweiterungen, wie z.B. *Forward-backward improvement*, bei der Einplanung betrachtet wurden, die zum Teil zu besseren Lösungen führten. Als dritter Ansatz zur Verbesserung wird vorgeschlagen, anstatt des genetischen Algorithmus als eingesetzte Metaheuristik auszuprobieren, in wie weit sich ein Simulated Annealing-Algorithmus hier eignen würde. Dieser wurde ebenfalls von den beiden eben angegebenen Quellen als sehr konkurrenzfähig getestet. Es wäre deshalb interessant zu probieren, in wie weit sich solch ein SA eignet, die lokale Suche auf der in Kapitel 6.1 aufgestellten (τ, O, K^*) -Repräsentation zu steuern.

Nach den möglichen Vergleichen und Verbesserungen wäre es zuletzt noch interessant weiter zu evaluieren, in wie weit der hier entwickelte genetische Algorithmus tatsächlich dem Anspruch gerecht wird, für viele verschiedene praxisrelevante Varianten des (F)RCPSP ein effektives und effizientes Lösungsverfahren zu sein. In dieser Arbeit wurde bereits anhand eines Praxisbeispiels in Kapitel 8 gezeigt, dass der GA sich dazu eignet, ein von der Struktur und den Mengen der Entitäten her eher ungewöhnliches Problem der Projektablaufplanung ebenfalls gut zu lösen. Es sollte nun mit weiteren praxisnahen Beispielen getestet werden, ob der GA auch für diese ohne größere Anpassungen geeignet ist und es somit tatsächlich sinnvoll wäre, ihn für einen breiten Praxiseinsatz als Lösungsverfahren ohne vorherige Kenntnis des genauen Projektplanungsproblems in Erwägung zu ziehen.

Literaturverzeichnis

- [Abbasi u. a. 2006] ABBASI, Babak ; SHADROKH, Shahram ; ARKAT, Jamal: Bi-objective resource-constrained project scheduling with robustness and make-span criteria. In: *Applied Mathematics and Computation* 180 (2006), Nr. 1, S. 146 – 152. – URL <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0096300305011057>. – ISSN 0096-3003
- [Al-Fawzan und Haouari 2005] AL-FAWZAN, M.A. ; HAOUARI, Mohamed: A bi-objective model for robust resource-constrained project scheduling. In: *International Journal of Production Economics* 96 (2005), Nr. 2, S. 175 – 187. – URL <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0925527304001458>. – ISSN 0925-5273
- [Alcaraz u. a. 2003] ALCARAZ, J. ; MAROTO, C. ; RUIZ, R.: Solving the Multi-Mode Resource-Constrained Project Scheduling Problem with Genetic Algorithms. In: *The Journal of the Operational Research Society* 54 (2003), Nr. 6, S. pp. 614–626. – URL <http://www.jstor.org/stable/4101753>. – ISSN 01605682
- [Ballestín u. a. 2006] BALLESTÍN, Francisco ; VALLS, Vicente ; QUINTANILLA, Sacramento: Due Dates and RCPSP. In: JÓZEFOWSKA, Joanna (Hrsg.) ; WEGLARZ, Jan (Hrsg.): *Perspectives in Modern Project Scheduling* Bd. 92. Springer US, 2006, S. 79–104. – URL http://dx.doi.org/10.1007/978-0-387-33768-5_4. – ISBN 978-0-387-33643-5
- [Brooks und White 1965] BROOKS, George H. ; WHITE, Charles R.: An algorithm for finding optimal or near optimal solutions to the production scheduling problem. In: *Journal of Industrial Engineering* 16 (1965), Nr. 1, S. 34–40
- [Brucker 2002] BRUCKER, Peter: Scheduling and constraint propagation. In: *Discrete Applied Mathematics* 123 (2002), Nr. 1-3, S. 227 – 256. – URL <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0166218X01003420>. – ISSN 0166-218X
- [Brucker u. a. 1999] BRUCKER, Peter ; DREXL, Andreas ; MÖHRING, Rolf ; NEUMANN, Klaus ; PESCH, Erwin: Resource-constrained project scheduling: Notation, classification, models, and methods. In: *European Journal of Operational Research* 112 (1999), Nr. 1, S. 3 – 41. – URL <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0377221798002045>. – ISSN 0377-2217

- [Calhoun u. a. 2002] CALHOUN, Kevin M. ; DECKRO, Richard F. ; MOORE, James T. ; CHRISSIS, James W. ; HOVE, John C. V.: Planning and re-planning in project and production scheduling. In: *Omega* 30 (2002), Nr. 3, S. 155 – 170. – URL <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0305048302000245>. – ISSN 0305-0483
- [Coelho und Vanhoucke 2011] COELHO, José ; VANHOUCKE, Mario: Multi-mode resource-constrained project scheduling using RCPSP and SAT solvers. In: *European Journal of Operational Research* 213 (2011), Nr. 1, S. 73 – 82. – URL <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S037722171100230X>. – ISSN 0377-2217
- [Deblaere u. a. 2011] DEBLAERE, Filip ; DEMEULEMEESTER, Erik ; HERROELEN, Willy: Reactive scheduling in the multi-mode RCPSP. In: *Computers & Operations Research* 38 (2011), Nr. 1, S. 63 – 74. – URL <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S030505481000002X>. – <ce:title>Project Management and Scheduling</ce:title>. – ISSN 0305-0548
- [Demeulemeester und Herroelen 2002] DEMEULEMEESTER, Erik L. ; HERROELEN, Willy S. ; HILLIER, Frederick S. (Hrsg.): *Project Scheduling - A Research Handbook*. Kluwer Academic Publishers, 2002 (International Series in Operations Research & Management Science)
- [Deutsches Institut für Normung 2009] DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG: *DIN 69901 - Projektmanagement; Projektmanagementsysteme*. 1 2009
- [Doran 1981] DORAN, George T.: There's a SMART way to write management's goals and objectives. In: *Management Review* 70 (1981), Nr. 11, S. 35–36
- [Elmaghraby 1977] ELMAGHRABY, Salah E.: *Activity networks: project planning and control by network models*. New York [u. a.] : Wiley, 1977. – URL https://katalog.ub.uni-paderborn.de/records/PAD_ALEPH000021179. – ISBN 0-471-23861-9
- [Engel u. a. 2006] ENGEL, C ; MENZER, M ; NIENSTEDT, D: *Ergebnisse der Projektmanagement Studie "Konsequente Berücksichtigung weicher Faktoren Gemeinsame Studie von GPM Deutsche Gesellschaft für Projektmanagement eV und PA Consulting Group*. 2006. – URL http://www.osn.ch/blog/wp-content/uploads/gpm_studie.pdf
- [Fischer u. a. 2002] FISCHER, Joachim ; HEROLD, Werner ; DANGELMAIER, Wilhelm ; NASTANSKY, Ludwig ; SUHL, Leena: *Bausteine der Wirtschaftsinformatik*. Erich Schmidt Verlag, 2002

- [Fündeling und Trautmann 2010] FÜNDELING, C.-U. ; TRAUTMANN, N.: A priority-rule method for project scheduling with work-content constraints. In: *European Journal of Operational Research* 203 (2010), Nr. 3, S. 568 – 574. – URL <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0377221709006341>. – ISSN 0377-2217
- [Fündeling 2006] FÜNDELING, Cord-Ulrich: *Ressourcenbeschränkte Projektplanung bei vorgegebenen Arbeitsvolumina*, Universität Karlsruhe, Dissertation, 2006. – URL http://dx.doi.org/10.1007/978-3-8350-9237-2_1. – 10.1007/978-3-8350-9237-2_1
- [Gendreau und Potvin 2010] GENDREAU, Michel ; POTVIN, Jean-Yves: *Handbook of metaheuristics*. Bd. 2. Springer, 2010
- [Glover 1990] GLOVER, Fred: Tabu Search: A Tutorial. In: *Interfaces* 20 (1990), Nr. 4, S. 74 – 94. – URL <http://search.ebscohost.com/login.aspx?direct=true&db=pbh&AN=4479100&site=ehost-live>. – ISSN 00922102
- [Glover und Laguna 1999] GLOVER, Fred ; LAGUNA, Manuel: Tabu Search. In: DU, Ding-Zhu (Hrsg.) ; PARDALOS, PanosM. (Hrsg.): *Handbook of Combinatorial Optimization*. Springer US, 1999, S. 2093–2229. – URL http://dx.doi.org/10.1007/978-1-4613-0303-9_33. – ISBN 978-1-4613-7987-4
- [Gonçalves u. a. 2008] GONÇALVES, J.F. ; MENDES, J.J.M. ; RESENDE, M.G.C.: A genetic algorithm for the resource constrained multi-project scheduling problem. In: *European Journal of Operational Research* 189 (2008), Nr. 3, S. 1171 – 1190. – URL <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0377221707005929>. – ISSN 0377-2217
- [GPM Deutsche Gesellschaft für Projektmanagement e.V. u. a. 2013] GPM DEUTSCHE GESELLSCHAFT FÜR PROJEKTMANAGEMENT E.V. ; EUROPEAN BUSINESS SCHOOL PARIS ; HOCHSCHULE FÜR WIRTSCHAFT UND UMWELT NÜRTINGEN-GEISLINGEN: *Misserfolgsk Faktoren in der Projektarbeit*. 2013. – URL http://www.gpm-ipma.de/know_how/studienergebnisse/misserfolgsk Faktoren_in_der_projektarbeit.html
- [Hartmann 1998] HARTMANN, Sönke: A competitive genetic algorithm for resource-constrained project scheduling. In: *Naval Research Logistics (NRL)* 45 (1998), Nr. 7, S. 733–750. – URL [http://dx.doi.org/10.1002/\(SICI\)1520-6750\(199810\)45:7<733::AID-NAV5>3.0.CO;2-C](http://dx.doi.org/10.1002/(SICI)1520-6750(199810)45:7<733::AID-NAV5>3.0.CO;2-C). – ISSN 1520-6750
- [Hartmann und Briskorn 2010] HARTMANN, Sönke ; BRISKORN, Dirk: A survey of variants and extensions of the resource-constrained project scheduling problem. In: *European Journal of Operational Research* 207 (2010), Nr. 1, S. 1 – 14. – URL <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0377221709006341>

- [//www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0377221709008558](http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0377221709008558). – ISSN 0377-2217
- [Hartmann und Kolisch 2000] HARTMANN, Sönke ; KOLISCH, Rainer: Experimental evaluation of state-of-the-art heuristics for the resource-constrained project scheduling problem. In: *European Journal of Operational Research* 127 (2000), Nr. 2, S. 394 – 407. – URL <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0377221799004853>. – ISSN 0377-2217
- [Hazir und Schmidt 2012] HAZIR, Öncü ; SCHMIDT, KlausWerner: An integrated scheduling and control model for multi-mode projects. In: *Flexible Services and Manufacturing Journal* 1 (2012), S. 1–25. – URL <http://dx.doi.org/10.1007/s10696-012-9138-3>. – ISSN 1936-6582
- [Herroelen 2005] HERROELEN, Willy: Project Scheduling - Theory and Practice. In: *Production and Operations Management* 14 (2005), Nr. 4, S. 413–432. – URL <http://dx.doi.org/10.1111/j.1937-5956.2005.tb00230.x>. – ISSN 1937-5956
- [Herroelen und Leus 2005] HERROELEN, Willy ; LEUS, Roel: Project scheduling under uncertainty: Survey and research potentials. In: *European Journal of Operational Research* 165 (2005), Nr. 2, S. 289 – 306. – URL <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0377221704002401>. – <ce:title>Project Management and Scheduling</ce:title>. – ISSN 0377-2217
- [Holland 1975] HOLLAND, John H.: *Adaptation in natural and artificial systems: An introductory analysis with applications to biology, control, and artificial intelligence*. U Michigan Press, 1975
- [Hutter u. a. 2010] HUTTER, F. ; HOOS, H. H. ; LEYTON-BROWN, K.: Sequential Model-Based Optimization for General Algorithm Configuration (extended version) / University of British Columbia, Department of Computer Science. URL <http://www.cs.ubc.ca/labs/beta/Projects/SMAC/>, 2010 (TR-2010-10). – Forschungsbericht. Available online: <http://www.cs.ubc.ca/~hutter/papers/10-TR-SMAC.pdf>
- [Józefowska u. a. 2000] JÓZEFOWSKA, Joanna ; MIKA, Marek ; RÓŻYCKI, Rafa? ; WALIGÓRA, Grzegorz ; WĘGLARZ, Jan: Solving the discrete-continuous project scheduling problem via its discretization. In: *Mathematical Methods of Operations Research* 52 (2000), S. 489–499. – URL <http://dx.doi.org/10.1007/s001860000094>. – 10.1007/s001860000094. – ISSN 1432-2994
- [Kelley 1963] KELLEY, James E.: The critical-path method: Resources planning and scheduling. In: *Industrial scheduling* 13 (1963), S. 347–365

- [Kelley und Walker 1959] KELLEY, James E. ; WALKER, Morgan R.: Critical-path Planning and Scheduling. In: *Papers Presented at the December 1-3, 1959, Eastern Joint IRE-AIEE-ACM Computer Conference*. New York, NY, USA : ACM, 1959 (IRE-AIEE-ACM '59 (Eastern)), S. 160–173. – URL <http://doi.acm.org/10.1145/1460299.1460318>
- [Kimms 2001] KIMMS, A.: Maximizing the Net Present Value of a Project Under Resource Constraints Using a Lagrangian Relaxation Based Heuristic with Tight Upper Bounds. In: *Annals of Operations Research* 102 (2001), Nr. 1-4, S. 221–236. – URL <http://dx.doi.org/10.1023/A%3A1010962300979>. – ISSN 0254-5330
- [Klein 2000] KLEIN, Robert: Scheduling of resource constrained projects / Darmstadt Technical University, Department of Business Administration, Economics and Law, Institute for Business Studies (BWL). URL <http://EconPapers.repec.org/RePEc:dar:wpaper:1592>, 2000. – Publications of Darmstadt Technical University, Institute for Business Studies (BWL)
- [Kolisch 2000] KOLISCH, R.: Integrated scheduling, assembly area- and part-assignment for large-scale, make-to-order assemblies. In: *International Journal of Production Economics* 64 (2000), Nr. 1?3, S. 127 – 141. – URL <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0925527399000523>. – ISSN 0925-5273
- [Kolisch 1996a] KOLISCH, Rainer: Efficient priority rules for the resource-constrained project scheduling problem. In: *Journal of Operations Management* 14 (1996), Nr. 3, S. 179 – 192. – URL <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/0272696395000321>. – ISSN 0272-6963
- [Kolisch 1996b] KOLISCH, Rainer: Serial and parallel resource-constrained project scheduling methods revisited: Theory and computation. In: *European Journal of Operational Research* 90 (1996), Nr. 2, S. 320 – 333. – URL <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/0377221795003576>. – ISSN 0377-2217
- [Kolisch 1999] KOLISCH, Rainer: Resource Allocation Capabilities of Commercial Project Management Software Packages. In: *Interfaces* 29 (1999), Nr. 4, S. pp. 19–31. – URL <http://www.jstor.org/stable/25062501>. – ISSN 00922102
- [Kolisch und Hartmann 2006] KOLISCH, Rainer ; HARTMANN, S.: Experimental investigation of heuristics for resource-constrained project scheduling: An update. In: *European Journal of Operational Research* 174 (2006), Nr. 1, S. 23 – 37. – URL <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0377221705002596>. – ISSN 0377-2217

- [Kolisch u. a. 2003] KOLISCH, Rainer ; MEYER, Konrad ; MOHR, Roland ; SCHWINDT, Christoph ; URMANN, Matthias: Ablaufplanung für die Leitstruktur-optimierung in der Pharmaforschung. In: *Zeitschrift für Betriebswirtschaft* 73.2003 (2003), S. 825–848
- [Kolisch und Sprecher 1997] KOLISCH, Rainer ; SPRECHER, Arno: PSPLIB - A project scheduling problem library: OR Software - ORSEP Operations Research Software Exchange Program. In: *European Journal of Operational Research* 96 (1997), Nr. 1, S. 205 – 216. – URL <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0377221796001701>. – ISSN 0377-2217
- [Koné u. a. 2013] KONÉ, Oumar ; ARTIGUES, Christian ; LOPEZ, Pierre ; MONGEAU, Marcel: Comparison of mixed integer linear programming models for the resource-constrained project scheduling problem with consumption and production of resources. In: *Flexible Services and Manufacturing Journal* 25 (2013), Nr. 1-2, S. 25–47. – URL <http://dx.doi.org/10.1007/s10696-012-9152-5>. – ISSN 1936-6582
- [Krumke und Noltemeier 2009] KRUMKE, Sven O. ; NOLTEMEIER, Hartmut: *Graphentheoretische Konzepte und Algorithmen*. 2., aktualisierte Auflage. Wiesbaden : Vieweg+Teubner Verlag / GWV Fachverlage GmbH, Wiesbaden, 2009. – URL https://katalog.ub.uni-paderborn.de/records/PAD_ALEPH001258423. – ISBN 978-3-8348-9592-9
- [Kumanan u. a. 2006] KUMANAN, S. ; JEGAN JOSE, G. ; RAJA, K.: Multi-project scheduling using an heuristic and a genetic algorithm. In: *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology* 31 (2006), S. 360–366. – URL <http://dx.doi.org/10.1007/s00170-005-0199-2>. – 10.1007/s00170-005-0199-2. – ISSN 0268-3768
- [Lambourn 1963] LAMBOURN, S.: Resource allocation and multi-project scheduling (RAMPS) - A new tool in planning and control. In: *The Computer Journal* 5 (1963), Nr. 4, S. 300–304. – URL <http://comjnl.oxfordjournals.org/content/5/4/300.abstract>
- [Lee und Kim 1996] LEE, Jae-Kwan ; KIM, Yeong-Dae: Search Heuristics for Resource Constrained Project Scheduling. In: *The Journal of the Operational Research Society* 47 (1996), Nr. 5, S. pp. 678–689. – URL <http://www.jstor.org/stable/3010018>. – ISSN 01605682
- [Maniezzo und Mingozzi 1999] MANIEZZO, Vittorio ; MINGOZZI, Aristide: The project scheduling problem with irregular starting time costs. In: *Operations Research Letters* 25 (1999), Nr. 4, S. 175 – 182. – URL <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0167637799000504>. – ISSN 0167-6377

- [Matthes 1972] MATTHES, Winfried: *Grundmodell der Prozeßstruktur der Unternehmung*. Duncker & Humblot, 1972
- [Metropolis u. a. 1953] METROPOLIS, Nicholas ; ROSENBLUTH, Arianna W. ; ROSENBLUTH, Marshall N. ; TELLER, Augusta H. ; TELLER, Edward: Equation of State Calculations by Fast Computing Machines. In: *The Journal of Chemical Physics* 21 (1953), Nr. 6, S. 1087–1092. – URL <http://scitation.aip.org/content/aip/journal/jcp/21/6/10.1063/1.1699114>
- [Mika u. a. 2005] MIKA, Marek ; WALIGÓRA, Grzegorz ; WĘGLARZ, Jan: Simulated annealing and tabu search for multi-mode resource-constrained project scheduling with positive discounted cash flows and different payment models. In: *European Journal of Operational Research* 164 (2005), Nr. 3, S. 639 – 668. – URL <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0377221704001134>. – <ce:title>Recent Advances in Scheduling in Computer and manufacturing Systems</ce:title>. – ISSN 0377-2217
- [Mingozzi u. a. 1998] MINGOZZI, Aristide ; MANIEZZO, Vittorio ; RICCIARDELLI, Salvatore ; BIANCO, Lucio: An Exact Algorithm for the Resource-Constrained Project Scheduling Problem Based on a New Mathematical Formulation. In: *Management Science* 44 (1998), Nr. 5, S. pp. 714–729. – URL <http://www.jstor.org/stable/2634475>. – ISSN 00251909
- [Motzel 2006] MOTZEL, E.: *Projektmanagement Lexikon*. Wiley, 2006 (Wiley Klartext). – URL <http://books.google.de/books?id=5hQ3AAAACAAJ>. – ISBN 9783527502202
- [Neumann und Zimmermann 2000] NEUMANN, K. ; ZIMMERMANN, J.: Procedures for resource leveling and net present value problems in project scheduling with general temporal and resource constraints. In: *European Journal of Operational Research* 127 (2000), Nr. 2, S. 425 – 443. – URL <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0377221799004981>. – ISSN 0377-2217
- [Neumann u. a. 2003] NEUMANN, Klaus ; SCHWINDT, Christoph ; ZIMMERMANN, Jürgen: *Project scheduling with time windows and scarce resources: Temporal and resource-constrained project scheduling with regular and nonregular objective functions*. Springer, 2003
- [Pritsker u. a. 1969] PRITSKER, A. Alan B. ; WATTERS, Lawrence J. ; WOLFE, Philip M.: Multiproject Scheduling with Limited Resources: A Zero-One Programming Approach. In: *Management Science* 16 (1969), Nr. 1, S. pp. 93–108. – URL <http://www.jstor.org/stable/2628369>. – ISSN 00251909

- [Ranjbar und Kianfar 2010] RANJBAR, M ; KIANFAR, F: Resource-Constrained Project Scheduling Problem with Flexible Work Profiles: A Genetic Algorithm Approach. In: *Transaction E: Industrial Engineering, Sharif University of Technology* 17 (2010), S. 25–35
- [Rechenberg 1973] RECHENBERG, Ingo: *Evolutionsstrategie – Optimierung technischer Systeme nach Prinzipien der biologischen Evolution*. Stuttgart, GER : Frommann-Holzboog, 1973
- [Schramme und Suhl 2014] SCHRAMME, Torben ; SUHL, Leena: A genetic algorithm for solving the flexible resource constrained project scheduling problem under different objectives. In: FLIEDNER, Thomas (Hrsg.) ; KOLISCH, Rainer (Hrsg.) ; NABER, Anulark (Hrsg.): *Proceedings of the 14th International Conference on Project Management and Scheduling*. Munich, Germany : TUM School of Management, Mar 2014, S. 218–221. – URL <http://mediatum.ub.tum.de/node?id=1200549>
- [Schwefel 1977] SCHWEFEL, Hans-Paul: *Numerische Optimierung von Computer-Modellen mittels der Evolutionsstrategie: mit einer vergleichenden Einführung in die Hill-Climbing-und Zufallsstrategie*. Birkhäuser, 1977
- [Sedlacek 2009] SEDLACEK, Robert: Untertage-Gasspeicherung in Deutschland. In: *ERDÖL ERDGAS KOHLE* 125. Jg., Heft 11 (2009), S. 412–426
- [Seidl 2011] SEIDL, Jörg: Einführung und Grundlagen. In: *Multiprojektmanagement*. Springer Berlin Heidelberg, 2011 (Xpert.press), S. 1–24. – URL http://dx.doi.org/10.1007/978-3-642-16723-2_1. – 10.1007/978-3-642-16723-2_1. – ISBN 978-3-642-16723-2
- [Sprecher und Drexl 1998] SPRECHER, Arno ; DREXL, Andreas: Multi-mode resource-constrained project scheduling by a simple, general and powerful sequencing algorithm. In: *European Journal of Operational Research* 107 (1998), Nr. 2, S. 431 – 450. – URL <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0377221797003482>. – ISSN 0377-2217
- [Sprecher u. a. 1995] SPRECHER, Arno ; KOLISCH, Rainer ; DREXL, Andreas: Semi-active, active, and non-delay schedules for the resource-constrained project scheduling problem. In: *European Journal of Operational Research* 80 (1995), Nr. 1, S. 94 – 102. – URL <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0377221793E02948>. – ISSN 0377-2217
- [Thomas und Salhi 1998] THOMAS, PaulR. ; SALHI, Said: A Tabu Search Approach for the Resource Constrained Project Scheduling Problem. In: *Journal of Heuristics* 4 (1998), Nr. 2, S. 123–139. – URL <http://dx.doi.org/10.1023/A%3A1009673512884>. – ISSN 1381-1231

- [Tritschler u. a. 2014] TRITSCHLER, Martin ; NABER, Anulark ; KOLISCH, Rainer: A Genetic Algorithm for the Resource-Constrained Project Scheduling Problem with Flexible Resource Profiles. In: FLIEDNER, Thomas (Hrsg.) ; KOLISCH, Rainer (Hrsg.) ; NABER, Anulark (Hrsg.): *Proceedings of the 14th International Conference on Project Management and Scheduling*. Munich, Germany : TUM School of Management, Mar 2014, S. 230–233. – URL <http://mediatum.ub.tum.de/node?id=1200549>
- [Vanhoucke 2006] VANHOUCKE, Mario: Scheduling an R&D Project with Quality-Dependent Time Slots. In: GAVRILOVA, Marina (Hrsg.) ; GERVASI, Osvaldo (Hrsg.) ; KUMAR, Vipin (Hrsg.) ; TAN, C.J.Kenneth (Hrsg.) ; TANIAR, David (Hrsg.) ; LAGANÁ, Antonio (Hrsg.) ; MUN, Youngsong (Hrsg.) ; CHOO, Hyunseung (Hrsg.): *Computational Science and Its Applications - ICCSA 2006* Bd. 3982. Springer Berlin Heidelberg, 2006, S. 621–630. – URL http://dx.doi.org/10.1007/11751595_66. – ISBN 978-3-540-34075-1
- [Vanhoucke 2012] VANHOUCKE, Mario: The PERT/CPM Technique. In: *Project Management with Dynamic Scheduling*. Springer Berlin Heidelberg, 2012, S. 11–35. – URL http://dx.doi.org/10.1007/978-3-642-25175-7_2. – ISBN 978-3-642-25174-0
- [Vanhoucke u. a. 2001] VANHOUCKE, Mario ; DEMEULEMEESTER, Erik ; HERROELEN, Willy: On Maximizing the Net Present Value of a Project Under Renewable Resource Constraints. In: *Management Science* 47 (2001), Nr. 8, S. 1113–1121. – URL <http://pubsonline.informs.org/doi/abs/10.1287/mnsc.47.8.1113.10226>
- [Viana und de Sousa 2000] VIANA, Ana ; SOUSA, Jorge P. de: Using metaheuristics in multiobjective resource constrained project scheduling. In: *European Journal of Operational Research* 120 (2000), Nr. 2, S. 359 – 374. – URL <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0377221799001630>. – ISSN 0377-2217
- [Viefhues 1982] VIEFHUES, Dieter: *Mehrzielorientierte Projektplanung*. Lang, 1982
- [Van de Vonder u. a. 2007] VONDER, Stijn Van de ; DEMEULEMEESTER, Erik ; HERROELEN, Willy: A classification of predictive-reactive project scheduling procedures. In: *Journal of Scheduling* 10 (2007), S. 195–207. – URL <http://dx.doi.org/10.1007/s10951-007-0011-2>. – 10.1007/s10951-007-0011-2. – ISSN 1094-6136
- [Williams 2003] WILLIAMS, Terry: The contribution of mathematical modelling to the practice of project management. In: *IMA Journal of Management Mathematics* 14 (2003), Nr. 1, S. 3–30. – URL <http://imaman.oxfordjournals.org/content/14/1/3.abstract>

- [Zhang und Sun 2011] ZHANG, Lianying ; SUN, Ruoxin: An improvement of resource-constrained multi-project scheduling model based on priority-rule based heuristics. In: *Service Systems and Service Management (ICSSSM), 2011 8th International Conference on*, june 2011, S. 1 –5. – ISSN 2161-1890
- [Zimmermann u. a. 2005] ZIMMERMANN, Jürgen ; STARK, Christoph ; RIECK, Julia: *Projektplanung: Modelle, Methoden, Management*. Springer DE, 2005

Anhang A.

Instanzen für numerische Testläufe

A.1. Erläuterungen

In den folgenden Abschnitten werden anhand verschiedener Kennzahlen die Testinstanzen vorgestellt, die für die numerischen Testläufe zur Evaluation der Lösungsverfahren in Kapitel 7 verwendet wurden. Anschließend werden in Anhang B die detaillierten Optimierungsergebnisse dieser Testinstanzen aufgeführt. Dabei werden in den Spaltenüberschriften die folgenden Abkürzungen verwendet:

#R Anzahl der unterschiedlichen Ressourcen in einem Plan.

#P Anzahl der Projekte in einem Plan.

#A Anzahl der Aktivitäten ohne Blindaktivitäten, je nach Kontext in einem Projekt oder im gesamten Plan.

S Schwierigkeit des Plans anhand der benötigten Lösungszeit mit dem exakten Lösungsverfahren (vgl. Kapitel 7.2). Die Schwierigkeit ist dabei in die folgenden 4 Stufen unterteilt:

- 1 = Benötigte Lösungszeit < 1 Minute
- 2 = Benötigte Lösungszeit 1–5 Minuten
- 3 = Benötigte Lösungszeit 5–50 Minuten
- 4 = Benötigte Lösungszeit > 50 Minuten

#KB Anzahl der konstanten Bedarfe für alle Aktivitäten eines Projekts.

#FB Anzahl der flexibel planbaren Bedarfe für alle Aktivitäten eines Projekts.

LB Die *Lower Bound* (untere Schranke), d.h. die beste gefundene Lösung der LP-Relaxation eines Problems, die jedoch nicht zwingend ganzzahlig und damit gültig sein muss.

Obj. Der Zielfunktionswert der besten gefundenen ganzzahligen Lösung (*Objective*, obere Schranke)

Gap Der relative Abstand zwischen unterer und oberer Schranke als Maß dafür, wie nah die beste gefundene ganzzahlige Lösung an einer möglichen optimalen Lösung liegt. Bei einem Gap von 0% gilt untere Schranke = obere Schranke, die obere Schranke ist damit bewiesenermaßen eine optimale Lösung und es ist keine weitere Verbesserung des Optimierungsergebnisses möglich. Bei der Optimierung über eine Heuristik wird der Gap in dieser Arbeit dazu benutzt, den Abstand der besten heuristischen Lösung entweder zur besten oberen oder zur besten unteren Schranke der MIP-Lösung anzugeben. Der Gap wird dabei wie folgt berechnet:

$$\delta^{\%} = \frac{|IP - LB|}{IP + \epsilon}$$

Hier bezeichnet LB die untere Schranke, zu der der Abstand berechnet werden soll und IP die beste gefundene ganzzahlige Lösung.

A.2. Testinstanzenmenge EP150

Name	PSPLIB	Gesamter Plan				Projekt 1			Name	PSPLIB	Gesamter Plan				Projekt 1		
		#R	#P	#A	S	#A	#KB	#FB			#R	#P	#A	S	#A	#KB	#FB
EP150/1	j3012_10	4	1	32	1	30	119	9	EP150/76	j603_4	4	1	62	1	60	205	43
EP150/2	j3017_10	4	1	32	1	30	119	9	EP150/77	j6015_3	4	1	62	1	60	203	45
EP150/3	j3019_8	4	1	32	1	30	119	9	EP150/78	j6030_1	4	1	62	2	60	201	47
EP150/4	j3035_2	4	1	32	1	30	119	9	EP150/79	j6031_10	4	1	62	1	60	199	49
EP150/5	j304_1	4	1	32	1	30	119	9	EP150/80	j605_6	4	1	62	4	60	198	50
EP150/6	j301_3	4	1	32	1	30	118	10	EP150/81	j6032_10	4	1	62	1	60	194	54
EP150/7	j3033_7	4	1	32	1	30	118	10	EP150/82	j607_6	4	1	62	1	60	194	54
EP150/8	j308_9	4	1	32	1	30	117	11	EP150/83	j608_2	4	1	62	1	60	191	57
EP150/9	j3020_9	4	1	32	1	30	116	12	EP150/84	j6013_1	4	1	62	4	60	185	63
EP150/10	j3036_9	4	1	32	1	30	116	12	EP150/85	j6021_10	4	1	62	4	60	185	63
EP150/11	j3043_7	4	1	32	1	30	116	12	EP150/86	j6021_3	4	1	62	4	60	185	63
EP150/12	j3035_2	4	1	32	1	30	114	14	EP150/87	j6026_3	4	1	62	4	60	185	63
EP150/13	j3020_9	4	1	32	1	30	113	15	EP150/88	j606_6	4	1	62	2	60	185	63
EP150/14	j3036_9	4	1	32	1	30	113	15	EP150/89	j6028_3	4	1	62	1	60	184	64
EP150/15	j3039_8	4	1	32	1	30	113	15	EP150/90	j605_10	4	1	62	4	60	182	66
EP150/16	j3014_8	4	1	32	1	30	112	16	EP150/91	j6032_10	4	1	62	1	60	178	70
EP150/17	j3017_10	4	1	32	1	30	112	16	EP150/92	j6012_8	4	1	62	1	60	175	73
EP150/18	j3023_10	4	1	32	1	30	112	16	EP150/93	j6010_1	4	1	62	4	60	171	77
EP150/19	j3042_1	4	1	32	1	30	112	16	EP150/94	j6016_9	4	1	62	1	60	171	77
EP150/20	j3045_8	4	1	32	4	30	112	16	EP150/95	j6013_1	4	1	62	4	60	167	81
EP150/21	j3010_10	4	1	32	1	30	111	17	EP150/96	j6030_1	4	1	62	4	60	166	82
EP150/22	j3010_8	4	1	32	1	30	111	17	EP150/97	j6031_10	4	1	62	1	60	166	82
EP150/23	j304_1	4	1	32	1	30	111	17	EP150/98	j6027_3	4	1	62	3	60	163	85
EP150/24	j3033_7	4	1	32	1	30	110	18	EP150/99	j6010_8	4	1	62	4	60	154	94
EP150/25	j3038_3	4	1	32	1	30	110	18	EP150/100	j6015_3	4	1	62	1	60	146	102
EP150/26	j3022_6	4	1	32	1	30	109	19	EP150/101	j9034_3	4	1	92	1	90	345	23
EP150/27	j307_4	4	1	32	1	30	109	19	EP150/102	j9039_7	4	1	92	1	90	344	24
EP150/28	j308_9	4	1	32	1	30	109	19	EP150/103	j906_3	4	1	92	4	90	337	31
EP150/29	j301_3	4	1	32	1	30	107	21	EP150/104	j9021_1	4	1	92	4	90	336	32
EP150/30	j3019_8	4	1	32	1	30	107	21	EP150/105	j9018_4	4	1	92	1	90	331	37
EP150/31	j3038_3	4	1	32	1	30	106	22	EP150/106	j9036_1	4	1	92	1	90	331	37
EP150/32	j3031_3	4	1	32	1	30	105	23	EP150/107	j9022_10	4	1	92	4	90	328	40
EP150/33	j3029_3	4	1	32	4	30	102	26	EP150/108	j9047_5	4	1	92	1	90	328	40
EP150/34	j307_4	4	1	32	1	30	102	26	EP150/109	j9033_6	4	1	92	1	90	327	41
EP150/35	j3027_10	4	1	32	1	30	101	27	EP150/110	j9018_4	4	1	92	1	90	322	46
EP150/36	j3016_10	4	1	32	1	30	100	28	EP150/111	j9034_3	4	1	92	1	90	319	49
EP150/37	j3010_8	4	1	32	1	30	98	30	EP150/112	j9033_6	4	1	92	2	90	317	51
EP150/38	j3022_6	4	1	32	1	30	97	31	EP150/113	j9043_9	4	1	92	1	90	314	54
EP150/39	j3023_10	4	1	32	1	30	97	31	EP150/114	j9038_8	4	1	92	3	90	310	58
EP150/40	j3012_10	4	1	32	1	30	96	32	EP150/115	j9036_1	4	1	92	1	90	308	60
EP150/41	j3027_10	4	1	32	1	30	95	33	EP150/116	j9037_1	4	1	92	4	90	307	61
EP150/42	j3039_8	4	1	32	1	30	95	33	EP150/117	j9042_2	4	1	92	4	90	302	66
EP150/43	j3010_10	4	1	32	1	30	94	34	EP150/118	j9025_8	4	1	92	4	90	300	68
EP150/44	j3043_7	4	1	32	1	30	92	36	EP150/119	j9037_1	4	1	92	4	90	300	68
EP150/45	j3042_1	4	1	32	1	30	91	37	EP150/120	j9032_2	4	1	92	1	90	297	71
EP150/46	j3029_3	4	1	32	4	30	89	39	EP150/121	j9041_5	4	1	92	4	90	296	72
EP150/47	j3031_3	4	1	32	1	30	86	42	EP150/122	j9021_1	4	1	92	4	90	294	74
EP150/48	j3014_8	4	1	32	1	30	85	43	EP150/123	j9028_7	4	1	92	1	90	294	74
EP150/49	j3045_8	4	1	32	4	30	85	43	EP150/124	j9046_3	4	1	92	4	90	294	74
EP150/50	j3016_10	4	1	32	1	30	72	56	EP150/125	j9022_10	4	1	92	3	90	290	78
EP150/51	j601_3	4	1	62	1	60	234	14	EP150/126	j9024_9	4	1	92	1	90	289	79
EP150/52	j6018_3	4	1	62	1	60	233	15	EP150/127	j9024_9	4	1	92	1	90	286	82
EP150/53	j607_6	4	1	62	1	60	231	17	EP150/128	j9029_8	4	1	92	4	90	285	83
EP150/54	j605_6	4	1	62	4	60	227	21	EP150/129	j9038_8	4	1	92	4	90	285	83
EP150/55	j6021_10	4	1	62	4	60	225	23	EP150/130	j9010_10	4	1	92	2	90	282	86
EP150/56	j608_2	4	1	62	1	60	225	23	EP150/131	j9039_7	4	1	92	1	90	282	86

Fortsetzung auf nächster Seite. ...

Anhang A. Instanzen für numerische Testläufe

... fortgesetzte Tabelle von vorheriger Seite

Name	PSPLIB	Gesamter Plan				Projekt 1				Name	PSPLIB	Gesamter Plan				Projekt 1		
		#R	#P	#A	S	#A	#KB	#FB				#R	#P	#A	S	#A	#KB	#FB
EP150/57	j605_10	4	1	62	4	60	224	24		EP150/132	j9027_10	4	1	92	1	90	281	87
EP150/58	j6012_8	4	1	62	1	60	223	25		EP150/133	j9016_5	4	1	92	1	90	277	91
EP150/59	j6019_4	4	1	62	1	60	223	25		EP150/134	j9048_9	4	1	92	1	90	265	103
EP150/60	j6024_10	4	1	62	1	60	223	25		EP150/135	j9016_5	4	1	92	1	90	264	104
EP150/61	j606_6	4	1	62	1	60	223	25		EP150/136	j906_3	4	1	92	4	90	262	106
EP150/62	j603_4	4	1	62	1	60	222	26		EP150/137	j9048_9	4	1	92	1	90	261	107
EP150/63	j604_5	4	1	62	1	60	222	26		EP150/138	j9030_5	4	1	92	4	90	258	110
EP150/64	j6010_1	4	1	62	1	60	219	29		EP150/139	j9042_2	4	1	92	4	90	258	110
EP150/65	j601_3	4	1	62	1	60	218	30		EP150/140	j9047_5	4	1	92	3	90	250	118
EP150/66	j6019_4	4	1	62	1	60	213	35		EP150/141	j9010_10	4	1	92	3	90	249	119
EP150/67	j6028_3	4	1	62	1	60	213	35		EP150/142	j9025_8	4	1	92	4	90	246	122
EP150/68	j604_5	4	1	62	1	60	213	35		EP150/143	j9032_2	4	1	92	1	90	239	129
EP150/69	j6016_9	4	1	62	1	60	210	38		EP150/144	j9041_5	4	1	92	4	90	236	132
EP150/70	j6027_3	4	1	62	1	60	209	39		EP150/145	j9028_7	4	1	92	1	90	235	133
EP150/71	j6021_3	4	1	62	4	60	207	41		EP150/146	j9029_8	4	1	92	4	90	233	135
EP150/72	j6024_10	4	1	62	1	60	207	41		EP150/147	j9043_9	4	1	92	4	90	232	136
EP150/73	j6010_8	4	1	62	1	60	206	42		EP150/148	j9046_3	4	1	92	4	90	223	145
EP150/74	j6018_3	4	1	62	1	60	206	42		EP150/149	j9027_10	4	1	92	1	90	222	146
EP150/75	j6026_3	4	1	62	4	60	205	43		EP150/150	j9030_5	4	1	92	4	90	205	163

Tabelle A.1. – Testinstanzenmenge EP150 für die Einzelprojektplanung

A.3. Testinstanzenmenge MP50

Name	Gesamter Plan				Projekt 1			Projekt 2			Projekt 3			Projekt 4			Projekt 5		
	#R	#P	#A	S	#A	#KB	#FB	#A	#KB	#FB	#A	#KB	#FB	#A	#KB	#FB	#A	#KB	#FB
MP50/1	4	3	50	1	21	60	24	10	36	4	19	70	6						
MP50/2	4	3	50	1	21	63	21	10	38	2	19	61	15						
MP50/3	4	3	57	1	18	66	6	18	58	14	21	80	4						
MP50/4	4	3	57	4	18	63	9	18	67	5	21	72	12						
MP50/5	4	3	57	4	18	68	4	16	54	10	23	81	11						
MP50/6	4	3	57	4	18	65	7	16	60	4	23	77	15						
MP50/7	4	3	58	3	24	80	16	23	82	10	11	42	2						
MP50/8	4	3	58	1	23	74	18	12	42	6	23	77	15						
MP50/9	4	3	59	4	19	69	7	20	57	23	20	75	5						
MP50/10	4	3	59	4	19	59	17	20	59	21	20	70	10						
MP50/11	4	3	61	4	12	41	7	25	92	8	24	66	30						
MP50/12	4	3	61	4	12	41	7	25	87	13	24	82	14						
MP50/13	4	3	61	1	23	76	16	19	67	9	19	54	22						
MP50/14	4	3	63	4	24	75	21	20	71	9	19	71	5						
MP50/15	4	3	64	4	18	67	5	22	68	20	24	81	15						
MP50/16	4	3	66	4	22	57	31	24	89	7	20	52	28						
MP50/17	4	3	66	4	22	72	16	24	90	6	20	73	7						
MP50/18	4	3	67	4	19	64	12	19	57	19	29	111	5						
MP50/19	4	3	67	4	29	90	26	20	73	7	18	46	26						
MP50/20	4	3	67	4	29	92	24	20	77	3	18	50	22						
MP50/21	4	3	69	1	15	56	4	29	110	6	25	90	10						
MP50/22	4	3	69	2	15	57	3	29	94	22	25	81	19						
MP50/23	4	3	71	2	27	100	8	25	65	35	19	70	6						
MP50/24	4	3	72	4	23	63	29	20	76	4	29	96	20						
MP50/25	4	3	72	4	23	77	15	20	75	5	29	103	13						
MP50/26	4	4	71	4	10	38	2	18	56	16	24	76	20	19	68	8			
MP50/27	4	4	71	4	10	37	3	18	57	15	24	85	11	19	72	4			
MP50/28	4	4	72	2	22	77	11	24	91	5	10	36	4	16	61	3			
MP50/29	4	4	72	4	22	71	17	24	87	9	10	32	8	16	59	5			
MP50/30	4	4	76	4	17	54	14	18	62	10	21	80	4	20	75	5			
MP50/31	4	4	76	4	17	61	7	18	60	12	21	78	6	20	67	13			
MP50/32	4	4	77	4	22	57	31	19	59	17	19	65	11	17	63	5			
MP50/33	4	4	77	4	26	83	21	17	59	9	19	64	12	15	54	6			
MP50/34	4	4	77	4	26	85	19	17	59	9	19	63	13	15	49	11			
MP50/35	4	4	77	1	19	73	3	21	74	10	18	69	3	19	70	6			
MP50/36	4	4	77	1	19	71	5	21	73	11	18	68	4	19	59	17			
MP50/37	4	4	78	4	28	75	37	16	62	2	15	56	4	19	66	10			
MP50/38	4	4	78	4	28	77	35	16	56	8	15	55	5	19	67	9			
MP50/39	4	4	80	4	19	59	17	21	50	34	11	42	2	29	94	22			
MP50/40	4	4	81	4	27	92	16	19	72	4	23	82	10	12	44	4			
MP50/41	4	4	85	4	28	103	9	20	64	16	26	77	27	11	38	6			
MP50/42	4	4	88	4	20	72	8	26	81	23	20	75	5	22	69	19			
MP50/43	4	5	93	4	11	39	5	29	105	11	20	75	5	14	37	19	19	67	9
MP50/44	4	5	95	2	23	78	14	19	72	4	13	47	5	22	68	20	18	61	11
MP50/45	4	5	104	4	15	42	18	30	84	36	22	83	5	18	63	9	19	57	19
MP50/46	4	5	104	4	15	46	14	30	84	36	22	80	8	18	64	8	19	65	11
MP50/47	4	5	105	1	22	80	8	21	53	31	25	88	12	18	63	9	19	56	20
MP50/48	4	5	105	1	22	69	19	21	56	28	25	85	15	18	69	3	19	66	10
MP50/49	4	5	111	4	20	77	3	24	72	24	26	98	6	20	72	8	21	59	25
MP50/50	4	5	117	4	21	78	6	25	85	15	25	87	13	21	73	11	25	95	5

Tabelle A.2. – Testinstanzenmenge MP50 für die Multiprojektplanung

A.4. Testinstanzenmenge MP250

Name	Gesamter Plan				Projekt 1			Projekt 2			Projekt 3			Projekt 4			Projekt 5		
	#R	#P	#A	S	#A	#KB	#FB	#A	#KB	#FB	#A	#KB	#FB	#A	#KB	#FB	#A	#KB	#FB
MP250/1	4	3	47	1	18	59	13	11	42	2	18	50	22						
MP250/2	4	3	47	1	18	65	7	11	41	3	18	59	13						
MP250/3	4	3	50	1	10	39	1	21	72	12	19	69	7						
MP250/4	4	3	52	1	10	34	6	24	72	24	18	56	16						
MP250/5	4	3	53	1	18	65	7	24	87	9	11	40	4						
MP250/6	4	3	55	1	18	51	21	18	49	23	19	54	22						
MP250/7	4	3	55	2	18	55	17	18	65	7	19	60	16						
MP250/8	4	3	56	4	15	40	20	19	68	8	22	60	28						
MP250/9	4	3	56	4	15	51	9	19	59	17	22	80	8						
MP250/10	4	3	56	2	17	63	5	13	50	2	26	91	13						
MP250/11	4	3	56	2	17	62	6	13	47	5	26	91	13						
MP250/12	4	3	56	4	20	75	5	19	58	18	17	56	12						
MP250/13	4	3	56	4	20	68	12	19	69	7	17	62	6						
MP250/14	4	3	57	1	20	63	17	19	70	6	18	68	4						
MP250/15	4	3	57	1	20	70	10	19	60	16	18	56	16						
MP250/16	4	3	58	4	24	90	6	23	86	6	11	41	3						
MP250/17	4	3	58	1	20	67	13	26	82	22	12	46	2						
MP250/18	4	3	58	1	25	88	12	12	43	5	21	71	13						
MP250/19	4	3	58	1	25	92	8	12	44	4	21	61	23						
MP250/20	4	3	58	4	22	67	21	18	63	9	18	54	18						
MP250/21	4	3	58	4	22	71	17	18	64	8	18	54	18						
MP250/22	4	3	58	4	19	58	18	19	68	8	20	62	18						
MP250/23	4	3	58	1	18	59	13	22	78	10	18	66	6						
MP250/24	4	3	61	4	19	66	10	18	57	15	24	77	19						
MP250/25	4	3	61	4	19	70	6	18	63	9	24	85	11						
MP250/26	4	3	61	4	12	42	6	22	76	12	27	68	40						
MP250/27	4	3	61	4	12	45	3	22	75	13	27	80	28						
MP250/28	4	3	61	4	20	72	8	15	52	8	26	90	14						
MP250/29	4	3	61	4	20	51	29	23	74	18	18	56	16						
MP250/30	4	3	61	4	20	56	24	23	74	18	18	63	9						
MP250/31	4	3	61	2	23	85	7	19	68	8	19	67	9						
MP250/32	4	3	62	4	19	64	12	24	73	23	19	68	8						
MP250/33	4	3	62	4	20	67	13	22	78	10	20	69	11						
MP250/34	4	3	62	4	20	70	10	22	83	5	20	67	13						
MP250/35	4	3	62	2	21	57	27	18	51	21	23	78	14						
MP250/36	4	3	63	1	25	81	19	20	69	11	18	54	18						
MP250/37	4	3	63	1	25	90	10	20	61	19	18	60	12						
MP250/38	4	3	63	1	20	71	9	21	72	12	22	77	11						
MP250/39	4	3	63	4	24	65	31	20	73	7	19	70	6						
MP250/40	4	3	64	4	24	73	23	18	67	5	22	77	11						
MP250/41	4	3	64	4	18	58	14	21	63	21	25	81	19						
MP250/42	4	3	64	4	18	66	6	21	60	24	25	79	21						
MP250/43	4	3	64	4	24	70	26	19	66	10	21	77	7						
MP250/44	4	3	64	3	18	67	5	23	71	21	23	66	26						
MP250/45	4	3	64	4	18	67	5	22	68	20	24	71	25						
MP250/46	4	3	65	4	14	45	11	23	65	27	28	97	15						
MP250/47	4	3	65	4	14	51	5	23	75	17	28	99	13						
MP250/48	4	3	65	4	19	72	4	19	64	12	27	87	21						
MP250/49	4	3	65	4	19	71	5	19	63	13	27	98	10						
MP250/50	4	3	65	1	24	85	11	18	69	3	23	74	18						
MP250/51	4	3	65	1	18	68	4	23	76	16	24	92	4						
MP250/52	4	3	65	1	18	65	7	23	69	23	24	87	9						
MP250/53	4	3	66	4	19	63	13	18	53	19	29	87	29						
MP250/54	4	3	66	4	19	65	11	18	65	7	29	107	9						
MP250/55	4	3	66	1	16	59	5	25	85	15	25	89	11						
MP250/56	4	3	66	1	16	59	5	25	94	6	25	76	24						

Fortsetzung auf nächster Seite...

A.4. Testinstanzenmenge MP250

... fortgesetzte Tabelle von vorheriger Seite

Name	Gesamter Plan				Projekt 1			Projekt 2			Projekt 3			Projekt 4			Projekt 5		
	#R	#P	#A	S	#A	#KB	#FB	#A	#KB	#FB	#A	#KB	#FB	#A	#KB	#FB	#A	#KB	#FB
MP250/57	4	3	66	4	23	70	22	19	69	7	24	75	21						
MP250/58	4	3	66	2	23	85	7	19	68	8	24	86	10						
MP250/59	4	3	67	4	28	86	26	15	40	20	24	73	23						
MP250/60	4	3	67	4	28	88	24	15	48	12	24	86	10						
MP250/61	4	3	67	4	28	93	19	19	60	16	20	76	4						
MP250/62	4	3	67	4	19	66	10	19	69	7	29	105	11						
MP250/63	4	3	68	4	25	73	27	28	92	20	15	54	6						
MP250/64	4	3	68	4	22	70	18	20	57	23	26	89	15						
MP250/65	4	3	68	4	22	68	20	20	62	18	26	78	26						
MP250/66	4	3	68	4	23	79	13	20	76	4	25	88	12						
MP250/67	4	3	68	4	23	77	15	20	73	7	25	79	21						
MP250/68	4	3	69	4	22	77	11	19	58	18	28	105	7						
MP250/69	4	3	69	4	22	80	8	19	68	8	28	98	14						
MP250/70	4	3	70	4	23	77	15	24	84	12	23	73	19						
MP250/71	4	3	70	4	23	81	11	24	76	20	23	84	8						
MP250/72	4	3	70	4	19	49	27	26	67	37	25	90	10						
MP250/73	4	3	71	4	18	67	5	24	78	18	29	92	24						
MP250/74	4	3	71	1	27	103	5	25	82	18	19	61	15						
MP250/75	4	3	71	4	24	81	15	22	84	4	25	92	8						
MP250/76	4	3	72	4	26	86	18	27	89	19	19	60	16						
MP250/77	4	3	72	1	30	108	12	24	76	20	18	64	8						
MP250/78	4	3	72	4	26	99	5	20	50	30	26	100	4						
MP250/79	4	3	73	1	27	101	7	24	75	21	22	58	30						
MP250/80	4	3	74	1	23	76	16	22	80	8	29	93	23						
MP250/81	4	3	74	4	28	81	31	23	80	12	23	81	11						
MP250/82	4	3	76	4	28	99	13	18	67	5	30	107	13						
MP250/83	4	3	79	4	26	99	5	25	76	24	28	82	30						
MP250/84	4	3	80	2	21	51	33	29	96	20	30	109	11						
MP250/85	4	4	60	4	18	61	11	11	40	4	12	43	5	19	60	16			
MP250/86	4	4	64	4	14	37	19	18	57	15	20	67	13	12	40	8			
MP250/87	4	4	64	4	14	43	13	18	61	11	20	62	18	12	46	2			
MP250/88	4	4	65	4	10	34	6	10	38	2	19	69	7	26	91	13			
MP250/89	4	4	65	4	10	38	2	10	39	1	19	66	10	26	100	4			
MP250/90	4	4	69	4	12	45	3	19	72	4	18	68	4	20	65	15			
MP250/91	4	4	69	4	20	76	4	21	50	34	18	54	18	10	33	7			
MP250/92	4	4	70	4	20	70	10	10	36	4	20	71	9	20	65	15			
MP250/93	4	4	70	4	11	42	2	19	59	17	22	74	14	18	65	7			
MP250/94	4	4	72	1	19	58	18	18	66	6	24	78	18	11	42	2			
MP250/95	4	4	72	1	19	71	5	18	69	3	24	88	8	11	39	5			
MP250/96	4	4	73	3	10	39	1	25	89	11	22	70	18	16	45	19			
MP250/97	4	4	73	3	10	34	6	25	93	7	22	66	22	16	59	5			
MP250/98	4	4	73	2	24	84	12	13	49	3	12	40	8	24	86	10			
MP250/99	4	4	73	3	24	76	20	13	48	4	12	45	3	24	89	7			
MP250/100	4	4	73	4	27	101	7	15	54	6	21	79	5	10	37	3			
MP250/101	4	4	74	4	19	56	20	23	84	8	20	77	3	12	45	3			
MP250/102	4	4	74	4	19	61	15	23	80	12	20	66	14	12	45	3			
MP250/103	4	4	75	4	13	43	9	19	59	17	19	59	17	24	86	10			
MP250/104	4	4	75	4	19	63	13	14	54	2	18	65	7	24	91	5			
MP250/105	4	4	75	4	19	65	11	14	51	5	18	59	13	24	86	10			
MP250/106	4	4	75	1	20	70	10	22	79	9	11	38	6	22	79	9			
MP250/107	4	4	75	1	20	73	7	22	76	12	11	40	4	22	76	12			
MP250/108	4	4	76	3	21	55	29	21	80	4	21	69	15	13	43	9			
MP250/109	4	4	76	3	21	74	10	21	72	12	21	70	14	13	46	6			
MP250/110	4	4	77	1	27	92	16	12	43	5	19	69	7	19	72	4			
MP250/111	4	4	77	1	27	98	10	12	43	5	19	66	10	19	67	9			
MP250/112	4	4	77	4	21	77	7	28	88	24	10	36	4	18	65	7			
MP250/113	4	4	77	4	21	74	10	28	98	14	10	36	4	18	57	15			
MP250/114	4	4	77	4	22	78	10	19	62	14	19	69	7	17	52	16			
MP250/115	4	4	77	4	20	74	6	26	93	11	11	41	3	20	52	28			

Fortsetzung auf nächster Seite...

Anhang A. Instanzen für numerische Testläufe

... fortgesetzte Tabelle von vorheriger Seite

Name	Gesamter Plan				Projekt 1			Projekt 2			Projekt 3			Projekt 4			Projekt 5		
	#R	#P	#A	S	#A	#KB	#FB	#A	#KB	#FB	#A	#KB	#FB	#A	#KB	#FB	#A	#KB	#FB
MP250/116	4	4	77	4	20	69	11	26	80	24	11	41	3	20	68	12			
MP250/117	4	4	78	4	20	71	9	24	83	13	16	52	12	18	49	23			
MP250/118	4	4	79	4	21	74	10	26	91	13	20	67	13	12	35	13			
MP250/119	4	4	79	4	21	61	23	26	69	35	20	63	17	12	38	10			
MP250/120	4	4	79	4	23	83	9	23	82	10	12	39	9	21	67	17			
MP250/121	4	4	79	3	14	40	16	22	79	9	18	60	12	25	70	30			
MP250/122	4	4	79	4	10	37	3	18	58	14	28	106	6	23	80	12			
MP250/123	4	4	79	4	10	36	4	18	64	8	28	91	21	23	86	6			
MP250/124	4	4	80	4	11	42	2	20	69	11	20	69	11	29	93	23			
MP250/125	4	4	80	4	28	85	27	21	67	17	19	68	8	12	45	3			
MP250/126	4	4	80	4	28	100	12	21	74	10	19	67	9	12	45	3			
MP250/127	4	4	80	4	19	60	16	21	59	25	11	39	5	29	97	19			
MP250/128	4	4	81	4	27	85	23	19	72	4	23	82	10	12	43	5			
MP250/129	4	4	81	1	24	85	11	18	67	5	21	79	5	18	58	14			
MP250/130	4	4	81	1	24	79	17	18	64	8	21	76	8	18	61	11			
MP250/131	4	4	81	4	26	77	27	18	63	9	19	61	15	18	62	10			
MP250/132	4	4	81	4	26	92	12	18	64	8	19	70	6	18	65	7			
MP250/133	4	4	82	4	24	87	9	18	60	12	21	58	26	19	60	16			
MP250/134	4	4	82	4	24	84	12	18	46	26	21	78	6	19	45	31			
MP250/135	4	4	82	4	12	41	7	24	84	12	24	91	5	22	80	8			
MP250/136	4	4	82	4	12	43	5	24	69	27	24	90	6	22	80	8			
MP250/137	4	4	83	4	17	65	3	29	95	21	20	68	12	17	52	16			
MP250/138	4	4	83	4	17	60	8	29	105	11	20	55	25	17	47	21			
MP250/139	4	4	83	4	22	82	6	13	49	3	19	56	20	29	106	10			
MP250/140	4	4	83	4	22	76	12	13	46	6	19	54	22	29	104	12			
MP250/141	4	4	84	4	22	77	11	25	90	10	18	51	21	19	70	6			
MP250/142	4	4	84	4	22	64	24	25	81	19	18	51	21	19	68	8			
MP250/143	4	4	84	4	19	62	14	23	66	26	22	78	10	20	65	15			
MP250/144	4	4	84	4	19	64	12	23	81	11	22	78	10	20	72	8			
MP250/145	4	4	85	4	19	69	7	25	94	6	19	66	10	22	66	22			
MP250/146	4	4	85	4	28	100	12	20	69	11	26	86	18	11	40	4			
MP250/147	4	4	85	4	16	49	15	26	90	14	22	68	20	21	78	6			
MP250/148	4	4	85	4	16	52	12	26	95	9	22	76	12	21	80	4			
MP250/149	4	4	86	4	29	89	27	22	71	17	23	83	9	12	41	7			
MP250/150	4	4	87	1	21	72	12	21	61	23	22	70	18	23	64	28			
MP250/151	4	4	87	4	20	74	6	20	61	19	30	81	39	17	65	3			
MP250/152	4	4	87	4	20	73	7	20	68	12	30	101	19	17	54	14			
MP250/153	4	4	88	4	20	66	14	17	59	9	25	84	16	26	86	18			
MP250/154	4	4	88	4	20	74	6	17	51	17	25	89	11	26	98	6			
MP250/155	4	4	88	4	19	67	9	18	53	19	25	81	19	26	89	15			
MP250/156	4	4	88	4	19	68	8	18	58	14	25	76	24	26	97	7			
MP250/157	4	4	88	4	20	68	12	26	76	28	20	65	15	22	74	14			
MP250/158	4	4	90	4	23	83	9	25	92	8	18	60	12	24	63	33			
MP250/159	4	4	91	4	28	93	19	22	81	7	19	55	21	22	78	10			
MP250/160	4	4	91	4	21	63	21	30	80	40	20	73	7	20	68	12			
MP250/161	4	4	91	4	21	74	10	30	85	35	20	73	7	20	60	20			
MP250/162	4	4	91	1	25	91	9	14	46	10	30	86	34	22	83	5			
MP250/163	4	4	91	4	22	77	11	20	74	6	22	75	13	27	88	20			
MP250/164	4	4	91	4	22	69	19	20	77	3	22	75	13	27	88	20			
MP250/165	4	4	92	1	23	86	6	21	72	12	29	106	10	19	63	13			
MP250/166	4	4	92	1	23	81	11	21	75	9	29	91	25	19	65	11			
MP250/167	4	4	94	4	19	65	11	20	77	3	28	97	15	27	95	13			
MP250/168	4	4	94	4	24	82	14	23	66	26	23	76	16	24	74	22			
MP250/169	4	4	95	4	23	69	23	25	86	14	28	103	9	19	67	9			
MP250/170	4	4	96	4	23	76	16	18	68	4	27	72	36	28	101	11			
MP250/171	4	4	96	4	22	61	27	19	71	5	26	90	14	29	99	17			
MP250/172	4	4	96	4	22	55	33	19	72	4	26	91	13	29	101	15			
MP250/173	4	4	97	4	30	95	25	21	74	10	24	85	11	22	54	34			
MP250/174	4	4	97	4	30	105	15	21	64	20	24	76	20	22	70	18			

Fortsetzung auf nächster Seite...

A.4. Testinstanzenmenge MP250

... fortgesetzte Tabelle von vorheriger Seite

Name	Gesamter Plan				Projekt 1			Projekt 2			Projekt 3			Projekt 4			Projekt 5		
	#R	#P	#A	S	#A	#KB	#FB	#A	#KB	#FB	#A	#KB	#FB	#A	#KB	#FB	#A	#KB	#FB
MP250/175	4	4	97	4	22	67	21	24	87	9	23	83	9	28	100	12			
MP250/176	4	4	97	4	22	75	13	24	79	17	23	81	11	28	77	35			
MP250/177	4	4	99	4	22	64	24	25	87	13	23	78	14	29	107	9			
MP250/178	4	4	100	4	25	85	15	24	73	23	31	116	8	20	76	4			
MP250/179	4	4	102	4	25	89	11	22	75	13	26	90	14	29	90	26			
MP250/180	4	5	79	4	23	84	8	10	36	4	12	45	3	14	42	14	20	63	17
MP250/181	4	5	85	4	20	48	32	11	40	4	10	39	1	21	64	20	23	66	26
MP250/182	4	5	85	4	20	61	19	11	40	4	10	37	3	21	76	8	23	67	25
MP250/183	4	5	86	4	18	49	23	28	76	36	10	33	7	20	67	13	10	39	1
MP250/184	4	5	88	4	12	39	9	18	68	4	18	54	18	22	68	20	18	60	12
MP250/185	4	5	88	4	20	61	19	19	64	12	19	69	7	12	43	5	18	65	7
MP250/186	4	5	88	4	20	73	7	19	54	22	19	71	5	12	42	6	18	63	9
MP250/187	4	5	89	4	22	76	12	14	52	4	18	57	15	15	50	10	20	72	8
MP250/188	4	5	91	1	10	31	9	19	71	5	20	75	5	24	91	5	18	66	6
MP250/189	4	5	92	4	13	47	5	12	43	5	21	77	7	21	79	5	25	61	39
MP250/190	4	5	93	4	11	39	5	29	99	17	20	65	15	14	45	11	19	61	15
MP250/191	4	5	94	4	11	36	8	21	75	9	17	53	15	24	88	8	21	71	13
MP250/192	4	5	95	1	23	79	13	19	66	10	13	37	15	22	70	18	18	66	6
MP250/193	4	5	96	4	22	71	17	19	62	14	15	53	7	23	83	9	17	55	13
MP250/194	4	5	96	4	22	68	20	19	69	7	15	53	7	23	80	12	17	55	13
MP250/195	4	5	97	4	20	65	15	10	38	2	21	65	19	28	103	9	18	55	17
MP250/196	4	5	97	4	20	67	13	10	35	5	21	65	19	28	107	5	18	59	13
MP250/197	4	5	97	4	18	65	7	19	68	8	20	61	19	19	54	22	21	66	18
MP250/198	4	5	97	4	18	63	9	19	62	14	20	58	22	19	53	23	21	67	17
MP250/199	4	5	101	4	25	75	25	24	66	30	19	66	10	10	38	2	23	84	8
MP250/200	4	5	101	4	25	95	5	24	77	19	19	54	22	10	34	6	23	81	11
MP250/201	4	5	104	3	26	95	9	21	72	12	16	58	6	20	74	6	21	77	7
MP250/202	4	5	104	4	18	54	18	19	69	7	20	72	8	24	86	10	23	77	15
MP250/203	4	5	104	4	23	62	30	28	92	20	23	66	26	20	56	24	10	38	2
MP250/204	4	5	104	4	23	68	24	28	78	34	23	60	32	20	63	17	10	33	7
MP250/205	4	5	105	4	28	105	7	25	89	11	16	46	18	18	56	16	18	67	5
MP250/206	4	5	105	4	28	98	14	25	95	5	16	52	12	18	61	11	18	65	7
MP250/207	4	5	105	4	20	71	9	29	97	19	21	74	10	14	46	10	21	63	21
MP250/208	4	5	105	4	20	69	11	29	97	19	21	70	14	14	43	13	21	61	23
MP250/209	4	5	105	4	24	83	13	22	76	12	22	81	7	19	73	3	18	53	19
MP250/210	4	5	105	4	24	68	28	22	78	10	22	77	11	19	64	12	18	54	18
MP250/211	4	5	106	4	21	52	32	12	45	3	27	90	18	18	62	10	28	92	20
MP250/212	4	5	106	4	21	72	12	12	38	10	27	83	25	18	63	9	28	90	22
MP250/213	4	5	106	4	18	68	4	30	86	34	19	70	6	19	71	5	20	65	15
MP250/214	4	5	106	4	21	78	6	11	39	5	23	70	22	29	75	41	22	84	4
MP250/215	4	5	106	4	21	70	14	11	42	2	23	78	14	29	82	34	22	77	11
MP250/216	4	5	106	4	24	85	11	19	69	7	22	65	23	18	57	15	23	82	10
MP250/217	4	5	106	4	24	89	7	19	67	9	22	68	20	18	54	18	23	80	12
MP250/218	4	5	107	4	21	72	12	18	52	20	20	71	9	27	76	32	21	62	22
MP250/219	4	5	107	4	24	88	8	20	63	17	11	43	1	31	99	25	21	78	6
MP250/220	4	5	107	4	24	73	23	20	55	25	11	36	8	31	109	15	21	74	10
MP250/221	4	5	107	4	23	63	29	25	85	15	25	83	17	10	37	3	24	70	26
MP250/222	4	5	107	4	23	69	23	25	86	14	25	87	13	10	33	7	24	81	15
MP250/223	4	5	108	4	21	78	6	24	90	6	23	82	10	22	80	8	18	51	21
MP250/224	4	5	108	4	21	81	3	18	57	15	25	82	18	22	81	7	22	79	9
MP250/225	4	5	108	4	25	82	18	24	90	6	19	59	17	22	75	13	18	53	19
MP250/226	4	5	108	4	25	90	10	24	83	13	19	69	7	22	75	13	18	55	17
MP250/227	4	5	109	4	26	71	33	20	61	19	25	96	4	19	61	15	19	67	9
MP250/228	4	5	110	4	27	86	22	17	64	4	24	73	23	14	47	9	28	70	42
MP250/229	4	5	110	4	27	79	29	17	56	12	24	64	32	14	46	10	28	96	16
MP250/230	4	5	110	4	26	96	8	11	42	2	22	72	16	27	71	37	24	89	7
MP250/231	4	5	110	4	26	99	5	11	40	4	22	68	20	27	75	33	24	91	5
MP250/232	4	5	111	4	20	77	3	24	65	31	26	94	10	20	75	5	21	78	6
MP250/233	4	5	111	4	26	96	8	19	57	19	21	72	12	21	73	11	24	89	7

Fortsetzung auf nächster Seite. ...

Anhang A. Instanzen für numerische Testläufe

... fortgesetzte Tabelle von vorheriger Seite

Name	Gesamter Plan				Projekt 1			Projekt 2			Projekt 3			Projekt 4			Projekt 5		
	#R	#P	#A	S	#A	#KB	#FB	#A	#KB	#FB	#A	#KB	#FB	#A	#KB	#FB	#A	#KB	#FB
MP250/234	4	5	111	4	26	93	11	19	65	11	21	81	3	21	74	10	24	81	15
MP250/235	4	5	112	4	30	103	17	26	88	16	22	70	18	18	67	5	16	43	21
MP250/236	4	5	112	4	30	105	15	26	82	22	22	79	9	18	65	7	16	54	10
MP250/237	4	5	113	4	22	65	23	25	86	14	20	77	3	21	78	6	25	94	6
MP250/238	4	5	113	4	30	112	8	20	71	9	25	75	25	19	70	6	19	70	6
MP250/239	4	5	114	4	26	95	9	21	78	6	24	88	8	23	83	9	20	74	6
MP250/240	4	5	114	4	22	80	8	20	51	29	23	79	13	29	102	14	20	65	15
MP250/241	4	5	115	4	19	68	8	28	99	13	20	55	25	25	76	24	23	71	21
MP250/242	4	5	115	4	19	66	10	28	101	11	20	65	15	25	76	24	23	80	12
MP250/243	4	5	116	4	31	115	9	22	63	25	22	66	22	22	80	8	19	62	14
MP250/244	4	5	116	4	31	114	10	22	57	31	22	50	38	22	83	5	19	53	23
MP250/245	4	5	117	4	21	79	5	25	89	11	25	89	11	21	74	10	25	80	20
MP250/246	4	5	118	4	29	74	42	23	82	10	22	66	22	19	70	6	25	81	19
MP250/247	4	5	119	4	21	80	4	27	103	5	19	70	6	28	93	19	24	85	11
MP250/248	4	5	119	4	21	79	5	27	100	8	19	69	7	28	98	14	24	82	14
MP250/249	4	5	126	4	31	98	26	28	96	16	20	69	11	22	83	5	25	67	33
MP250/250	4	5	126	4	23	86	6	23	80	12	26	89	15	30	104	16	24	72	24

Tabelle A.3. – Testinstanzenmenge MP250 für die Multiprojektplanung

Anhang B.

Ergebnisse numerischer Testläufe - exakte Lösungsverfahren

B.1. Testinstanzenmenge EP150

Name	Gesamter Plan			Lösung					Name	Gesamter Plan			Lösung			
	#R	#P	#A	Sek.	LB	Obj.	Gap			#R	#P	#A	Sek.	LB	Obj.	Gap
EP150/1	4	1	32	0	53	53	0,0%		EP150/76	4	1	62	37	54	54	0,0%
EP150/2	4	1	32	0	66	66	0,0%		EP150/77	4	1	62	3	66	66	0,0%
EP150/3	4	1	32	0	51	51	0,0%		EP150/78	4	1	62	88	62	62	0,0%
EP150/4	4	1	32	0	45	45	0,0%		EP150/79	4	1	62	6	50	50	0,0%
EP150/5	4	1	32	0	41	41	0,0%		EP150/80	4	1	62	3600	53	72	26,4%
EP150/6	4	1	32	3	38	38	0,0%		EP150/81	4	1	62	4	52	52	0,0%
EP150/7	4	1	32	1	58	58	0,0%		EP150/82	4	1	62	13	49	49	0,0%
EP150/8	4	1	32	0	35	35	0,0%		EP150/83	4	1	62	9	37	37	0,0%
EP150/9	4	1	32	0	34	34	0,0%		EP150/84	4	1	62	3600	61	n.v.	n.v.
EP150/10	4	1	32	0	50	50	0,0%		EP150/85	4	1	62	3600	50	102	51,0%
EP150/11	4	1	32	0	52	52	0,0%		EP150/86	4	1	62	3600	50	n.v.	n.v.
EP150/12	4	1	32	2	40	40	0,0%		EP150/87	4	1	62	3600	46	65	29,2%
EP150/13	4	1	32	0	37	37	0,0%		EP150/88	4	1	62	2622	42	42	0,0%
EP150/14	4	1	32	0	51	51	0,0%		EP150/89	4	1	62	5	51	51	0,0%
EP150/15	4	1	32	0	55	55	0,0%		EP150/90	4	1	62	3600	50	n.v.	n.v.
EP150/16	4	1	32	1	52	52	0,0%		EP150/91	4	1	62	12	56	56	0,0%
EP150/17	4	1	32	4	55	55	0,0%		EP150/92	4	1	62	8	37	37	0,0%
EP150/18	4	1	32	2	50	50	0,0%		EP150/93	4	1	62	3600	50	63	20,6%
EP150/19	4	1	32	25	47	47	0,0%		EP150/94	4	1	62	6	46	46	0,0%
EP150/20	4	1	32	3600	76	n.v.	n.v.		EP150/95	4	1	62	3600	59	n.v.	n.v.
EP150/21	4	1	32	19	38	38	0,0%		EP150/96	4	1	62	3600	50	74	32,4%
EP150/22	4	1	32	18	50	50	0,0%		EP150/97	4	1	62	18	45	45	0,0%
EP150/23	4	1	32	0	42	42	0,0%		EP150/98	4	1	62	3600	49	74	33,8%
EP150/24	4	1	32	4	47	47	0,0%		EP150/99	4	1	62	3600	46	49	6,1%
EP150/25	4	1	32	25	44	44	0,0%		EP150/100	4	1	62	23	48	48	0,0%
EP150/26	4	1	32	6	44	44	0,0%		EP150/101	4	1	92	4	81	81	0,0%
EP150/27	4	1	32	1	35	35	0,0%		EP150/102	4	1	92	2	79	79	0,0%
EP150/28	4	1	32	0	37	37	0,0%		EP150/103	4	1	92	3600	67	89	24,7%
EP150/29	4	1	32	10	34	34	0,0%		EP150/104	4	1	92	3600	72	n.v.	n.v.
EP150/30	4	1	32	2	36	36	0,0%		EP150/105	4	1	92	25	72	72	0,0%
EP150/31	4	1	32	6	48	48	0,0%		EP150/106	4	1	92	6	72	72	0,0%
EP150/32	4	1	32	2	49	49	0,0%		EP150/107	4	1	92	3600	65	77	15,6%
EP150/33	4	1	32	3600	57	76	25,0%		EP150/108	4	1	92	14	93	93	0,0%
EP150/34	4	1	32	5	35	35	0,0%		EP150/109	4	1	92	139	76	76	0,0%
EP150/35	4	1	32	1	48	48	0,0%		EP150/110	4	1	92	31	65	65	0,0%
EP150/36	4	1	32	1	50	50	0,0%		EP150/111	4	1	92	213	64	64	0,0%
EP150/37	4	1	32	32	45	45	0,0%		EP150/112	4	1	92	3600	71	109	34,9%
EP150/38	4	1	32	25	40	40	0,0%		EP150/113	4	1	92	18	74	74	0,0%
EP150/39	4	1	32	4	44	44	0,0%		EP150/114	4	1	92	534	78	78	0,0%
EP150/40	4	1	32	1	46	46	0,0%		EP150/115	4	1	92	50	66	66	0,0%
EP150/41	4	1	32	1	46	46	0,0%		EP150/116	4	1	92	3600	70	n.v.	n.v.

Fortsetzung auf nächster Seite. . .

Anhang B. Ergebnisse numerischer Testläufe - exakte Lösungsverfahren

... fortgesetzte Tabelle von vorheriger Seite

Name	Gesamter Plan			Lösung					Name	Gesamter Plan			Lösung			
	#R	#P	#A	Sek.	LB	Obj.	Gap			#R	#P	#A	Sek.	LB	Obj.	Gap
EP150/42	4	1	32	17	48	48	0,0%		EP150/117	4	1	92	3600	81	119	31,9%
EP150/43	4	1	32	35	32	32	0,0%		EP150/118	4	1	92	3601	83	n.v.	n.v.
EP150/44	4	1	32	14	36	36	0,0%		EP150/119	4	1	92	3601	72	n.v.	n.v.
EP150/45	4	1	32	70	39	39	0,0%		EP150/120	4	1	92	6	66	66	0,0%
EP150/46	4	1	32	3600	45	96	53,1%		EP150/121	4	1	92	3600	69	n.v.	n.v.
EP150/47	4	1	32	3	47	47	0,0%		EP150/122	4	1	92	3600	72	n.v.	n.v.
EP150/48	4	1	32	30	42	42	0,0%		EP150/123	4	1	92	5	77	77	0,0%
EP150/49	4	1	32	3600	54	108	50,0%		EP150/124	4	1	92	3600	102	106	3,8%
EP150/50	4	1	32	1	40	40	0,0%		EP150/125	4	1	92	1355	63	63	0,0%
EP150/51	4	1	62	11	64	64	0,0%		EP150/126	4	1	92	9	64	64	0,0%
EP150/52	4	1	62	1	75	75	0,0%		EP150/127	4	1	92	3	64	64	0,0%
EP150/53	4	1	62	1	59	59	0,0%		EP150/128	4	1	92	3601	86	n.v.	n.v.
EP150/54	4	1	62	3600	61	69	11,6%		EP150/129	4	1	92	3600	56	69	18,8%
EP150/55	4	1	62	3600	65	n.v.	n.v.		EP150/130	4	1	92	111	64	64	0,0%
EP150/56	4	1	62	0	54	54	0,0%		EP150/131	4	1	92	59	59	59	0,0%
EP150/57	4	1	62	3600	69	86	19,8%		EP150/132	4	1	92	26	81	81	0,0%
EP150/58	4	1	62	0	51	51	0,0%		EP150/133	4	1	92	9	56	56	0,0%
EP150/59	4	1	62	5	55	55	0,0%		EP150/134	4	1	92	9	73	73	0,0%
EP150/60	4	1	62	3	57	57	0,0%		EP150/135	4	1	92	2	52	52	0,0%
EP150/61	4	1	62	11	48	48	0,0%		EP150/136	4	1	92	3600	48	64	25,0%
EP150/62	4	1	62	1	75	75	0,0%		EP150/137	4	1	92	11	64	64	0,0%
EP150/63	4	1	62	6	66	66	0,0%		EP150/138	4	1	92	3600	61	n.v.	n.v.
EP150/64	4	1	62	15	80	80	0,0%		EP150/139	4	1	92	3600	71	n.v.	n.v.
EP150/65	4	1	62	21	53	53	0,0%		EP150/140	4	1	92	544	70	70	0,0%
EP150/66	4	1	62	12	58	58	0,0%		EP150/141	4	1	92	539	61	61	0,0%
EP150/67	4	1	62	2	63	63	0,0%		EP150/142	4	1	92	3601	68	n.v.	n.v.
EP150/68	4	1	62	9	51	51	0,0%		EP150/143	4	1	92	13	56	56	0,0%
EP150/69	4	1	62	0	44	44	0,0%		EP150/144	4	1	92	3601	67	n.v.	n.v.
EP150/70	4	1	62	13	66	66	0,0%		EP150/145	4	1	92	13	60	60	0,0%
EP150/71	4	1	62	3600	68	113	39,8%		EP150/146	4	1	92	3601	84	n.v.	n.v.
EP150/72	4	1	62	3	50	50	0,0%		EP150/147	4	1	92	3600	55	56	1,8%
EP150/73	4	1	62	26	56	56	0,0%		EP150/148	4	1	92	3600	75	n.v.	n.v.
EP150/74	4	1	62	57	56	56	0,0%		EP150/149	4	1	92	82	63	63	0,0%
EP150/75	4	1	62	3600	64	82	22,0%		EP150/150	4	1	92	3600	46	n.v.	n.v.

Tabelle B.1. – EP150 gelöst per MIP unter ZF1, Zeitlimit = 1 Stunde

B.2. Testinstanzenmenge MP50

Name	Gesamter Plan			Sek.	ZF2			Gap	Sek.	ZF3			Gap
	#R	#P	#A		LB	Obj.				LB	Obj.		
MP50/1	4	3	50	7	10	10	0,0%		19	9,28	9,28	0,0%	
MP50/2	4	3	50	23	4	4	0,0%		316	3,53	3,53	0,0%	
MP50/3	4	3	57	13	9	9	0,0%		59	8,69	8,69	0,0%	
MP50/4	4	3	57	3600	1	3	66,7%		3600	0,64	2,55	74,9%	
MP50/5	4	3	57	3600	10	25	60,0%		3600	6,82	24,7	72,4%	
MP50/6	4	3	57	3600	19	26	26,9%		3600	17,41	25,34	31,3%	
MP50/7	4	3	58	3600	22	24	8,3%		3600	21,21	22,09	4,0%	
MP50/8	4	3	58	5	5	5	0,0%		25	4,21	4,21	0,0%	
MP50/9	4	3	59	3600	37	118	68,6%		3600	38,07	109,3	65,2%	
MP50/10	4	3	59	3600	21	52	59,6%		3600	20,96	94,47	77,8%	
MP50/11	4	3	61	3600	5	6	16,7%		3600	4,57	6,71	31,9%	
MP50/12	4	3	61	3600	9	14	35,7%		3600	6,78	15,75	57,0%	
MP50/13	4	3	61	13	11	11	0,0%		29	10,47	10,47	0,0%	
MP50/14	4	3	63	3600	13	30	56,7%		3600	11,54	30,75	62,5%	
MP50/15	4	3	64	3600	7	34	79,4%		3600	5,48	86,83	93,7%	
MP50/16	4	3	66	3600	5	13	61,5%		3600	2,63	9,35	71,9%	
MP50/17	4	3	66	3600	13	20	35,0%		3600	12,83	18,41	30,3%	
MP50/18	4	3	67	3600	16	24	33,3%		3600	14,73	25,66	42,6%	
MP50/19	4	3	67	3600	12	86	86,1%		3600	10,69	93,43	88,6%	
MP50/20	4	3	67	3600	23	53	56,6%		3600	19,82	113,46	82,5%	
MP50/21	4	3	69	40	6	6	0,0%		3600	5,03	5,04	0,2%	
MP50/22	4	3	69	72	10	10	0,0%		151	8,82	8,82	0,0%	
MP50/23	4	3	71	277	0	0	0,0%		1112	-0,95	-0,95	0,0%	
MP50/24	4	3	72	3601	10	111	91,0%		3601	9,08	150,12	94,0%	
MP50/25	4	3	72	3600	10	72	86,1%		3600	9,31	n.v.	n.v.	
MP50/26	4	4	71	3600	17	58	70,7%		3600	14,37	83,06	82,7%	
MP50/27	4	4	71	3600	26	43	39,5%		3600	24,89	47,23	47,3%	
MP50/28	4	4	72	3600	15	28	46,4%		3600	12,22	24,73	50,6%	
MP50/29	4	4	72	3600	12	26	53,9%		3600	12,1	34,9	65,3%	
MP50/30	4	4	76	3600	16	185	91,4%		3600	15,38	127,16	87,9%	
MP50/31	4	4	76	3600	16	135	88,2%		3608	15,58	n.v.	n.v.	
MP50/32	4	4	77	3601	3	186	98,4%		3601	2,85	257,1	98,9%	
MP50/33	4	4	77	3601	23	231	90,0%		3600	22,49	n.v.	n.v.	
MP50/34	4	4	77	3600	38	181	79,0%		3600	38,44	219,31	82,5%	
MP50/35	4	4	77	1	10	10	0,0%		6	9,67	9,67	0,0%	
MP50/36	4	4	77	2	1	1	0,0%		6	0,8	0,8	0,0%	
MP50/37	4	4	78	3601	14	n.v.	n.v.		3601	12,98	136,74	90,5%	
MP50/38	4	4	78	3601	22	n.v.	n.v.		3601	21,33	n.v.	n.v.	
MP50/39	4	4	80	3601	19	n.v.	n.v.		3601	18,7	n.v.	n.v.	
MP50/40	4	4	81	3600	20	22	9,1%		3600	18,74	22,82	17,9%	
MP50/41	4	4	85	3600	7	15	53,3%		3600	4,56	20,54	77,8%	
MP50/42	4	4	88	3600	17	51	66,7%		3601	16,13	28,25	42,9%	
MP50/43	4	5	93	3601	16	131	87,8%		3602	15,52	202,97	92,4%	
MP50/44	4	5	95	3600	10	19	47,4%		264	9,3	9,3	0,0%	
MP50/45	4	5	104	3600	4	81	95,1%		3600	3,12	n.v.	n.v.	
MP50/46	4	5	104	3600	5	41	87,8%		3600	3,84	54,01	92,9%	
MP50/47	4	5	105	17	5	5	0,0%		19	4,4	4,4	0,0%	
MP50/48	4	5	105	61	13	13	0,0%		23	12,18	12,18	0,0%	
MP50/49	4	5	111	3601	16	196	91,8%		3602	15,36	228,13	93,3%	
MP50/50	4	5	117	3601	10	564	98,2%		3601	7,94	n.v.	n.v.	

Tabelle B.2. – MP50 gelöst per MIP unter ZF2 und ZF3, Zeitlimit = 1 Stunde

Anhang B. Ergebnisse numerischer Testläufe - exakte Lösungsverfahren

Name	Gesamter Plan			Sekt.	ZF2			Gap	Sekt.	ZF3			Gap
	#R	#P	#A		LB	Obj.	Gap			LB	Obj.	Gap	
MP50/1	4	3	50	600	10	10	0,0%		610	9,27	9,31	0,4%	
MP50/2	4	3	50	617	4	4	0,0%		639	3,5	3,53	0,9%	
MP50/3	4	3	57	615	9	9	0,0%		628	8,62	8,69	0,8%	
MP50/4	4	3	57	43800	2	3	33,3%		28631	2,52	2,54	0,8%	
MP50/5	4	3	57	43798	13	19	31,6%		43798	10,45	22,23	53,0%	
MP50/6	4	3	57	29451	24	24	0,0%		43798	22,45	24,46	8,2%	
MP50/7	4	3	58	43798	22	24	8,3%		1877	22,04	22,09	0,2%	
MP50/8	4	3	58	601	5	5	0,0%		606	4,2	4,24	0,9%	
MP50/9	4	3	59	43816	44	69	36,2%		43800	43,46	70,48	38,3%	
MP50/10	4	3	59	43799	27	44	38,6%		43799	26,07	50,35	48,2%	
MP50/11	4	3	61	43799	5	6	16,7%		43799	4,69	5,72	18,0%	
MP50/12	4	3	61	43800	12	13	7,7%		43800	11,82	13,62	13,2%	
MP50/13	4	3	61	601	11	11	0,0%		612	10,47	10,5	0,3%	
MP50/14	4	3	63	43798	19	31	38,7%		43798	16,72	30,7	45,5%	
MP50/15	4	3	64	43799	8	32	75,0%		43799	7,33	24,06	69,5%	
MP50/16	4	3	66	43803	7	12	41,7%		43801	6,37	9,35	31,9%	
MP50/17	4	3	66	43798	17	20	15,0%		43798	15,59	17,48	10,8%	
MP50/18	4	3	67	43799	19	20	5,0%		43799	16,88	20,86	19,1%	
MP50/19	4	3	67	43799	16	31	48,4%		43799	14,53	29,08	50,0%	
MP50/20	4	3	67	43801	31	39	20,5%		43801	28,17	45,92	38,7%	
MP50/21	4	3	69	660	6	6	0,0%		850	5,03	5,04	0,2%	
MP50/22	4	3	69	603	10	10	0,0%		660	8,8	8,83	0,3%	
MP50/23	4	3	71	232	0	0	0,0%		711	-0,95	-0,95	0,0%	
MP50/24	4	3	72	43801	12	54	77,8%		43802	10,08	48,98	79,4%	
MP50/25	4	3	72	43799	15	58	74,1%		43799	11,95	52,41	77,2%	
MP50/26	4	4	71	43799	22	37	40,5%		43799	19,19	43,45	55,8%	
MP50/27	4	4	71	43798	30	47	36,2%		43798	29,65	45,38	34,7%	
MP50/28	4	4	72	12771	21	21	0,0%		43798	18,18	21,93	17,1%	
MP50/29	4	4	72	43798	21	25	16,0%		43798	18,79	23,89	21,4%	
MP50/30	4	4	76	43199	27	112	75,9%		43198	25,15	92,45	72,8%	
MP50/31	4	4	76	43201	26	116	77,6%		43201	26,43	144,27	81,7%	
MP50/32	4	4	77	43799	13	52	75,0%		43800	6,3	73,78	91,5%	
MP50/33	4	4	77	43801	35	94	62,8%		43801	25,03	91,43	72,6%	
MP50/34	4	4	77	43799	45	109	58,7%		43799	45,89	117,43	60,9%	
MP50/35	4	4	77	600	10	10	0,0%		601	9,64	9,68	0,4%	
MP50/36	4	4	77	600	1	1	0,0%		602	0,8	0,8	0,0%	
MP50/37	4	4	78	43799	21	56	62,5%		43800	16,2	67,21	75,9%	
MP50/38	4	4	78	43802	26	57	54,4%		43802	25,69	53,3	51,8%	
MP50/39	4	4	80	43201	20	n.v.	n.v.		43201	21,03	n.v.	n.v.	
MP50/40	4	4	81	43798	21	22	4,6%		43798	20,74	21,7	4,4%	
MP50/41	4	4	85	43799	6	25	76,0%		43799	5,75	28,45	79,8%	
MP50/42	4	4	88	43799	17	32	46,9%		43800	16,13	24,3	33,6%	
MP50/43	4	5	93	43802	19	80	76,3%		43801	19,69	94,15	79,1%	
MP50/44	4	5	95	708	10	10	0,0%		1152	9,3	9,34	0,4%	
MP50/45	4	5	104	43800	10	48	79,2%		43800	10,94	36,51	70,0%	
MP50/46	4	5	104	43799	12	46	73,9%		43799	10,72	36,31	70,5%	
MP50/47	4	5	105	630	5	5	0,0%		618	4,4	4,41	0,2%	
MP50/48	4	5	105	636	13	13	0,0%		621	12,18	12,18	0,0%	
MP50/49	4	5	111	43817	26	82	68,3%		43801	18,01	89,22	79,8%	
MP50/50	4	5	117	43802	21	132	84,1%		43802	8,7	178,53	95,1%	

Tabelle B.3. – MP50 gelöst per MIP unter ZF2 und ZF3, Zeitlimit = 12 Stunden

B.3. Testinstanzenmenge MP250

Name	Gesamter Plan			Sek.	ZF2			Gap		ZF3			Gap
	#R	#P	#A		LB	Obj.				Sek.	LB	Obj.	
MP250/1	4	3	47	6	9	9	0,0%			4	8,5	8,5	0,0%
MP250/2	4	3	47	3	10	10	0,0%			2	9,6	9,6	0,0%
MP250/3	4	3	50	2	4	4	0,0%			1	3,79	3,79	0,0%
MP250/4	4	3	52	53	0	0	0,0%			39	-0,48	-0,48	0,0%
MP250/5	4	3	53	3	9	9	0,0%			6	8,7	8,7	0,0%
MP250/6	4	3	55	32	8	8	0,0%			139	7,72	7,72	0,0%
MP250/7	4	3	55	180	8	8	0,0%			3600	7,7	7,75	0,7%
MP250/8	4	3	56	3600	14	29	51,7%			3600	12,62	39,59	68,1%
MP250/9	4	3	56	3600	19	42	54,8%			3600	18,43	41,6	55,7%
MP250/10	4	3	56	102	22	22	0,0%			3600	21,59	21,65	0,3%
MP250/11	4	3	56	203	13	13	0,0%			1507	12,73	12,73	0,0%
MP250/12	4	3	56	3600	14	78	82,1%			3600	14,19	73,14	80,6%
MP250/13	4	3	56	3600	21	64	67,2%			3601	20,92	73,47	71,5%
MP250/14	4	3	57	4	13	13	0,0%			3	12,78	12,78	0,0%
MP250/15	4	3	57	9	15	15	0,0%			7	14,72	14,72	0,0%
MP250/16	4	3	58	3600	25	26	3,9%			3600	24,31	25,16	3,4%
MP250/17	4	3	58	5	8	8	0,0%			3	7,87	7,87	0,0%
MP250/18	4	3	58	5	3	3	0,0%			21	2,12	2,12	0,0%
MP250/19	4	3	58	18	7	7	0,0%			1180	6	6	0,0%
MP250/20	4	3	58	3600	18	40	55,0%			3600	16,64	42,35	60,7%
MP250/21	4	3	58	3600	9	32	71,9%			3600	7,85	44,41	82,3%
MP250/22	4	3	58	3600	14	142	90,1%			3602	13,33	149,36	91,1%
MP250/23	4	3	58	7	10	10	0,0%			6	9,47	9,47	0,0%
MP250/24	4	3	61	3601	9	67	86,6%			3601	8,45	58,09	85,5%
MP250/25	4	3	61	3600	23	43	46,5%			3600	18,3	121,63	85,0%
MP250/26	4	3	61	3601	0	69	100,0%			3601	-1,15	150,59	100,8%
MP250/27	4	3	61	3601	0	51	100,0%			3602	-1,17	463,75	100,3%
MP250/28	4	3	61	3600	16	41	61,0%			3601	14,85	47,08	68,5%
MP250/29	4	3	61	3601	14	129	89,2%			3601	13,83	146,74	90,6%
MP250/30	4	3	61	3600	17	90	81,1%			3600	15,54	95,34	83,7%
MP250/31	4	3	61	113	6	6	0,0%			3600	5,64	5,7	1,1%
MP250/32	4	3	62	3601	7	96	92,7%			3601	7,07	193,51	96,4%
MP250/33	4	3	62	3600	5	86	94,2%			3600	-0,59	127,02	100,5%
MP250/34	4	3	62	3600	6	64	90,6%			3601	3,62	119,66	97,0%
MP250/35	4	3	62	220	0	0	0,0%			621	-0,43	-0,43	0,0%
MP250/36	4	3	63	19	2	2	0,0%			36	1,55	1,55	0,0%
MP250/37	4	3	63	54	1	1	0,0%			85	0,56	0,56	0,0%
MP250/38	4	3	63	8	5	5	0,0%			30	4,82	4,82	0,0%
MP250/39	4	3	63	3600	22	30	26,7%			3600	18,74	35,52	47,2%
MP250/40	4	3	64	3600	12	13	7,7%			3600	11,01	13,82	20,3%
MP250/41	4	3	64	3601	8	113	92,9%			3601	7,57	126,33	94,0%
MP250/42	4	3	64	3601	17	84	79,8%			3601	17,02	210,26	91,9%
MP250/43	4	3	64	3600	3	16	81,3%			3600	1,21	37,06	96,7%
MP250/44	4	3	64	2539	13	13	0,0%			3600	9,79	25,09	61,0%
MP250/45	4	3	64	3600	8	33	75,8%			3600	7,24	41,8	82,7%
MP250/46	4	3	65	3601	0	20	100,0%			3601	-0,79	18,42	104,3%
MP250/47	4	3	65	3601	0	20	100,0%			3601	-0,8	14,04	105,7%
MP250/48	4	3	65	3600	16	32	50,0%			3600	12,68	35,43	64,2%
MP250/49	4	3	65	3600	16	40	60,0%			3600	14,46	42,4	65,9%
MP250/50	4	3	65	1	8	8	0,00%			1	7,85	7,85	0,00%
MP250/51	4	3	65	4	8	8	0,00%			3	7,51	7,51	0,00%
MP250/52	4	3	65	4	5	5	0,00%			10	4,51	4,51	0,00%
MP250/53	4	3	66	3600	6	21	71,43%			3600	4,38	20,64	78,78%
MP250/54	4	3	66	3600	20	48	58,33%			3600	18,88	46,47	59,37%
MP250/55	4	3	66	40	3	3	0,00%			3600	2,42	2,45	1,22%
MP250/56	4	3	66	54	8	8	0,00%			3600	7,24	7,25	0,14%

Fortsetzung auf nächster Seite. ...

Anhang B. Ergebnisse numerischer Testläufe - exakte Lösungsverfahren

... fortgesetzte Tabelle von vorheriger Seite

Name	Gesamter Plan			Sek.	ZF2			Sek.	ZF3		
	#R	#P	#A		LB	Obj.	Gap		LB	Obj.	Gap
MP250/57	4	3	66	3600	5	8	37,50%	3600	5,48	7,54	27,32%
MP250/58	4	3	66	116	13	13	0,00%	2356	12,75	12,75	0,00%
MP250/59	4	3	67	3601	1	46	97,83%	3601	0,01	161,54	100,00%
MP250/60	4	3	67	3600	6	67	91,04%	3600	5,18	51,75	89,99%
MP250/61	4	3	67	3600	13	44	70,45%	3600	13,55	26,33	48,54%
MP250/62	4	3	67	3600	15	32	53,12%	3600	15,78	34,49	54,25%
MP250/63	4	3	68	3600	4	64	93,75%	3600	3,36	81,58	95,88%
MP250/64	4	3	68	3601	3	40	92,50%	3600	2,43	72,7	96,66%
MP250/65	4	3	68	3601	0	38	100,00%	3601	-0,54	77,81	100,69%
MP250/66	4	3	68	3601	8	98	91,84%	3601	7,35	105,33	93,02%
MP250/67	4	3	68	3601	5	33	84,85%	3601	4,19	71,48	94,14%
MP250/68	4	3	69	3600	11	15	26,67%	3600	10,66	18,38	42,00%
MP250/69	4	3	69	3600	9	60	85,00%	3600	9,48	28,47	66,70%
MP250/70	4	3	70	3601	12	200	94,00%	3601	12,45	186,93	93,34%
MP250/71	4	3	70	3601	11	233	95,28%	3601	10,36	193,01	94,63%
MP250/72	4	3	70	3601	7	89	92,13%	3602	6,09	104,52	94,17%
MP250/73	4	3	71	3600	7	127	94,49%	3601	3,93	123,49	96,82%
MP250/74	4	3	71	181	0	0	0,00%	3600	-0,76	-0,75	-1,33%
MP250/75	4	3	71	3600	9	58	84,48%	3600	9,58	37,14	74,21%
MP250/76	4	3	72	3601	27	313	91,37%	3602	25,32	307,92	91,78%
MP250/77	4	3	72	48	23	23	0,00%	72	22,38	22,38	0,00%
MP250/78	4	3	72	3600	0	9	100,00%	3601	-0,95	18,44	105,15%
MP250/79	4	3	73	24	10	10	0,00%	26	9,62	9,62	0,00%
MP250/80	4	3	74	54	6	6	0,00%	3600	5,33	5,34	0,19%
MP250/81	4	3	74	3600	3	24	87,50%	3601	-0,18	84,91	100,21%
MP250/82	4	3	76	3601	14	37	62,16%	3600	13,22	28,67	53,89%
MP250/83	4	3	79	3600	9	52	82,69%	3601	8,55	31,44	72,81%
MP250/84	4	3	80	251	13	13	0,00%	3600	12,67	12,68	0,08%
MP250/85	4	4	60	3600	42	64	34,37%	3600	44,17	54,46	18,89%
MP250/86	4	4	64	3600	25	33	24,24%	3600	25,32	30,76	17,69%
MP250/87	4	4	64	3600	25	31	19,35%	3600	20,47	31,76	35,55%
MP250/88	4	4	65	3600	3	4	25,00%	3600	2,78	3,71	25,07%
MP250/89	4	4	65	3600	2	5	60,00%	3600	2,14	6,68	67,96%
MP250/90	4	4	69	3600	19	56	66,07%	3600	15,18	64,17	76,34%
MP250/91	4	4	69	3602	19	107	82,24%	3602	18,7	112,02	83,31%
MP250/92	4	4	70	3600	12	41	70,73%	3600	11,42	49,87	77,10%
MP250/93	4	4	70	3600	6	7	14,29%	3600	3,56	20,62	82,74%
MP250/94	4	4	72	14	9	9	0,00%	71	8,45	8,45	0,00%
MP250/95	4	4	72	9	9	9	0,00%	53	8,53	8,53	0,00%
MP250/96	4	4	73	1406	2	2	0,00%	3600	1,21	1,22	0,82%
MP250/97	4	4	73	448	0	0	0,00%	3600	-0,76	-0,74	-2,70%
MP250/98	4	4	73	235	6	6	0,00%	1803	5,7	5,7	0,00%
MP250/99	4	4	73	393	20	20	0,00%	3600	19,72	20,68	4,64%
MP250/100	4	4	73	3602	14	55	74,55%	3600	13	54,3	76,06%
MP250/101	4	4	74	3600	3	65	95,38%	3600	1,17	54,54	97,85%
MP250/102	4	4	74	3600	3	40	92,50%	3600	3,23	26,66	87,88%
MP250/103	4	4	75	3601	31	451	93,13%	3601	29,4	353,49	91,68%
MP250/104	4	4	75	3600	19	71	73,24%	3600	20,39	125,5	83,75%
MP250/105	4	4	75	3600	15	95	84,21%	3600	14,38	141,25	89,82%
MP250/106	4	4	75	2	1	1	0,00%	4	0,43	0,43	0,00%
MP250/107	4	4	75	4	4	4	0,00%	3	3,24	3,24	0,00%
MP250/108	4	4	76	340	2	2	0,00%	676	1,88	1,88	0,00%
MP250/109	4	4	76	356	10	10	0,00%	557	9,79	9,79	0,00%
MP250/110	4	4	77	38	2	2	0,00%	74	1,48	1,48	0,00%
MP250/111	4	4	77	18	0	0	0,00%	20	-0,64	-0,64	0,00%
MP250/112	4	4	77	3600	0	14	100,00%	3600	-0,51	4,48	111,38%
MP250/113	4	4	77	3600	18	32	43,75%	3600	16,59	23,36	28,98%
MP250/114	4	4	77	3601	11	177	93,79%	3600	8,69	175	95,03%
MP250/115	4	4	77	3601	35	202	82,67%	3601	34,23	296,41	88,45%

Fortsetzung auf nächster Seite. ...

B.3. Testinstanzenmenge MP250

... fortgesetzte Tabelle von vorheriger Seite

Name	Gesamter Plan			Sekt.	ZF2			Sekt.	ZF3		
	#R	#P	#A		LB	Obj.	Gap		LB	Obj.	Gap
MP250/116	4	4	77	3601	38	284	86,62%	3601	35,48	219,36	83,83%
MP250/117	4	4	78	3601	31	490	93,67%	3610	31,87	377,83	91,56%
MP250/118	4	4	79	3600	31	95	67,37%	3600	30,35	86,88	65,07%
MP250/119	4	4	79	3600	14	93	84,95%	3601	12,22	165,71	92,63%
MP250/120	4	4	79	3601	2	124	98,39%	3601	0,49	108,93	99,55%
MP250/121	4	4	79	939	5	5	0,00%	3601	3,36	92,45	96,37%
MP250/122	4	4	79	3600	29	30	3,33%	3601	27,81	34,81	20,11%
MP250/123	4	4	79	3600	27	28	3,57%	3600	26	27,84	6,61%
MP250/124	4	4	80	3600	23	24	4,17%	3600	21,96	24,18	9,18%
MP250/125	4	4	80	3600	13	14	7,14%	3600	11,55	14,58	20,78%
MP250/126	4	4	80	3600	15	19	21,05%	3600	13,43	17,31	22,41%
MP250/127	4	4	80	3604	18	n.v.	n.v.	3601	17,61	n.v.	n.v.
MP250/128	4	4	81	3600	19	25	24,00%	3600	19,07	24,61	22,51%
MP250/129	4	4	81	44	17	17	0,00%	155	16,66	16,66	0,00%
MP250/130	4	4	81	6	20	20	0,00%	14	19,57	19,57	0,00%
MP250/131	4	4	81	3600	10	38	73,68%	3600	9,98	14,87	32,89%
MP250/132	4	4	81	3600	24	25	4,00%	3600	24,59	25,55	3,76%
MP250/133	4	4	82	3600	83	n.v.	n.v.	3601	84,18	n.v.	n.v.
MP250/134	4	4	82	3601	55	n.v.	n.v.	3601	53,18	n.v.	n.v.
MP250/135	4	4	82	3600	2	54	96,30%	3600	0,5	32,37	98,46%
MP250/136	4	4	82	3600	0	34	100,00%	3600	-0,12	32,53	100,37%
MP250/137	4	4	83	3601	13	200	93,50%	3601	10,93	124,5	91,22%
MP250/138	4	4	83	3602	14	183	92,35%	3602	12,25	149,31	91,80%
MP250/139	4	4	83	3600	10	35	71,43%	3600	9,91	64,93	84,74%
MP250/140	4	4	83	3600	9	72	87,50%	3600	8,75	28,29	69,07%
MP250/141	4	4	84	3601	45	175	74,29%	3600	45,73	n.v.	n.v.
MP250/142	4	4	84	3600	33	264	87,50%	3601	32,22	343,31	90,61%
MP250/143	4	4	84	3600	18	31	41,94%	3600	16,51	32,15	48,65%
MP250/144	4	4	84	3600	13	37	64,86%	3600	12,85	30,26	57,53%
MP250/145	4	4	85	3600	37	49	24,49%	3600	30,95	55,17	43,90%
MP250/146	4	4	85	3600	9	19	52,63%	3600	7,27	22,55	67,76%
MP250/147	4	4	85	3600	15	n.v.	n.v.	3601	14,44	347,93	95,85%
MP250/148	4	4	85	3600	20	351	94,30%	3601	18,72	340,62	94,50%
MP250/149	4	4	86	3600	2	42	95,24%	3600	0,67	59,81	98,88%
MP250/150	4	4	87	23	0	0	0,00%	82	-0,57	-0,57	0,00%
MP250/151	4	4	87	3601	10	11	9,09%	3601	9,19	27,09	66,08%
MP250/152	4	4	87	3600	3	41	92,68%	3600	2,33	86,49	97,31%
MP250/153	4	4	88	3601	20	325	93,85%	3601	19,1	306,2	93,76%
MP250/154	4	4	88	3608	23	187	87,70%	3602	22,36	265,62	91,58%
MP250/155	4	4	88	3600	25	n.v.	n.v.	3601	24,81	n.v.	n.v.
MP250/156	4	4	88	3601	28	n.v.	n.v.	3600	24,92	n.v.	n.v.
MP250/157	4	4	88	3601	19	31	38,71%	3601	18,29	31,48	41,90%
MP250/158	4	4	90	3601	52	n.v.	n.v.	3601	51,68	n.v.	n.v.
MP250/159	4	4	91	3601	10	332	96,99%	3601	9,22	318,55	97,11%
MP250/160	4	4	91	3601	11	455	97,58%	3603	10,15	196,13	94,82%
MP250/161	4	4	91	3601	5	123	95,93%	3601	3,15	215,1	98,54%
MP250/162	4	4	91	52	17	17	0,00%	85	16,21	16,21	0,00%
MP250/163	4	4	91	3601	0	95	100,00%	3602	-0,98	151,33	100,65%
MP250/164	4	4	91	3601	0	82	100,00%	3600	-1,2	130,01	100,92%
MP250/165	4	4	92	119	1	1	0,00%	3600	0,08	0,11	27,27%
MP250/166	4	4	92	49	5	5	0,00%	147	3,98	3,98	0,00%
MP250/167	4	4	94	3600	23	47	51,06%	3600	19,39	67,93	71,46%
MP250/168	4	4	94	3601	17	395	95,70%	3601	14,32	341,89	95,81%
MP250/169	4	4	95	3600	6	63	90,48%	3600	5,62	90,48	93,79%
MP250/170	4	4	96	3601	23	n.v.	n.v.	3602	20,34	n.v.	n.v.
MP250/171	4	4	96	3600	3	8	62,50%	3600	2,57	5,96	56,88%
MP250/172	4	4	96	3600	0	13	100,00%	3600	3,2	10,86	70,53%
MP250/173	4	4	97	3601	10	n.v.	n.v.	3602	10,16	n.v.	n.v.
MP250/174	4	4	97	3601	10	n.v.	n.v.	3602	7,58	n.v.	n.v.

Fortsetzung auf nächster Seite. ...

Anhang B. Ergebnisse numerischer Testläufe - exakte Lösungsverfahren

... fortgesetzte Tabelle von vorheriger Seite

Name	Gesamter Plan			Sek.	ZF2			Gap	Sek.	ZF3		
	#R	#P	#A		LB	Obj.	Gap			LB	Obj.	Gap
MP250/175	4	4	97	3602	92	n.v.	n.v.		3602	91,32	n.v.	n.v.
MP250/176	4	4	97	3601	62	n.v.	n.v.		3601	62,08	n.v.	n.v.
MP250/177	4	4	99	3601	1	16	93,75%		3601	-0,54	37,08	101,46%
MP250/178	4	4	100	3601	10	278	96,40%		3604	9,15	240,75	96,20%
MP250/179	4	4	102	3601	45	424	89,39%		3601	45,48	420,02	89,17%
MP250/180	4	5	79	3601	20	99	79,80%		3601	19,96	237,3	91,59%
MP250/181	4	5	85	3600	25	207	87,92%		3600	23,09	204,61	88,72%
MP250/182	4	5	85	3601	16	153	89,54%		3601	17,64	194,36	90,92%
MP250/183	4	5	86	3601	41	n.v.	n.v.		3601	42,17	n.v.	n.v.
MP250/184	4	5	88	3601	16	108	85,19%		3601	14,52	147,97	90,19%
MP250/185	4	5	88	3601	22	223	90,13%		3601	20,73	220,93	90,62%
MP250/186	4	5	88	3601	13	127	89,76%		3601	13,11	134,96	90,29%
MP250/187	4	5	89	3601	22	262	91,60%		3601	21,28	269,65	92,11%
MP250/188	4	5	91	27	10	0	0,00%		33	9,62	9,62	0,00%
MP250/189	4	5	92	3602	1	46	97,83%		3602	0,25	101,06	99,75%
MP250/190	4	5	93	3601	7	381	98,16%		3601	5,79	234,04	97,53%
MP250/191	4	5	94	3600	2	39	94,87%		3600	0,49	32,08	98,47%
MP250/192	4	5	95	40	7	7	0,00%		84	6,35	6,35	0,00%
MP250/193	4	5	96	3600	21	n.v.	n.v.		3601	21,53	n.v.	n.v.
MP250/194	4	5	96	3600	8	n.v.	n.v.		3600	9,62	n.v.	n.v.
MP250/195	4	5	97	3601	37	n.v.	n.v.		3601	37,44	n.v.	n.v.
MP250/196	4	5	97	3600	59	n.v.	n.v.		3601	59,05	436,89	86,48%
MP250/197	4	5	97	3601	29	n.v.	n.v.		3601	30,52	n.v.	n.v.
MP250/198	4	5	97	3601	46	n.v.	n.v.		3601	47,52	n.v.	n.v.
MP250/199	4	5	101	3601	12	n.v.	n.v.		3601	10,52	n.v.	n.v.
MP250/200	4	5	101	3601	11	474	97,68%		3601	12,36	449,56	97,25%
MP250/201	4	5	104	3600	9	10	10,00%		2101	9,11	9,11	0,00%
MP250/202	4	5	104	3600	30	124	75,81%		3600	29	108,6	73,30%
MP250/203	4	5	104	3603	13	99	86,87%		3602	11,29	161,82	93,02%
MP250/204	4	5	104	3603	1	206	99,51%		3603	-0,65	237,4	100,27%
MP250/205	4	5	105	3601	11	120	90,83%		3602	9,76	281,54	96,53%
MP250/206	4	5	105	3601	32	212	84,91%		3601	31,09	250,87	87,61%
MP250/207	4	5	105	3601	54	397	86,40%		3601	53,44	470,2	88,63%
MP250/208	4	5	105	3601	52	n.v.	n.v.		3601	50,9	n.v.	n.v.
MP250/209	4	5	105	3600	10	23	56,52%		3600	8,62	29,24	70,52%
MP250/210	4	5	105	3600	26	34	23,53%		3600	21,37	36,2	40,97%
MP250/211	4	5	106	3601	43	438	90,18%		3601	41,55	499,31	91,68%
MP250/212	4	5	106	3601	48	n.v.	n.v.		3601	47,27	n.v.	n.v.
MP250/213	4	5	106	3601	19	106	82,08%		3601	18,77	109,42	82,85%
MP250/214	4	5	106	3601	8	21	61,90%		3601	7,12	39,2	81,84%
MP250/215	4	5	106	3600	4	41	90,24%		3602	2,55	79,91	96,81%
MP250/216	4	5	106	3601	4	n.v.	n.v.		3601	1,57	563,42	99,72%
MP250/217	4	5	106	3601	8	658	98,78%		3601	7,73	n.v.	n.v.
MP250/218	4	5	107	3601	43	410	89,51%		3601	42,86	n.v.	n.v.
MP250/219	4	5	107	3601	11	329	96,66%		3601	10,53	266,81	96,05%
MP250/220	4	5	107	3601	10	236	95,76%		3602	8,74	222,77	96,08%
MP250/221	4	5	107	3603	11	80	86,25%		3600	9,45	74,93	87,39%
MP250/222	4	5	107	3600	3	25	88,00%		3601	1,97	68,43	97,12%
MP250/223	4	5	108	3601	9	102	91,18%		3601	8,07	112,03	92,80%
MP250/224	4	5	108	3601	67	n.v.	n.v.		3601	66,54	n.v.	n.v.
MP250/225	4	5	108	3600	1	n.v.	n.v.		3604	0,58	354,99	99,84%
MP250/226	4	5	108	3600	5	n.v.	n.v.		3601	1,94	478,25	99,59%
MP250/227	4	5	109	3601	35	349	89,97%		3602	34,15	338,39	89,91%
MP250/228	4	5	110	3602	24	364	93,41%		3601	24,97	n.v.	n.v.
MP250/229	4	5	110	3601	8	467	98,29%		3603	7,71	479,64	98,39%
MP250/230	4	5	110	3601	6	58	89,66%		3603	5,85	134,47	95,65%
MP250/231	4	5	110	3601	9	122	92,62%		3601	7,54	128,92	94,15%
MP250/232	4	5	111	3603	17	119	85,71%		3601	16,59	233,78	92,90%
MP250/233	4	5	111	3601	12	221	94,57%		3602	9,57	391,45	97,56%

Fortsetzung auf nächster Seite. ...

... fortgesetzte Tabelle von vorheriger Seite

Name	Gesamter Plan			Sek.	ZF2			Sek.	ZF3		
	#R	#P	#A		LB	Obj.	Gap		LB	Obj.	Gap
MP250/234	4	5	111	3601	44	335	86,87%	3601	43,05	328,11	86,88%
MP250/235	4	5	112	3601	80	n.v.	n.v.	3601	81,16	n.v.	n.v.
MP250/236	4	5	112	3602	96	879	89,08%	3602	93,06	814,47	88,57%
MP250/237	4	5	113	3600	24	97	75,26%	3600	24,06	61,75	61,04%
MP250/238	4	5	113	3600	23	214	89,25%	3600	22,95	199,88	88,52%
MP250/239	4	5	114	3601	28	542	94,83%	3601	28,74	536,94	94,65%
MP250/240	4	5	114	3601	53	n.v.	n.v.	3601	52,24	n.v.	n.v.
MP250/241	4	5	115	3601	10	249	95,98%	3601	10,57	338,03	96,87%
MP250/242	4	5	115	3601	39	n.v.	n.v.	3601	38,73	243,4	84,09%
MP250/243	4	5	116	3602	52	n.v.	n.v.	3601	54,73	n.v.	n.v.
MP250/244	4	5	116	3601	48	n.v.	n.v.	3603	47,23	n.v.	n.v.
MP250/245	4	5	117	3603	12	n.v.	n.v.	3601	10,02	n.v.	n.v.
MP250/246	4	5	118	3601	21	218	90,37%	3601	20,29	198,63	89,79%
MP250/247	4	5	119	3600	117	n.v.	n.v.	3600	115,43	n.v.	n.v.
MP250/248	4	5	119	3601	80	n.v.	n.v.	3600	85,51	n.v.	n.v.
MP250/249	4	5	126	3601	6	n.v.	n.v.	3602	4,97	n.v.	n.v.
MP250/250	4	5	126	3601	31	502	93,82%	3601	30,67	483,37	93,65%

Tabelle B.4. – MP250 gelöst per MIP unter ZF2 und ZF3, Zeitlimit = 1 Stunde

Anhang C.

Ergebnisse numerischer Testläufe - heuristische Lösungsverfahren

C.1. Parameterevaluation des genetischen Algorithmus

	$\chi^{K^*} = 0$								$\chi^{K^*} = 1$							
	$\chi^N = 0$				$\chi^N = 1$				$\chi^N = 0$				$\chi^N = 1$			
	$\chi^S = 1$		$\chi^S = 2$		$\chi^S = 1$		$\chi^S = 2$		$\chi^S = 1$		$\chi^S = 2$		$\chi^S = 1$		$\chi^S = 2$	
	\emptyset	Min.	\emptyset	Min.	\emptyset	Min.	\emptyset	Min.	\emptyset	Min.	\emptyset	Min.	\emptyset	Min.	\emptyset	Min.
MP50/1	10,3	10,0	10,0	10,0	10,0	10,0	10,0	10,0	10,0	10,0	10,0	10,0	12,0	10,0	10,0	10,0
MP50/2	5,0	5,0	5,0	5,0	5,0	5,0	5,0	5,0	5,7	5,0	5,0	5,0	5,0	5,0	5,0	5,0
MP50/3	16,0	16,0	13,0	13,0	13,7	12,0	12,3	11,0	14,7	12,0	13,7	13,0	15,0	13,0	14,7	14,0
MP50/4	6,3	6,0	4,7	4,0	6,3	6,0	4,7	4,0	6,0	6,0	5,3	5,0	6,3	6,0	5,7	5,0
MP50/5	25,3	23,0	25,0	21,0	24,7	24,0	25,0	25,0	30,0	29,0	24,7	24,0	28,0	24,0	29,3	25,0
MP50/6	33,0	30,0	29,3	29,0	28,3	26,0	30,0	29,0	36,0	33,0	29,7	27,0	33,3	31,0	30,0	29,0
MP50/7	24,0	24,0	24,0	24,0	24,0	24,0	24,0	24,0	24,7	24,0	24,0	24,0	25,3	24,0	24,0	24,0
MP50/8	5,0	5,0	5,0	5,0	5,0	5,0	5,0	5,0	5,0	5,0	5,0	5,0	5,0	5,0	5,0	5,0
MP50/9	61,0	61,0	65,3	61,0	62,0	61,0	62,0	61,0	71,7	61,0	66,7	65,0	68,3	62,0	65,7	65,0
MP50/10	51,0	50,0	53,0	51,0	51,3	50,0	50,3	49,0	50,0	50,0	52,0	50,0	55,7	54,0	54,3	54,0
MP50/11	11,3	10,0	15,3	13,0	9,7	8,0	14,3	12,0	13,3	8,0	16,3	13,0	14,7	13,0	17,0	17,0
MP50/12	16,7	16,0	16,0	14,0	17,7	16,0	16,0	15,0	18,3	15,0	18,0	18,0	19,0	18,0	17,7	15,0
MP50/13	11,0	11,0	11,0	11,0	11,0	11,0	11,0	11,0	11,0	11,0	11,0	11,0	11,0	11,0	11,0	11,0
MP50/14	31,7	31,0	31,7	31,0	31,3	31,0	31,7	31,0	33,0	32,0	30,7	30,0	33,0	33,0	31,3	30,0
MP50/15	32,0	31,0	31,7	31,0	31,7	29,0	31,3	30,0	32,3	31,0	35,3	34,0	33,0	33,0	33,7	31,0
MP50/16	13,0	13,0	11,7	11,0	12,7	12,0	12,3	12,0	12,7	12,0	11,7	11,0	13,7	13,0	11,7	11,0
MP50/17	21,0	21,0	21,0	21,0	20,7	20,0	21,0	21,0	21,7	20,0	21,0	21,0	21,3	21,0	21,0	21,0
MP50/18	36,0	36,0	36,0	36,0	36,0	36,0	36,0	36,0	36,0	36,0	36,0	36,0	36,0	36,0	36,0	36,0
MP50/19	35,0	33,0	31,7	31,0	33,7	33,0	32,3	31,0	35,3	32,0	33,7	33,0	34,0	33,0	32,0	31,0
MP50/20	54,7	52,0	51,0	49,0	53,7	50,0	48,7	47,0	52,3	52,0	53,0	52,0	52,3	52,0	50,3	48,0
MP50/21	7,3	6,0	11,0	10,0	7,7	6,0	8,0	6,0	10,7	9,0	9,3	6,0	11,7	8,0	8,3	7,0
MP50/22	10,0	10,0	10,0	10,0	10,0	10,0	10,0	10,0	10,0	10,0	10,0	10,0	10,0	10,0	10,0	10,0
MP50/23	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
MP50/24	46,0	42,0	44,7	39,0	44,0	42,0	43,3	41,0	51,0	50,0	52,3	51,0	51,0	49,0	51,7	51,0
MP50/25	53,3	53,0	53,0	51,0	60,0	55,0	55,7	53,0	67,0	65,0	55,3	53,0	63,7	62,0	61,3	55,0
MP50/26	41,0	40,0	41,3	40,0	41,0	41,0	41,7	41,0	41,0	40,0	41,0	40,0	44,0	43,0	41,0	40,0
MP50/27	45,3	45,0	45,7	45,0	45,7	45,0	45,0	45,0	47,3	45,0	48,0	45,0	46,0	45,0	46,7	45,0
MP50/28	28,7	28,0	30,0	29,0	29,0	27,0	28,0	26,0	30,7	28,0	30,7	30,0	30,7	27,0	30,3	30,0
MP50/29	33,7	31,0	28,3	28,0	34,7	34,0	28,0	28,0	35,0	35,0	31,7	30,0	34,0	32,0	30,0	29,0
MP50/30	89,0	87,0	85,7	85,0	86,0	82,0	88,7	86,0	88,7	82,0	92,0	88,0	93,3	86,0	91,7	88,0
MP50/31	89,0	89,0	89,0	89,0	89,7	89,0	88,3	87,0	90,0	90,0	90,7	89,0	93,3	91,0	89,3	89,0
MP50/32	57,3	54,0	55,0	53,0	57,7	57,0	57,3	53,0	57,7	55,0	56,7	53,0	57,0	57,0	55,7	54,0
MP50/33	87,3	86,0	86,3	85,0	85,7	84,0	84,0	81,0	89,3	86,0	93,3	88,0	89,0	86,0	86,0	85,0
MP50/34	104,3	103,0	109,0	104,0	104,0	103,0	106,0	105,0	117,7	114,0	108,3	105,0	115,7	110,0	109,3	106,0
MP50/35	10,0	10,0	10,0	10,0	10,0	10,0	10,0	10,0	10,0	10,0	10,0	10,0	10,0	10,0	10,0	10,0
MP50/36	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0
MP50/37	60,7	60,0	57,3	56,0	61,3	58,0	58,0	55,0	62,3	59,0	57,0	56,0	63,0	59,0	57,7	55,0
MP50/38	57,0	56,0	56,7	55,0	58,0	57,0	56,0	56,0	60,0	56,0	56,3	55,0	58,0	57,0	57,0	56,0

Fortsetzung auf nächster Seite...

... fortgesetzte Tabelle von vorheriger Seite

	$\chi^{K^*} = 0$								$\chi^{K^*} = 1$							
	$\chi^N = 0$				$\chi^N = 1$				$\chi^N = 0$				$\chi^N = 1$			
	$\chi^S = 1$		$\chi^S = 2$		$\chi^S = 1$		$\chi^S = 2$		$\chi^S = 1$		$\chi^S = 2$		$\chi^S = 1$		$\chi^S = 2$	
	\emptyset	Min.	\emptyset	Min.	\emptyset	Min.	\emptyset	Min.	\emptyset	Min.	\emptyset	Min.	\emptyset	Min.	\emptyset	Min.
MP50/39	111,7	105,0	104,0	100,0	112,0	103,0	103,0	100,0	120,0	114,0	105,0	97,0	111,7	108,0	106,3	99,0
MP50/40	25,3	24,0	25,3	25,0	24,3	24,0	25,0	25,0	26,3	25,0	25,0	25,0	27,0	27,0	24,7	24,0
MP50/41	26,3	25,0	23,0	19,0	26,3	25,0	25,0	25,0	25,0	23,0	26,3	25,0	26,0	24,0	23,7	20,0
MP50/42	34,3	32,0	32,0	30,0	33,3	32,0	33,0	32,0	33,7	33,0	31,0	30,0	35,3	34,0	31,3	30,0
MP50/43	70,5	66,0	72,0	70,0	77,7	74,0	72,3	64,0	76,0	75,0	75,7	74,0	75,3	72,0	70,7	67,0
MP50/44	22,0	21,0	18,7	18,0	22,7	18,0	19,0	17,0	23,3	23,0	19,0	18,0	22,3	22,0	19,3	18,0
MP50/45	48,3	48,0	45,0	44,0	48,3	48,0	45,7	45,0	48,0	46,0	46,7	46,0	52,7	51,0	46,0	45,0
MP50/46	49,7	48,0	44,3	43,0	47,7	46,0	44,7	43,0	53,0	50,0	47,3	45,0	50,7	47,0	46,7	44,0
MP50/47	5,0	5,0	5,0	5,0	5,0	5,0	5,0	5,0	5,0	5,0	5,0	5,0	6,3	5,0	5,0	5,0
MP50/48	14,7	13,0	14,0	14,0	14,7	13,0	13,5	13,0	17,3	15,0	14,5	14,0	16,3	13,0	16,7	14,0
MP50/49	80,0	77,0	76,7	73,0	82,7	78,0	70,7	65,0	81,7	78,0	82,3	81,0	87,0	86,0	82,0	81,0
MP50/50	131,0	117,0	127,0	120,0	136,3	134,0	120,3	115,0	139,0	136,0	135,3	132,0	140,0	133,0	132,7	127,0
Mittelwert	38,8	37,3	37,8	36,4	38,9	37,4	37,4	36,0	40,7	38,8	39,2	37,8	40,9	39,0	38,9	37,4

Tabelle C.1. – MP50 gelöst per GA unter ZF2 und $\chi^R = 1$, verschiedene Konfigurationen, Zeitlimit = 5 Minuten. Es wird der durchschnittliche und der beste Zielfunktionswert aus drei Optimierungen pro Konfiguration und Instanz angegeben.

C.1. Parameterevaluation des genetischen Algorithmus

	$\chi^{K^*} = 0$								$\chi^{K^*} = 1$							
	$\chi^N = 0$				$\chi^N = 1$				$\chi^N = 0$				$\chi^N = 1$			
	$\chi^S = 1$	$\chi^S = 2$	$\chi^S = 1$	$\chi^S = 2$	$\chi^S = 1$	$\chi^S = 2$	$\chi^S = 1$	$\chi^S = 2$	$\chi^S = 1$	$\chi^S = 2$	$\chi^S = 1$	$\chi^S = 2$	$\chi^S = 1$	$\chi^S = 2$	$\chi^S = 1$	$\chi^S = 2$
	\emptyset	Min.	\emptyset	Min.	\emptyset	Min.	\emptyset	Min.	\emptyset	Min.	\emptyset	Min.	\emptyset	Min.	\emptyset	Min.
MP50/1	9,5	9,5	9,5	9,5	9,5	9,5	9,5	9,5	11,1	10,3	9,5	9,5	10,5	9,4	10,2	9,5
MP50/2	4,3	4,3	4,3	4,3	4,3	4,3	4,3	4,3	6,0	5,4	5,0	4,4	5,0	4,3	4,6	4,3
MP50/3	15,4	15,4	14,8	13,7	15,4	15,4	14,4	12,6	16,5	15,6	16,5	15,6	15,5	15,4	15,5	15,4
MP50/4	5,6	5,5	4,9	4,6	5,3	4,7	4,6	4,6	7,8	6,6	7,7	7,4	7,9	6,6	6,5	5,5
MP50/5	24,6	23,3	22,4	21,6	24,5	22,6	23,2	20,6	29,1	28,4	29,3	28,5	31,9	25,5	27,4	26,5
MP50/6	30,9	30,2	30,9	30,2	30,5	29,2	30,9	30,2	42,7	42,1	42,7	42,0	38,8	37,1	40,4	37,1
MP50/7	24,8	24,3	23,2	23,2	23,2	23,1	25,2	24,4	27,0	26,1	27,0	27,0	24,9	24,3	25,5	24,3
MP50/8	4,3	4,3	4,2	4,2	4,2	4,2	4,2	4,2	4,3	4,3	4,2	4,2	4,3	4,3	4,2	4,2
MP50/9	63,5	62,5	63,0	60,8	64,0	61,0	63,3	60,8	64,1	60,8	69,5	68,5	67,9	66,7	72,5	68,5
MP50/10	51,0	49,7	50,3	48,7	51,0	49,7	48,3	47,7	54,7	52,7	52,7	51,7	55,7	53,7	52,0	50,7
MP50/11	13,1	10,8	14,7	13,8	11,7	6,7	14,3	12,8	20,3	17,6	18,9	17,7	20,2	18,6	16,6	15,6
MP50/12	18,6	16,6	15,6	15,6	17,6	17,6	15,6	15,6	23,8	22,4	25,1	24,4	23,2	21,7	21,2	19,6
MP50/13	10,5	10,5	10,5	10,5	10,5	10,5	10,5	10,5	13,1	12,5	12,5	11,5	13,5	12,5	12,5	11,5
MP50/14	33,1	32,8	31,0	29,7	32,8	32,8	30,7	29,7	39,7	37,7	35,6	34,7	35,7	34,8	32,4	31,7
MP50/15	33,3	31,3	32,5	30,3	33,9	31,4	32,3	30,3	43,1	42,2	44,5	41,7	47,1	46,8	42,4	36,9
MP50/16	12,3	11,6	11,7	11,6	12,3	11,6	11,9	11,6	18,7	17,3	16,7	16,3	17,3	16,3	16,0	15,3
MP50/17	22,1	20,8	21,1	20,8	20,5	19,8	20,4	19,8	27,5	26,5	27,8	27,4	26,9	25,5	24,9	23,6
MP50/18	35,8	35,8	35,8	35,8	35,8	35,8	35,8	35,8	38,7	37,7	39,4	38,8	38,7	37,8	38,1	37,7
MP50/19	35,2	32,3	32,9	31,3	34,6	32,3	32,2	32,2	45,3	43,0	42,6	41,0	43,8	40,3	40,3	39,0
MP50/20	53,5	51,2	51,5	50,2	52,5	52,2	51,5	51,2	71,9	67,8	60,9	59,0	70,9	64,8	61,6	59,0
MP50/21	7,4	5,5	9,3	7,6	10,3	5,4	9,7	9,4	21,1	21,1	15,2	12,3	18,5	13,4	12,4	11,4
MP50/22	8,8	8,8	8,8	8,8	8,8	8,8	8,8	8,8	9,3	8,8	8,8	8,8	9,0	8,9	8,8	8,8
MP50/23	-0,7	-0,8	-0,8	-0,8	-0,8	-0,8	-0,8	-0,8	2,7	-0,6	1,6	-0,6	0,3	-0,7	0,4	0,4
MP50/24	45,8	40,6	46,1	43,5	48,2	46,5	43,7	39,3	54,6	50,1	53,3	49,4	54,4	53,6	55,9	53,2
MP50/25	55,3	54,6	52,9	52,6	57,5	54,6	52,6	52,6	75,5	69,3	71,2	67,3	70,2	68,2	64,3	57,4
MP50/26	40,1	38,7	40,3	39,6	41,7	40,7	41,0	40,7	51,0	49,7	49,7	47,6	49,0	46,6	46,7	45,7
MP50/27	45,5	44,6	44,4	44,4	44,6	44,6	45,7	44,4	51,6	48,4	54,0	51,4	51,0	49,4	49,9	48,2
MP50/28	30,7	29,1	29,8	29,0	30,7	30,0	30,1	29,9	42,1	38,9	39,8	37,5	36,2	33,0	34,5	32,8
MP50/29	31,3	26,8	30,9	28,6	33,6	33,6	34,7	33,5	42,3	38,7	42,4	42,3	37,9	37,5	34,6	33,5
MP50/30	89,2	88,5	87,3	85,7	87,7	84,9	87,7	85,6	109,2	106,2	106,3	100,6	102,8	97,6	99,2	97,6
MP50/31	87,9	86,6	88,5	88,4	88,5	88,5	88,5	88,4	100,7	95,4	104,5	98,3	107,8	102,2	99,6	93,5
MP50/32	55,0	53,7	55,7	54,7	55,7	54,7	55,7	54,7	80,4	79,4	74,1	69,5	79,4	73,7	72,8	71,5
MP50/33	90,5	83,4	85,3	83,6	87,9	81,6	84,6	82,7	98,4	92,3	96,0	90,7	95,5	93,6	94,2	92,5
MP50/34	105,7	104,7	105,2	102,6	105,0	101,6	104,9	101,6	111,0	108,6	111,8	107,5	113,9	111,5	113,8	107,5
MP50/35	9,7	9,7	9,7	9,7	9,7	9,7	9,7	9,7	11,0	10,6	10,0	9,7	10,3	9,7	9,7	9,7
MP50/36	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8	1,8	0,8	0,8	0,8	1,5	0,8	0,8	0,8
MP50/37	63,6	59,7	57,4	55,7	62,0	60,6	56,0	55,5	70,8	68,7	68,4	66,3	69,5	68,3	67,7	66,4
MP50/38	60,0	58,8	56,7	55,8	59,6	58,6	55,7	55,6	76,7	74,3	72,0	71,4	76,2	72,5	67,8	66,5
MP50/39	118,9	114,8	107,8	105,8	116,9	108,9	106,9	102,9	151,3	139,4	143,9	141,2	147,4	143,5	138,7	130,6
MP50/40	26,2	24,9	24,8	24,8	26,1	24,8	24,8	24,8	29,4	28,8	28,1	27,7	27,5	26,8	28,1	27,8
MP50/41	25,4	24,8	27,7	24,8	26,1	25,8	27,1	21,8	33,3	29,8	34,9	31,7	35,0	33,7	31,4	30,7
MP50/42	33,7	32,4	32,0	29,3	33,1	32,6	30,8	29,4	42,5	37,3	38,8	36,2	36,3	35,4	36,1	34,6
MP50/43	73,7	73,6	73,0	70,6	78,0	76,7	75,0	74,7	98,9	93,7	98,3	93,3	100,5	99,4	96,8	89,6
MP50/44	20,3	17,7	19,6	19,6	20,6	19,6	19,0	16,6	38,3	37,0	32,7	30,2	38,1	35,1	32,5	31,2
MP50/45	48,2	47,9	46,2	45,9	48,1	46,9	46,8	45,9	58,6	57,6	52,3	49,8	59,2	57,5	52,3	51,7
MP50/46	51,4	49,9	42,1	39,9	51,1	49,6	44,7	43,7	58,2	54,4	51,5	49,5	58,2	54,6	53,9	53,5
MP50/47	5,1	4,4	4,4	4,4	4,8	4,4	4,4	4,4	13,3	10,3	10,3	9,3	12,7	10,3	9,3	7,4
MP50/48	15,3	12,3	15,0	13,4	14,7	14,3	15,6	13,3	23,1	22,2	20,4	18,1	19,9	19,2	18,8	17,2
MP50/49	79,9	77,1	72,9	69,5	81,4	78,2	70,3	67,2	100,5	98,6	96,3	94,6	101,1	97,5	93,0	91,2
MP50/50	133,2	122,0	133,1	115,9	130,3	126,4	136,4	127,0	177,6	168,7	172,5	167,1	177,5	172,9	174,2	172,1
Mittelwert	39,2	37,6	37,8	36,5	39,1	37,7	37,9	36,6	48,8	46,3	47,0	45,0	47,9	45,8	45,3	43,4

Tabelle C.2. – MP50 gelöst per GA unter ZF3 und $\chi^R = 1$, verschiedene Konfigurationen, Zeitlimit = 5 Minuten. Es wird der durchschnittliche und der beste Zielfunktionswert aus drei Optimierungen pro Konfiguration und Instanz angegeben.

Anhang C. Ergebnisse numerischer Testläufe - heuristische Lösungsverfahren

	$\chi^{K^*} = 0$								$\chi^{K^*} = 1$							
	$\chi^N = 0$				$\chi^N = 1$				$\chi^N = 0$				$\chi^N = 1$			
	$\chi^S = 1$		$\chi^S = 2$		$\chi^S = 1$		$\chi^S = 2$		$\chi^S = 1$		$\chi^S = 2$		$\chi^S = 1$		$\chi^S = 2$	
	\emptyset	Min.	\emptyset	Min.	\emptyset	Min.	\emptyset	Min.	\emptyset	Min.	\emptyset	Min.	\emptyset	Min.	\emptyset	Min.
MP50/1	10,0	10,0	10,0	10,0	10,0	10,0	10,0	10,0	10,0	10,0	10,0	10,0	10,0	10,0	10,0	10,0
MP50/2	5,0	5,0	5,0	5,0	5,0	5,0	5,0	5,0	5,0	5,0	5,0	5,0	5,0	5,0	5,0	5,0
MP50/3	11,7	11,0	11,7	11,0	11,7	11,0	12,0	11,0	11,7	11,0	11,7	11,0	12,0	12,0	12,0	11,0
MP50/4	5,3	4,0	4,7	4,0	4,7	4,0	4,0	4,0	5,0	4,0	4,7	4,0	5,0	4,0	4,0	4,0
MP50/5	20,3	19,0	20,7	20,0	19,3	19,0	20,7	20,0	21,7	20,0	21,3	21,0	20,7	20,0	21,0	21,0
MP50/6	28,3	27,0	28,7	28,0	28,3	26,0	29,0	29,0	30,3	29,0	27,0	26,0	30,7	29,0	28,3	26,0
MP50/7	23,0	23,0	23,0	23,0	23,7	23,0	23,3	23,0	23,7	23,0	23,3	23,0	23,3	23,0	23,3	23,0
MP50/8	5,0	5,0	5,0	5,0	5,0	5,0	5,0	5,0	5,0	5,0	5,0	5,0	5,0	5,0	5,0	5,0
MP50/9	62,7	61,0	61,7	61,0	62,0	61,0	62,0	61,0	63,7	62,0	64,0	64,0	61,7	61,0	65,3	64,0
MP50/10	49,7	48,0	46,7	46,0	49,0	45,0	46,7	46,0	52,0	51,0	48,0	48,0	48,7	46,0	46,7	46,0
MP50/11	9,3	8,0	11,0	11,0	8,3	8,0	10,0	10,0	9,3	9,0	12,0	10,0	8,7	7,0	10,7	10,0
MP50/12	15,3	15,0	14,7	14,0	15,0	14,0	15,0	15,0	16,0	15,0	15,3	15,0	14,7	14,0	15,3	14,0
MP50/13	11,0	11,0	11,0	11,0	11,0	11,0	11,0	11,0	11,0	11,0	11,0	11,0	11,0	11,0	11,0	11,0
MP50/14	30,7	30,0	30,3	30,0	30,7	30,0	30,3	30,0	30,7	30,0	30,3	30,0	30,3	30,0	30,3	30,0
MP50/15	26,7	24,0	27,0	26,0	27,0	25,0	26,3	25,0	30,0	27,0	27,3	25,0	29,7	29,0	27,3	25,0
MP50/16	11,0	11,0	10,0	10,0	11,0	11,0	10,0	10,0	10,7	10,0	10,0	10,0	11,0	11,0	10,0	10,0
MP50/17	21,0	21,0	21,0	21,0	20,7	20,0	20,7	20,0	21,0	21,0	20,7	20,0	21,0	21,0	21,3	21,0
MP50/18	25,7	23,0	25,0	23,0	25,0	23,0	24,3	23,0	29,3	24,0	30,3	27,0	30,7	24,0	27,3	25,0
MP50/19	31,0	30,0	31,3	31,0	31,7	30,0	31,0	30,0	33,0	33,0	32,7	32,0	32,3	31,0	33,0	31,0
MP50/20	48,7	45,0	49,3	47,0	51,0	49,0	48,3	47,0	48,3	47,0	49,3	47,0	52,0	52,0	50,7	47,0
MP50/21	6,0	6,0	6,0	6,0	6,0	6,0	6,0	6,0	6,0	6,0	6,3	6,0	9,0	6,0	6,0	6,0
MP50/22	10,0	10,0	10,0	10,0	10,0	10,0	10,0	10,0	10,0	10,0	10,0	10,0	10,0	10,0	10,0	10,0
MP50/23	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
MP50/24	37,0	34,0	38,3	37,0	38,3	37,0	38,0	38,0	39,7	39,0	39,0	39,0	41,7	39,0	41,3	39,0
MP50/25	50,0	50,0	48,7	47,0	50,0	48,0	52,0	50,0	50,0	50,0	58,7	58,0	52,7	49,0	55,3	52,0
MP50/26	34,7	34,0	37,7	35,0	34,7	34,0	39,7	38,0	38,3	36,0	40,7	40,0	38,7	37,0	39,3	38,0
MP50/27	44,3	44,0	44,0	44,0	45,7	44,0	43,3	43,0	46,3	46,0	45,0	44,0	45,0	45,0	45,0	45,0
MP50/28	25,7	25,0	26,7	25,0	25,7	25,0	27,0	25,0	32,0	32,0	27,0	26,0	29,0	27,0	28,0	27,0
MP50/29	27,0	25,0	28,0	28,0	28,0	28,0	27,7	27,0	32,0	28,0	28,0	28,0	28,7	28,0	28,0	27,0
MP50/30	83,7	82,0	87,0	85,0	84,3	82,0	84,7	83,0	88,7	84,0	88,0	86,0	88,0	88,0	87,0	85,0
MP50/31	86,7	86,0	85,3	84,0	86,0	85,0	86,3	86,0	89,7	89,0	88,7	86,0	89,7	86,0	88,7	87,0
MP50/32	53,0	53,0	53,0	52,0	53,0	52,0	53,0	53,0	60,7	56,0	59,0	55,0	60,0	55,0	59,3	56,0
MP50/33	88,0	83,0	87,3	82,0	87,7	84,0	88,0	85,0	94,3	88,0	93,0	89,0	92,3	87,0	93,0	88,0
MP50/34	107,0	104,0	104,0	103,0	106,7	104,0	106,0	104,0	114,7	114,0	114,7	113,0	114,7	114,0	111,3	106,0
MP50/35	10,0	10,0	10,0	10,0	10,0	10,0	10,0	10,0	10,0	10,0	10,0	10,0	10,0	10,0	10,0	10,0
MP50/36	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0
MP50/37	59,0	58,0	55,3	55,0	59,3	59,0	55,0	55,0	60,3	60,0	58,0	57,0	61,7	59,0	59,0	56,0
MP50/38	57,0	56,0	53,7	52,0	56,0	53,0	54,7	54,0	61,7	59,0	58,3	58,0	58,3	58,0	55,3	54,0
MP50/39	119,7	116,0	108,3	105,0	121,0	120,0	111,3	111,0	134,7	132,0	119,3	118,0	132,7	129,0	119,7	119,0
MP50/40	24,0	24,0	24,0	24,0	23,7	23,0	23,7	23,0	24,0	24,0	24,3	24,0	24,0	24,0	24,7	24,0
MP50/41	15,3	13,0	13,0	13,0	13,7	13,0	14,0	13,0	22,7	17,0	17,3	14,0	15,0	13,0	16,3	13,0
MP50/42	30,3	29,0	29,3	29,0	31,0	30,0	30,0	29,0	31,3	30,0	30,0	30,0	31,3	31,0	30,0	30,0
MP50/43	76,3	75,0	72,0	70,0	73,3	71,0	75,0	70,0	80,0	79,0	78,7	75,0	80,7	78,0	80,3	76,0
MP50/44	15,7	13,0	13,7	13,0	13,3	13,0	14,0	12,0	17,3	15,0	14,0	13,0	13,7	13,0	14,0	13,0
MP50/45	46,0	45,0	43,0	43,0	45,7	43,0	43,3	43,0	48,3	48,0	44,3	43,0	48,3	47,0	44,7	44,0
MP50/46	42,0	39,0	43,0	42,0	44,3	44,0	41,7	41,0	45,7	42,0	44,7	44,0	46,3	44,0	42,7	42,0
MP50/47	5,0	5,0	5,0	5,0	5,0	5,0	5,0	5,0	5,0	5,0	5,0	5,0	5,0	5,0	5,0	5,0
MP50/48	13,3	13,0	13,0	13,0	13,0	13,0	13,0	13,0	13,0	13,0	13,7	13,0	13,0	13,0	13,0	13,0
MP50/49	69,3	64,0	73,0	67,0	69,0	66,0	70,7	69,0	78,0	75,0	79,0	73,0	78,5	77,0	77,0	67,0
MP50/50	118,3	116,0	114,3	109,0	112,0	103,0	116,0	106,0	133,0	127,0	129,7	117,0	127,0	123,0	139,0	126,0
Mittelwert	36,1	34,9	35,5	34,5	35,9	34,7	35,7	34,8	38,7	37,2	37,7	36,4	38,2	36,8	37,6	36,0

Tabelle C.3. – MP50 gelöst per GA unter ZF2 und $\chi^R = 2$, verschiedene Konfigurationen, Zeitlimit = 5 Minuten. Es wird der durchschnittliche und der beste Zielfunktionswert aus drei Optimierungen pro Konfiguration und Instanz angegeben.

C.1. Parameterevaluation des genetischen Algorithmus

	$\chi^{K^*} = 0$								$\chi^{K^*} = 1$							
	$\chi^N = 0$				$\chi^N = 1$				$\chi^N = 0$				$\chi^N = 1$			
	$\chi^S = 1$		$\chi^S = 2$		$\chi^S = 1$		$\chi^S = 2$		$\chi^S = 1$		$\chi^S = 2$		$\chi^S = 1$		$\chi^S = 2$	
	\emptyset	Min.	\emptyset	Min.	\emptyset	Min.	\emptyset	Min.	\emptyset	Min.	\emptyset	Min.	\emptyset	Min.	\emptyset	Min.
MP50/1	9,9	9,5	9,5	9,5	10,2	9,5	9,5	9,5	11,1	9,5	9,5	9,5	11,4	10,5	9,5	9,5
MP50/2	4,5	4,4	4,4	4,4	4,5	4,4	4,4	4,3	6,2	5,6	5,3	5,3	5,5	4,5	5,3	5,3
MP50/3	15,4	15,4	13,5	12,6	14,4	12,5	12,9	12,6	17,3	15,4	15,5	15,4	16,5	15,4	15,5	15,4
MP50/4	4,9	4,6	4,6	4,6	4,6	3,8	4,3	3,6	8,1	7,5	5,9	5,5	8,2	7,5	6,9	6,5
MP50/5	20,7	19,5	22,0	21,5	21,3	20,4	21,3	21,3	29,8	29,2	31,5	29,1	27,6	25,2	26,2	24,2
MP50/6	28,0	25,4	28,7	28,3	28,9	28,3	27,6	26,4	38,8	33,2	37,1	37,1	34,5	31,2	34,8	33,2
MP50/7	22,2	22,2	23,1	22,2	22,5	22,2	22,8	22,2	26,0	25,0	24,7	23,1	25,4	25,0	24,5	23,1
MP50/8	4,2	4,2	4,2	4,2	4,2	4,2	4,2	4,2	4,3	4,3	4,2	4,2	4,3	4,3	4,2	4,2
MP50/9	65,6	64,5	65,6	64,5	66,9	65,5	65,5	64,5	71,6	68,7	69,6	68,7	70,6	69,6	69,3	68,6
MP50/10	49,2	46,7	47,4	46,7	51,0	50,7	48,4	46,8	58,5	57,8	56,1	54,8	60,2	58,8	54,1	52,7
MP50/11	10,1	9,7	11,8	10,9	9,8	9,7	12,1	10,8	18,6	16,6	18,4	17,7	18,6	15,7	18,3	16,6
MP50/12	15,4	14,8	16,1	14,8	15,7	15,6	15,0	13,7	29,1	28,3	25,4	24,5	24,7	24,4	23,8	23,4
MP50/13	10,5	10,5	10,5	10,5	11,2	10,5	10,5	10,5	13,5	11,5	11,2	10,5	13,1	12,5	12,5	10,5
MP50/14	31,5	30,8	31,4	30,7	31,2	30,8	31,1	30,7	39,4	37,8	37,3	35,7	37,1	36,7	35,4	33,7
MP50/15	31,1	30,6	28,9	27,6	30,5	30,2	29,5	28,8	44,7	42,3	44,0	39,4	42,7	42,3	43,3	42,9
MP50/16	12,4	11,8	12,1	11,7	12,1	11,7	11,8	11,7	19,0	17,9	17,4	15,5	18,8	18,5	16,5	15,7
MP50/17	20,8	20,8	20,8	20,8	21,4	20,8	20,8	20,8	28,9	25,6	27,2	25,6	27,9	26,6	25,9	23,6
MP50/18	34,1	33,8	30,5	27,8	34,1	33,7	31,8	28,8	42,0	41,7	42,3	41,8	40,4	39,7	40,4	38,8
MP50/19	37,0	35,6	35,4	33,8	35,6	34,3	35,6	34,6	56,9	53,1	49,0	47,5	50,2	49,1	47,0	45,5
MP50/20	50,6	49,5	50,2	50,2	53,6	51,2	51,2	50,2	72,9	69,9	64,1	62,9	65,3	59,1	64,2	60,0
MP50/21	5,4	5,4	6,4	5,6	6,9	5,4	5,7	5,4	11,0	9,6	11,8	11,4	13,0	10,2	9,7	7,4
MP50/22	8,8	8,8	8,8	8,8	8,8	8,8	8,8	8,8	9,1	9,0	9,0	8,9	9,0	8,9	9,0	8,8
MP50/23	-0,7	-0,7	-0,7	-0,7	-0,6	-0,7	-0,7	-0,7	3,1	0,4	2,1	0,6	3,3	-0,4	1,5	-0,5
MP50/24	42,4	41,4	39,8	39,5	40,7	39,5	40,1	39,4	56,5	53,7	52,2	49,5	53,8	53,3	52,4	50,4
MP50/25	53,5	49,4	51,5	50,5	49,9	49,5	55,5	53,5	72,5	68,5	71,0	66,4	70,6	66,5	68,7	67,4
MP50/26	41,4	39,7	41,0	40,6	39,8	37,8	39,0	37,7	49,7	47,8	49,3	47,6	48,1	47,8	47,7	46,7
MP50/27	45,5	44,5	45,5	44,5	46,2	45,6	45,2	44,7	54,5	52,6	51,5	50,5	51,7	50,4	50,1	49,6
MP50/28	30,4	29,0	28,8	26,1	30,9	30,8	29,1	27,1	38,0	36,6	37,4	36,9	32,7	32,1	33,9	32,8
MP50/29	26,2	24,8	29,5	29,4	28,8	26,0	27,8	26,9	39,6	37,9	39,3	37,8	36,0	34,7	36,1	31,6
MP50/30	87,4	84,7	86,2	84,9	86,9	86,5	90,0	87,5	114,2	109,4	108,3	104,5	108,3	101,7	99,6	96,6
MP50/31	87,9	85,7	89,3	88,6	89,4	85,8	87,7	86,7	107,1	105,5	105,8	100,6	104,2	103,5	100,5	97,6
MP50/32	57,7	56,7	57,5	55,7	55,8	55,8	56,8	56,8	79,8	74,9	76,4	71,8	75,2	73,0	72,4	68,8
MP50/33	95,3	94,6	84,9	83,7	88,4	85,7	89,3	87,6	103,4	99,6	98,2	97,7	106,6	103,7	97,7	94,8
MP50/34	114,6	108,7	109,8	107,4	119,9	118,3	110,6	107,7	130,3	123,6	127,7	123,8	128,3	127,7	128,0	124,6
MP50/35	9,7	9,7	9,7	9,7	9,7	9,7	9,7	9,7	11,1	9,8	10,8	9,9	9,8	9,8	9,7	9,7
MP50/36	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8	1,8	0,8	0,8	0,8	2,1	1,8	0,8	0,8
MP50/37	64,6	61,7	62,7	60,8	65,3	63,7	63,1	60,8	78,2	76,4	74,6	73,6	75,7	72,8	73,9	71,9
MP50/38	62,5	60,8	61,3	59,6	61,7	59,7	60,7	58,7	82,6	75,7	77,3	76,6	78,3	76,8	79,3	76,6
MP50/39	124,2	122,5	115,2	114,9	124,7	123,5	113,2	110,8	161,2	158,8	144,4	138,7	162,8	161,6	147,4	141,0
MP50/40	24,8	24,8	24,8	24,8	24,2	23,8	24,2	23,9	30,3	28,7	28,8	27,8	28,7	28,7	28,7	28,7
MP50/41	18,6	15,9	23,8	15,9	21,2	16,8	21,5	16,8	37,6	33,7	32,4	30,8	33,4	29,8	31,4	28,8
MP50/42	32,2	30,6	30,1	28,5	32,5	32,5	30,1	29,6	39,0	38,3	37,8	37,2	38,4	37,5	37,6	35,4
MP50/43	87,1	80,9	86,9	81,8	84,5	78,6	83,4	76,8	113,6	107,7	109,0	104,8	107,9	102,7	104,3	98,7
MP50/44	15,3	14,6	16,3	15,6	17,0	13,6	15,6	15,6	36,3	34,0	31,8	29,2	30,6	25,4	31,9	28,4
MP50/45	51,5	50,8	49,5	46,9	53,2	50,8	49,2	47,9	64,2	60,8	58,8	57,8	65,5	62,9	59,1	55,8
MP50/46	47,2	43,8	47,5	45,7	47,5	44,9	44,5	43,8	64,7	61,6	57,1	54,7	62,5	59,6	56,5	55,8
MP50/47	5,2	4,5	4,9	4,5	5,2	4,6	5,2	4,5	15,0	13,3	11,7	10,4	12,1	10,4	11,4	9,5
MP50/48	13,1	12,5	12,3	12,3	13,0	12,3	12,3	12,3	24,0	23,1	20,8	19,2	22,1	21,2	17,5	16,2
MP50/49	80,7	75,1	79,4	73,5	72,3	69,9	72,2	71,0	105,1	104,0	101,8	99,9	102,9	101,9	104,4	99,1
MP50/50	119,7	108,3	136,0	127,6	131,1	107,7	126,2	116,8	174,4	166,7	175,8	170,1	179,0	169,2	176,3	169,6
Mittelwert	38,6	37,1	38,2	36,9	38,8	37,1	37,7	36,5	50,9	48,5	48,2	46,5	49,1	47,2	47,1	45,1

Tabelle C.4. – MP50 gelöst per GA unter ZF3 und $\chi^R = 2$, verschiedene Konfigurationen, Zeitlimit = 5 Minuten. Es wird der durchschnittliche und der beste Zielfunktionswert aus drei Optimierungen pro Konfiguration und Instanz angegeben.

Anhang C. Ergebnisse numerischer Testläufe - heuristische Lösungsverfahren

	$\chi^{K^*} = 0$								$\chi^{K^*} = 1$							
	$\chi^N = 0$				$\chi^N = 1$				$\chi^N = 0$				$\chi^N = 1$			
	$\chi^S = 1$		$\chi^S = 2$		$\chi^S = 1$		$\chi^S = 2$		$\chi^S = 1$		$\chi^S = 2$		$\chi^S = 1$		$\chi^S = 2$	
	\emptyset	Min.	\emptyset	Min.	\emptyset	Min.	\emptyset	Min.	\emptyset	Min.	\emptyset	Min.	\emptyset	Min.	\emptyset	Min.
MP50/1	10,0	10,0	10,0	10,0	10,0	10,0	10,0	10,0	10,7	10,0	10,3	10,0	10,7	10,0	10,0	10,0
MP50/2	5,7	5,0	5,3	5,0	5,3	5,0	5,0	5,0	5,7	5,0	5,0	5,0	5,7	5,0	5,0	5,0
MP50/3	16,0	16,0	13,3	13,0	15,0	13,0	13,3	13,0	16,0	16,0	15,0	13,0	16,0	16,0	14,7	13,0
MP50/4	6,0	6,0	5,3	5,0	6,0	6,0	5,3	4,0	6,0	6,0	6,0	6,0	6,3	6,0	5,7	5,0
MP50/5	23,3	22,0	23,0	21,0	23,3	23,0	23,3	21,0	24,7	22,0	24,0	22,0	27,3	24,0	32,0	30,0
MP50/6	33,0	31,0	30,7	29,0	35,3	34,0	31,0	29,0	40,0	39,0	30,0	29,0	33,0	30,0	30,7	29,0
MP50/7	24,0	24,0	24,0	24,0	24,0	24,0	24,0	24,0	24,0	24,0	24,0	24,0	24,0	24,0	24,0	24,0
MP50/8	5,0	5,0	5,0	5,0	5,0	5,0	5,0	5,0	5,0	5,0	5,0	5,0	5,0	5,0	5,0	5,0
MP50/9	65,7	62,0	63,3	61,0	63,3	62,0	64,3	61,0	65,7	61,0	63,3	61,0	65,7	63,0	74,3	69,0
MP50/10	50,7	50,0	50,7	50,0	55,0	54,0	52,7	52,0	57,3	57,0	54,3	54,0	55,0	52,0	54,3	54,0
MP50/11	14,3	11,0	13,7	11,0	13,3	9,0	15,0	11,0	16,7	15,0	16,3	13,0	16,3	15,0	17,0	16,0
MP50/12	18,0	17,0	16,0	15,0	18,3	18,0	16,0	14,0	18,0	18,0	19,3	16,0	18,3	15,0	18,7	16,0
MP50/13	11,0	11,0	11,0	11,0	11,0	11,0	11,0	11,0	11,3	11,0	11,0	11,0	11,3	11,0	11,3	11,0
MP50/14	32,3	31,0	32,0	31,0	32,3	31,0	32,0	31,0	33,0	33,0	33,0	32,0	33,0	33,0	33,7	33,0
MP50/15	32,3	31,0	34,3	33,0	33,0	32,0	30,7	27,0	33,0	32,0	37,3	37,0	34,0	33,0	36,7	34,0
MP50/16	13,0	13,0	12,0	12,0	12,7	12,0	11,7	11,0	13,3	13,0	12,0	12,0	13,0	13,0	12,0	12,0
MP50/17	21,0	21,0	21,0	21,0	21,0	21,0	21,0	21,0	21,3	21,0	21,0	21,0	21,0	21,0	21,0	21,0
MP50/18	36,0	36,0	36,0	36,0	36,0	36,0	36,0	36,0	36,0	36,0	36,0	36,0	36,0	36,0	36,0	36,0
MP50/19	33,0	32,0	33,0	32,0	33,3	32,0	33,7	33,0	38,3	37,0	34,3	33,0	38,7	37,0	34,3	33,0
MP50/20	56,0	53,0	52,7	52,0	56,3	53,0	51,3	49,0	56,3	53,0	52,7	51,0	58,0	58,0	54,0	52,0
MP50/21	10,0	8,0	10,7	8,0	9,7	9,0	8,0	6,0	12,3	12,0	7,7	7,0	9,7	6,0	11,7	7,0
MP50/22	10,0	10,0	10,0	10,0	10,0	10,0	10,0	10,0	10,0	10,0	10,0	10,0	10,0	10,0	10,0	10,0
MP50/23	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
MP50/24	49,3	47,0	48,0	40,0	48,0	47,0	47,0	41,0	50,7	49,0	48,7	46,0	50,7	49,0	50,0	46,0
MP50/25	58,7	56,0	53,0	53,0	57,0	56,0	53,3	53,0	59,7	59,0	56,0	53,0	59,0	59,0	56,3	53,0
MP50/26	42,7	42,0	42,0	42,0	41,0	40,0	42,0	42,0	45,0	44,0	42,7	42,0	42,3	41,0	43,0	42,0
MP50/27	45,0	45,0	45,0	45,0	45,0	45,0	45,0	45,0	49,0	49,0	45,0	45,0	45,0	45,0	48,0	45,0
MP50/28	29,3	28,0	31,0	31,0	30,0	29,0	30,7	30,0	32,7	32,0	31,3	31,0	34,7	34,0	31,0	31,0
MP50/29	33,7	31,0	31,7	29,0	33,3	31,0	28,7	28,0	41,0	35,0	33,3	30,0	32,3	30,0	33,7	31,0
MP50/30	88,3	88,0	89,0	87,0	88,3	85,0	88,7	87,0	89,7	87,0	91,7	90,0	91,7	88,0	91,0	89,0
MP50/31	89,3	89,0	89,0	89,0	89,7	89,0	89,0	89,0	93,0	92,0	89,0	89,0	90,7	90,0	89,0	89,0
MP50/32	56,3	55,0	54,7	54,0	55,7	53,0	56,0	55,0	58,7	56,0	57,7	57,0	60,0	58,0	57,7	56,0
MP50/33	89,3	88,0	83,7	83,0	86,0	85,0	84,7	83,0	89,7	87,0	93,0	92,0	87,0	85,0	93,0	92,0
MP50/34	107,3	106,0	105,3	104,0	105,7	105,0	104,7	102,0	109,3	103,0	106,7	105,0	114,3	109,0	111,3	108,0
MP50/35	10,0	10,0	10,0	10,0	10,0	10,0	10,0	10,0	10,0	10,0	10,0	10,0	10,0	10,0	10,0	10,0
MP50/36	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0
MP50/37	62,3	60,0	57,0	56,0	60,0	59,0	57,7	57,0	65,0	63,0	59,0	57,0	61,7	60,0	60,3	60,0
MP50/38	58,7	57,0	58,0	56,0	59,7	58,0	57,0	56,0	62,7	60,0	60,7	57,0	61,3	60,0	60,3	58,0
MP50/39	123,3	117,0	107,0	101,0	117,3	114,0	106,3	103,0	129,0	121,0	114,7	111,0	126,7	121,0	106,3	103,0
MP50/40	26,0	25,0	25,3	25,0	25,7	25,0	25,0	25,0	27,0	27,0	25,7	25,0	27,0	27,0	26,3	25,0
MP50/41	26,7	26,0	25,0	25,0	25,7	25,0	26,3	25,0	27,0	27,0	26,0	24,0	26,7	26,0	27,0	27,0
MP50/42	33,7	33,0	31,7	31,0	35,3	35,0	31,7	31,0	35,0	35,0	32,3	31,0	35,7	35,0	31,7	31,0
MP50/43	78,3	73,0	74,3	71,0	77,3	73,0	77,0	73,0	84,7	84,0	74,7	71,0	79,7	79,0	76,3	71,0
MP50/44	22,7	22,0	19,3	18,0	22,0	20,0	22,3	22,0	24,0	23,0	22,7	21,0	24,3	24,0	22,0	21,0
MP50/45	48,3	48,0	46,7	46,0	47,7	47,0	46,7	46,0	52,7	51,0	49,0	49,0	53,0	52,0	48,7	48,0
MP50/46	44,0	43,0	42,7	41,0	47,0	45,0	45,3	44,0	50,7	47,0	47,7	44,0	50,3	48,0	49,3	47,0
MP50/47	5,0	5,0	5,0	5,0	5,0	5,0	5,0	5,0	5,7	5,0	5,0	5,0	7,7	5,0	5,0	5,0
MP50/48	15,3	14,0	16,3	14,0	15,3	15,0	14,3	13,0	22,3	20,0	16,3	14,0	18,7	17,0	17,7	16,0
MP50/49	81,7	79,0	79,7	78,0	78,3	70,0	79,7	77,0	87,3	87,0	84,3	82,0	86,7	85,0	84,7	82,0
MP50/50	118,7	115,0	130,7	122,0	120,7	117,0	116,0	114,0	137,7	132,0	133,0	125,0	134,7	125,0	136,3	129,0
Mittelwert	39,4	38,2	38,3	37,0	39,1	37,9	38,0	36,8	41,9	40,4	39,7	38,3	41,2	39,7	40,4	38,8

Tabelle C.5. – MP50 gelöst per GA unter ZF2 und $\chi^R = 1, \chi^C = 0$, verschiedene Konfigurationen, Zeitlimit = 5 Minuten. Es wird der durchschnittliche und der beste Zielfunktionswert aus drei Optimierungen pro Konfiguration und Instanz angegeben.

C.1. Parameterevaluation des genetischen Algorithmus

	$\chi^{K^*} = 0$								$\chi^{K^*} = 1$							
	$\chi^N = 0$				$\chi^N = 1$				$\chi^N = 0$				$\chi^N = 1$			
	$\chi^S = 1$		$\chi^S = 2$		$\chi^S = 1$		$\chi^S = 2$		$\chi^S = 1$		$\chi^S = 2$		$\chi^S = 1$		$\chi^S = 2$	
	\emptyset	Min.	\emptyset	Min.	\emptyset	Min.	\emptyset	Min.	\emptyset	Min.	\emptyset	Min.	\emptyset	Min.	\emptyset	Min.
MP50/1	12,0	12,0	10,0	10,0	12,0	11,0	10,0	10,0	13,3	12,0	11,3	11,0	13,3	13,0	11,3	11,0
MP50/2	5,3	5,0	5,0	5,0	5,7	5,0	5,0	5,0	7,0	6,0	6,0	6,0	6,7	6,0	5,7	5,0
MP50/3	15,7	15,0	14,7	14,0	15,0	14,0	14,7	14,0	16,0	16,0	15,0	15,0	16,7	16,0	15,0	15,0
MP50/4	7,0	7,0	6,0	6,0	7,0	6,0	6,0	6,0	8,7	8,0	7,0	7,0	8,3	8,0	7,7	7,0
MP50/5	31,0	30,0	31,3	31,0	30,3	30,0	31,0	31,0	39,7	39,0	37,0	36,0	39,0	38,0	36,3	34,0
MP50/6	38,3	37,0	35,3	35,0	38,0	37,0	36,3	35,0	48,0	48,0	44,0	43,0	45,7	44,0	43,3	42,0
MP50/7	25,7	25,0	25,3	25,0	26,0	26,0	25,3	25,0	27,0	27,0	26,7	26,0	27,0	27,0	26,3	26,0
MP50/8	5,0	5,0	5,0	5,0	5,0	5,0	5,0	5,0	5,0	5,0	5,0	5,0	5,0	5,0	5,0	5,0
MP50/9	77,0	76,0	75,7	74,0	75,7	73,0	74,3	72,0	86,0	85,0	82,3	82,0	84,7	84,0	81,3	81,0
MP50/10	61,0	60,0	57,0	56,0	60,7	59,0	57,0	56,0	70,0	69,0	62,7	62,0	68,7	66,0	63,7	63,0
MP50/11	21,0	21,0	19,0	18,0	20,3	20,0	19,3	18,0	27,3	27,0	24,0	23,0	24,7	24,0	22,0	21,0
MP50/12	23,5	22,0	24,3	24,0	25,3	24,0	23,7	23,0	31,7	31,0	29,3	27,0	29,0	28,0	29,3	29,0
MP50/13	15,3	15,0	13,3	12,0	15,3	15,0	13,3	12,0	19,3	19,0	17,0	17,0	18,7	18,0	16,3	16,0
MP50/14	36,3	36,0	34,7	34,0	37,0	36,0	34,7	34,0	40,7	40,0	37,7	37,0	40,3	40,0	35,7	33,0
MP50/15	42,7	41,0	40,3	39,0	41,7	40,0	41,0	40,0	51,0	49,0	48,0	45,0	50,0	48,0	45,7	45,0
MP50/16	16,0	16,0	14,0	13,0	16,0	16,0	14,7	14,0	18,7	18,0	16,3	16,0	18,0	17,0	16,0	16,0
MP50/17	24,0	24,0	21,3	21,0	24,0	23,0	21,3	21,0	29,3	29,0	25,7	25,0	29,0	28,0	25,0	25,0
MP50/18	37,0	37,0	37,5	37,0	38,0	37,0	37,3	37,0	39,7	39,0	39,3	39,0	39,7	39,0	37,7	36,0
MP50/19	47,7	47,0	44,0	43,0	47,7	46,0	43,0	41,0	56,3	52,0	52,0	51,0	52,7	50,0	50,0	49,0
MP50/20	64,0	63,0	58,3	57,0	67,0	66,0	60,0	59,0	78,0	78,0	70,0	67,0	75,3	75,0	67,3	66,0
MP50/21	16,0	16,0	13,3	12,0	15,7	14,0	13,7	13,0	21,3	21,0	18,3	18,0	22,0	22,0	18,3	18,0
MP50/22	10,0	10,0	10,0	10,0	10,0	10,0	10,0	10,0	16,0	16,0	10,7	10,0	13,0	12,0	10,3	10,0
MP50/23	3,3	3,0	2,0	1,0	3,3	3,0	2,7	2,0	12,7	11,0	9,7	8,0	13,0	10,0	10,3	8,0
MP50/24	57,3	55,0	55,0	52,0	57,3	56,0	56,7	56,0	62,3	61,0	59,7	56,0	61,7	59,0	60,3	60,0
MP50/25	70,0	67,0	67,7	66,0	71,3	71,0	67,3	67,0	84,0	83,0	78,7	78,0	78,7	75,0	77,3	77,0
MP50/26	51,7	51,0	48,3	47,0	51,7	51,0	49,0	49,0	63,7	63,0	57,0	55,0	59,3	57,0	55,0	54,0
MP50/27	52,0	50,0	49,7	49,0	52,0	52,0	49,7	49,0	60,7	60,0	53,7	52,0	58,7	56,0	54,3	54,0
MP50/28	34,7	34,0	33,5	33,0	35,7	35,0	33,3	33,0	40,3	40,0	38,7	38,0	40,0	40,0	38,0	37,0
MP50/29	37,3	37,0	36,0	35,0	37,3	37,0	35,7	35,0	46,0	45,0	44,3	43,0	41,7	40,0	39,0	36,0
MP50/30	108,7	107,0	104,3	104,0	106,3	102,0	105,3	104,0	125,0	124,0	119,7	114,0	123,0	121,0	118,0	114,0
MP50/31	102,7	102,0	100,0	98,0	105,0	104,0	100,7	100,0	123,7	122,0	119,0	118,0	121,7	121,0	116,0	115,0
MP50/32	76,7	76,0	73,0	72,0	78,7	77,0	74,0	73,0	92,3	88,0	87,7	87,0	90,0	88,0	87,5	87,0
MP50/33	106,3	105,0	101,3	97,0	104,7	102,0	103,3	102,0	125,7	125,0	123,0	122,0	115,7	113,0	116,0	115,0
MP50/34	126,0	125,0	120,3	119,0	126,0	125,0	119,0	116,0	141,3	140,0	136,0	128,0	133,0	130,0	133,3	126,0
MP50/35	10,0	10,0	10,0	10,0	10,0	10,0	10,0	10,0	11,7	11,0	10,0	10,0	11,0	10,0	10,0	10,0
MP50/36	1,3	1,0	1,0	1,0	1,3	1,0	1,0	1,0	3,3	3,0	1,0	1,0	2,7	2,0	1,0	1,0
MP50/37	72,7	71,0	69,3	68,0	72,3	72,0	69,7	69,0	82,7	81,0	79,0	78,0	81,7	81,0	77,7	76,0
MP50/38	79,0	78,0	75,7	75,0	81,3	79,0	73,7	73,0	97,0	93,0	91,7	89,0	93,3	91,0	92,0	91,0
MP50/39	150,0	149,0	138,0	135,0	159,0	154,0	136,3	134,0	177,0	172,0	161,0	156,0	171,0	168,0	158,7	156,0
MP50/40	27,7	27,0	27,0	27,0	28,0	28,0	26,7	26,0	29,3	29,0	28,0	28,0	29,3	29,0	28,0	28,0
MP50/41	31,0	30,0	29,3	29,0	30,7	29,0	28,3	26,0	38,7	38,0	35,7	35,0	36,0	34,0	35,0	34,0
MP50/42	42,3	42,0	38,3	38,0	41,7	41,0	37,0	36,0	51,0	51,0	44,3	44,0	49,7	48,0	43,3	43,0
MP50/43	102,3	100,0	95,7	94,0	102,0	102,0	94,3	93,0	126,3	122,0	120,7	120,0	114,7	109,0	114,7	107,0
MP50/44	36,0	35,0	31,3	31,0	37,0	36,0	30,3	28,0	47,0	45,0	42,7	42,0	43,0	41,0	38,3	37,0
MP50/45	63,3	62,0	56,0	56,0	62,3	61,0	55,7	54,0	74,7	73,0	65,0	64,0	70,0	68,0	63,3	60,0
MP50/46	62,7	61,0	54,3	53,0	61,7	61,0	56,7	55,0	69,7	68,0	65,0	64,0	68,3	67,0	62,7	60,0
MP50/47	13,3	13,0	10,3	10,0	13,0	13,0	11,3	10,0	17,7	17,0	16,3	14,0	16,7	16,0	15,0	12,0
MP50/48	22,7	22,0	20,7	20,0	23,0	23,0	19,7	18,0	26,3	25,0	24,0	24,0	24,7	24,0	23,3	23,0
MP50/49	103,7	102,0	96,0	93,0	102,0	100,0	101,3	100,0	126,0	124,0	119,7	119,0	125,0	124,0	116,3	113,0
MP50/50	170,0	167,0	171,3	167,0	172,7	169,0	169,7	166,0	215,3	206,0	203,7	198,0	210,7	209,0	203,3	200,0
Mittelwert	48,9	48,0	46,2	45,2	49,2	48,1	46,3	45,3	58,4	57,1	54,4	53,1	56,2	54,8	53,1	51,7

Tabelle C.6. – MP50 gelöst per GA unter ZF2 und $\chi^R = 1$, verschiedene Konfigurationen, Zeitlimit = 5 Minuten, alternative Wahrscheinlichkeiten. Es wird der durchschnittliche und der beste Zielfunktionswert aus drei Optimierungen pro Konfiguration und Instanz angegeben.

C.2. Vergleich mit dem exakten Lösungsverfahren

Instanz Name	MIP			GA 1 Sek.		GA 30 Sek.		GA 1 Min.		GA 2 Min.		GA 5 Min.	
	LB	Obj	Gap	Gap LB	Gap Obj	Gap LB	Gap Obj	Gap LB	Gap Obj	Gap LB	Gap Obj	Gap LB	Gap Obj
EP150/1	53	53	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%
EP150/2	66	66	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%
EP150/3	51	51	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%
EP150/4	45	45	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%
EP150/5	41	41	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%
EP150/6	38	38	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%
EP150/7	58	58	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%
EP150/8	35	35	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%
EP150/9	34	34	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%
EP150/10	50	50	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%
EP150/11	52	52	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%
EP150/12	40	40	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%
EP150/13	37	37	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%
EP150/14	51	51	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%
EP150/15	55	55	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%
EP150/16	52	52	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%
EP150/17	55	55	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%
EP150/18	50	50	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%
EP150/19	47	47	0,0%	2,1%	2,1%	2,1%	2,1%	2,1%	2,1%	2,1%	2,1%	2,1%	2,1%
EP150/20	76	<i>n.v.</i>	<i>n.v.</i>	11,6%	<i>n.v.</i>	10,6%	<i>n.v.</i>	10,6%	<i>n.v.</i>	10,6%	<i>n.v.</i>	10,6%	<i>n.v.</i>
EP150/21	38	38	0,0%	5,0%	5,0%	2,6%	2,6%	2,6%	2,6%	2,6%	2,6%	2,6%	2,6%
EP150/22	50	50	0,0%	2,0%	2,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%
EP150/23	42	42	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%
EP150/24	47	47	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%
EP150/25	44	44	0,0%	2,2%	2,2%	2,2%	2,2%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%
EP150/26	44	44	0,0%	2,2%	2,2%	2,2%	2,2%	2,2%	2,2%	2,2%	2,2%	2,2%	2,2%
EP150/27	35	35	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%
EP150/28	37	37	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%
EP150/29	34	34	0,0%	2,9%	2,9%	2,9%	2,9%	2,9%	2,9%	2,9%	2,9%	2,9%	2,9%
EP150/30	36	36	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%
EP150/31	48	48	0,0%	2,0%	2,0%	2,0%	2,0%	2,0%	2,0%	2,0%	2,0%	2,0%	2,0%
EP150/32	49	49	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%
EP150/33	57	76	25,0%	21,9%	-4,1%	18,6%	-8,6%	17,4%	-10,1%	17,4%	-10,1%	17,4%	-10,1%
EP150/34	35	35	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%
EP150/35	48	48	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%
EP150/36	50	50	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%
EP150/37	45	45	0,0%	2,2%	2,2%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%
EP150/38	40	40	0,0%	2,4%	2,4%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%
EP150/39	44	44	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%
EP150/40	46	46	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%
EP150/41	46	46	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%
EP150/42	48	48	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%
EP150/43	32	32	0,0%	5,9%	5,9%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%
EP150/44	36	36	0,0%	5,3%	5,3%	2,7%	2,7%	2,7%	2,7%	2,7%	2,7%	2,7%	2,7%
EP150/45	39	39	0,0%	9,3%	9,3%	2,5%	2,5%	2,5%	2,5%	2,5%	2,5%	2,5%	2,5%
EP150/46	45	96	53,1%	37,5%	-33,3%	30,8%	-47,7%	30,8%	-47,7%	29,7%	-50,0%	29,7%	-50,0%
EP150/47	47	47	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%
EP150/48	42	42	0,0%	4,5%	4,5%	2,3%	2,3%	2,3%	2,3%	2,3%	2,3%	2,3%	2,3%
EP150/49	54	108	50,0%	28,9%	-42,1%	23,9%	-52,1%	22,9%	-54,3%	22,9%	-54,3%	22,9%	-54,3%
EP150/50	40	40	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%
EP150/51	64	64	0,0%	1,5%	1,5%	1,5%	1,5%	1,5%	1,5%	1,5%	1,5%	1,5%	1,5%
EP150/52	75	75	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%
EP150/53	59	59	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%
EP150/54	61	69	11,6%	21,8%	11,5%	9,0%	-3,0%	9,0%	-3,0%	7,6%	-4,5%	7,6%	-4,5%
EP150/55	65	<i>n.v.</i>	<i>n.v.</i>	21,7%	<i>n.v.</i>	13,3%	<i>n.v.</i>	12,2%	<i>n.v.</i>	12,2%	<i>n.v.</i>	12,2%	<i>n.v.</i>
EP150/56	54	54	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%

Fortsetzung auf nächster Seite...

C.2. Vergleich mit dem exakten Lösungsverfahren

... fortgesetzte Tabelle von vorheriger Seite

Instanz Name	MIP			GA 1 Sek.		GA 30 Sek.		GA 1 Min.		GA 2 Min.		GA 5 Min.	
	LB	Obj	Gap	Gap LB	Gap Obj	Gap LB	Gap Obj	Gap LB	Gap Obj	Gap LB	Gap Obj	Gap LB	Gap Obj
EP150/57	69	86	19,8%	19,8%	0,0%	9,2%	-13,2%	9,2%	-13,2%	8,0%	-14,7%	8,0%	-14,7%
EP150/58	51	51	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%
EP150/59	55	55	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%
EP150/60	57	57	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%
EP150/61	48	48	0,0%	9,4%	9,4%	2,0%	2,0%	2,0%	2,0%	2,0%	2,0%	2,0%	2,0%
EP150/62	75	75	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%
EP150/63	66	66	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%
EP150/64	80	80	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%
EP150/65	53	53	0,0%	1,9%	1,9%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%
EP150/66	58	58	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%
EP150/67	63	63	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%
EP150/68	51	51	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%
EP150/69	44	44	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%
EP150/70	66	66	0,0%	4,3%	4,3%	1,5%	1,5%	1,5%	1,5%	1,5%	1,5%	1,5%	1,5%
EP150/71	68	113	39,8%	24,4%	-25,6%	9,3%	-50,7%	9,3%	-50,7%	9,3%	-50,7%	9,3%	-50,7%
EP150/72	50	50	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%
EP150/73	56	56	0,0%	8,2%	8,2%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%
EP150/74	56	56	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%
EP150/75	64	82	22,0%	15,8%	-7,9%	9,9%	-15,5%	9,9%	-15,5%	9,9%	-15,5%	9,9%	-15,5%
EP150/76	54	54	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%
EP150/77	66	66	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%
EP150/78	62	62	0,0%	12,7%	12,7%	1,6%	1,6%	1,6%	1,6%	1,6%	1,6%	1,6%	1,6%
EP150/79	50	50	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%
EP150/80	53	72	26,4%	30,3%	5,3%	15,9%	-14,3%	15,9%	-14,3%	14,5%	-16,1%	14,5%	-16,1%
EP150/81	52	52	0,0%	3,7%	3,7%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%
EP150/82	49	49	0,0%	3,9%	3,9%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%
EP150/83	37	37	0,0%	5,1%	5,1%	2,6%	2,6%	2,6%	2,6%	2,6%	2,6%	2,6%	2,6%
EP150/84	61	n.v.	n.v.	48,7%	n.v.	43,5%	n.v.	43,0%	n.v.	42,5%	n.v.	41,3%	n.v.
EP150/85	50	102	51,0%	34,2%	-34,2%	24,2%	-54,5%	24,2%	-54,5%	24,2%	-54,5%	24,2%	-54,5%
EP150/86	50	n.v.	n.v.	41,2%	n.v.	30,6%	n.v.	29,6%	n.v.	28,6%	n.v.	28,6%	n.v.
EP150/87	46	65	29,2%	31,3%	3,0%	23,3%	-8,3%	22,0%	-10,2%	22,0%	-10,2%	20,7%	-12,1%
EP150/88	42	42	0,0%	17,6%	17,6%	4,5%	4,5%	4,5%	4,5%	2,3%	2,3%	2,3%	2,3%
EP150/89	51	51	0,0%	1,9%	1,9%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%
EP150/90	50	n.v.	n.v.	38,3%	n.v.	32,4%	n.v.	32,4%	n.v.	32,4%	n.v.	32,4%	n.v.
EP150/91	56	56	0,0%	1,8%	1,8%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%
EP150/92	37	37	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%
EP150/93	50	63	20,6%	25,4%	6,0%	18,0%	-3,3%	16,7%	-5,0%	16,7%	-5,0%	16,7%	-5,0%
EP150/94	46	46	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%
EP150/95	59	n.v.	n.v.	50,8%	n.v.	46,4%	n.v.	45,4%	n.v.	44,9%	n.v.	43,8%	n.v.
EP150/96	50	74	32,4%	16,7%	-23,3%	9,1%	-34,5%	9,1%	-34,5%	7,4%	-37,0%	7,4%	-37,0%
EP150/97	45	45	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%
EP150/98	49	74	33,8%	14,0%	-29,8%	7,5%	-39,6%	5,8%	-42,3%	5,8%	-42,3%	5,8%	-42,3%
EP150/99	46	49	6,1%	16,4%	10,9%	8,0%	2,0%	8,0%	2,0%	6,1%	0,0%	4,2%	-2,1%
EP150/100	48	48	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%
EP150/101	81	81	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%
EP150/102	79	79	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%
EP150/103	67	89	24,7%	18,3%	-8,5%	5,6%	-25,4%	4,3%	-27,1%	4,3%	-27,1%	2,9%	-29,0%
EP150/104	72	n.v.	n.v.	43,7%	n.v.	33,9%	n.v.	32,1%	n.v.	31,4%	n.v.	30,1%	n.v.
EP150/105	72	72	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%
EP150/106	72	72	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%
EP150/107	65	77	15,6%	19,8%	4,9%	7,1%	-10,0%	7,1%	-10,0%	7,1%	-10,0%	5,8%	-11,6%
EP150/108	93	93	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%
EP150/109	76	76	0,0%	2,6%	2,6%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%
EP150/110	65	65	0,0%	1,5%	1,5%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%
EP150/111	64	64	0,0%	3,0%	3,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%
EP150/112	71	109	34,9%	9,0%	-39,7%	1,4%	-51,4%	1,4%	-51,4%	1,4%	-51,4%	1,4%	-51,4%
EP150/113	74	74	0,0%	6,3%	6,3%	1,3%	1,3%	1,3%	1,3%	1,3%	1,3%	1,3%	1,3%
EP150/114	78	78	0,0%	14,3%	14,3%	3,7%	3,7%	2,5%	2,5%	1,3%	1,3%	1,3%	1,3%
EP150/115	66	66	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%

Fortsetzung auf nächster Seite. ...

Anhang C. Ergebnisse numerischer Testläufe - heuristische Lösungsverfahren

... fortgesetzte Tabelle von vorheriger Seite

Instanz Name	MIP			GA 1 Sek.		GA 30 Sek.		GA 1 Min.		GA 2 Min.		GA 5 Min.	
	LB	Obj	Gap	Gap LB	Gap Obj	Gap LB	Gap Obj	Gap LB	Gap Obj	Gap LB	Gap Obj	Gap LB	Gap Obj
EP150/116	70	n.v.	n.v.	41,2%	n.v.	32,0%	n.v.	30,0%	n.v.	29,3%	n.v.	27,8%	n.v.
EP150/117	81	119	31,9%	26,4%	-8,2%	13,8%	-26,6%	12,9%	-28,0%	12,0%	-29,3%	11,0%	-30,8%
EP150/118	83	n.v.	n.v.	47,1%	n.v.	41,5%	n.v.	40,3%	n.v.	39,4%	n.v.	39,0%	n.v.
EP150/119	72	n.v.	n.v.	37,9%	n.v.	31,4%	n.v.	30,1%	n.v.	29,4%	n.v.	28,0%	n.v.
EP150/120	66	66	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%
EP150/121	69	n.v.	n.v.	49,3%	n.v.	46,5%	n.v.	45,2%	n.v.	44,4%	n.v.	43,4%	n.v.
EP150/122	72	n.v.	n.v.	40,0%	n.v.	31,4%	n.v.	29,4%	n.v.	28,0%	n.v.	26,5%	n.v.
EP150/123	77	77	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%
EP150/124	102	106	3,8%	11,3%	7,8%	3,8%	0,0%	3,8%	0,0%	3,8%	0,0%	2,9%	-1,0%
EP150/125	63	63	0,0%	16,0%	16,0%	3,1%	3,1%	1,6%	1,6%	1,6%	1,6%	0,0%	0,0%
EP150/126	64	64	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%
EP150/127	64	64	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%
EP150/128	86	n.v.	n.v.	50,0%	n.v.	45,6%	n.v.	44,5%	n.v.	43,8%	n.v.	43,0%	n.v.
EP150/129	56	69	18,8%	23,3%	5,5%	13,8%	-6,2%	12,5%	-7,8%	12,5%	-7,8%	11,1%	-9,5%
EP150/130	64	64	0,0%	11,1%	11,1%	3,0%	3,0%	1,5%	1,5%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%
EP150/131	59	59	0,0%	7,8%	7,8%	3,3%	3,3%	3,3%	3,3%	3,3%	3,3%	3,3%	3,3%
EP150/132	81	81	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%
EP150/133	56	56	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%
EP150/134	73	73	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%
EP150/135	52	52	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%
EP150/136	48	64	25,0%	30,4%	7,2%	22,6%	-3,2%	21,3%	-4,9%	20,0%	-6,7%	18,6%	-8,5%
EP150/137	64	64	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%
EP150/138	61	n.v.	n.v.	28,2%	n.v.	19,7%	n.v.	18,7%	n.v.	18,7%	n.v.	17,6%	n.v.
EP150/139	71	n.v.	n.v.	29,7%	n.v.	20,2%	n.v.	20,2%	n.v.	19,3%	n.v.	18,4%	n.v.
EP150/140	70	70	0,0%	7,9%	7,9%	1,4%	1,4%	1,4%	1,4%	1,4%	1,4%	1,4%	1,4%
EP150/141	61	61	0,0%	14,1%	14,1%	4,7%	4,7%	3,2%	3,2%	3,2%	3,2%	3,2%	3,2%
EP150/142	68	n.v.	n.v.	55,0%	n.v.	50,7%	n.v.	49,3%	n.v.	48,5%	n.v.	46,9%	n.v.
EP150/143	56	56	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%
EP150/144	67	n.v.	n.v.	48,5%	n.v.	45,5%	n.v.	45,1%	n.v.	44,2%	n.v.	42,7%	n.v.
EP150/145	60	60	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%
EP150/146	84	n.v.	n.v.	50,0%	n.v.	46,8%	n.v.	45,8%	n.v.	45,1%	n.v.	44,4%	n.v.
EP150/147	55	56	1,8%	16,7%	15,2%	6,8%	5,1%	6,8%	5,1%	5,2%	3,4%	5,2%	3,4%
EP150/148	75	n.v.	n.v.	21,1%	n.v.	13,8%	n.v.	12,8%	n.v.	11,8%	n.v.	10,7%	n.v.
EP150/149	63	63	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%
EP150/150	46	n.v.	n.v.	41,0%	n.v.	35,2%	n.v.	35,2%	n.v.	34,3%	n.v.	34,3%	n.v.
Mittelwert	56,7	58,92	3,8%	10,0%	0,2%	6,8%	-3,1%	6,5%	-3,3%	6,3%	-3,5%	6,1%	-3,6%

Tabelle C.7. – EP150 gelöst per GA unter ZF1, Zeitlimit = 5 Minuten, Vergleich mit bester unterer und oberer Schranke des exakten Verfahrens nach 1 Stunde.

C.2. Vergleich mit dem exakten Lösungsverfahren

Instanz Name	MIP			GA 1 Sek.		GA 30 Sek.		GA 1 Min.		GA 2 Min.		GA 5 Min.	
	LB	Obj	Gap	Gap LB	Gap Obj	Gap LB	Gap Obj	Gap LB	Gap Obj	Gap LB	Gap Obj	Gap LB	Gap Obj
MP50/1	10	10	0,0%	9,1%	9,1%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%
MP50/2	4	4	0,0%	33,3%	33,3%	20,0%	20,0%	20,0%	20,0%	20,0%	20,0%	20,0%	20,0%
MP50/3	9	9	0,0%	43,7%	43,7%	25,0%	25,0%	25,0%	25,0%	18,2%	18,2%	18,2%	18,2%
MP50/4	2	3	33,3%	75,0%	62,5%	50,0%	25,0%	50,0%	25,0%	50,0%	25,0%	50,0%	25,0%
MP50/5	13	19	31,6%	65,8%	50,0%	38,1%	9,5%	38,1%	9,5%	35,0%	5,0%	35,0%	5,0%
MP50/6	24	24	0,0%	42,9%	42,9%	14,3%	14,3%	14,3%	14,3%	14,3%	14,3%	14,3%	14,3%
MP50/7	22	23	4,3%	18,5%	14,8%	4,3%	0,0%	4,3%	0,0%	4,3%	0,0%	4,3%	0,0%
MP50/8	5	5	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%
MP50/9	44	69	36,2%	47,0%	16,9%	31,2%	-7,8%	27,9%	-13,1%	27,9%	-13,1%	27,9%	-13,1%
MP50/10	27	44	38,6%	58,5%	32,3%	42,6%	6,4%	42,6%	6,4%	41,3%	4,3%	41,3%	4,3%
MP50/11	5	6	16,7%	78,3%	73,9%	58,3%	50,0%	54,5%	45,5%	54,5%	45,5%	54,5%	45,5%
MP50/12	12	13	7,7%	58,6%	55,2%	14,3%	7,1%	14,3%	7,1%	14,3%	7,1%	14,3%	7,1%
MP50/13	11	11	0,0%	31,2%	31,2%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%
MP50/14	19	30	36,7%	52,5%	25,0%	38,7%	3,2%	38,7%	3,2%	36,7%	0,0%	36,7%	0,0%
MP50/15	8	32	75,0%	84,9%	39,6%	71,4%	-14,3%	69,2%	-23,1%	69,2%	-23,1%	69,2%	-23,1%
MP50/16	7	12	41,7%	63,2%	36,8%	36,4%	-9,1%	30,0%	-20,0%	30,0%	-20,0%	30,0%	-20,0%
MP50/17	17	20	15,0%	34,6%	23,1%	19,0%	4,8%	19,0%	4,8%	19,0%	4,8%	19,0%	4,8%
MP50/18	19	20	5,0%	58,7%	56,5%	34,5%	31,0%	29,6%	25,9%	17,4%	13,0%	17,4%	13,0%
MP50/19	16	31	48,4%	69,2%	40,4%	52,9%	8,8%	50,0%	3,1%	48,4%	0,0%	48,4%	0,0%
MP50/20	31	39	20,5%	56,9%	45,8%	35,4%	18,7%	35,4%	18,7%	34,0%	17,0%	34,0%	17,0%
MP50/21	6	6	0,0%	72,7%	72,7%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%
MP50/22	10	10	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%
MP50/23	0	0	0,0%	100,0%	100,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%
MP50/24	12	54	77,8%	80,0%	10,0%	70,7%	-31,7%	69,2%	-38,5%	68,4%	-42,1%	67,6%	-45,9%
MP50/25	15	58	74,1%	81,9%	30,1%	69,4%	-18,4%	69,4%	-18,4%	68,1%	-23,4%	68,1%	-23,4%
MP50/26	22	37	40,5%	65,1%	41,3%	45,0%	7,5%	43,6%	5,1%	40,5%	0,0%	37,1%	-5,7%
MP50/27	30	43	30,2%	47,4%	24,6%	33,3%	4,4%	31,8%	2,3%	31,8%	2,3%	31,8%	2,3%
MP50/28	21	21	0,0%	53,3%	53,3%	22,2%	22,2%	16,0%	16,0%	16,0%	16,0%	16,0%	16,0%
MP50/29	21	25	16,0%	53,3%	44,4%	25,0%	10,7%	25,0%	10,7%	25,0%	10,7%	25,0%	10,7%
MP50/30	27	112	75,9%	76,9%	4,3%	69,0%	-28,7%	68,6%	-30,2%	68,2%	-31,8%	68,2%	-31,8%
MP50/31	26	116	77,6%	78,9%	5,7%	70,5%	-31,8%	69,4%	-36,5%	69,0%	-38,1%	69,0%	-38,1%
MP50/32	13	52	75,0%	86,2%	44,7%	76,8%	7,1%	76,4%	5,5%	75,5%	1,9%	75,0%	0,0%
MP50/33	35	94	62,8%	71,8%	24,2%	58,8%	-10,6%	58,3%	-11,9%	57,8%	-13,3%	57,3%	-14,6%
MP50/34	45	109	58,7%	68,3%	23,2%	58,3%	-0,9%	57,9%	-1,9%	56,7%	-4,8%	56,3%	-5,8%
MP50/35	10	10	0,0%	9,1%	9,1%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%
MP50/36	1	1	0,0%	50,0%	50,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%
MP50/37	21	56	62,5%	72,4%	26,3%	65,6%	8,2%	63,8%	3,4%	63,2%	1,8%	61,8%	-1,8%
MP50/38	26	57	54,4%	72,3%	39,4%	56,7%	5,0%	53,6%	-1,8%	51,9%	-5,6%	50,0%	-9,6%
MP50/39	20	405	95,1%	87,8%	-147,0%	82,9%	-246,2%	81,7%	-271,6%	81,7%	-271,6%	81,0%	-285,7%
MP50/40	21	22	4,5%	30,0%	26,7%	12,5%	8,3%	12,5%	8,3%	12,5%	8,3%	12,5%	8,3%
MP50/41	7	15	53,3%	81,6%	60,5%	53,3%	0,0%	50,0%	-7,1%	50,0%	-7,1%	46,2%	-15,4%
MP50/42	17	32	46,9%	64,6%	33,3%	46,9%	0,0%	45,2%	-3,2%	43,3%	-6,7%	41,4%	-10,3%
MP50/43	19	80	76,2%	83,2%	29,2%	77,1%	3,6%	75,9%	-1,3%	75,0%	-5,3%	72,9%	-14,3%
MP50/44	10	10	0,0%	77,3%	77,3%	37,5%	37,5%	33,3%	33,3%	28,6%	28,6%	23,1%	23,1%
MP50/45	10	48	79,2%	84,6%	26,2%	77,8%	-6,7%	77,3%	-9,1%	76,7%	-11,6%	76,7%	-11,6%
MP50/46	12	41	70,7%	81,2%	35,9%	73,9%	10,9%	73,3%	8,9%	72,1%	4,7%	71,4%	2,4%
MP50/47	5	5	0,0%	75,0%	75,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%
MP50/48	13	13	0,0%	48,0%	48,0%	7,1%	7,1%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%
MP50/49	26	82	68,3%	78,7%	32,8%	64,9%	-10,8%	62,9%	-17,1%	61,8%	-20,6%	61,2%	-22,4%
MP50/50	21	132	84,1%	90,2%	38,3%	84,2%	0,8%	83,2%	-5,6%	82,1%	-12,8%	80,7%	-21,1%
Mittelwert	16,54	43,4	33,9%	60,1%	33,5%	38,5%	-1,2%	37,2%	-4,2%	36,2%	-6,0%	35,7%	-7,5%

Tabelle C.8. – MP50 gelöst per GA unter ZF2, Zeitlimit = 5 Minuten, Vergleich mit bester unterer und oberer Schranke des exakten Verfahrens nach 1 oder 12 Stunden.

Anhang C. Ergebnisse numerischer Testläufe - heuristische Lösungsverfahren

Instanz Name	MIP			GA 1 Sek.		GA 30 Sek.		GA 1 Min.		GA 2 Min.		GA 5 Min.	
	LB	Obj	Gap	Gap LB	Gap Obj	Gap LB	Gap Obj	Gap LB	Gap Obj	Gap LB	Gap Obj	Gap LB	Gap Obj
MP50/1	9,28	9,28	0,0%	20,5%	20,5%	2,6%	2,6%	2,3%	2,3%	2,3%	2,3%	2,3%	2,3%
MP50/2	3,53	3,53	0,0%	46,7%	46,7%	21,9%	21,9%	20,7%	20,7%	19,6%	19,6%	19,0%	19,0%
MP50/3	8,69	8,69	0,0%	53,6%	53,6%	31,1%	31,1%	31,0%	31,0%	30,9%	30,9%	30,8%	30,8%
MP50/4	2,52	2,54	0,8%	74,3%	74,1%	46,6%	46,2%	46,0%	45,6%	45,1%	44,7%	44,9%	44,4%
MP50/5	10,45	22,23	53,0%	74,8%	46,4%	53,2%	0,5%	53,2%	0,4%	51,5%	-3,2%	51,5%	-3,2%
MP50/6	22,45	24,46	8,2%	51,8%	47,4%	20,8%	13,8%	20,7%	13,6%	20,6%	13,5%	20,6%	13,4%
MP50/7	22,04	22,09	0,2%	22,2%	22,1%	4,8%	4,6%	0,5%	0,3%	0,5%	0,3%	0,5%	0,3%
MP50/8	4,21	4,21	0,0%	5,6%	5,6%	0,5%	0,5%	0,2%	0,2%	0,2%	0,2%	0,0%	0,0%
MP50/9	43,46	70,48	38,3%	51,3%	21,0%	37,5%	-1,4%	34,8%	-5,8%	34,7%	-5,9%	32,7%	-9,2%
MP50/10	26,07	50,35	48,2%	59,2%	21,3%	52,3%	7,9%	46,5%	-3,2%	45,4%	-5,5%	44,1%	-7,9%
MP50/11	4,69	5,72	18,0%	81,0%	76,9%	73,6%	67,8%	63,6%	55,6%	60,4%	51,6%	56,9%	47,5%
MP50/12	11,82	13,62	13,2%	65,9%	60,7%	43,1%	34,5%	29,7%	19,0%	20,4%	8,3%	20,2%	8,1%
MP50/13	10,47	10,47	0,0%	41,4%	41,4%	1,0%	1,0%	0,6%	0,6%	0,2%	0,2%	0,2%	0,2%
MP50/14	16,72	27,77	39,8%	60,0%	33,6%	53,4%	22,6%	50,5%	17,7%	47,3%	12,5%	45,6%	9,6%
MP50/15	7,33	24,06	69,5%	85,8%	53,3%	80,9%	37,1%	77,4%	25,9%	75,4%	19,4%	73,5%	12,9%
MP50/16	6,37	9,35	31,9%	66,4%	50,7%	56,8%	36,6%	50,4%	27,2%	50,0%	26,6%	45,5%	20,0%
MP50/17	15,59	17,48	10,8%	54,1%	48,5%	25,4%	16,4%	25,3%	16,2%	25,2%	16,1%	25,1%	16,0%
MP50/18	16,88	20,86	19,1%	60,5%	51,2%	55,4%	44,9%	48,6%	36,4%	46,9%	34,4%	39,3%	25,0%
MP50/19	14,53	29,08	50,0%	71,8%	43,6%	68,6%	37,1%	64,0%	28,0%	63,2%	26,3%	57,0%	13,9%
MP50/20	28,17	45,92	38,7%	58,0%	31,6%	50,8%	19,7%	47,5%	14,4%	44,3%	9,2%	43,9%	8,5%
MP50/21	5,03	5,04	0,2%	75,4%	75,3%	46,0%	45,9%	24,1%	24,0%	10,5%	10,3%	9,4%	9,2%
MP50/22	8,82	8,82	0,0%	28,9%	28,9%	2,5%	2,5%	2,1%	2,1%	0,3%	0,3%	0,0%	0,0%
MP50/23	-0,95	-0,95	0,0%	107,5%	107,5%	-252%	-252%	-102%	-102%	-61,0%	-61,0%	-28,4%	-28,4%
MP50/24	10,08	48,98	79,4%	83,6%	20,4%	79,1%	-1,3%	77,3%	-10,5%	75,7%	-18,1%	74,5%	-24,0%
MP50/25	11,95	52,41	77,2%	84,8%	33,4%	82,6%	23,5%	80,2%	13,2%	78,1%	4,1%	76,3%	-3,8%
MP50/26	19,19	43,45	55,8%	69,9%	31,9%	58,9%	7,0%	56,1%	0,6%	53,9%	-4,3%	52,8%	-7,0%
MP50/27	29,65	45,38	34,7%	47,7%	19,9%	37,8%	4,8%	36,4%	2,7%	33,6%	-1,6%	33,4%	-2,0%
MP50/28	18,18	21,93	17,1%	57,2%	48,4%	38,1%	25,3%	33,5%	19,8%	30,5%	16,2%	30,4%	16,1%
MP50/29	18,79	23,89	21,3%	60,4%	49,6%	41,4%	25,5%	38,8%	22,2%	36,4%	19,2%	36,2%	18,8%
MP50/30	25,15	92,45	72,8%	78,8%	22,2%	73,7%	3,5%	71,7%	-4,1%	70,7%	-7,7%	70,4%	-8,9%
MP50/31	26,43	144,27	81,7%	78,8%	-15,8%	72,1%	-52,4%	70,9%	-59,0%	70,5%	-61,1%	70,2%	-62,8%
MP50/32	6,3	73,78	91,5%	93,7%	25,7%	91,0%	-5,6%	89,8%	-19,5%	89,1%	-27,4%	88,7%	-32,4%
MP50/33	25,03	91,43	72,6%	79,2%	24,1%	73,8%	4,4%	72,3%	-1,2%	71,1%	-5,4%	70,1%	-9,3%
MP50/34	45,89	117,43	60,9%	64,8%	9,9%	62,9%	5,0%	60,0%	-2,4%	58,6%	-5,9%	57,3%	-9,3%
MP50/35	9,67	9,67	0,0%	25,3%	25,3%	1,3%	1,3%	1,1%	1,1%	0,8%	0,8%	0,1%	0,1%
MP50/36	0,8	0,8	0,0%	79,5%	79,5%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%
MP50/37	16,2	67,21	75,9%	79,1%	13,4%	79,1%	13,4%	76,4%	2,1%	74,6%	-5,4%	73,3%	-10,6%
MP50/38	25,69	53,3	51,8%	71,4%	40,6%	66,9%	31,4%	62,6%	22,5%	59,0%	15,0%	56,9%	10,6%
MP50/39	21,03	396,25	94,7%	86,4%	-156,0%	84,6%	-189,8%	83,4%	-212,4%	82,3%	-233,4%	81,7%	-245,0%
MP50/40	20,74	21,7	4,4%	33,0%	29,9%	16,5%	12,6%	16,4%	12,5%	16,4%	12,5%	16,2%	12,4%
MP50/41	5,75	18,57	69,0%	84,4%	49,8%	77,8%	28,2%	73,7%	14,9%	67,8%	-4,0%	63,8%	-16,8%
MP50/42	16,14	24,3	33,6%	66,0%	48,8%	51,7%	27,3%	50,3%	25,1%	46,8%	19,9%	43,3%	14,7%
MP50/43	19,69	94,15	79,1%	82,2%	15,0%	81,7%	12,6%	80,0%	4,5%	77,3%	-8,5%	75,9%	-15,2%
MP50/44	9,3	9,3	0,0%	78,3%	78,3%	55,3%	55,3%	44,4%	44,4%	40,8%	40,8%	40,2%	40,2%
MP50/45	10,94	36,51	70,0%	84,3%	47,8%	81,4%	38,0%	79,3%	31,0%	77,2%	23,8%	76,7%	22,2%
MP50/46	10,72	36,31	70,5%	83,7%	44,9%	81,7%	38,1%	79,3%	29,7%	77,1%	22,3%	76,5%	20,5%
MP50/47	4,4	4,4	0,0%	73,5%	73,5%	42,6%	42,6%	22,0%	22,0%	4,3%	4,3%	2,7%	2,7%
MP50/48	12,18	12,18	0,0%	50,8%	50,8%	15,5%	15,5%	8,8%	8,8%	1,1%	1,1%	0,7%	0,7%
MP50/49	18,01	89,22	79,8%	85,1%	26,3%	83,2%	16,8%	81,0%	5,9%	77,8%	-10,1%	75,5%	-21,4%
MP50/50	8,7	178,53	95,1%	95,7%	12,4%	94,8%	-6,7%	94,0%	-22,7%	93,6%	-31,7%	93,2%	-39,9%
Mittelwert	14,9	44,9	36,6%	65,5%	36,2%	44,1%	8,4%	43,5%	4,4%	42,0%	0,1%	41,4%	-2,3%

Tabelle C.9. – MP50 gelöst per GA unter ZF3, Zeitlimit = 5 Minuten, Vergleich mit bester unterer und oberer Schranke des exakten Verfahrens nach 1 oder 12 Stunden.

C.2. Vergleich mit dem exakten Lösungsverfahren

Instanz Name	MIP			GA 1 Sek.		GA 30 Sek.		GA 1 Min.		GA 2 Min.		GA 5 Min.	
	LB	Obj	Gap	Gap	LB Gap Obj	Gap	LB Gap Obj	Gap	LB Gap Obj	Gap	LB Gap Obj	Gap	LB Gap Obj
MP250/1	9	9	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%
MP250/2	10	10	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%
MP250/3	4	4	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%
MP250/4	0	0	0%	100%	100%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%
MP250/5	9	9	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%
MP250/6	8	8	0%	62%	62%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%
MP250/7	8	8	0%	62%	62%	20%	20%	20%	20%	20%	20%	11%	11%
MP250/8	14	29	52%	63%	24%	50%	-4%	50%	-4%	48%	-7%	48%	-7%
MP250/9	19	42	55%	57%	5%	39%	-35%	39%	-35%	37%	-40%	37%	-40%
MP250/10	22	22	0%	12%	12%	4%	4%	4%	4%	4%	4%	4%	4%
MP250/11	13	13	0%	28%	28%	19%	19%	19%	19%	19%	19%	19%	19%
MP250/12	14	78	82%	75%	-42%	67%	-86%	67%	-86%	67%	-86%	67%	-86%
MP250/13	21	64	67%	69%	6%	57%	-31%	57%	-31%	56%	-33%	56%	-33%
MP250/14	13	13	0%	13%	13%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%
MP250/15	15	15	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%
MP250/16	25	26	4%	7%	4%	4%	0%	4%	0%	4%	0%	4%	0%
MP250/17	8	8	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%
MP250/18	3	3	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%
MP250/19	7	7	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%
MP250/20	18	40	55%	63%	18%	51%	-8%	50%	-11%	49%	-14%	44%	-25%
MP250/21	9	32	72%	76%	14%	65%	-23%	65%	-23%	65%	-23%	65%	-23%
MP250/22	14	142	90%	84%	-58%	80%	-100%	79%	-112%	79%	-115%	78%	-122%
MP250/23	10	10	0%	23%	23%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%
MP250/24	9	67	87%	82%	-31%	76%	-81%	76%	-81%	76%	-81%	76%	-81%
MP250/25	23	43	47%	57%	20%	45%	-2%	45%	-2%	45%	-2%	45%	-2%
MP250/26	0	69	100%	100%	-33%	100%	-130%	100%	-165%	100%	-200%	100%	-214%
MP250/27	0	51	100%	100%	-31%	100%	-112%	100%	-112%	100%	-122%	100%	-122%
MP250/28	16	41	61%	65%	11%	50%	-28%	48%	-32%	48%	-32%	48%	-32%
MP250/29	14	129	89%	80%	-84%	74%	-143%	72%	-158%	71%	-163%	70%	-174%
MP250/30	17	90	81%	76%	-27%	70%	-61%	69%	-64%	69%	-67%	68%	-70%
MP250/31	6	6	0%	73%	73%	25%	25%	25%	25%	25%	25%	25%	25%
MP250/32	7	96	93%	88%	-68%	83%	-129%	83%	-134%	83%	-134%	82%	-140%
MP250/33	5	86	94%	93%	-15%	90%	-76%	89%	-83%	89%	-91%	89%	-91%
MP250/34	6	64	91%	91%	3%	88%	-23%	88%	-28%	88%	-28%	88%	-31%
MP250/35	0	0	0%	100%	100%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%
MP250/36	2	2	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%
MP250/37	1	1	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%
MP250/38	5	5	0%	37%	37%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%
MP250/39	22	30	27%	49%	30%	31%	6%	31%	6%	31%	6%	31%	6%
MP250/40	12	13	8%	45%	41%	25%	19%	20%	13%	20%	13%	20%	13%
MP250/41	8	113	93%	89%	-57%	84%	-131%	83%	-146%	82%	-151%	82%	-157%
MP250/42	17	84	80%	75%	-24%	67%	-65%	67%	-65%	66%	-68%	66%	-68%
MP250/43	3	16	81%	88%	36%	79%	-14%	75%	-33%	75%	-33%	73%	-45%
MP250/44	13	13	0%	50%	50%	19%	19%	19%	19%	19%	19%	19%	19%
MP250/45	8	33	76%	87%	46%	78%	8%	78%	8%	78%	8%	78%	8%
MP250/46	0	20	100%	100%	29%	100%	-33%	100%	-54%	100%	-82%	100%	-122%
MP250/47	0	20	100%	100%	37%	100%	-25%	100%	-25%	100%	-43%	100%	-43%
MP250/48	16	32	50%	67%	35%	47%	-7%	47%	-7%	43%	-14%	43%	-14%
MP250/49	16	40	60%	62%	5%	47%	-33%	47%	-33%	45%	-38%	45%	-38%
MP250/50	8	8	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%
MP250/51	8	8	0%	11%	11%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%
MP250/52	5	5	0%	29%	29%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%
MP250/53	6	21	71%	81%	32%	68%	-11%	67%	-17%	65%	-24%	65%	-24%
MP250/54	20	48	58%	55%	-9%	37%	-50%	37%	-50%	35%	-55%	35%	-55%
MP250/55	3	3	0%	73%	73%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%
MP250/56	8	8	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%
MP250/57	5	8	37%	78%	65%	58%	33%	58%	33%	58%	33%	55%	27%
MP250/58	13	13	0%	38%	38%	13%	13%	13%	13%	13%	13%	13%	13%
MP250/59	1	46	98%	97%	-21%	95%	-119%	95%	-142%	95%	-142%	94%	-156%

Fortsetzung auf nächster Seite...

Anhang C. Ergebnisse numerischer Testläufe - heuristische Lösungsverfahren

... fortgesetzte Tabelle von vorheriger Seite

Instanz Name	MIP			GA 1 Sek.		GA 30 Sek.		GA 1 Min.		GA 2 Min.		GA 5 Min.	
	LB	Obj	Gap	Gap LB	Gap Obj	Gap LB	Gap Obj	Gap LB	Gap Obj	Gap LB	Gap Obj	Gap LB	Gap Obj
MP250/60	6	67	91%	83%	-86%	77%	-158%	75%	-179%	75%	-179%	75%	-179%
MP250/61	13	44	70%	61%	-33%	50%	-69%	48%	-76%	48%	-76%	48%	-76%
MP250/62	15	32	53%	67%	29%	52%	-3%	52%	-3%	52%	-3%	52%	-3%
MP250/63	4	64	94%	93%	-10%	91%	-42%	90%	-52%	90%	-52%	90%	-56%
MP250/64	3	40	92%	92%	-8%	86%	-82%	86%	-90%	85%	-100%	85%	-100%
MP250/65	0	38	100%	100%	12%	100%	-58%	100%	-65%	100%	-73%	100%	-81%
MP250/66	8	98	92%	90%	-27%	78%	-172%	77%	-180%	77%	-180%	76%	-188%
MP250/67	5	33	85%	90%	37%	78%	-43%	77%	-50%	76%	-57%	72%	-83%
MP250/68	11	15	27%	71%	61%	48%	29%	48%	29%	42%	21%	42%	21%
MP250/69	9	60	85%	82%	-20%	64%	-140%	61%	-161%	59%	-173%	59%	-173%
MP250/70	12	200	94%	83%	-178%	74%	-326%	74%	-326%	74%	-326%	72%	-365%
MP250/71	11	233	95%	85%	-228%	78%	-376%	77%	-396%	76%	-407%	76%	-407%
MP250/72	7	89	92%	86%	-75%	81%	-147%	80%	-154%	79%	-162%	79%	-162%
MP250/73	7	127	94%	87%	-140%	74%	-370%	70%	-452%	65%	-535%	63%	-568%
MP250/74	0	0	0%	100%	100%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%
MP250/75	9	58	84%	84%	0%	75%	-61%	74%	-66%	74%	-66%	74%	-66%
MP250/76	27	313	91%	76%	-179%	70%	-248%	69%	-260%	68%	-273%	68%	-273%
MP250/77	23	23	0%	15%	15%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%
MP250/78	0	9	100%	100%	76%	100%	44%	100%	44%	100%	44%	100%	44%
MP250/79	10	10	0%	50%	50%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%
MP250/80	6	6	0%	57%	57%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%
MP250/81	3	24	87%	92%	40%	83%	-33%	80%	-60%	80%	-60%	80%	-60%
MP250/82	14	37	62%	69%	18%	52%	-28%	50%	-32%	48%	-37%	48%	-37%
MP250/83	9	52	83%	80%	-16%	61%	-126%	55%	-160%	53%	-174%	47%	-206%
MP250/84	13	13	0%	50%	50%	7%	7%	0%	0%	0%	0%	0%	0%
MP250/85	42	64	34%	43%	14%	25%	-14%	25%	-14%	25%	-14%	25%	-14%
MP250/86	25	33	24%	52%	37%	26%	3%	24%	0%	24%	0%	22%	-3%
MP250/87	25	31	19%	40%	26%	24%	6%	22%	3%	22%	3%	22%	3%
MP250/88	3	4	25%	77%	69%	40%	20%	40%	20%	40%	20%	40%	20%
MP250/89	2	5	60%	82%	55%	67%	17%	67%	17%	67%	17%	67%	17%
MP250/90	19	56	66%	66%	0%	56%	-30%	56%	-30%	56%	-30%	56%	-30%
MP250/91	19	107	82%	77%	-32%	67%	-88%	65%	-95%	64%	-102%	63%	-110%
MP250/92	12	41	71%	74%	11%	57%	-46%	54%	-58%	54%	-58%	54%	-58%
MP250/93	6	7	14%	84%	81%	60%	53%	60%	53%	60%	53%	60%	53%
MP250/94	9	9	0%	31%	31%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%
MP250/95	9	9	0%	36%	36%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%
MP250/96	2	2	0%	87%	87%	33%	33%	33%	33%	0%	0%	0%	0%
MP250/97	0	0	0%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%
MP250/98	6	6	0%	73%	73%	40%	40%	33%	33%	33%	33%	33%	33%
MP250/99	20	20	0%	47%	47%	23%	23%	23%	23%	23%	23%	23%	23%
MP250/100	14	55	75%	81%	27%	70%	-17%	70%	-17%	70%	-17%	67%	-28%
MP250/101	3	65	95%	91%	-97%	86%	-210%	86%	-210%	86%	-210%	86%	-210%
MP250/102	3	40	92%	92%	-3%	85%	-100%	83%	-122%	82%	-135%	81%	-150%
MP250/103	31	451	93%	81%	-182%	77%	-234%	77%	-242%	76%	-247%	76%	-252%
MP250/104	19	71	73%	76%	9%	61%	-45%	61%	-45%	61%	-45%	61%	-45%
MP250/105	15	95	84%	79%	-30%	68%	-102%	68%	-102%	67%	-111%	67%	-111%
MP250/106	1	1	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%
MP250/107	4	4	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%
MP250/108	2	2	0%	91%	91%	50%	50%	33%	33%	33%	33%	33%	33%
MP250/109	10	10	0%	67%	67%	23%	23%	9%	9%	9%	9%	0%	0%
MP250/110	2	2	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%
MP250/111	0	0	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%
MP250/112	0	14	100%	100%	56%	100%	18%	100%	7%	100%	0%	100%	0%
MP250/113	18	32	44%	68%	43%	38%	-10%	36%	-14%	36%	-14%	36%	-14%
MP250/114	11	177	94%	88%	-97%	82%	-195%	80%	-216%	80%	-222%	80%	-228%
MP250/115	35	202	83%	75%	-46%	65%	-100%	65%	-104%	64%	-108%	64%	-110%
MP250/116	38	284	87%	72%	-109%	62%	-184%	61%	-190%	61%	-193%	61%	-193%
MP250/117	31	490	94%	86%	-121%	82%	-182%	80%	-216%	79%	-238%	77%	-266%
MP250/118	31	95	67%	63%	-14%	45%	-70%	42%	-79%	42%	-79%	42%	-79%

Fortsetzung auf nächster Seite...

C.2. Vergleich mit dem exakten Lösungsverfahren

... fortgesetzte Tabelle von vorheriger Seite

Instanz Name	MIP			GA 1 Sek.		GA 30 Sek.		GA 1 Min.		GA 2 Min.		GA 5 Min.	
	LB	Obj	Gap	Gap LB	Gap Obj	Gap LB	Gap Obj	Gap LB	Gap Obj	Gap LB	Gap Obj	Gap LB	Gap Obj
MP250/119	14	93	85%	80%	-31%	71%	-94%	70%	-102%	69%	-107%	68%	-111%
MP250/120	2	124	98%	n.v.	n.v.	n.v.	n.v.	n.v.	n.v.	n.v.	n.v.	n.v.	n.v.
MP250/121	5	5	0%	83%	83%	17%	17%	17%	17%	0%	0%	0%	0%
MP250/122	29	30	3%	41%	39%	12%	9%	12%	9%	12%	9%	12%	9%
MP250/123	27	28	4%	41%	39%	10%	7%	7%	3%	7%	3%	7%	3%
MP250/124	23	24	4%	28%	25%	12%	8%	12%	8%	12%	8%	12%	8%
MP250/125	13	14	7%	52%	48%	13%	7%	13%	7%	13%	7%	13%	7%
MP250/126	15	19	21%	52%	39%	21%	0%	21%	0%	21%	0%	21%	0%
MP250/127	18	n.v.	n.v.	89%	n.v.	84%	n.v.	83%	n.v.	82%	n.v.	82%	n.v.
MP250/128	19	25	24%	39%	19%	21%	-4%	21%	-4%	21%	-4%	21%	-4%
MP250/129	17	17	0%	37%	37%	6%	6%	6%	6%	6%	6%	6%	6%
MP250/130	20	20	0%	29%	29%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%
MP250/131	10	38	74%	71%	-9%	37%	-137%	33%	-153%	33%	-153%	33%	-153%
MP250/132	24	25	4%	40%	37%	8%	4%	8%	4%	8%	4%	8%	4%
MP250/133	83	n.v.	n.v.	n.v.	n.v.	n.v.	n.v.	n.v.	n.v.	n.v.	n.v.	n.v.	n.v.
MP250/134	55	n.v.	n.v.	n.v.	n.v.	n.v.	n.v.	n.v.	n.v.	n.v.	n.v.	n.v.	n.v.
MP250/135	2	54	96%	96%	0%	91%	-135%	91%	-145%	91%	-145%	91%	-145%
MP250/136	0	34	100%	100%	31%	100%	-79%	100%	-100%	100%	-100%	100%	-100%
MP250/137	13	200	93%	82%	-178%	73%	-308%	72%	-335%	70%	-365%	69%	-376%
MP250/138	14	183	92%	81%	-144%	69%	-307%	67%	-326%	66%	-346%	64%	-369%
MP250/139	10	35	71%	80%	31%	67%	-17%	64%	-25%	62%	-35%	60%	-40%
MP250/140	9	72	87%	79%	-67%	61%	-213%	59%	-227%	59%	-227%	59%	-227%
MP250/141	45	175	74%	63%	-42%	50%	-94%	49%	-97%	49%	-99%	48%	-103%
MP250/142	33	264	87%	74%	-105%	64%	-190%	61%	-211%	61%	-214%	59%	-226%
MP250/143	18	31	42%	59%	30%	36%	-11%	33%	-15%	33%	-15%	28%	-24%
MP250/144	13	37	65%	73%	24%	61%	-12%	59%	-16%	58%	-19%	58%	-19%
MP250/145	37	49	24%	47%	30%	29%	6%	29%	6%	27%	4%	27%	4%
MP250/146	9	19	53%	80%	59%	59%	14%	55%	5%	55%	5%	53%	0%
MP250/147	15	n.v.	n.v.	88%	n.v.	82%	n.v.	81%	n.v.	81%	n.v.	80%	n.v.
MP250/148	20	351	94%	85%	-170%	77%	-303%	76%	-318%	76%	-328%	76%	-328%
MP250/149	2	42	95%	95%	-14%	87%	-162%	87%	-180%	87%	-180%	85%	-223%
MP250/150	0	0	0%	100%	100%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%
MP250/151	10	11	9%	79%	77%	71%	69%	68%	65%	64%	61%	60%	56%
MP250/152	3	41	93%	96%	41%	90%	-32%	89%	-46%	87%	-71%	86%	-86%
MP250/153	20	325	94%	81%	-210%	73%	-339%	73%	-345%	72%	-358%	71%	-378%
MP250/154	23	187	88%	79%	-73%	71%	-140%	70%	-143%	68%	-160%	67%	-167%
MP250/155	25	n.v.	n.v.	n.v.	n.v.	n.v.	n.v.	n.v.	n.v.	n.v.	n.v.	n.v.	n.v.
MP250/156	28	n.v.	n.v.	84%	n.v.	81%	n.v.	80%	n.v.	79%	n.v.	79%	n.v.
MP250/157	19	31	39%	68%	48%	44%	9%	39%	0%	37%	-3%	32%	-11%
MP250/158	52	n.v.	n.v.	80%	n.v.	74%	n.v.	73%	n.v.	72%	n.v.	72%	n.v.
MP250/159	10	332	97%	90%	-219%	87%	-331%	86%	-355%	86%	-361%	86%	-381%
MP250/160	11	455	98%	88%	-406%	81%	-698%	80%	-712%	80%	-743%	79%	-758%
MP250/161	5	123	96%	94%	-60%	89%	-162%	89%	-173%	88%	-186%	88%	-186%
MP250/162	17	17	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%
MP250/163	0	95	100%	100%	-46%	100%	-188%	100%	-188%	100%	-206%	100%	-206%
MP250/164	0	82	100%	100%	-17%	100%	-156%	100%	-204%	100%	-215%	100%	-228%
MP250/165	1	1	0%	94%	94%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%
MP250/166	5	5	0%	62%	62%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%
MP250/167	23	47	51%	64%	27%	36%	-31%	34%	-34%	32%	-38%	32%	-38%
MP250/168	17	395	96%	n.v.	n.v.	n.v.	n.v.	n.v.	n.v.	n.v.	n.v.	n.v.	n.v.
MP250/169	6	63	90%	90%	-5%	81%	-103%	79%	-117%	79%	-117%	79%	-125%
MP250/170	23	n.v.	n.v.	84%	n.v.	80%	n.v.	79%	n.v.	78%	n.v.	77%	n.v.
MP250/171	3	8	62%	89%	70%	67%	11%	62%	0%	62%	0%	62%	0%
MP250/172	0	13	100%	100%	46%	100%	-30%	100%	-30%	100%	-30%	100%	-30%
MP250/173	10	n.v.	n.v.	94%	n.v.	91%	n.v.	91%	n.v.	90%	n.v.	90%	n.v.
MP250/174	10	n.v.	n.v.	93%	n.v.	91%	n.v.	90%	n.v.	90%	n.v.	90%	n.v.
MP250/175	92	n.v.	n.v.	74%	n.v.	71%	n.v.	70%	n.v.	68%	n.v.	68%	n.v.
MP250/176	62	n.v.	n.v.	84%	n.v.	80%	n.v.	79%	n.v.	78%	n.v.	77%	n.v.
MP250/177	1	16	94%	96%	36%	93%	-14%	93%	-14%	92%	-23%	92%	-23%

Fortsetzung auf nächster Seite. ...

Anhang C. Ergebnisse numerischer Testläufe - heuristische Lösungsverfahren

... fortgesetzte Tabelle von vorheriger Seite

Instanz Name	MIP			GA 1 Sek.		GA 30 Sek.		GA 1 Min.		GA 2 Min.		GA 5 Min.	
	LB	Obj	Gap	Gap LB	Gap Obj	Gap LB	Gap Obj	Gap LB	Gap Obj	Gap LB	Gap Obj	Gap LB	Gap Obj
MP250/178	10	278	96%	90%	-187%	84%	-348%	83%	-379%	83%	-379%	82%	-388%
MP250/179	45	424	89%	76%	-129%	66%	-221%	65%	-231%	64%	-239%	63%	-248%
MP250/180	20	99	80%	83%	17%	71%	-46%	70%	-50%	69%	-52%	69%	-52%
MP250/181	25	207	88%	78%	-85%	66%	-180%	64%	-200%	64%	-200%	62%	-214%
MP250/182	16	153	90%	83%	-66%	71%	-178%	70%	-183%	70%	-189%	69%	-194%
MP250/183	41	n.v.	n.v.	77%	n.v.	66%	n.v.	66%	n.v.	65%	n.v.	65%	n.v.
MP250/184	16	108	85%	81%	-29%	67%	-120%	66%	-130%	65%	-135%	64%	-145%
MP250/185	22	223	90%	78%	-125%	69%	-219%	67%	-233%	66%	-248%	65%	-260%
MP250/186	13	127	90%	87%	-30%	81%	-84%	80%	-92%	79%	-102%	79%	-108%
MP250/187	22	262	92%	84%	-91%	78%	-165%	75%	-201%	73%	-216%	73%	-220%
MP250/188	10	10	0%	44%	44%	17%	17%	17%	17%	0%	0%	0%	0%
MP250/189	1	46	98%	98%	26%	97%	-35%	97%	-53%	96%	-64%	96%	-84%
MP250/190	7	381	98%	94%	-215%	91%	-376%	91%	-415%	91%	-415%	90%	-444%
MP250/191	2	39	95%	96%	22%	90%	-95%	88%	-129%	87%	-160%	85%	-200%
MP250/192	7	7	0%	82%	82%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%
MP250/193	21	n.v.	n.v.	90%	n.v.	85%	n.v.	83%	n.v.	83%	n.v.	82%	n.v.
MP250/194	8	n.v.	n.v.	96%	n.v.	94%	n.v.	94%	n.v.	94%	n.v.	94%	n.v.
MP250/195	37	n.v.	n.v.	82%	n.v.	74%	n.v.	72%	n.v.	71%	n.v.	70%	n.v.
MP250/196	59	n.v.	n.v.	76%	n.v.	61%	n.v.	61%	n.v.	61%	n.v.	60%	n.v.
MP250/197	29	n.v.	n.v.	n.v.	n.v.	n.v.	n.v.	n.v.	n.v.	n.v.	n.v.	n.v.	n.v.
MP250/198	46	n.v.	n.v.	n.v.	n.v.	n.v.	n.v.	n.v.	n.v.	n.v.	n.v.	n.v.	n.v.
MP250/199	12	n.v.	n.v.	91%	n.v.	86%	n.v.	85%	n.v.	84%	n.v.	83%	n.v.
MP250/200	11	474	98%	91%	-267%	86%	-485%	85%	-549%	85%	-558%	84%	-607%
MP250/201	9	10	10%	79%	77%	25%	17%	25%	17%	25%	17%	25%	17%
MP250/202	30	124	76%	69%	-27%	54%	-91%	53%	-94%	52%	-100%	52%	-100%
MP250/203	13	99	87%	83%	-29%	64%	-175%	62%	-191%	58%	-219%	54%	-254%
MP250/204	1	206	100%	98%	-261%	95%	-984%	94%	-1112%	94%	-1187%	93%	-1371%
MP250/205	11	120	91%	92%	12%	88%	-28%	88%	-35%	87%	-41%	87%	-46%
MP250/206	32	212	85%	77%	-53%	67%	-119%	66%	-126%	66%	-128%	65%	-133%
MP250/207	54	397	86%	74%	-90%	64%	-166%	64%	-166%	63%	-172%	62%	-178%
MP250/208	52	n.v.	n.v.	75%	n.v.	66%	n.v.	63%	n.v.	61%	n.v.	61%	n.v.
MP250/209	10	23	57%	79%	51%	57%	0%	52%	-10%	50%	-15%	47%	-21%
MP250/210	26	34	24%	51%	36%	30%	8%	28%	6%	28%	6%	28%	6%
MP250/211	43	438	90%	77%	-139%	66%	-245%	64%	-262%	64%	-271%	63%	-281%
MP250/212	48	n.v.	n.v.	75%	n.v.	67%	n.v.	65%	n.v.	64%	n.v.	63%	n.v.
MP250/213	19	106	82%	76%	-36%	64%	-100%	63%	-108%	61%	-116%	61%	-116%
MP250/214	8	21	62%	86%	63%	71%	25%	65%	9%	64%	5%	58%	-11%
MP250/215	4	41	90%	93%	32%	86%	-46%	82%	-86%	81%	-95%	79%	-116%
MP250/216	4	n.v.	n.v.	96%	n.v.	92%	n.v.	92%	n.v.	90%	n.v.	90%	n.v.
MP250/217	8	658	99%	93%	-439%	89%	-814%	87%	-997%	85%	-1142%	84%	-1216%
MP250/218	43	410	90%	78%	-105%	69%	-197%	67%	-213%	66%	-220%	66%	-228%
MP250/219	11	329	97%	88%	-266%	83%	-414%	82%	-431%	82%	-448%	81%	-467%
MP250/220	10	236	96%	90%	-129%	86%	-223%	85%	-247%	84%	-269%	83%	-293%
MP250/221	11	80	86%	83%	-23%	72%	-100%	71%	-111%	70%	-116%	69%	-129%
MP250/222	3	25	88%	93%	40%	89%	7%	87%	-9%	85%	-25%	84%	-32%
MP250/223	9	102	91%	86%	-59%	77%	-162%	76%	-168%	76%	-168%	76%	-176%
MP250/224	67	n.v.	n.v.	73%	n.v.	62%	n.v.	60%	n.v.	59%	n.v.	58%	n.v.
MP250/225	1	n.v.	n.v.	99%	n.v.	99%	n.v.	99%	n.v.	99%	n.v.	99%	n.v.
MP250/226	5	n.v.	n.v.	96%	n.v.	94%	n.v.	94%	n.v.	94%	n.v.	93%	n.v.
MP250/227	35	349	90%	75%	-146%	63%	-271%	62%	-284%	61%	-288%	60%	-297%
MP250/228	24	364	93%	82%	-166%	74%	-296%	73%	-304%	72%	-318%	72%	-328%
MP250/229	8	467	98%	93%	-296%	90%	-456%	90%	-477%	90%	-491%	90%	-491%
MP250/230	6	58	90%	93%	36%	91%	13%	90%	6%	90%	3%	89%	-2%
MP250/231	9	122	93%	90%	-30%	86%	-91%	85%	-100%	84%	-114%	84%	-118%
MP250/232	17	119	86%	85%	-2%	77%	-63%	76%	-68%	76%	-70%	76%	-70%
MP250/233	12	221	95%	88%	-119%	84%	-191%	83%	-211%	82%	-225%	82%	-225%
MP250/234	44	335	87%	67%	-152%	53%	-260%	51%	-272%	51%	-276%	50%	-281%
MP250/235	80	n.v.	n.v.	n.v.	n.v.	n.v.	n.v.	n.v.	n.v.	n.v.	n.v.	n.v.	n.v.
MP250/236	96	879	89%	n.v.	n.v.	n.v.	n.v.	n.v.	n.v.	n.v.	n.v.	n.v.	n.v.

Fortsetzung auf nächster Seite...

C.2. Vergleich mit dem exakten Lösungsverfahren

... fortgesetzte Tabelle von vorheriger Seite

Instanz Name	MIP			GA 1 Sek.		GA 30 Sek.		GA 1 Min.		GA 2 Min.		GA 5 Min.	
	LB	Obj	Gap	Gap LB	Gap Obj	Gap LB	Gap Obj	Gap LB	Gap Obj	Gap LB	Gap Obj	Gap LB	Gap Obj
MP250/237	24	97	75%	73%	-10%	62%	-54%	60%	-62%	58%	-70%	57%	-73%
MP250/238	23	214	89%	80%	-86%	69%	-185%	68%	-193%	67%	-206%	67%	-210%
MP250/239	28	542	95%	83%	-227%	77%	-344%	76%	-371%	75%	-375%	75%	-380%
MP250/240	53	<i>n.v.</i>	<i>n.v.</i>	<i>n.v.</i>	<i>n.v.</i>	<i>n.v.</i>	<i>n.v.</i>	<i>n.v.</i>	<i>n.v.</i>	<i>n.v.</i>	<i>n.v.</i>	<i>n.v.</i>	<i>n.v.</i>
MP250/241	10	249	96%	<i>n.v.</i>	<i>n.v.</i>	<i>n.v.</i>	<i>n.v.</i>	<i>n.v.</i>	<i>n.v.</i>	<i>n.v.</i>	<i>n.v.</i>	<i>n.v.</i>	<i>n.v.</i>
MP250/242	39	<i>n.v.</i>	<i>n.v.</i>	<i>n.v.</i>	<i>n.v.</i>	<i>n.v.</i>	<i>n.v.</i>	<i>n.v.</i>	<i>n.v.</i>	<i>n.v.</i>	<i>n.v.</i>	<i>n.v.</i>	<i>n.v.</i>
MP250/243	52	<i>n.v.</i>	<i>n.v.</i>	<i>n.v.</i>	<i>n.v.</i>	<i>n.v.</i>	<i>n.v.</i>	<i>n.v.</i>	<i>n.v.</i>	<i>n.v.</i>	<i>n.v.</i>	<i>n.v.</i>	<i>n.v.</i>
MP250/244	48	<i>n.v.</i>	<i>n.v.</i>	<i>n.v.</i>	<i>n.v.</i>	<i>n.v.</i>	<i>n.v.</i>	<i>n.v.</i>	<i>n.v.</i>	<i>n.v.</i>	<i>n.v.</i>	<i>n.v.</i>	<i>n.v.</i>
MP250/245	12	<i>n.v.</i>	<i>n.v.</i>	94%	<i>n.v.</i>	90%	<i>n.v.</i>	89%	<i>n.v.</i>	88%	<i>n.v.</i>	87%	<i>n.v.</i>
MP250/246	21	218	90%	78%	-132%	67%	-246%	66%	-252%	65%	-263%	64%	-276%
MP250/247	117	<i>n.v.</i>	<i>n.v.</i>	<i>n.v.</i>	<i>n.v.</i>	<i>n.v.</i>	<i>n.v.</i>	<i>n.v.</i>	<i>n.v.</i>	<i>n.v.</i>	<i>n.v.</i>	<i>n.v.</i>	<i>n.v.</i>
MP250/248	80	<i>n.v.</i>	<i>n.v.</i>	<i>n.v.</i>	<i>n.v.</i>	<i>n.v.</i>	<i>n.v.</i>	<i>n.v.</i>	<i>n.v.</i>	<i>n.v.</i>	<i>n.v.</i>	<i>n.v.</i>	<i>n.v.</i>
MP250/249	6	<i>n.v.</i>	<i>n.v.</i>	96%	<i>n.v.</i>	94%	<i>n.v.</i>	93%	<i>n.v.</i>	93%	<i>n.v.</i>	92%	<i>n.v.</i>
MP250/250	31	502	94%	80%	-220%	75%	-298%	72%	-352%	70%	-378%	69%	-402%
Mittelwert	16,98	100,43	57%	70%	-19%	55%	-86%	54%	-96%	53%	-102%	53%	-109%

Tabelle C.10. – MP250 gelöst per GA unter ZF2, Zeitlimit = 5 Minuten, Vergleich mit bester unterer und oberer Schranke des exakten Verfahrens nach 1 Stunde.

Anhang C. Ergebnisse numerischer Testläufe - heuristische Lösungsverfahren

Instanz Name	MIP			GA 1 Sek.		GA 30 Sek.		GA 1 Min.		GA 2 Min.		GA 5 Min.	
	LB	Obj	Gap	Gap LB	Gap Obj	Gap LB	Gap Obj	Gap LB	Gap Obj	Gap LB	Gap Obj	Gap LB	Gap Obj
MP250/1	8,5	8,5	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%
MP250/2	9,6	9,6	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%
MP250/3	3,79	3,79	0%	2%	2%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%
MP250/4	-0,48	-0,48	0%	117%	117%	-2%	-2%	-2%	-2%	-2%	-2%	-2%	-2%
MP250/5	8,7	8,7	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%
MP250/6	7,72	7,72	0%	63%	63%	12%	12%	12%	12%	1%	1%	1%	1%
MP250/7	7,7	7,75	1%	65%	65%	21%	21%	21%	20%	21%	20%	21%	20%
MP250/8	12,62	39,59	68%	70%	6%	56%	-37%	56%	-37%	53%	-47%	51%	-53%
MP250/9	18,43	41,6	56%	60%	10%	46%	-23%	44%	-26%	44%	-27%	44%	-27%
MP250/10	21,59	21,65	0%	20%	19%	4%	4%	4%	4%	4%	4%	4%	4%
MP250/11	12,73	12,73	0%	36%	36%	19%	19%	19%	19%	18%	18%	18%	18%
MP250/12	14,19	73,14	81%	75%	-29%	68%	-67%	67%	-71%	67%	-71%	66%	-75%
MP250/13	20,92	73,47	72%	71%	-1%	58%	-47%	58%	-47%	58%	-47%	58%	-47%
MP250/14	12,78	12,78	0%	15%	15%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%
MP250/15	14,72	14,72	0%	13%	13%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%
MP250/16	24,31	25,16	3%	20%	17%	3%	0%	3%	0%	3%	0%	3%	0%
MP250/17	7,87	7,87	0%	1%	1%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%
MP250/18	2,12	2,12	0%	17%	17%	2%	2%	1%	1%	1%	1%	1%	1%
MP250/19	6	6	0%	7%	7%	2%	2%	1%	1%	1%	1%	1%	1%
MP250/20	16,64	42,35	61%	66%	13%	56%	-12%	53%	-18%	53%	-19%	52%	-22%
MP250/21	7,85	44,41	82%	79%	-20%	70%	-72%	70%	-72%	70%	-72%	70%	-72%
MP250/22	13,33	149,36	91%	85%	-66%	81%	-108%	81%	-108%	81%	-108%	81%	-117%
MP250/23	9,47	9,47	0%	30%	30%	1%	1%	1%	1%	1%	1%	1%	1%
MP250/24	8,45	58,09	85%	83%	-15%	79%	-43%	79%	-46%	78%	-54%	78%	-54%
MP250/25	18,3	121,63	85%	66%	-127%	59%	-172%	57%	-185%	57%	-185%	57%	-185%
MP250/26	-1,15	150,59	101%	102%	-193%	103%	-348%	104%	-429%	105%	-495%	105%	-541%
MP250/27	-1,17	463,75	100%	103%	-1108%	104%	-1580%	104%	-1596%	105%	-1721%	105%	-1879%
MP250/28	14,85	47,08	68%	68%	-3%	53%	-49%	52%	-53%	50%	-59%	48%	-64%
MP250/29	13,83	146,74	91%	80%	-110%	76%	-150%	75%	-169%	74%	-180%	71%	-207%
MP250/30	15,54	95,34	84%	79%	-32%	73%	-68%	72%	-71%	72%	-75%	71%	-78%
MP250/31	5,64	5,7	1%	76%	76%	64%	63%	64%	63%	64%	63%	64%	63%
MP250/32	7,07	193,51	96%	88%	-229%	83%	-365%	83%	-375%	83%	-375%	83%	-375%
MP250/33	-0,59	127,02	100%	101%	-71%	101%	-129%	101%	-147%	101%	-167%	101%	-186%
MP250/34	3,62	119,66	97%	94%	-83%	94%	-105%	93%	-115%	93%	-128%	93%	-133%
MP250/35	-0,43	-0,43	0%	103%	103%	146%	146%	151%	151%	152%	152%	159%	159%
MP250/36	1,55	1,55	0%	69%	69%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%
MP250/37	0,56	0,56	0%	70%	70%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%
MP250/38	4,82	4,82	0%	40%	40%	18%	18%	18%	18%	18%	18%	17%	17%
MP250/39	18,74	35,52	47%	56%	17%	43%	-8%	43%	-8%	43%	-8%	43%	-8%
MP250/40	11,01	13,82	20%	49%	37%	34%	18%	30%	13%	30%	13%	26%	7%
MP250/41	7,57	126,33	94%	89%	-76%	85%	-158%	84%	-164%	84%	-169%	84%	-175%
MP250/42	17,02	210,26	92%	76%	-196%	67%	-305%	67%	-312%	67%	-313%	67%	-313%
MP250/43	1,21	37,06	97%	96%	-34%	92%	-137%	92%	-153%	92%	-154%	91%	-172%
MP250/44	9,79	25,09	61%	62%	3%	42%	-49%	38%	-59%	34%	-69%	34%	-69%
MP250/45	7,24	41,8	83%	89%	34%	82%	-3%	81%	-11%	80%	-17%	80%	-18%
MP250/46	-0,79	18,42	104%	103%	34%	104%	1%	105%	-19%	106%	-47%	107%	-74%
MP250/47	-0,8	14,04	106%	102%	62%	105%	16%	105%	10%	106%	-4%	107%	-21%
MP250/48	12,68	35,43	64%	74%	28%	60%	-11%	57%	-19%	56%	-23%	55%	-27%
MP250/49	14,46	42,4	66%	65%	-1%	53%	-38%	51%	-42%	51%	-43%	51%	-43%
MP250/50	7,85	7,85	0%	1%	1%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%
MP250/51	7,51	7,51	0%	14%	14%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%
MP250/52	4,51	4,51	0%	32%	32%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%
MP250/53	4,38	20,64	79%	86%	35%	78%	-4%	76%	-15%	76%	-15%	74%	-22%
MP250/54	18,88	46,47	59%	61%	3%	39%	-50%	39%	-51%	39%	-51%	39%	-51%
MP250/55	2,42	2,45	1%	78%	77%	5%	4%	5%	4%	4%	3%	4%	3%
MP250/56	7,24	7,25	0%	8%	8%	1%	1%	1%	1%	1%	1%	1%	1%
MP250/57	5,48	7,54	27%	76%	67%	54%	37%	54%	36%	54%	36%	53%	35%
MP250/58	12,75	12,75	0%	44%	44%	13%	13%	13%	13%	13%	13%	13%	13%
MP250/59	0,01	161,54	100%	100%	-306%	100%	-676%	100%	-681%	100%	-726%	100%	-731%

Fortsetzung auf nächster Seite...

C.2. Vergleich mit dem exakten Lösungsverfahren

... fortgesetzte Tabelle von vorheriger Seite

Instanz Name	MIP			GA 1 Sek.		GA 30 Sek.		GA 1 Min.		GA 2 Min.		GA 5 Min.	
	LB	Obj	Gap	Gap LB	Gap Obj	Gap LB	Gap Obj	Gap LB	Gap Obj	Gap LB	Gap Obj	Gap LB	Gap Obj
MP250/60	5,18	51,75	90%	85%	-45%	82%	-80%	81%	-92%	79%	-107%	78%	-116%
MP250/61	13,55	26,33	49%	59%	20%	51%	5%	49%	0%	47%	-3%	47%	-4%
MP250/62	15,78	34,49	54%	67%	28%	52%	-5%	50%	-8%	50%	-8%	50%	-8%
MP250/63	3,36	81,58	96%	94%	-42%	93%	-79%	92%	-87%	92%	-96%	92%	-97%
MP250/64	2,43	72,7	97%	93%	-98%	89%	-220%	88%	-251%	88%	-251%	88%	-253%
MP250/65	-0,54	77,81	101%	101%	-79%	102%	-215%	102%	-257%	102%	-258%	103%	-274%
MP250/66	7,35	105,33	93%	90%	-37%	80%	-187%	78%	-213%	77%	-233%	77%	-233%
MP250/67	4,19	71,48	94%	92%	-36%	84%	-176%	82%	-202%	82%	-213%	80%	-243%
MP250/68	10,66	18,38	42%	72%	52%	53%	19%	51%	15%	46%	7%	43%	2%
MP250/69	9,48	28,47	67%	81%	43%	66%	-3%	63%	-11%	60%	-20%	60%	-21%
MP250/70	12,45	186,93	93%	83%	-160%	78%	-235%	76%	-254%	75%	-275%	73%	-308%
MP250/71	10,36	193,01	95%	85%	-173%	80%	-265%	79%	-287%	79%	-295%	79%	-296%
MP250/72	6,09	104,52	94%	88%	-106%	83%	-185%	83%	-193%	82%	-202%	82%	-211%
MP250/73	3,93	123,49	97%	92%	-137%	88%	-268%	86%	-335%	84%	-394%	82%	-473%
MP250/74	-0,76	-0,75	-1%	103%	103%	223%	221%	-81%	-79%	-52%	-50%	-36%	-34%
MP250/75	9,58	37,14	74%	83%	35%	76%	8%	74%	-1%	72%	-7%	72%	-8%
MP250/76	25,32	307,92	92%	77%	-177%	75%	-205%	72%	-237%	70%	-262%	70%	-264%
MP250/77	22,38	22,38	0%	16%	16%	1%	1%	0%	0%	0%	0%	0%	0%
MP250/78	-0,95	18,44	105%	103%	48%	105%	-1%	106%	-7%	106%	-13%	106%	-14%
MP250/79	9,62	9,62	0%	51%	51%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%
MP250/80	5,33	5,34	0%	62%	62%	29%	29%	19%	19%	18%	18%	18%	18%
MP250/81	-0,18	84,91	100%	100%	-103%	101%	-349%	101%	-402%	101%	-434%	101%	-470%
MP250/82	13,22	28,67	54%	74%	43%	56%	4%	53%	-3%	52%	-3%	51%	-7%
MP250/83	8,55	31,44	73%	81%	30%	68%	-17%	64%	-32%	62%	-38%	61%	-44%
MP250/84	12,67	12,68	0%	52%	52%	8%	8%	8%	8%	8%	8%	1%	1%
MP250/85	44,17	54,46	19%	40%	26%	24%	6%	22%	4%	22%	4%	22%	4%
MP250/86	25,32	30,76	18%	53%	43%	27%	12%	25%	9%	25%	9%	23%	7%
MP250/87	20,47	31,76	36%	58%	35%	38%	4%	38%	3%	38%	3%	38%	3%
MP250/88	2,78	3,71	25%	78%	71%	59%	45%	43%	24%	29%	5%	28%	4%
MP250/89	2,14	6,68	68%	80%	39%	63%	-14%	56%	-38%	56%	-38%	55%	-39%
MP250/90	15,18	64,17	76%	73%	-15%	65%	-46%	65%	-47%	64%	-51%	64%	-51%
MP250/91	18,7	112,02	83%	77%	-39%	69%	-84%	67%	-101%	65%	-108%	63%	-120%
MP250/92	11,42	49,87	77%	70%	-29%	61%	-69%	59%	-81%	57%	-89%	55%	-96%
MP250/93	3,56	20,62	83%	92%	52%	77%	-32%	76%	-41%	72%	-63%	69%	-78%
MP250/94	8,45	8,45	0%	34%	34%	1%	1%	1%	1%	1%	1%	1%	1%
MP250/95	8,53	8,53	0%	43%	43%	19%	19%	11%	11%	11%	11%	11%	11%
MP250/96	1,21	1,22	1%	93%	93%	48%	47%	47%	47%	46%	46%	45%	45%
MP250/97	-0,76	-0,74	-3%	104%	104%	152%	151%	243%	240%	273%	268%	311%	306%
MP250/98	5,7	5,7	0%	77%	77%	46%	46%	42%	42%	42%	42%	35%	35%
MP250/99	19,72	20,68	5%	48%	45%	26%	22%	23%	19%	23%	19%	22%	19%
MP250/100	13	54,3	76%	83%	28%	74%	-10%	73%	-13%	70%	-26%	70%	-26%
MP250/101	1,17	54,54	98%	96%	-66%	95%	-152%	95%	-152%	94%	-162%	94%	-165%
MP250/102	3,23	26,66	88%	92%	31%	85%	-22%	84%	-35%	83%	-42%	81%	-59%
MP250/103	29,4	353,49	92%	81%	-123%	78%	-166%	76%	-183%	76%	-192%	75%	-199%
MP250/104	20,39	125,5	84%	74%	-59%	60%	-147%	59%	-152%	59%	-153%	59%	-153%
MP250/105	14,38	141,25	90%	80%	-94%	70%	-190%	69%	-202%	69%	-209%	68%	-216%
MP250/106	0,43	0,43	0%	75%	75%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%
MP250/107	3,24	3,24	0%	13%	13%	1%	1%	1%	1%	1%	1%	0%	0%
MP250/108	1,88	1,88	0%	91%	91%	62%	62%	52%	52%	52%	52%	35%	35%
MP250/109	9,79	9,79	0%	67%	67%	34%	34%	24%	24%	17%	17%	17%	17%
MP250/110	1,48	1,48	0%	19%	19%	1%	1%	1%	1%	1%	1%	1%	1%
MP250/111	-0,64	-0,64	0%	-64%	-64%	-16%	-16%	-7%	-7%	0%	0%	0%	0%
MP250/112	-0,51	4,48	111%	102%	86%	103%	77%	103%	73%	104%	69%	104%	67%
MP250/113	16,59	23,36	29%	70%	58%	48%	26%	42%	18%	40%	15%	39%	15%
MP250/114	8,69	175	95%	90%	-95%	87%	-166%	85%	-203%	85%	-209%	84%	-219%
MP250/115	34,23	296,41	88%	75%	-112%	66%	-194%	65%	-200%	65%	-204%	64%	-211%
MP250/116	35,48	219,36	84%	74%	-62%	65%	-115%	64%	-121%	64%	-123%	64%	-124%
MP250/117	31,87	377,83	92%	86%	-71%	85%	-82%	82%	-108%	81%	-124%	79%	-144%
MP250/118	30,35	86,88	65%	65%	0%	48%	-48%	47%	-51%	44%	-59%	43%	-62%

Fortsetzung auf nächster Seite...

Anhang C. Ergebnisse numerischer Testläufe - heuristische Lösungsverfahren

... fortgesetzte Tabelle von vorheriger Seite

Instanz Name	MIP			GA 1 Sek.		GA 30 Sek.		GA 1 Min.		GA 2 Min.		GA 5 Min.	
	LB	Obj	Gap	Gap LB	Gap Obj	Gap LB	Gap Obj	Gap LB	Gap Obj	Gap LB	Gap Obj	Gap LB	Gap Obj
MP250/119	12,22	165,71	93%	83%	-131%	75%	-234%	75%	-241%	74%	-255%	73%	-263%
MP250/120	0,49	108,93	100%	n.v.	n.v.	n.v.	n.v.	n.v.	n.v.	n.v.	n.v.	n.v.	n.v.
MP250/121	3,36	92,45	96%	89%	-214%	50%	-1272%	48%	-1324%	39%	-1572%	27%	-1910%
MP250/122	27,81	34,81	20%	43%	29%	25%	6%	24%	5%	22%	3%	22%	3%
MP250/123	26	27,84	7%	44%	41%	16%	10%	13%	7%	13%	7%	13%	7%
MP250/124	21,96	24,18	9%	39%	32%	14%	5%	10%	1%	9%	0%	9%	0%
MP250/125	11,55	14,58	21%	56%	45%	31%	12%	26%	7%	26%	6%	26%	6%
MP250/126	13,43	17,31	22%	56%	43%	31%	11%	28%	7%	27%	7%	24%	2%
MP250/127	17,61	n.v.	n.v.	89%	n.v.	86%	n.v.	84%	n.v.	84%	n.v.	83%	n.v.
MP250/128	19,07	24,61	23%	38%	21%	23%	1%	23%	1%	23%	1%	23%	1%
MP250/129	16,66	16,66	0%	38%	38%	11%	11%	11%	11%	11%	11%	10%	10%
MP250/130	19,57	19,57	0%	34%	34%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%
MP250/131	9,98	14,87	33%	71%	57%	41%	12%	37%	6%	37%	6%	37%	6%
MP250/132	24,59	25,55	4%	41%	39%	8%	4%	4%	1%	4%	1%	4%	1%
MP250/133	84,18	n.v.	n.v.	n.v.	n.v.	n.v.	n.v.	n.v.	n.v.	n.v.	n.v.	n.v.	n.v.
MP250/134	53,18	n.v.	n.v.	n.v.	n.v.	n.v.	n.v.	n.v.	n.v.	n.v.	n.v.	n.v.	n.v.
MP250/135	0,5	32,37	98%	99%	40%	98%	-17%	98%	-31%	98%	-38%	98%	-39%
MP250/136	-0,12	32,53	100%	100%	33%	100%	-33%	101%	-57%	101%	-67%	101%	-77%
MP250/137	10,93	124,5	91%	85%	-72%	81%	-118%	80%	-126%	78%	-149%	77%	-159%
MP250/138	12,25	149,31	92%	83%	-102%	77%	-180%	73%	-235%	72%	-244%	72%	-245%
MP250/139	9,91	64,93	85%	80%	-29%	67%	-113%	65%	-127%	64%	-135%	60%	-165%
MP250/140	8,75	28,29	69%	79%	33%	66%	-11%	63%	-20%	63%	-21%	59%	-31%
MP250/141	45,73	n.v.	n.v.	63%	n.v.	52%	n.v.	50%	n.v.	50%	n.v.	48%	n.v.
MP250/142	32,22	343,31	91%	75%	-167%	70%	-224%	67%	-247%	65%	-274%	63%	-299%
MP250/143	16,51	32,15	49%	62%	27%	48%	-2%	42%	-12%	40%	-17%	38%	-21%
MP250/144	12,85	30,26	58%	74%	38%	62%	10%	61%	7%	59%	4%	57%	-2%
MP250/145	30,95	55,17	44%	55%	21%	37%	-11%	37%	-12%	36%	-14%	36%	-14%
MP250/146	7,27	22,55	68%	85%	54%	72%	13%	68%	2%	65%	-7%	65%	-8%
MP250/147	14,44	347,93	96%	88%	-189%	85%	-265%	83%	-303%	82%	-338%	82%	-344%
MP250/148	18,72	340,62	95%	86%	-148%	80%	-265%	79%	-277%	78%	-299%	78%	-309%
MP250/149	0,67	59,81	99%	98%	-66%	96%	-246%	96%	-286%	96%	-293%	95%	-351%
MP250/150	-0,57	-0,57	0%	110%	110%	-36%	-36%	-24%	-24%	-12%	-12%	-4%	-4%
MP250/151	9,19	27,09	66%	81%	43%	79%	37%	74%	22%	70%	12%	66%	-1%
MP250/152	2,33	86,49	97%	97%	-22%	94%	-135%	93%	-164%	92%	-191%	91%	-224%
MP250/153	19,1	306,2	94%	82%	-193%	75%	-294%	75%	-295%	74%	-322%	73%	-328%
MP250/154	22,36	265,62	92%	79%	-147%	74%	-207%	72%	-234%	70%	-250%	70%	-256%
MP250/155	24,81	n.v.	n.v.	n.v.	n.v.	n.v.	n.v.	n.v.	n.v.	n.v.	n.v.	n.v.	n.v.
MP250/156	24,92	n.v.	n.v.	86%	n.v.	84%	n.v.	84%	n.v.	83%	n.v.	83%	n.v.
MP250/157	18,29	31,48	42%	69%	47%	54%	20%	45%	6%	42%	0%	36%	-10%
MP250/158	51,68	n.v.	n.v.	80%	n.v.	78%	n.v.	76%	n.v.	74%	n.v.	73%	n.v.
MP250/159	9,22	318,55	97%	91%	-207%	89%	-285%	88%	-326%	87%	-337%	87%	-357%
MP250/160	10,15	196,13	95%	89%	-120%	84%	-201%	83%	-238%	82%	-256%	81%	-276%
MP250/161	3,15	215,1	99%	96%	-182%	94%	-304%	94%	-319%	93%	-354%	93%	-385%
MP250/162	16,21	16,21	0%	7%	7%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%
MP250/163	-0,98	151,33	101%	102%	-135%	102%	-257%	103%	-293%	103%	-316%	103%	-397%
MP250/164	-1,2	130,01	101%	102%	-88%	103%	-258%	104%	-311%	104%	-371%	105%	-408%
MP250/165	0,08	0,11	27%	100%	99%	98%	97%	94%	92%	78%	69%	77%	69%
MP250/166	3,98	3,98	0%	73%	73%	6%	6%	2%	2%	2%	2%	2%	2%
MP250/167	19,39	67,93	71%	70%	-4%	50%	-75%	46%	-90%	46%	-90%	44%	-96%
MP250/168	14,32	341,89	96%	n.v.	n.v.	n.v.	n.v.	n.v.	n.v.	n.v.	n.v.	n.v.	n.v.
MP250/169	5,62	90,48	94%	91%	-51%	83%	-168%	82%	-185%	81%	-203%	81%	-204%
MP250/170	20,34	n.v.	n.v.	86%	n.v.	83%	n.v.	82%	n.v.	81%	n.v.	80%	n.v.
MP250/171	2,57	5,96	57%	90%	77%	84%	63%	82%	58%	80%	55%	80%	54%
MP250/172	3,2	10,86	71%	86%	53%	74%	12%	73%	9%	71%	1%	71%	0%
MP250/173	10,16	n.v.	n.v.	94%	n.v.	91%	n.v.	90%	n.v.	90%	n.v.	90%	n.v.
MP250/174	7,58	n.v.	n.v.	95%	n.v.	93%	n.v.	93%	n.v.	92%	n.v.	92%	n.v.
MP250/175	91,32	n.v.	n.v.	74%	n.v.	73%	n.v.	72%	n.v.	71%	n.v.	70%	n.v.
MP250/176	62,08	n.v.	n.v.	84%	n.v.	81%	n.v.	80%	n.v.	80%	n.v.	79%	n.v.
MP250/177	-0,54	37,08	101%	102%	-25%	104%	-159%	104%	-179%	104%	-182%	104%	-204%

Fortsetzung auf nächster Seite...

C.2. Vergleich mit dem exakten Lösungsverfahren

... fortgesetzte Tabelle von vorheriger Seite

Instanz Name	MIP			GA 1 Sek.		GA 30 Sek.		GA 1 Min.		GA 2 Min.		GA 5 Min.	
	LB	Obj	Gap	Gap LB	Gap Obj	Gap LB	Gap Obj	Gap LB	Gap Obj	Gap LB	Gap Obj	Gap LB	Gap Obj
MP250/178	9,15	240,75	96%	91%	-132%	86%	-279%	85%	-286%	85%	-306%	84%	-313%
MP250/179	45,48	420,02	89%	75%	-128%	65%	-219%	64%	-231%	64%	-236%	63%	-245%
MP250/180	19,96	237,3	92%	83%	-101%	73%	-217%	72%	-231%	71%	-245%	70%	-255%
MP250/181	23,09	204,61	89%	79%	-84%	70%	-162%	69%	-179%	66%	-200%	65%	-208%
MP250/182	17,64	194,36	91%	81%	-113%	70%	-228%	69%	-238%	69%	-245%	68%	-258%
MP250/183	42,17	n.v.	n.v.	76%	n.v.	67%	n.v.	66%	n.v.	65%	n.v.	64%	n.v.
MP250/184	14,52	147,97	90%	83%	-77%	72%	-181%	71%	-199%	69%	-211%	69%	-218%
MP250/185	20,73	220,93	91%	79%	-125%	71%	-209%	70%	-222%	69%	-232%	69%	-232%
MP250/186	13,11	134,96	90%	87%	-39%	81%	-94%	81%	-100%	80%	-108%	79%	-115%
MP250/187	21,28	269,65	92%	84%	-98%	80%	-153%	79%	-169%	77%	-191%	76%	-199%
MP250/188	9,62	9,62	0%	52%	52%	29%	29%	24%	24%	24%	24%	17%	17%
MP250/189	0,25	101,06	100%	100%	-65%	99%	-117%	99%	-155%	99%	-221%	99%	-280%
MP250/190	5,79	234,04	98%	95%	-94%	93%	-167%	93%	-186%	92%	-222%	92%	-231%
MP250/191	0,49	32,08	98%	99%	35%	98%	-36%	98%	-63%	97%	-84%	97%	-107%
MP250/192	6,35	6,35	0%	84%	84%	6%	6%	4%	4%	2%	2%	1%	1%
MP250/193	21,53	n.v.	n.v.	89%	n.v.	86%	n.v.	84%	n.v.	83%	n.v.	83%	n.v.
MP250/194	9,62	n.v.	n.v.	95%	n.v.	93%	n.v.	93%	n.v.	93%	n.v.	93%	n.v.
MP250/195	37,44	n.v.	n.v.	81%	n.v.	76%	n.v.	74%	n.v.	72%	n.v.	70%	n.v.
MP250/196	59,05	436,89	86%	75%	-82%	63%	-174%	62%	-181%	61%	-186%	58%	-209%
MP250/197	30,52	n.v.	n.v.	n.v.	n.v.	n.v.	n.v.	n.v.	n.v.	n.v.	n.v.	n.v.	n.v.
MP250/198	47,52	n.v.	n.v.	n.v.	n.v.	n.v.	n.v.	n.v.	n.v.	n.v.	n.v.	n.v.	n.v.
MP250/199	10,52	n.v.	n.v.	92%	n.v.	90%	n.v.	88%	n.v.	87%	n.v.	86%	n.v.
MP250/200	12,36	449,56	97%	90%	-251%	89%	-306%	86%	-402%	85%	-447%	83%	-512%
MP250/201	9,11	9,11	0%	78%	78%	40%	40%	31%	31%	26%	26%	19%	19%
MP250/202	29	108,6	73%	71%	-10%	56%	-65%	55%	-68%	54%	-73%	52%	-79%
MP250/203	11,29	161,82	93%	85%	-112%	78%	-216%	74%	-273%	71%	-320%	64%	-414%
MP250/204	-0,65	237,4	100%	101%	-323%	102%	-676%	103%	-839%	103%	-1119%	104%	-1443%
MP250/205	9,76	281,54	97%	93%	-106%	90%	-182%	90%	-200%	89%	-221%	88%	-233%
MP250/206	31,09	250,87	88%	78%	-81%	71%	-131%	69%	-154%	68%	-162%	67%	-168%
MP250/207	53,44	470,2	89%	74%	-126%	66%	-199%	65%	-208%	64%	-220%	63%	-225%
MP250/208	50,9	n.v.	n.v.	76%	n.v.	69%	n.v.	67%	n.v.	63%	n.v.	61%	n.v.
MP250/209	8,62	29,24	71%	82%	38%	67%	-14%	66%	-14%	66%	-14%	66%	-15%
MP250/210	21,37	36,2	41%	60%	33%	46%	9%	46%	8%	46%	8%	46%	8%
MP250/211	41,55	499,31	92%	77%	-173%	69%	-276%	68%	-288%	66%	-303%	65%	-317%
MP250/212	47,27	n.v.	n.v.	75%	n.v.	70%	n.v.	67%	n.v.	66%	n.v.	65%	n.v.
MP250/213	18,77	109,42	83%	76%	-41%	71%	-72%	68%	-86%	68%	-89%	66%	-96%
MP250/214	7,12	39,2	82%	87%	30%	81%	-7%	75%	-37%	70%	-66%	64%	-101%
MP250/215	2,55	79,91	97%	96%	-35%	92%	-145%	91%	-180%	90%	-224%	90%	-226%
MP250/216	1,57	563,42	100%	98%	-462%	98%	-577%	98%	-679%	98%	-711%	98%	-789%
MP250/217	7,73	n.v.	n.v.	94%	n.v.	92%	n.v.	90%	n.v.	89%	n.v.	88%	n.v.
MP250/218	42,86	n.v.	n.v.	79%	n.v.	71%	n.v.	69%	n.v.	68%	n.v.	66%	n.v.
MP250/219	10,53	266,81	96%	88%	-198%	86%	-264%	84%	-296%	83%	-322%	83%	-342%
MP250/220	8,74	222,77	96%	91%	-117%	89%	-178%	88%	-216%	87%	-226%	86%	-269%
MP250/221	9,45	74,93	87%	85%	-16%	78%	-72%	75%	-95%	70%	-138%	69%	-147%
MP250/222	1,97	68,43	97%	95%	-64%	95%	-76%	94%	-102%	94%	-116%	93%	-133%
MP250/223	8,07	112,03	93%	87%	-77%	78%	-199%	76%	-227%	75%	-247%	71%	-296%
MP250/224	66,54	n.v.	n.v.	73%	n.v.	65%	n.v.	62%	n.v.	61%	n.v.	58%	n.v.
MP250/225	0,58	354,99	100%	100%	-179%	100%	-186%	99%	-238%	99%	-258%	99%	-297%
MP250/226	1,94	478,25	100%	99%	-252%	98%	-461%	97%	-519%	97%	-534%	97%	-553%
MP250/227	34,15	338,39	90%	76%	-139%	66%	-240%	63%	-265%	63%	-265%	62%	-274%
MP250/228	24,97	n.v.	n.v.	82%	n.v.	75%	n.v.	74%	n.v.	73%	n.v.	72%	n.v.
MP250/229	7,71	479,64	98%	93%	-309%	91%	-448%	91%	-469%	90%	-496%	90%	-519%
MP250/230	5,85	134,47	96%	94%	-48%	92%	-81%	91%	-103%	90%	-119%	90%	-131%
MP250/231	7,54	128,92	94%	92%	-38%	90%	-72%	89%	-92%	88%	-101%	87%	-118%
MP250/232	16,59	233,78	93%	86%	-101%	79%	-199%	78%	-216%	75%	-248%	75%	-254%
MP250/233	9,57	391,45	98%	90%	-289%	89%	-353%	88%	-387%	87%	-412%	87%	-439%
MP250/234	43,05	328,11	87%	67%	-148%	60%	-203%	57%	-227%	55%	-242%	55%	-245%
MP250/235	81,16	n.v.	n.v.	n.v.	n.v.	n.v.	n.v.	n.v.	n.v.	n.v.	n.v.	n.v.	n.v.
MP250/236	93,06	814,47	89%	n.v.	n.v.	n.v.	n.v.	n.v.	n.v.	n.v.	n.v.	n.v.	n.v.

Fortsetzung auf nächster Seite...

Anhang C. Ergebnisse numerischer Testläufe - heuristische Lösungsverfahren

... fortgesetzte Tabelle von vorheriger Seite

Instanz Name	MIP			GA 1 Sek.		GA 30 Sek.		GA 1 Min.		GA 2 Min.		GA 5 Min.	
	LB	Obj	Gap	Gap LB	Gap Obj	Gap LB	Gap Obj	Gap LB	Gap Obj	Gap LB	Gap Obj	Gap LB	Gap Obj
MP250/237	24,06	61,75	61%	72%	29%	64%	9%	63%	4%	60%	-2%	59%	-6%
MP250/238	22,95	199,88	89%	80%	-75%	70%	-165%	68%	-179%	67%	-183%	66%	-192%
MP250/239	28,74	536,94	95%	83%	-227%	78%	-307%	77%	-329%	76%	-350%	75%	-376%
MP250/240	52,24	n.v.	n.v.	n.v.	n.v.	n.v.	n.v.	n.v.	n.v.	n.v.	n.v.	n.v.	n.v.
MP250/241	10,57	338,03	97%	n.v.	n.v.	n.v.	n.v.	n.v.	n.v.	n.v.	n.v.	n.v.	n.v.
MP250/242	38,73	243,4	84%	n.v.	n.v.	n.v.	n.v.	n.v.	n.v.	n.v.	n.v.	n.v.	n.v.
MP250/243	54,73	n.v.	n.v.	n.v.	n.v.	n.v.	n.v.	n.v.	n.v.	n.v.	n.v.	n.v.	n.v.
MP250/244	47,23	n.v.	n.v.	n.v.	n.v.	n.v.	n.v.	n.v.	n.v.	n.v.	n.v.	n.v.	n.v.
MP250/245	10,02	n.v.	n.v.	95%	n.v.	93%	n.v.	92%	n.v.	91%	n.v.	90%	n.v.
MP250/246	20,29	198,63	90%	78%	-112%	71%	-185%	68%	-211%	68%	-216%	67%	-227%
MP250/247	115,43	n.v.	n.v.	n.v.	n.v.	n.v.	n.v.	n.v.	n.v.	n.v.	n.v.	n.v.	n.v.
MP250/248	85,51	n.v.	n.v.	n.v.	n.v.	n.v.	n.v.	n.v.	n.v.	n.v.	n.v.	n.v.	n.v.
MP250/249	4,97	n.v.	n.v.	96%	n.v.	95%	n.v.	95%	n.v.	94%	n.v.	94%	n.v.
MP250/250	30,67	483,37	94%	80%	-210%	77%	-263%	75%	-287%	74%	-315%	72%	-342%
Mittelwert	16,2	112,5	60,6%	73,3%	-37,6%	61,6%	-102,0%	59,3%	-116,9%	58,6%	-129,0%	58,0%	-141,8%

Tabelle C.11. – MP250 gelöst per GA unter ZF3, Zeitlimit = 5 Minuten, Vergleich mit bester unterer und oberer Schranke des exakten Verfahrens nach 1 Stunde.

C.2. Vergleich mit dem exakten Lösungsverfahren

Instanz Name	MIP			GA 1 Sek.		GA 1 Min.		GA 3 Min.		GA 10 Min.		GA 30 Min.	
	LB	Obj	Gap	Gap LB	Gap Obj	Gap LB	Gap Obj	Gap LB	Gap Obj	Gap LB	Gap Obj	Gap LB	Gap Obj
MP50/1	10	10	0,0%	33,3%	33,3%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%
MP50/2	4	4	0,0%	50,0%	50,0%	20,0%	20,0%	20,0%	20,0%	20,0%	20,0%	20,0%	20,0%
MP50/3	9	9	0,0%	52,6%	52,6%	25,0%	25,0%	25,0%	25,0%	25,0%	25,0%	25,0%	25,0%
MP50/4	2	3	33,3%	80,0%	70,0%	60,0%	40,0%	50,0%	25,0%	50,0%	25,0%	50,0%	25,0%
MP50/5	13	19	31,6%	73,5%	61,2%	43,5%	17,4%	40,9%	13,6%	40,9%	13,6%	40,9%	13,6%
MP50/6	24	24	0,0%	53,8%	53,8%	17,2%	17,2%	17,2%	17,2%	17,2%	17,2%	17,2%	17,2%
MP50/7	22	23	4,3%	21,4%	17,9%	8,3%	4,2%	8,3%	4,2%	4,3%	0,0%	4,3%	0,0%
MP50/8	5	5	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%
MP50/9	44	69	36,2%	53,2%	26,6%	33,3%	-4,5%	32,3%	-6,2%	31,2%	-7,8%	31,2%	-7,8%
MP50/10	27	44	38,6%	64,0%	41,3%	43,7%	8,3%	41,3%	4,3%	41,3%	4,3%	41,3%	4,3%
MP50/11	5	6	16,7%	82,1%	78,6%	58,3%	50,0%	54,5%	45,5%	54,5%	45,5%	44,4%	33,3%
MP50/12	12	13	7,7%	65,7%	62,9%	25,0%	18,7%	25,0%	18,7%	14,3%	7,1%	14,3%	7,1%
MP50/13	11	11	0,0%	45,0%	45,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%
MP50/14	19	30	36,7%	56,8%	31,8%	38,7%	3,2%	36,7%	0,0%	36,7%	0,0%	36,7%	0,0%
MP50/15	8	32	75,0%	85,2%	40,7%	71,4%	-14,3%	69,2%	-23,1%	69,2%	-23,1%	69,2%	-23,1%
MP50/16	7	12	41,7%	66,7%	42,9%	36,4%	-9,1%	30,0%	-20,0%	30,0%	-20,0%	30,0%	-20,0%
MP50/17	17	20	15,0%	46,9%	37,5%	19,0%	4,8%	19,0%	4,8%	19,0%	4,8%	19,0%	4,8%
MP50/18	19	20	5,0%	61,2%	59,2%	38,7%	35,5%	29,6%	25,9%	20,8%	16,7%	20,8%	16,7%
MP50/19	16	31	48,4%	75,0%	51,6%	54,3%	11,4%	50,0%	3,1%	48,4%	0,0%	48,4%	0,0%
MP50/20	31	39	20,5%	58,7%	48,0%	39,2%	23,5%	36,7%	20,4%	36,7%	20,4%	34,0%	17,0%
MP50/21	6	6	0,0%	76,0%	76,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%
MP50/22	10	10	0,0%	50,0%	50,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%
MP50/23	0	0	0,0%	100,0%	100,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%
MP50/24	12	54	77,8%	82,9%	22,9%	70,0%	-35,0%	70,0%	-35,0%	69,2%	-38,5%	69,2%	-38,5%
MP50/25	15	58	74,1%	79,7%	21,6%	70,0%	-16,0%	68,7%	-20,8%	68,7%	-20,8%	68,1%	-23,4%
MP50/26	22	37	40,5%	62,1%	36,2%	46,3%	9,8%	43,6%	5,1%	38,9%	-2,8%	35,3%	-8,8%
MP50/27	30	43	30,2%	53,1%	32,8%	33,3%	4,4%	33,3%	4,4%	30,2%	0,0%	30,2%	0,0%
MP50/28	21	21	0,0%	58,0%	58,0%	19,2%	19,2%	19,2%	19,2%	19,2%	19,2%	19,2%	19,2%
MP50/29	21	25	16,0%	54,3%	45,7%	27,6%	13,8%	25,0%	10,7%	25,0%	10,7%	25,0%	10,7%
MP50/30	27	112	75,9%	79,4%	14,5%	69,3%	-27,3%	69,3%	-27,3%	69,3%	-27,3%	69,3%	-27,3%
MP50/31	26	116	77,6%	79,5%	8,7%	70,5%	-31,8%	69,8%	-34,9%	69,0%	-38,1%	69,0%	-38,1%
MP50/32	13	52	75,0%	85,1%	40,2%	78,0%	11,9%	76,8%	7,1%	75,9%	3,7%	75,5%	1,9%
MP50/33	35	94	62,8%	72,0%	24,8%	59,8%	-8,0%	58,8%	-10,6%	57,8%	-13,3%	57,3%	-14,6%
MP50/34	45	109	58,7%	67,9%	22,1%	60,9%	5,2%	60,2%	3,5%	59,5%	1,8%	59,5%	1,8%
MP50/35	10	10	0,0%	33,3%	33,3%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%
MP50/36	1	1	0,0%	66,7%	66,7%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%
MP50/37	21	56	62,5%	74,4%	31,7%	65,6%	8,2%	63,8%	3,4%	62,5%	0,0%	62,5%	0,0%
MP50/38	26	57	54,4%	74,0%	43,0%	56,7%	5,0%	54,4%	0,0%	53,6%	-1,8%	52,7%	-3,6%
MP50/39	20	405	95,1%	86,7%	-170,0%	82,9%	-246,2%	82,1%	-261,6%	81,1%	-282,1%	80,6%	-293,2%
MP50/40	21	22	4,5%	30,0%	26,7%	12,5%	8,3%	12,5%	8,3%	12,5%	8,3%	12,5%	8,3%
MP50/41	7	15	53,3%	83,7%	65,1%	58,8%	11,8%	56,2%	6,2%	53,3%	0,0%	46,2%	-15,4%
MP50/42	17	32	46,9%	68,5%	40,7%	50,0%	5,9%	45,2%	-3,2%	43,3%	-6,7%	41,4%	-10,3%
MP50/43	19	80	76,2%	86,4%	42,9%	78,9%	11,1%	77,4%	4,8%	75,6%	-2,6%	74,0%	-9,6%
MP50/44	10	10	0,0%	77,3%	77,3%	56,5%	56,5%	52,4%	52,4%	50,0%	50,0%	47,4%	47,4%
MP50/45	10	48	79,2%	85,7%	31,4%	79,2%	0,0%	78,3%	-4,3%	77,3%	-9,1%	76,2%	-14,3%
MP50/46	12	41	70,7%	81,5%	36,9%	72,7%	6,8%	71,4%	2,4%	71,4%	2,4%	70,0%	-2,5%
MP50/47	5	5	0,0%	73,7%	73,7%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%
MP50/48	13	13	0,0%	53,6%	53,6%	7,1%	7,1%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%
MP50/49	26	82	68,3%	78,3%	31,7%	63,9%	-13,9%	61,2%	-22,4%	60,0%	-26,2%	60,0%	-26,2%
MP50/50	21	132	84,1%	90,9%	42,6%	84,3%	1,5%	82,5%	-10,0%	81,2%	-17,9%	80,9%	-20,0%
Mittelwert	16,54	43,4	33,9%	65,4%	39,7%	40,1%	1,2%	38,4%	-2,5%	37,3%	-4,8%	36,6%	-6,5%

Tabelle C.12. – MP50 gelöst per GA unter ZF2, Zeitlimit = 30 Minuten, Vergleich mit bester unterer und oberer Schranke des exakten Verfahrens nach 1 oder 12 Stunden.

Anhang C. Ergebnisse numerischer Testläufe - heuristische Lösungsverfahren

Instanz Name	MIP			GA 1 Sek.		GA 1 Min.		GA 3 Min.		GA 10 Min.		GA 30 Min.	
	LB	Obj	Gap	Gap LB	Gap Obj	Gap LB	Gap Obj	Gap LB	Gap Obj	Gap LB	Gap Obj	Gap LB	Gap Obj
MP50/1	9,28	9,28	0,0%	35,9%	35,9%	2,5%	2,5%	2,5%	2,5%	2,5%	2,5%	2,5%	2,5%
MP50/2	3,53	3,53	0,0%	59,7%	59,7%	20,3%	20,3%	19,0%	19,0%	18,5%	18,5%	18,5%	18,5%
MP50/3	8,69	8,69	0,0%	53,7%	53,7%	31,8%	31,8%	30,9%	30,9%	30,5%	30,5%	30,5%	30,5%
MP50/4	2,52	2,54	0,8%	76,6%	76,4%	46,8%	46,4%	45,2%	44,8%	44,7%	44,3%	44,6%	44,2%
MP50/5	10,45	22,23	53,0%	78,3%	53,9%	53,3%	0,7%	51,1%	-4,0%	48,9%	-8,7%	48,9%	-8,8%
MP50/6	22,45	24,46	8,2%	57,0%	53,2%	20,6%	13,5%	20,6%	13,4%	20,6%	13,4%	20,6%	13,4%
MP50/7	22,04	22,09	0,2%	22,3%	22,1%	4,8%	4,5%	0,5%	0,3%	0,5%	0,3%	0,5%	0,3%
MP50/8	4,21	4,21	0,0%	5,4%	5,4%	0,2%	0,2%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%
MP50/9	43,46	70,48	38,3%	53,6%	24,7%	35,6%	-4,4%	33,7%	-7,6%	31,6%	-10,9%	31,6%	-10,9%
MP50/10	26,07	50,35	48,2%	65,1%	32,6%	50,5%	4,4%	45,3%	-5,6%	44,2%	-7,9%	43,0%	-10,2%
MP50/11	4,69	5,72	18,0%	83,0%	79,2%	66,0%	58,5%	56,8%	47,3%	56,5%	47,0%	52,4%	41,9%
MP50/12	11,82	13,62	13,2%	65,8%	60,6%	24,5%	13,0%	24,2%	12,7%	24,2%	12,7%	24,2%	12,7%
MP50/13	10,47	10,47	0,0%	47,5%	47,5%	0,9%	0,9%	0,3%	0,3%	0,2%	0,2%	0,2%	0,2%
MP50/14	16,72	27,77	39,8%	61,9%	36,7%	51,8%	20,0%	47,3%	12,4%	45,6%	9,6%	45,6%	9,6%
MP50/15	7,33	24,06	69,5%	86,4%	55,3%	80,0%	34,4%	75,9%	21,0%	74,1%	15,0%	72,3%	9,0%
MP50/16	6,37	9,35	31,9%	69,6%	55,4%	50,4%	27,2%	45,4%	19,8%	45,2%	19,6%	40,3%	12,4%
MP50/17	15,59	17,48	10,8%	55,4%	50,0%	25,3%	16,2%	21,5%	11,9%	21,5%	11,9%	21,5%	11,9%
MP50/18	16,88	20,86	19,1%	66,7%	58,9%	50,0%	38,3%	46,9%	34,4%	29,1%	12,4%	26,1%	8,6%
MP50/19	14,53	29,08	50,0%	77,0%	53,9%	68,0%	36,0%	59,9%	19,8%	55,0%	9,9%	53,6%	7,2%
MP50/20	28,17	45,92	38,7%	62,0%	38,1%	50,8%	19,7%	46,3%	12,4%	46,1%	12,1%	45,0%	10,4%
MP50/21	5,03	5,04	0,2%	79,6%	79,5%	31,5%	31,3%	20,4%	20,3%	20,0%	19,9%	20,0%	19,9%
MP50/22	8,82	8,82	0,0%	54,1%	54,1%	1,6%	1,6%	0,5%	0,5%	0,2%	0,2%	0,0%	0,0%
MP50/23	-0,95	-0,95	0,0%	107,5%	107,5%	-82,7%	-82,7%	-66,7%	-66,7%	-35,7%	-35,7%	-18,8%	-18,8%
MP50/24	10,08	48,98	79,4%	85,4%	29,2%	77,8%	-7,7%	76,3%	-15,1%	74,5%	-24,1%	73,8%	-27,4%
MP50/25	11,95	52,41	77,2%	83,7%	28,7%	79,2%	8,7%	77,7%	2,0%	77,6%	1,9%	77,6%	1,9%
MP50/26	19,19	43,45	55,8%	66,8%	24,8%	56,2%	0,8%	54,0%	-4,2%	50,4%	-12,3%	47,7%	-18,5%
MP50/27	29,65	45,38	34,7%	53,6%	28,9%	37,8%	4,8%	36,5%	2,8%	33,4%	-2,0%	33,3%	-2,1%
MP50/28	18,18	21,93	17,1%	64,5%	57,1%	33,3%	19,6%	30,1%	15,7%	30,0%	15,6%	30,0%	15,6%
MP50/29	18,79	23,89	21,3%	58,4%	47,1%	34,9%	17,2%	32,7%	14,4%	24,7%	4,3%	21,8%	0,5%
MP50/30	25,15	92,45	72,8%	80,7%	29,1%	73,2%	1,4%	71,4%	-5,2%	70,7%	-7,9%	70,6%	-8,0%
MP50/31	26,43	144,27	81,7%	79,1%	-13,8%	71,8%	-54,0%	70,5%	-61,0%	70,1%	-63,0%	69,8%	-64,8%
MP50/32	6,3	73,78	91,5%	92,7%	15,1%	89,6%	-21,4%	89,3%	-25,7%	88,7%	-32,3%	88,3%	-37,2%
MP50/33	25,03	91,43	72,6%	79,9%	26,7%	73,6%	3,5%	72,3%	-1,1%	70,8%	-6,7%	69,7%	-10,6%
MP50/34	45,89	117,43	60,9%	67,1%	15,9%	58,9%	-5,3%	58,1%	-7,2%	57,4%	-9,0%	56,9%	-10,3%
MP50/35	9,67	9,67	0,0%	35,0%	35,0%	10,1%	10,1%	9,7%	9,7%	9,0%	9,0%	9,0%	9,0%
MP50/36	0,8	0,8	0,0%	72,5%	72,5%	2,4%	2,4%	1,2%	1,2%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%
MP50/37	16,2	67,21	75,9%	80,1%	17,6%	75,0%	-3,8%	74,1%	-7,3%	72,9%	-12,5%	71,5%	-18,4%
MP50/38	25,69	53,3	51,8%	74,2%	46,5%	66,5%	30,5%	63,2%	23,6%	59,8%	16,7%	55,5%	7,6%
MP50/39	21,03	396,25	94,7%	86,0%	-164,6%	83,7%	-207,5%	82,6%	-228,0%	81,4%	-251,1%	80,5%	-267,4%
MP50/40	20,74	21,7	4,4%	30,7%	27,5%	16,7%	12,8%	13,4%	9,4%	13,4%	9,4%	13,4%	9,4%
MP50/41	5,75	18,57	69,0%	86,6%	56,8%	72,4%	11,0%	66,0%	-9,9%	63,7%	-17,2%	61,1%	-25,5%
MP50/42	16,14	24,3	33,6%	69,9%	54,8%	58,0%	36,8%	50,6%	25,6%	47,0%	20,2%	43,2%	14,4%
MP50/43	19,69	94,15	79,1%	85,9%	32,7%	80,2%	5,3%	77,7%	-6,5%	76,4%	-12,9%	76,1%	-14,3%
MP50/44	9,3	9,3	0,0%	78,7%	78,7%	60,8%	60,8%	44,3%	44,3%	40,5%	40,5%	36,3%	36,3%
MP50/45	10,94	36,51	70,0%	84,4%	47,8%	80,0%	33,1%	78,0%	26,6%	76,6%	21,9%	75,5%	18,4%
MP50/46	10,72	36,31	70,5%	83,5%	44,0%	78,5%	27,1%	76,0%	18,8%	75,0%	15,3%	73,7%	10,8%
MP50/47	4,4	4,4	0,0%	76,5%	76,5%	33,0%	33,0%	20,3%	20,3%	1,8%	1,8%	1,1%	1,1%
MP50/48	12,18	12,18	0,0%	54,4%	54,4%	9,5%	9,5%	2,4%	2,4%	1,6%	1,6%	0,7%	0,7%
MP50/49	18,01	89,22	79,8%	84,8%	24,8%	78,1%	-8,3%	76,0%	-19,0%	74,3%	-27,1%	74,0%	-29,0%
MP50/50	8,7	178,53	95,1%	96,2%	21,5%	94,8%	-6,9%	93,9%	-25,5%	93,1%	-41,3%	92,5%	-54,6%
Mittelwert	14,9	44,9	36,6%	68,3%	40,2%	45,4%	7,0%	42,5%	0,8%	41,2%	-2,9%	40,5%	-5,1%

Tabelle C.13. – MP50 gelöst per GA unter ZF3, Zeitlimit = 30 Minuten, Vergleich mit bester unterer und oberer Schranke des exakten Verfahrens nach 1 oder 12 Stunden.

C.3. Vergleich mit anderen Lösungsheuristiken

Instanz	GA (1 Sek)	GA (30 Sek)	GA (5 Min)	RS (5 Min)	PR^{LPF}	PR^{MTS}	PR^{MWR}
EP150/1	53	53	53	53	53	53	53
EP150/2	66	66	66	66	66	73	73
EP150/3	51	51	51	51	51	51	51
EP150/4	45	45	45	45	46	45	45
EP150/5	41	41	41	41	41	41	42
EP150/6	38	38	38	38	38	43	43
EP150/7	58	58	58	58	58	60	58
EP150/8	35	35	35	35	35	36	38
EP150/9	34	34	34	34	37	37	35
EP150/10	50	50	50	50	50	53	53
EP150/11	52	52	52	52	52	54	54
EP150/12	40	40	40	40	40	45	45
EP150/13	37	37	37	37	37	37	37
EP150/14	51	51	51	51	51	51	51
EP150/15	55	55	55	55	55	55	59
EP150/16	52	52	52	52	52	52	52
EP150/17	55	55	55	55	55	57	57
EP150/18	50	50	50	50	50	52	50
EP150/19	48	48	48	50	54	55	58
EP150/20	86	85	85	90	92	98	95
EP150/21	40	39	39	40	43	46	46
EP150/22	51	50	50	52	61	66	57
EP150/23	42	42	42	42	42	42	42
EP150/24	47	47	47	48	53	56	54
EP150/25	45	45	44	45	53	48	52
EP150/26	45	45	45	45	46	52	53
EP150/27	35	35	35	35	36	41	41
EP150/28	37	37	37	37	37	37	37
EP150/29	35	35	35	35	42	40	44
EP150/30	36	36	36	36	36	38	37
EP150/31	49	49	49	49	51	53	51
EP150/32	49	49	49	49	49	50	49
EP150/33	73	70	69	73	81	79	84
EP150/34	35	35	35	35	36	38	41
EP150/35	48	48	48	48	48	49	49
EP150/36	50	50	50	50	50	50	50
EP150/37	46	45	45	47	50	62	54
EP150/38	41	40	40	43	44	45	47
EP150/39	44	44	44	45	45	50	54
EP150/40	46	46	46	46	46	46	46
EP150/41	46	46	46	46	46	46	46
EP150/42	48	48	48	49	50	51	52
EP150/43	34	32	32	35	34	40	39
EP150/44	38	37	37	40	43	45	47
EP150/45	43	40	40	43	46	46	54
EP150/46	72	65	64	72	80	80	83
EP150/47	47	47	47	48	47	48	50
EP150/48	44	43	43	46	46	54	53
EP150/49	76	71	70	79	85	86	85
EP150/50	40	40	40	40	40	40	40
EP150/51	65	65	65	65	69	67	77
EP150/52	75	75	75	75	75	79	75
EP150/53	59	59	59	59	59	61	60
EP150/54	78	67	66	76	78	82	81
EP150/55	83	75	74	81	85	93	84
EP150/56	54	54	54	54	54	54	54
EP150/57	86	76	75	81	89	93	94

Fortsetzung auf nächster Seite...

Anhang C. Ergebnisse numerischer Testläufe - heuristische Lösungsverfahren

... fortgesetzte Tabelle von vorheriger Seite

Instanz	GA (1 Sek)	GA (30 Sek)	GA (5 Min)	RS (5 Min)	PR^{LPF}	PR^{MTS}	PR^{MWR}
EP150/58	51	51	51	51	51	51	51
EP150/59	55	55	55	55	55	55	59
EP150/60	57	57	57	57	57	57	57
EP150/61	53	49	49	53	55	60	60
EP150/62	75	75	75	75	75	76	82
EP150/63	66	66	66	66	66	66	66
EP150/64	80	80	80	80	80	80	80
EP150/65	54	53	53	53	53	57	64
EP150/66	58	58	58	58	58	58	58
EP150/67	63	63	63	63	63	63	63
EP150/68	51	51	51	51	51	52	51
EP150/69	44	44	44	44	44	44	44
EP150/70	69	67	67	69	69	71	75
EP150/71	90	75	75	89	92	96	99
EP150/72	50	50	50	50	50	59	51
EP150/73	61	56	56	60	63	67	68
EP150/74	56	56	56	56	56	56	56
EP150/75	76	71	71	75	80	77	80
EP150/76	54	54	54	54	54	56	56
EP150/77	66	66	66	66	66	66	66
EP150/78	71	63	63	70	65	73	68
EP150/79	50	50	50	50	50	55	55
EP150/80	76	63	62	72	79	80	76
EP150/81	54	52	52	55	55	62	61
EP150/82	51	49	49	51	50	63	52
EP150/83	39	38	38	41	39	45	45
EP150/84	119	108	104	118	125	126	126
EP150/85	76	66	66	73	88	88	89
EP150/86	85	72	70	82	87	94	88
EP150/87	67	60	58	67	69	70	72
EP150/88	51	44	43	49	50	60	58
EP150/89	52	51	51	54	51	54	57
EP150/90	81	74	74	80	84	88	90
EP150/91	57	56	56	59	57	65	64
EP150/92	37	37	37	38	37	41	41
EP150/93	67	61	60	69	71	70	73
EP150/94	46	46	46	46	46	48	46
EP150/95	120	110	105	118	124	126	126
EP150/96	60	55	54	60	61	61	69
EP150/97	45	45	45	45	45	48	45
EP150/98	57	53	52	56	59	60	60
EP150/99	55	50	48	56	63	65	66
EP150/100	48	48	48	48	48	48	52
EP150/101	81	81	81	81	81	81	85
EP150/102	79	79	79	80	79	91	85
EP150/103	82	71	69	80	80	86	84
EP150/104	128	109	103	118	122	124	124
EP150/105	72	72	72	72	76	73	79
EP150/106	72	72	72	72	72	72	72
EP150/107	81	70	69	81	79	85	86
EP150/108	93	93	93	93	93	97	97
EP150/109	78	76	76	76	87	82	82
EP150/110	66	65	65	66	65	69	75
EP150/111	66	64	64	67	64	65	67
EP150/112	78	72	72	76	73	82	78
EP150/113	79	75	75	79	76	81	77
EP150/114	91	81	79	90	86	98	97
EP150/115	66	66	66	66	66	66	66
EP150/116	119	103	97	112	120	117	123
EP150/117	110	94	91	107	105	108	109

Fortsetzung auf nächster Seite. ...

... fortgesetzte Tabelle von vorheriger Seite

Instanz	GA (1 Sek)	GA (30 Sek)	GA (5 Min)	RS (5 Min)	PR^{LPF}	PR^{MTS}	PR^{MWR}
EP150/118	157	142	136	152	159	172	160
EP150/119	116	105	100	114	124	115	121
EP150/120	66	66	66	66	66	66	66
EP150/121	136	129	122	135	139	141	145
EP150/122	120	105	98	116	119	120	118
EP150/123	77	77	77	77	77	77	77
EP150/124	115	106	105	116	109	117	117
EP150/125	75	65	63	72	70	77	82
EP150/126	64	64	64	64	64	70	64
EP150/127	64	64	64	64	64	64	65
EP150/128	172	158	151	170	175	175	180
EP150/129	73	65	63	71	71	81	79
EP150/130	72	66	64	73	67	75	69
EP150/131	64	61	61	64	64	66	67
EP150/132	81	81	81	81	81	81	81
EP150/133	56	56	56	56	56	56	56
EP150/134	73	73	73	73	73	73	73
EP150/135	52	52	52	52	52	53	61
EP150/136	69	62	59	69	67	71	74
EP150/137	64	64	64	64	64	64	64
EP150/138	85	76	74	83	86	89	84
EP150/139	101	89	87	100	99	107	104
EP150/140	76	71	71	75	75	81	80
EP150/141	71	64	63	72	69	77	74
EP150/142	151	138	128	147	150	157	150
EP150/143	56	56	56	56	56	56	56
EP150/144	130	123	117	132	139	142	140
EP150/145	60	60	60	60	60	61	61
EP150/146	168	158	151	167	177	181	170
EP150/147	66	59	58	67	60	72	71
EP150/148	95	87	84	96	95	98	99
EP150/149	63	63	63	63	63	65	63
EP150/150	78	71	70	77	78	80	80
Mittelwert	66,5	63,3	62,5	66,2	67,5	70,1	70,1

Tabelle C.14. – EP150 gelöst unter ZF1 mit GA und weiteren Heuristiken aus der Literatur, Zielfunktionswert der besten Lösung. RS = *Random Sampling* (vgl. Kolisch u. a. (2003)), PR^{LPF} = *Longest path following* Prioritätsregel, PR^{MTS} = *Most total successors* Prioritätsregel, PR^{MWR} = *Most work content remaining* Prioritätsregel (für alle Prioritätsregeln vgl. Fündeling und Trautmann (2010)).

Instanz	GA (1 Sek)	GA (30 Sek)	GA (5 Min)	RS (5 Min)	PR^{LPF}	PR^{MTS}	PR^{MWR}
MP50/1	11	10	10	16	17	35	22
MP50/2	6	5	5	8	18	35	30
MP50/3	16	12	11	18	25	24	26
MP50/4	8	4	4	9	22	21	26
MP50/5	38	21	20	38	65	57	92
MP50/6	42	28	28	44	74	68	89
MP50/7	27	23	23	28	40	46	47
MP50/8	5	5	5	5	6	23	9
MP50/9	83	64	61	84	121	118	120
MP50/10	65	47	46	69	109	115	115
MP50/11	23	12	11	26	34	56	54
MP50/12	29	14	14	29	44	88	53
MP50/13	16	11	11	16	25	34	27
MP50/14	40	31	30	40	104	110	123
MP50/15	53	28	26	46	80	90	113
MP50/16	19	11	10	20	29	54	60
MP50/17	26	21	21	31	51	58	57
MP50/18	46	29	23	45	64	94	114
MP50/19	52	34	31	47	95	123	154
MP50/20	72	48	47	74	105	153	170
MP50/21	22	6	6	18	32	66	49
MP50/22	10	10	10	13	36	53	48
MP50/23	12	0	0	<i>n.v.</i>	<i>n.v.</i>	48	<i>n.v.</i>
MP50/24	60	41	37	63	153	129	148
MP50/25	83	49	47	80	141	161	147
MP50/26	63	40	35	61	130	102	138
MP50/27	57	45	44	59	118	113	136
MP50/28	45	27	25	44	93	110	117
MP50/29	45	28	28	46	93	118	104
MP50/30	117	87	85	121	215	229	217
MP50/31	123	88	84	110	199	241	212
MP50/32	94	56	52	88	189	200	207
MP50/33	124	85	82	121	219	202	225
MP50/34	142	108	103	135	271	198	280
MP50/35	11	10	10	12	15	15	26
MP50/36	2	1	1	3	12	20	14
MP50/37	76	61	55	78	280	279	286
MP50/38	94	60	52	80	245	273	243
MP50/39	164	117	105	177	375	472	451
MP50/40	30	24	24	30	58	69	69
MP50/41	38	15	13	37	117	115	116
MP50/42	48	32	29	55	124	128	135
MP50/43	113	83	70	99	267	314	256
MP50/44	44	16	13	40	54	108	99
MP50/45	65	45	43	74	115	139	155
MP50/46	64	46	42	69	105	122	161
MP50/47	20	5	5	14	25	33	42
MP50/48	25	14	13	23	28	45	54
MP50/49	122	74	67	122	247	261	297
MP50/50	214	133	109	203	315	448	438
Mittelwert	56,1	37,3	34,5	56,5	110,2	124,3	130,0

Tabelle C.15. – MP50 gelöst unter ZF2 mit GA und weiteren Heuristiken aus der Literatur, Zielfunktionswert der besten Lösung. RS = *Random Sampling* (vgl. Kolisch u. a. (2003)), PR^{LPF} = *Longest path following* Prioritätsregel, PR^{MTS} = *Most total successors* Prioritätsregel, PR^{MWR} = *Most work content remaining* Prioritätsregel (für alle Prioritätsregeln vgl. Fündeling und Trautmann (2010)).

C.3. Vergleich mit anderen Lösungsheuristiken

Instanz	GA (1 Sek)	GA (30 Sek)	GA (5 Min)	RS (5 Min)	PR^{LPF}	PR^{MTS}	PR^{MWR}
MP250/1	9	9	9	9	11	21	18
MP250/2	10	10	10	10	11	11	12
MP250/3	4	4	4	4	12	12	18
MP250/4	2	0	0	0	5	20	18
MP250/5	9	9	9	9	15	16	18
MP250/6	21	8	8	21	28	30	30
MP250/7	21	10	9	21	27	38	27
MP250/8	38	28	27	42	74	77	84
MP250/9	44	31	30	38	79	80	73
MP250/10	25	23	23	24	60	81	n.v.
MP250/11	18	16	16	20	63	67	52
MP250/12	55	42	42	53	97	106	106
MP250/13	68	49	48	69	115	126	130
MP250/14	15	13	13	17	14	25	16
MP250/15	15	15	15	17	15	22	18
MP250/16	27	26	26	28	50	56	58
MP250/17	8	8	8	8	8	20	17
MP250/18	3	3	3	3	39	22	56
MP250/19	7	7	7	7	56	53	65
MP250/20	49	37	32	47	98	91	107
MP250/21	37	26	26	35	84	65	85
MP250/22	90	71	64	93	183	186	175
MP250/23	13	10	10	13	25	32	22
MP250/24	51	37	37	55	132	105	146
MP250/25	54	42	42	61	132	95	130
MP250/26	52	30	22	52	174	182	166
MP250/27	39	24	23	46	143	156	190
MP250/28	46	32	31	48	123	115	122
MP250/29	70	53	47	77	101	106	91
MP250/30	71	56	53	74	99	104	95
MP250/31	22	8	8	19	32	43	42
MP250/32	57	42	40	60	129	124	132
MP250/33	75	49	45	73	124	166	151
MP250/34	66	52	49	66	130	133	134
MP250/35	14	0	0	12	33	42	37
MP250/36	2	2	2	2	15	19	24
MP250/37	1	1	1	4	13	17	23
MP250/38	8	5	5	7	9	17	26
MP250/39	43	32	32	41	91	134	116
MP250/40	22	16	15	21	45	53	50
MP250/41	72	49	44	72	152	195	175
MP250/42	68	51	50	79	156	195	180
MP250/43	25	14	11	22	47	65	80
MP250/44	26	16	16	30	53	58	57
MP250/45	61	36	36	62	115	94	132
MP250/46	28	15	9	24	91	65	83
MP250/47	32	16	14	33	61	109	94
MP250/48	49	30	28	43	95	68	105
MP250/49	42	30	29	46	98	83	85
MP250/50	8	8	8	8	8	n.v.	n.v.
MP250/51	9	8	8	10	10	19	24
MP250/52	7	5	5	6	5	16	13
MP250/53	31	19	17	34	47	51	51
MP250/54	44	32	31	51	68	75	77
MP250/55	11	3	3	8	41	41	53
MP250/56	8	8	8	9	37	50	49
MP250/57	23	12	11	22	36	39	42
MP250/58	21	15	15	22	35	42	41
MP250/59	38	21	18	35	84	78	82
MP250/60	36	26	24	37	84	116	100

Fortsetzung auf nächster Seite. ...

Anhang C. Ergebnisse numerischer Testläufe - heuristische Lösungsverfahren

... fortgesetzte Tabelle von vorheriger Seite

Instanz	GA (1 Sek)	GA (30 Sek)	GA (5 Min)	RS (5 Min)	PR^{LPF}	PR^{MTS}	PR^{MWR}
MP250/61	33	26	25	33	60	74	72
MP250/62	45	31	31	41	102	92	103
MP250/63	58	45	41	56	102	110	127
MP250/64	37	22	20	35	81	79	87
MP250/65	43	24	21	37	90	87	84
MP250/66	77	36	34	71	160	136	147
MP250/67	52	23	18	49	76	132	117
MP250/68	38	21	19	36	79	77	72
MP250/69	50	25	22	44	104	89	88
MP250/70	72	47	43	69	160	167	159
MP250/71	71	49	46	66	152	158	156
MP250/72	51	36	34	47	75	94	114
MP250/73	53	27	19	39	82	94	76
MP250/74	26	0	0	23	<i>n.v.</i>	83	<i>n.v.</i>
MP250/75	58	36	35	53	66	82	109
MP250/76	112	90	84	115	217	239	202
MP250/77	27	23	23	28	29	66	55
MP250/78	37	16	16	40	<i>n.v.</i>	<i>n.v.</i>	<i>n.v.</i>
MP250/79	20	10	10	<i>n.v.</i>	<i>n.v.</i>	<i>n.v.</i>	<i>n.v.</i>
MP250/80	14	6	6	11	22	48	69
MP250/81	40	18	15	36	57	83	82
MP250/82	45	29	27	46	80	84	100
MP250/83	45	23	17	46	87	89	78
MP250/84	26	14	13	29	39	45	58
MP250/85	74	56	56	69	129	151	142
MP250/86	52	34	32	52	99	93	107
MP250/87	42	33	32	45	105	106	112
MP250/88	13	5	5	13	35	44	42
MP250/89	11	6	6	10	42	38	40
MP250/90	56	43	43	57	120	132	163
MP250/91	81	57	51	79	<i>n.v.</i>	227	<i>n.v.</i>
MP250/92	46	28	26	43	85	101	82
MP250/93	37	15	15	38	66	84	71
MP250/94	13	9	9	10	34	43	44
MP250/95	14	9	9	17	42	38	33
MP250/96	15	3	2	17	41	41	37
MP250/97	20	1	1	18	24	43	65
MP250/98	22	10	9	24	49	60	59
MP250/99	38	26	26	36	62	68	91
MP250/100	75	47	43	<i>n.v.</i>	<i>n.v.</i>	<i>n.v.</i>	196
MP250/101	33	21	21	32	97	74	80
MP250/102	39	20	16	34	94	75	77
MP250/103	160	135	128	157	263	285	280
MP250/104	78	49	49	72	99	135	127
MP250/105	73	47	45	71	97	124	142
MP250/106	1	1	1	1	17	29	13
MP250/107	4	4	4	4	14	37	14
MP250/108	22	4	3	19	55	86	83
MP250/109	30	13	10	33	89	117	82
MP250/110	2	2	2	2	33	120	15
MP250/111	0	0	0	0	21	43	9
MP250/112	32	17	14	29	72	104	66
MP250/113	56	29	28	49	84	90	114
MP250/114	90	60	54	93	190	191	204
MP250/115	138	101	96	138	267	285	284
MP250/116	136	100	97	143	234	250	250
MP250/117	222	174	134	<i>n.v.</i>	<i>n.v.</i>	<i>n.v.</i>	<i>n.v.</i>
MP250/118	83	56	53	78	159	151	171
MP250/119	71	48	44	69	169	156	152
MP250/120	<i>n.v.</i>	<i>n.v.</i>	<i>n.v.</i>	<i>n.v.</i>	<i>n.v.</i>	<i>n.v.</i>	<i>n.v.</i>

Fortsetzung auf nächster Seite...

C.3. Vergleich mit anderen Lösungsheuristiken

... fortgesetzte Tabelle von vorheriger Seite

Instanz	GA (1 Sek)	GA (30 Sek)	GA (5 Min)	RS (5 Min)	PR^{LPF}	PR^{MTS}	PR^{MWR}
MP250/121	30	6	5	24	77	95	85
MP250/122	49	33	33	47	71	79	76
MP250/123	46	30	29	48	76	97	79
MP250/124	32	26	26	33	82	64	77
MP250/125	27	15	15	24	61	96	78
MP250/126	31	19	19	30	80	92	99
MP250/127	158	113	100	171	433	452	446
MP250/128	31	24	24	33	57	51	60
MP250/129	27	18	18	27	34	37	52
MP250/130	28	20	20	25	28	27	50
MP250/131	35	16	15	31	74	70	92
MP250/132	40	26	26	43	80	83	108
MP250/133	<i>n.v.</i>	<i>n.v.</i>	<i>n.v.</i>	<i>n.v.</i>	<i>n.v.</i>	<i>n.v.</i>	<i>n.v.</i>
MP250/134	<i>n.v.</i>	<i>n.v.</i>	<i>n.v.</i>	<i>n.v.</i>	<i>n.v.</i>	<i>n.v.</i>	<i>n.v.</i>
MP250/135	54	23	22	42	76	94	159
MP250/136	49	19	17	42	103	85	109
MP250/137	72	49	42	67	226	215	200
MP250/138	75	45	39	67	193	226	181
MP250/139	51	30	25	46	94	104	93
MP250/140	43	23	22	42	91	74	88
MP250/141	123	90	86	118	212	202	263
MP250/142	129	91	81	127	192	214	244
MP250/143	44	28	25	45	64	78	75
MP250/144	49	33	31	52	72	96	90
MP250/145	70	52	51	70	103	105	108
MP250/146	46	22	19	45	119	122	127
MP250/147	121	85	74	111	298	297	305
MP250/148	130	87	82	133	267	280	295
MP250/149	37	16	13	32	120	143	126
MP250/150	6	0	0	8	16	35	28
MP250/151	48	35	25	<i>n.v.</i>	125	<i>n.v.</i>	<i>n.v.</i>
MP250/152	70	31	22	<i>n.v.</i>	<i>n.v.</i>	<i>n.v.</i>	<i>n.v.</i>
MP250/153	105	74	68	109	197	199	205
MP250/154	108	78	70	110	247	218	208
MP250/155	<i>n.v.</i>	<i>n.v.</i>	<i>n.v.</i>	<i>n.v.</i>	<i>n.v.</i>	<i>n.v.</i>	356
MP250/156	176	144	132	<i>n.v.</i>	247	289	316
MP250/157	60	34	28	61	151	116	129
MP250/158	263	202	185	274	534	514	510
MP250/159	104	77	69	95	189	190	215
MP250/160	90	57	53	90	203	206	215
MP250/161	77	47	43	73	200	175	207
MP250/162	17	17	17	18	60	68	72
MP250/163	65	33	31	62	194	161	169
MP250/164	70	32	25	77	131	172	196
MP250/165	17	1	1	18	32	61	54
MP250/166	13	5	5	13	27	18	43
MP250/167	64	36	34	67	117	109	110
MP250/168	<i>n.v.</i>	<i>n.v.</i>	<i>n.v.</i>	<i>n.v.</i>	<i>n.v.</i>	<i>n.v.</i>	<i>n.v.</i>
MP250/169	60	31	28	59	101	128	124
MP250/170	147	115	100	148	298	382	289
MP250/171	27	9	8	26	40	58	47
MP250/172	24	10	10	27	43	50	48
MP250/173	180	114	101	163	380	386	387
MP250/174	149	108	99	131	355	358	369
MP250/175	354	317	291	<i>n.v.</i>	659	671	707
MP250/176	383	303	269	375	626	634	612
MP250/177	25	14	13	28	41	44	58
MP250/178	97	62	57	92	226	215	210
MP250/179	185	132	122	193	343	337	337
MP250/180	120	68	65	107	218	209	264

Fortsetzung auf nächster Seite...

Anhang C. Ergebnisse numerischer Testläufe - heuristische Lösungsverfahren

... fortgesetzte Tabelle von vorheriger Seite

Instanz	GA (1 Sek)	GA (30 Sek)	GA (5 Min)	RS (5 Min)	PR^{LPF}	PR^{MTS}	PR^{MWR}
MP250/181	112	74	66	114	243	231	248
MP250/182	92	55	52	101	220	209	238
MP250/183	175	120	116	169	317	319	341
MP250/184	84	49	44	81	147	146	176
MP250/185	99	70	62	106	270	297	288
MP250/186	98	69	61	100	265	263	255
MP250/187	137	99	82	141	234	204	225
MP250/188	18	12	10	18	50	42	43
MP250/189	62	34	25	59	106	202	191
MP250/190	121	80	70	125	266	297	248
MP250/191	50	20	13	59	116	151	159
MP250/192	39	7	7	34	36	68	77
MP250/193	204	139	118	<i>n.v.</i>	457	418	414
MP250/194	182	141	127	191	433	443	443
MP250/195	202	143	122	187	386	474	399
MP250/196	241	153	148	242	468	496	446
MP250/197	<i>n.v.</i>	<i>n.v.</i>	<i>n.v.</i>	<i>n.v.</i>	<i>n.v.</i>	<i>n.v.</i>	<i>n.v.</i>
MP250/198	<i>n.v.</i>	<i>n.v.</i>	<i>n.v.</i>	<i>n.v.</i>	<i>n.v.</i>	<i>n.v.</i>	<i>n.v.</i>
MP250/199	134	83	71	131	319	378	407
MP250/200	129	81	67	122	301	330	358
MP250/201	43	12	12	39	63	91	<i>n.v.</i>
MP250/202	98	65	62	94	111	125	132
MP250/203	77	36	28	73	200	188	194
MP250/204	57	19	14	56	212	204	214
MP250/205	137	94	82	144	322	270	356
MP250/206	139	97	91	151	313	343	297
MP250/207	209	149	143	198	365	372	414
MP250/208	209	151	132	189	372	386	367
MP250/209	47	23	19	42	87	98	105
MP250/210	53	37	36	53	97	96	94
MP250/211	183	127	115	184	329	321	340
MP250/212	189	147	129	177	306	327	323
MP250/213	78	53	49	73	198	211	235
MP250/214	57	28	19	51	115	151	126
MP250/215	60	28	19	49	155	153	176
MP250/216	101	53	39	103	253	251	227
MP250/217	122	72	50	<i>n.v.</i>	235	228	245
MP250/218	200	138	125	194	357	363	357
MP250/219	90	64	58	96	176	199	206
MP250/220	103	73	60	112	187	199	187
MP250/221	65	40	35	62	116	136	137
MP250/222	42	27	19	47	129	142	144
MP250/223	64	39	37	61	106	117	132
MP250/224	244	176	160	262	484	427	493
MP250/225	128	104	86	145	308	276	301
MP250/226	137	83	76	140	267	319	312
MP250/227	142	94	88	134	276	265	267
MP250/228	137	92	85	142	327	326	335
MP250/229	118	84	79	121	279	278	297
MP250/230	91	67	57	<i>n.v.</i>	182	<i>n.v.</i>	<i>n.v.</i>
MP250/231	94	64	56	<i>n.v.</i>	<i>n.v.</i>	<i>n.v.</i>	<i>n.v.</i>
MP250/232	117	73	70	117	243	264	307
MP250/233	101	76	68	103	247	258	250
MP250/234	133	93	88	123	257	293	303
MP250/235	<i>n.v.</i>	<i>n.v.</i>	<i>n.v.</i>	<i>n.v.</i>	<i>n.v.</i>	<i>n.v.</i>	<i>n.v.</i>
MP250/236	<i>n.v.</i>	<i>n.v.</i>	<i>n.v.</i>	<i>n.v.</i>	<i>n.v.</i>	<i>n.v.</i>	<i>n.v.</i>
MP250/237	88	63	56	90	148	185	181
MP250/238	115	75	69	107	237	242	260
MP250/239	166	122	113	168	310	332	367
MP250/240	<i>n.v.</i>	<i>n.v.</i>	<i>n.v.</i>	<i>n.v.</i>	<i>n.v.</i>	<i>n.v.</i>	<i>n.v.</i>

Fortsetzung auf nächster Seite...

... fortgesetzte Tabelle von vorheriger Seite

Instanz	GA (1 Sek)	GA (30 Sek)	GA (5 Min)	RS (5 Min)	PR^{LPF}	PR^{MTS}	PR^{MWR}
MP250/241	<i>n.v.</i>	<i>n.v.</i>	<i>n.v.</i>	<i>n.v.</i>	<i>n.v.</i>	<i>n.v.</i>	<i>n.v.</i>
MP250/242	<i>n.v.</i>	<i>n.v.</i>	<i>n.v.</i>	<i>n.v.</i>	<i>n.v.</i>	<i>n.v.</i>	<i>n.v.</i>
MP250/243	<i>n.v.</i>	<i>n.v.</i>	<i>n.v.</i>	<i>n.v.</i>	<i>n.v.</i>	<i>n.v.</i>	<i>n.v.</i>
MP250/244	<i>n.v.</i>	<i>n.v.</i>	<i>n.v.</i>	<i>n.v.</i>	<i>n.v.</i>	<i>n.v.</i>	<i>n.v.</i>
MP250/245	199	124	96	178	313	366	379
MP250/246	94	63	58	97	186	178	198
MP250/247	<i>n.v.</i>	<i>n.v.</i>	<i>n.v.</i>	<i>n.v.</i>	<i>n.v.</i>	<i>n.v.</i>	<i>n.v.</i>
MP250/248	<i>n.v.</i>	<i>n.v.</i>	<i>n.v.</i>	<i>n.v.</i>	471	<i>n.v.</i>	<i>n.v.</i>
MP250/249	135	93	79	144	331	307	313
MP250/250	157	126	100	171	270	282	296
Mittelwert	71,2	47,8	43,2	67,4	144,9	152,3	157,3

Tabelle C.16. – MP250 gelöst unter ZF2 mit GA und weiteren Heuristiken aus der Literatur, Zielfunktionswert der besten Lösung. RS = *Random Sampling* (vgl. Kolisch u. a. (2003)), PR^{LPF} = *Longest path following* Prioritätsregel, PR^{MTS} = *Most total successors* Prioritätsregel, PR^{MWR} = *Most work content remaining* Prioritätsregel (für alle Prioritätsregeln vgl. Fündeling und Trautmann (2010)).

C.4. Verbindung von exakten und heuristischen Verfahren

Instanz	MIP 1 h			GA 5 Min.			GA + MIP 5 Min				
	LB	Obj	Gap	Obj	Gap	LB	Gap	Obj	LB	Gap	Obj
EP150/1	53	53	0,0%	53	0,0%	0,0%	53	53	0,0%	0,0%	0,0%
EP150/2	66	66	0,0%	66	0,0%	0,0%	66	66	0,0%	0,0%	0,0%
EP150/3	51	51	0,0%	51	0,0%	0,0%	51	51	0,0%	0,0%	0,0%
EP150/4	45	45	0,0%	45	0,0%	0,0%	45	45	0,0%	0,0%	0,0%
EP150/5	41	41	0,0%	41	0,0%	0,0%	41	41	0,0%	0,0%	0,0%
EP150/6	38	38	0,0%	38	0,0%	0,0%	38	38	0,0%	0,0%	0,0%
EP150/7	58	58	0,0%	58	0,0%	0,0%	58	58	0,0%	0,0%	0,0%
EP150/8	35	35	0,0%	35	0,0%	0,0%	35	35	0,0%	0,0%	0,0%
EP150/9	34	34	0,0%	34	0,0%	0,0%	34	34	0,0%	0,0%	0,0%
EP150/10	50	50	0,0%	50	0,0%	0,0%	50	50	0,0%	0,0%	0,0%
EP150/11	52	52	0,0%	52	0,0%	0,0%	52	52	0,0%	0,0%	0,0%
EP150/12	40	40	0,0%	40	0,0%	0,0%	40	40	0,0%	0,0%	0,0%
EP150/13	37	37	0,0%	37	0,0%	0,0%	37	37	0,0%	0,0%	0,0%
EP150/14	51	51	0,0%	51	0,0%	0,0%	51	51	0,0%	0,0%	0,0%
EP150/15	55	55	0,0%	55	0,0%	0,0%	55	55	0,0%	0,0%	0,0%
EP150/16	52	52	0,0%	52	0,0%	0,0%	52	52	0,0%	0,0%	0,0%
EP150/17	55	55	0,0%	55	0,0%	0,0%	55	55	0,0%	0,0%	0,0%
EP150/18	50	50	0,0%	50	0,0%	0,0%	50	50	0,0%	0,0%	0,0%
EP150/19	47	47	0,0%	48	2,1%	2,1%	47	47	0,0%	0,0%	0,0%
EP150/20	76	n.v.	n.v.	85	10,6%	n.v.	77	85	9,4%	n.v.	n.v.
EP150/21	38	38	0,0%	39	2,6%	2,6%	38	38	0,0%	0,0%	0,0%
EP150/22	50	50	0,0%	50	0,0%	0,0%	50	50	0,0%	0,0%	0,0%
EP150/23	42	42	0,0%	42	0,0%	0,0%	42	42	0,0%	0,0%	0,0%
EP150/24	47	47	0,0%	47	0,0%	0,0%	47	47	0,0%	0,0%	0,0%
EP150/25	44	44	0,0%	44	0,0%	0,0%	44	44	0,0%	0,0%	0,0%
EP150/26	44	44	0,0%	45	2,2%	2,2%	44	44	0,0%	0,0%	0,0%
EP150/27	35	35	0,0%	35	0,0%	0,0%	35	35	0,0%	0,0%	0,0%
EP150/28	37	37	0,0%	37	0,0%	0,0%	37	37	0,0%	0,0%	0,0%
EP150/29	34	34	0,0%	35	2,9%	2,9%	34	34	0,0%	0,0%	0,0%
EP150/30	36	36	0,0%	36	0,0%	0,0%	36	36	0,0%	0,0%	0,0%
EP150/31	48	48	0,0%	49	2,0%	2,0%	48	48	0,0%	0,0%	0,0%
EP150/32	49	49	0,0%	49	0,0%	0,0%	49	49	0,0%	0,0%	0,0%
EP150/33	57	76	25,0%	69	17,4%	-10,1%	47	70	32,9%	-8,6%	-8,6%
EP150/34	35	35	0,0%	35	0,0%	0,0%	35	35	0,0%	0,0%	0,0%
EP150/35	48	48	0,0%	48	0,0%	0,0%	48	48	0,0%	0,0%	0,0%
EP150/36	50	50	0,0%	50	0,0%	0,0%	50	50	0,0%	0,0%	0,0%
EP150/37	45	45	0,0%	45	0,0%	0,0%	45	45	0,0%	0,0%	0,0%
EP150/38	40	40	0,0%	40	0,0%	0,0%	40	40	0,0%	0,0%	0,0%
EP150/39	44	44	0,0%	44	0,0%	0,0%	44	44	0,0%	0,0%	0,0%
EP150/40	46	46	0,0%	46	0,0%	0,0%	46	46	0,0%	0,0%	0,0%
EP150/41	46	46	0,0%	46	0,0%	0,0%	46	46	0,0%	0,0%	0,0%
EP150/42	48	48	0,0%	48	0,0%	0,0%	48	48	0,0%	0,0%	0,0%
EP150/43	32	32	0,0%	32	0,0%	0,0%	32	32	0,0%	0,0%	0,0%
EP150/44	36	36	0,0%	37	2,7%	2,7%	36	36	0,0%	0,0%	0,0%
EP150/45	39	39	0,0%	40	2,5%	2,5%	39	39	0,0%	0,0%	0,0%
EP150/46	45	96	53,1%	64	29,7%	-50,0%	43	65	33,8%	-47,7%	-47,7%
EP150/47	47	47	0,0%	47	0,0%	0,0%	47	47	0,0%	0,0%	0,0%
EP150/48	42	42	0,0%	43	2,3%	2,3%	42	42	0,0%	0,0%	0,0%
EP150/49	54	108	50,0%	70	22,9%	-54,3%	56	71	21,1%	-52,1%	-52,1%
EP150/50	40	40	0,0%	40	0,0%	0,0%	40	40	0,0%	0,0%	0,0%
EP150/51	64	64	0,0%	65	1,5%	1,5%	64	64	0,0%	0,0%	0,0%
EP150/52	75	75	0,0%	75	0,0%	0,0%	75	75	0,0%	0,0%	0,0%
EP150/53	59	59	0,0%	59	0,0%	0,0%	59	59	0,0%	0,0%	0,0%
EP150/54	61	69	11,6%	66	7,6%	-4,5%	64	66	3,0%	-4,5%	-4,5%
EP150/55	65	n.v.	n.v.	74	12,2%	n.v.	57	75	24,0%	n.v.	n.v.
EP150/56	54	54	0,0%	54	0,0%	0,0%	54	54	0,0%	0,0%	0,0%

Fortsetzung auf nächster Seite. . .

C.4. Verbindung von exakten und heuristischen Verfahren

... fortgesetzte Tabelle von vorheriger Seite

Instanz	MIP 1 h			GA 5 Min.				GA + MIP 5 Min						
	LB	Obj	Gap	Obj	Gap	LB	Gap	Obj	LB	Obj	Gap	LB	Gap	Obj
EP150/57	69	86	19,8%	75	8,0%	-14,7%			61	76	19,7%	-13,2%		
EP150/58	51	51	0,0%	51	0,0%	0,0%			51	51	0,0%	0,0%		
EP150/59	55	55	0,0%	55	0,0%	0,0%			55	55	0,0%	0,0%		
EP150/60	57	57	0,0%	57	0,0%	0,0%			57	57	0,0%	0,0%		
EP150/61	48	48	0,0%	49	2,0%	2,0%			48	48	0,0%	0,0%		
EP150/62	75	75	0,0%	75	0,0%	0,0%			75	75	0,0%	0,0%		
EP150/63	66	66	0,0%	66	0,0%	0,0%			66	66	0,0%	0,0%		
EP150/64	80	80	0,0%	80	0,0%	0,0%			80	80	0,0%	0,0%		
EP150/65	53	53	0,0%	53	0,0%	0,0%			53	53	0,0%	0,0%		
EP150/66	58	58	0,0%	58	0,0%	0,0%			58	58	0,0%	0,0%		
EP150/67	63	63	0,0%	63	0,0%	0,0%			63	63	0,0%	0,0%		
EP150/68	51	51	0,0%	51	0,0%	0,0%			51	51	0,0%	0,0%		
EP150/69	44	44	0,0%	44	0,0%	0,0%			44	44	0,0%	0,0%		
EP150/70	66	66	0,0%	67	1,5%	1,5%			66	66	0,0%	0,0%		
EP150/71	68	113	39,8%	75	9,3%	-50,7%			68	75	9,3%	-50,7%		
EP150/72	50	50	0,0%	50	0,0%	0,0%			50	50	0,0%	0,0%		
EP150/73	56	56	0,0%	56	0,0%	0,0%			56	56	0,0%	0,0%		
EP150/74	56	56	0,0%	56	0,0%	0,0%			56	56	0,0%	0,0%		
EP150/75	64	82	22,0%	71	9,9%	-15,5%			62	71	12,7%	-15,5%		
EP150/76	54	54	0,0%	54	0,0%	0,0%			54	54	0,0%	0,0%		
EP150/77	66	66	0,0%	66	0,0%	0,0%			66	66	0,0%	0,0%		
EP150/78	62	62	0,0%	63	1,6%	1,6%			62	62	0,0%	0,0%		
EP150/79	50	50	0,0%	50	0,0%	0,0%			50	50	0,0%	0,0%		
EP150/80	53	72	26,4%	62	14,5%	-16,1%			50	62	19,4%	-16,1%		
EP150/81	52	52	0,0%	52	0,0%	0,0%			52	52	0,0%	0,0%		
EP150/82	49	49	0,0%	49	0,0%	0,0%			49	49	0,0%	0,0%		
EP150/83	37	37	0,0%	38	2,6%	2,6%			37	37	0,0%	0,0%		
EP150/84	61	n.v.	n.v.	104	41,3%	n.v.			60	107	43,9%	n.v.		
EP150/85	50	102	51,0%	66	24,2%	-54,5%			46	66	30,3%	-54,5%		
EP150/86	50	n.v.	n.v.	70	28,6%	n.v.			46	71	35,2%	n.v.		
EP150/87	46	65	29,2%	58	20,7%	-12,1%			46	59	22,0%	-10,2%		
EP150/88	42	42	0,0%	43	2,3%	2,3%			37	42	11,9%	0,0%		
EP150/89	51	51	0,0%	51	0,0%	0,0%			51	51	0,0%	0,0%		
EP150/90	50	n.v.	n.v.	74	32,4%	n.v.			52	74	29,7%	n.v.		
EP150/91	56	56	0,0%	56	0,0%	0,0%			56	56	0,0%	0,0%		
EP150/92	37	37	0,0%	37	0,0%	0,0%			37	37	0,0%	0,0%		
EP150/93	50	63	20,6%	60	16,7%	-5,0%			50	60	16,7%	-5,0%		
EP150/94	46	46	0,0%	46	0,0%	0,0%			46	46	0,0%	0,0%		
EP150/95	59	n.v.	n.v.	105	43,8%	n.v.			58	107	45,8%	n.v.		
EP150/96	50	74	32,4%	54	7,4%	-37,0%			50	55	9,1%	-34,5%		
EP150/97	45	45	0,0%	45	0,0%	0,0%			45	45	0,0%	0,0%		
EP150/98	49	74	33,8%	52	5,8%	-42,3%			48	52	7,7%	-42,3%		
EP150/99	46	49	6,1%	48	4,2%	-2,1%			40	49	18,4%	0,0%		
EP150/100	48	48	0,0%	48	0,0%	0,0%			48	48	0,0%	0,0%		
EP150/101	81	81	0,0%	81	0,0%	0,0%			81	81	0,0%	0,0%		
EP150/102	79	79	0,0%	79	0,0%	0,0%			79	79	0,0%	0,0%		
EP150/103	67	89	24,7%	69	2,9%	-29,0%			67	70	4,3%	-27,1%		
EP150/104	72	n.v.	n.v.	103	30,1%	n.v.			71	105	32,4%	n.v.		
EP150/105	72	72	0,0%	72	0,0%	0,0%			72	72	0,0%	0,0%		
EP150/106	72	72	0,0%	72	0,0%	0,0%			72	72	0,0%	0,0%		
EP150/107	65	77	15,6%	69	5,8%	-11,6%			65	70	7,1%	-10,0%		
EP150/108	93	93	0,0%	93	0,0%	0,0%			93	93	0,0%	0,0%		
EP150/109	76	76	0,0%	76	0,0%	0,0%			76	76	0,0%	0,0%		
EP150/110	65	65	0,0%	65	0,0%	0,0%			65	65	0,0%	0,0%		
EP150/111	64	64	0,0%	64	0,0%	0,0%			64	64	0,0%	0,0%		
EP150/112	71	109	34,9%	72	1,4%	-51,4%			72	72	0,0%	-51,4%		
EP150/113	74	74	0,0%	75	1,3%	1,3%			74	74	0,0%	0,0%		
EP150/114	78	78	0,0%	79	1,3%	1,3%			78	78	0,0%	0,0%		
EP150/115	66	66	0,0%	66	0,0%	0,0%			66	66	0,0%	0,0%		

Fortsetzung auf nächster Seite. ...

... fortgesetzte Tabelle von vorheriger Seite

Instanz	MIP 1 h			GA 5 Min.				GA + MIP 5 Min						
	LB	Obj	Gap	Obj	Gap	LB	Gap	Obj	LB	Obj	Gap	LB	Gap	Obj
EP150/116	70	n.v.	n.v.	97	27,8%	n.v.			68	99	31,3%	n.v.		
EP150/117	81	119	31,9%	91	11,0%	-30,8%			80	92	13,0%	-29,3%		
EP150/118	83	n.v.	n.v.	136	39,0%	n.v.			83	137	39,4%	n.v.		
EP150/119	72	n.v.	n.v.	100	28,0%	n.v.			71	101	29,7%	n.v.		
EP150/120	66	66	0,0%	66	0,0%	0,0%			66	66	0,0%	0,0%		
EP150/121	69	n.v.	n.v.	122	43,4%	n.v.			69	124	44,4%	n.v.		
EP150/122	72	n.v.	n.v.	98	26,5%	n.v.			71	102	30,4%	n.v.		
EP150/123	77	77	0,0%	77	0,0%	0,0%			77	77	0,0%	0,0%		
EP150/124	102	106	3,8%	105	2,9%	-1,0%			101	105	3,8%	-1,0%		
EP150/125	63	63	0,0%	63	0,0%	0,0%			63	64	1,6%	1,6%		
EP150/126	64	64	0,0%	64	0,0%	0,0%			64	64	0,0%	0,0%		
EP150/127	64	64	0,0%	64	0,0%	0,0%			64	64	0,0%	0,0%		
EP150/128	86	n.v.	n.v.	151	43,0%	n.v.			86	154	44,2%	n.v.		
EP150/129	56	69	18,8%	63	11,1%	-9,5%			56	64	12,5%	-7,8%		
EP150/130	64	64	0,0%	64	0,0%	0,0%			64	64	0,0%	0,0%		
EP150/131	59	59	0,0%	61	3,3%	3,3%			59	59	0,0%	0,0%		
EP150/132	81	81	0,0%	81	0,0%	0,0%			81	81	0,0%	0,0%		
EP150/133	56	56	0,0%	56	0,0%	0,0%			56	56	0,0%	0,0%		
EP150/134	73	73	0,0%	73	0,0%	0,0%			73	73	0,0%	0,0%		
EP150/135	52	52	0,0%	52	0,0%	0,0%			52	52	0,0%	0,0%		
EP150/136	48	64	25,0%	59	18,6%	-8,5%			48	60	20,0%	-6,7%		
EP150/137	64	64	0,0%	64	0,0%	0,0%			64	64	0,0%	0,0%		
EP150/138	61	n.v.	n.v.	74	17,6%	n.v.			61	75	18,7%	n.v.		
EP150/139	71	n.v.	n.v.	87	18,4%	n.v.			70	87	19,5%	n.v.		
EP150/140	70	70	0,0%	71	1,4%	1,4%			70	71	1,4%	1,4%		
EP150/141	61	61	0,0%	63	3,2%	3,2%			60	63	4,8%	3,2%		
EP150/142	68	n.v.	n.v.	128	46,9%	n.v.			68	132	48,5%	n.v.		
EP150/143	56	56	0,0%	56	0,0%	0,0%			56	56	0,0%	0,0%		
EP150/144	67	n.v.	n.v.	117	42,7%	n.v.			64	120	46,7%	n.v.		
EP150/145	60	60	0,0%	60	0,0%	0,0%			60	60	0,0%	0,0%		
EP150/146	84	n.v.	n.v.	151	44,4%	n.v.			84	152	44,7%	n.v.		
EP150/147	55	56	1,8%	58	5,2%	3,4%			51	58	12,1%	3,4%		
EP150/148	75	n.v.	n.v.	84	10,7%	n.v.			75	86	12,8%	n.v.		
EP150/149	63	63	0,0%	63	0,0%	0,0%			63	63	0,0%	0,0%		
EP150/150	46	n.v.	n.v.	70	34,3%	n.v.			45	70	35,7%	n.v.		
Mittelwert	56,7	58,92	3,8%	62,45	6,1%	-3,6%			56,28	62,64	6,8%	-3,2%		

Tabelle C.17. – EP150 gelöst unter ZF1 mit GA als Konstruktionsheuristik für das MIP, Zielfunktionswerte nach 5+5 Minuten Laufzeit.

C.4. Verbindung von exakten und heuristischen Verfahren

Instanz	MIP 1 h			GA 5 Min.				GA + MIP 5 Min						
	LB	Obj	Gap	Obj	Gap	LB	Gap	Obj	LB	Obj	Gap	LB	Gap	Obj
MP50/1	10	10	0,0%	10	0,0%	0,0%			10	10	0,0%	0,0%		
MP50/2	4	4	0,0%	5	20,0%	20,0%			4	4	0,0%	0,0%		
MP50/3	9	9	0,0%	11	18,2%	18,2%			9	9	0,0%	0,0%		
MP50/4	2	3	33,3%	4	50,0%	25,0%			1	4	75,0%	25,0%		
MP50/5	13	19	31,6%	20	35,0%	5,0%			6	21	71,4%	9,5%		
MP50/6	24	24	0,0%	28	14,3%	14,3%			13	28	53,6%	14,3%		
MP50/7	22	23	4,3%	23	4,3%	0,0%			22	23	4,3%	0,0%		
MP50/8	5	5	0,0%	5	0,0%	0,0%			5	5	0,0%	0,0%		
MP50/9	44	69	36,2%	61	27,9%	-13,1%			37	65	43,1%	-6,2%		
MP50/10	27	44	38,6%	46	41,3%	4,3%			22	44	50,0%	0,0%		
MP50/11	5	6	16,7%	11	54,5%	45,5%			5	9	44,4%	33,3%		
MP50/12	12	13	7,7%	14	14,3%	7,1%			7	16	56,2%	18,7%		
MP50/13	11	11	0,0%	11	0,0%	0,0%			11	11	0,0%	0,0%		
MP50/14	19	30	36,7%	30	36,7%	0,0%			11	30	63,3%	0,0%		
MP50/15	8	32	75,0%	26	69,2%	-23,1%			6	24	75,0%	-33,3%		
MP50/16	7	12	41,7%	10	30,0%	-20,0%			1	10	90,0%	-20,0%		
MP50/17	17	20	15,0%	21	19,0%	4,8%			7	20	65,0%	0,0%		
MP50/18	19	20	5,0%	23	17,4%	13,0%			13	23	43,5%	13,0%		
MP50/19	16	31	48,4%	31	48,4%	0,0%			9	30	70,0%	-3,3%		
MP50/20	31	39	20,5%	47	34,0%	17,0%			20	49	59,2%	20,4%		
MP50/21	6	6	0,0%	6	0,0%	0,0%			6	6	0,0%	0,0%		
MP50/22	10	10	0,0%	10	0,0%	0,0%			10	10	0,0%	0,0%		
MP50/23	0	0	0,0%	0	0,0%	0,0%			0	0	0,0%	0,0%		
MP50/24	12	54	77,8%	37	67,6%	-45,9%			10	36	72,2%	-50,0%		
MP50/25	15	58	74,1%	47	68,1%	-23,4%			10	48	79,2%	-20,8%		
MP50/26	22	37	40,5%	35	37,1%	-5,7%			15	40	62,5%	7,5%		
MP50/27	30	43	30,2%	44	31,8%	2,3%			24	42	42,9%	-2,4%		
MP50/28	21	21	0,0%	25	16,0%	16,0%			11	26	57,7%	19,2%		
MP50/29	21	25	16,0%	28	25,0%	10,7%			12	28	57,1%	10,7%		
MP50/30	27	112	75,9%	85	68,2%	-31,8%			17	86	80,2%	-30,2%		
MP50/31	26	116	77,6%	84	69,0%	-38,1%			16	89	82,0%	-30,3%		
MP50/32	13	52	75,0%	52	75,0%	0,0%			2	53	96,2%	1,9%		
MP50/33	35	94	62,8%	82	57,3%	-14,6%			24	87	72,4%	-8,0%		
MP50/34	45	109	58,7%	103	56,3%	-5,8%			39	105	62,9%	-3,8%		
MP50/35	10	10	0,0%	10	0,0%	0,0%			10	10	0,0%	0,0%		
MP50/36	1	1	0,0%	1	0,0%	0,0%			1	1	0,0%	0,0%		
MP50/37	21	56	62,5%	55	61,8%	-1,8%			13	55	76,4%	-1,8%		
MP50/38	26	57	54,4%	52	50,0%	-9,6%			22	56	60,7%	-1,8%		
MP50/39	20	405	95,1%	105	81,0%	-285,7%			17	110	84,5%	-268,2%		
MP50/40	21	22	4,5%	24	12,5%	8,3%			15	24	37,5%	8,3%		
MP50/41	7	15	53,3%	13	46,2%	-15,4%			6	13	53,8%	-15,4%		
MP50/42	17	32	46,9%	29	41,4%	-10,3%			17	27	37,0%	-18,5%		
MP50/43	19	80	76,2%	70	72,9%	-14,3%			16	71	77,5%	-12,7%		
MP50/44	10	10	0,0%	13	23,1%	23,1%			10	15	33,3%	33,3%		
MP50/45	10	48	79,2%	43	76,7%	-11,6%			3	43	93,0%	-11,6%		
MP50/46	12	41	70,7%	42	71,4%	2,4%			5	42	88,1%	2,4%		
MP50/47	5	5	0,0%	5	0,0%	0,0%			5	5	0,0%	0,0%		
MP50/48	13	13	0,0%	13	0,0%	0,0%			13	13	0,0%	0,0%		
MP50/49	26	82	68,3%	67	61,2%	-22,4%			15	68	77,9%	-20,6%		
MP50/50	21	132	84,1%	109	80,7%	-21,1%			9	130	93,1%	-1,5%		
Mittelwert	16,54	43,4	33,9%	34,52	35,7%	-7,5%			11,84	35,48	48,8%	-6,9%		

Tabelle C.18. – MP50 gelöst unter ZF2 mit GA als Konstruktionsheuristik für das MIP, Zielfunktionswerte nach 5+5 Minuten Laufzeit.

Anhang C. Ergebnisse numerischer Testläufe - heuristische Lösungsverfahren

Instanz	MIP 1 h			GA 5 Min.				GA + MIP 5 Min						
	LB	Obj	Gap	Obj	Gap	LB	Gap	Obj	LB	Obj	Gap	LB	Gap	Obj
MP50/1	9,28	9,28	0,0%	9,5	2,3%	2,3%			9,28	9,28	0,0%	0,0%		
MP50/2	3,53	3,53	0,0%	4,36	19,0%	19,0%			3,53	3,53	0,0%	0,0%		
MP50/3	8,69	8,69	0,0%	12,55	30,8%	30,8%			8,69	8,69	0,0%	0,0%		
MP50/4	2,52	2,54	0,8%	4,57	44,9%	44,4%			0,61	2,68	77,2%	5,2%		
MP50/5	10,45	22,23	53,0%	21,54	51,5%	-3,2%			5,57	21,28	73,8%	-4,5%		
MP50/6	22,45	24,46	8,2%	28,26	20,6%	13,4%			10,92	27,34	60,1%	10,5%		
MP50/7	22,04	22,09	0,2%	22,15	0,5%	0,3%			21,21	22,15	4,2%	0,3%		
MP50/8	4,21	4,21	0,0%	4,21	0,0%	0,0%			4,21	4,21	0,0%	0,0%		
MP50/9	43,46	70,48	38,3%	64,54	32,7%	-9,2%			37,43	64,53	42,0%	-9,2%		
MP50/10	26,07	50,35	48,2%	46,66	44,1%	-7,9%			20,15	48,7	58,6%	-3,4%		
MP50/11	4,69	5,72	18,0%	10,89	56,9%	47,5%			4,53	10,63	57,4%	46,2%		
MP50/12	11,82	13,62	13,2%	14,82	20,2%	8,1%			6,69	15,6	57,1%	12,7%		
MP50/13	10,47	10,47	0,0%	10,49	0,2%	0,2%			10,47	10,47	0,0%	0,0%		
MP50/14	16,72	27,77	39,8%	30,72	45,6%	9,6%			9,74	30,68	68,3%	9,5%		
MP50/15	7,33	24,06	69,5%	27,61	73,5%	12,9%			5,38	28,09	80,8%	14,3%		
MP50/16	6,37	9,35	31,9%	11,69	45,5%	20,0%			0,45	10,59	95,8%	11,7%		
MP50/17	15,59	17,48	10,8%	20,82	25,1%	16,0%			6,72	19,65	65,8%	11,0%		
MP50/18	16,88	20,86	19,1%	27,82	39,3%	25,0%			9,79	25,74	62,0%	19,0%		
MP50/19	14,53	29,08	50,0%	33,76	57,0%	13,9%			9,29	34,19	72,8%	14,9%		
MP50/20	28,17	45,92	38,7%	50,17	43,9%	8,5%			18,84	51,05	63,1%	10,0%		
MP50/21	5,03	5,04	0,2%	5,55	9,4%	9,2%			5,03	5,04	0,2%	0,0%		
MP50/22	8,82	8,82	0,0%	8,82	0,0%	0,0%			8,82	8,82	0,0%	0,0%		
MP50/23	-0,95	-0,95	0,0%	-0,74	-28,4%	-28,4%			-0,95	-0,95	0,0%	0,0%		
MP50/24	10,08	48,98	79,4%	39,49	74,5%	-24,0%			9,07	38,47	76,4%	-27,3%		
MP50/25	11,95	52,41	77,2%	50,5	76,3%	-3,8%			9,41	51,48	81,7%	-1,8%		
MP50/26	19,19	43,45	55,8%	40,62	52,8%	-7,0%			14,29	38,55	62,9%	-12,7%		
MP50/27	29,65	45,38	34,7%	44,5	33,4%	-2,0%			23,27	45,4	48,7%	0,0%		
MP50/28	18,18	21,93	17,1%	26,13	30,4%	16,1%			10,61	24,92	57,4%	12,0%		
MP50/29	18,79	23,89	21,3%	29,43	36,2%	18,8%			9,34	26,53	64,8%	10,0%		
MP50/30	25,15	92,45	72,8%	84,88	70,4%	-8,9%			17,06	85,74	80,1%	-7,8%		
MP50/31	26,43	144,27	81,7%	88,6	70,2%	-62,8%			16,32	85,58	80,9%	-68,6%		
MP50/32	6,3	73,78	91,5%	55,71	88,7%	-32,4%			2,69	53,65	95,0%	-37,5%		
MP50/33	25,03	91,43	72,6%	83,68	70,1%	-9,3%			22,61	84,44	73,2%	-8,3%		
MP50/34	45,89	117,43	60,9%	107,4	57,3%	-9,3%			39,33	113,2	65,3%	-3,7%		
MP50/35	9,67	9,67	0,0%	9,68	0,1%	0,1%			9,67	9,67	0,0%	0,0%		
MP50/36	0,8	0,8	0,0%	0,8	0,0%	0,0%			0,8	0,8	0,0%	0,0%		
MP50/37	16,2	67,21	75,9%	60,76	73,3%	-10,6%			11,93	57,67	79,3%	-16,5%		
MP50/38	25,69	53,3	51,8%	59,63	56,9%	10,6%			20,87	59,43	64,9%	10,3%		
MP50/39	21,03	396,25	94,7%	114,86	81,7%	-245,0%			16,96	113,9	85,1%	-247,9%		
MP50/40	20,74	21,7	4,4%	24,76	16,2%	12,4%			14,42	22,82	36,8%	4,9%		
MP50/41	5,75	18,57	69,0%	15,9	63,8%	-16,8%			3,9	14,76	73,6%	-25,8%		
MP50/42	16,14	24,3	33,6%	28,48	43,3%	14,7%			16,13	30,23	46,6%	19,6%		
MP50/43	19,69	94,15	79,1%	81,75	75,9%	-15,2%			15,63	80,58	80,6%	-16,8%		
MP50/44	9,3	9,3	0,0%	15,55	40,2%	40,2%			9,3	9,31	0,1%	0,1%		
MP50/45	10,94	36,51	70,0%	46,94	76,7%	22,2%			3	44,59	93,3%	18,1%		
MP50/46	10,72	36,31	70,5%	45,7	76,5%	20,5%			4,77	42,62	88,8%	14,8%		
MP50/47	4,4	4,4	0,0%	4,52	2,7%	2,7%			4,4	4,4	0,0%	0,0%		
MP50/48	12,18	12,18	0,0%	12,27	0,7%	0,7%			12,18	12,18	0,0%	0,0%		
MP50/49	18,01	89,22	79,8%	73,47	75,5%	-21,4%			15,08	72,72	79,3%	-22,7%		
MP50/50	8,7	178,53	95,1%	127,57	93,2%	-39,9%			7,29	122,39	94,0%	-45,9%		
Mittelwert	14,9	44,9	36,6%	36,89	41,4%	-2,3%			11,13	36,16	51,0%	-6,1%		

Tabelle C.19. – MP50 gelöst unter ZF3 mit GA als Konstruktionsheuristik für das MIP, Zielfunktionswerte nach 5+5 Minuten Laufzeit.

C.4. Verbindung von exakten und heuristischen Verfahren

Instanz	MIP 1 h			GA 5 Min.				GA + MIP 5 Min						
	LB	Obj	Gap	Obj	Gap	LB	Gap	Obj	LB	Obj	Gap	LB	Gap	Obj
MP250/1	9	9	0%	9	0%	0%			9	9	0,0%	0,0%		
MP250/2	10	10	0%	10	0%	0%			10	10	0,0%	0,0%		
MP250/3	4	4	0%	4	0%	0%			4	4	0,0%	0,0%		
MP250/4	0	0	0%	0	0%	0%			0	0	0,0%	0,0%		
MP250/5	9	9	0%	9	0%	0%			9	9	0,0%	0,0%		
MP250/6	8	8	0%	8	0%	0%			8	8	0,0%	0,0%		
MP250/7	8	8	0%	9	11%	11%			8	8	0,0%	0,0%		
MP250/8	14	29	52%	27	48%	-7%			12	28	57,1%	-3,6%		
MP250/9	19	42	55%	30	37%	-40%			17	30	43,3%	-40,0%		
MP250/10	22	22	0%	23	4%	4%			22	23	4,3%	4,3%		
MP250/11	13	13	0%	16	19%	19%			13	14	7,1%	7,1%		
MP250/12	14	78	82%	42	67%	-86%			11	43	74,4%	-81,4%		
MP250/13	21	64	67%	48	56%	-33%			18	50	64,0%	-28,0%		
MP250/14	13	13	0%	13	0%	0%			13	13	0,0%	0,0%		
MP250/15	15	15	0%	15	0%	0%			15	15	0,0%	0,0%		
MP250/16	25	26	4%	26	4%	0%			26	26	0,0%	0,0%		
MP250/17	8	8	0%	8	0%	0%			8	8	0,0%	0,0%		
MP250/18	3	3	0%	3	0%	0%			3	3	0,0%	0,0%		
MP250/19	7	7	0%	7	0%	0%			7	7	0,0%	0,0%		
MP250/20	18	40	55%	32	44%	-25%			15	38	60,5%	-5,3%		
MP250/21	9	32	72%	26	65%	-23%			8	24	66,7%	-33,3%		
MP250/22	14	142	90%	64	78%	-122%			13	64	79,7%	-121,9%		
MP250/23	10	10	0%	10	0%	0%			10	10	0,0%	0,0%		
MP250/24	9	67	87%	37	76%	-81%			10	37	73,0%	-81,1%		
MP250/25	23	43	47%	42	45%	-2%			18	42	57,1%	-2,4%		
MP250/26	0	69	100%	22	100%	-214%			0	22	100,0%	-213,6%		
MP250/27	0	51	100%	23	100%	-122%			0	23	100,0%	-121,7%		
MP250/28	16	41	61%	31	48%	-32%			14	29	51,7%	-41,4%		
MP250/29	14	129	89%	47	70%	-174%			14	45	68,9%	-186,7%		
MP250/30	17	90	81%	53	68%	-70%			16	53	69,8%	-69,8%		
MP250/31	6	6	0%	8	25%	25%			6	6	0,0%	0,0%		
MP250/32	7	96	93%	40	82%	-140%			7	41	82,9%	-134,1%		
MP250/33	5	86	94%	45	89%	-91%			0	47	100,0%	-83,0%		
MP250/34	6	64	91%	49	88%	-31%			3	50	94,0%	-28,0%		
MP250/35	0	0	0%	0	0%	0%			0	0	0,0%	0,0%		
MP250/36	2	2	0%	2	0%	0%			2	2	0,0%	0,0%		
MP250/37	1	1	0%	1	0%	0%			1	1	0,0%	0,0%		
MP250/38	5	5	0%	5	0%	0%			5	5	0,0%	0,0%		
MP250/39	22	30	27%	32	31%	6%			19	30	36,7%	0,0%		
MP250/40	12	13	8%	15	20%	13%			10	16	37,5%	18,7%		
MP250/41	8	113	93%	44	82%	-157%			7	44	84,1%	-156,8%		
MP250/42	17	84	80%	50	66%	-68%			17	50	66,0%	-68,0%		
MP250/43	3	16	81%	11	73%	-45%			2	12	83,3%	-33,3%		
MP250/44	13	13	0%	16	19%	19%			13	16	18,7%	18,7%		
MP250/45	8	33	76%	36	78%	8%			7	36	80,6%	8,3%		
MP250/46	0	20	100%	9	100%	-122%			0	9	100,0%	-122,2%		
MP250/47	0	20	100%	14	100%	-43%			0	13	100,0%	-53,8%		
MP250/48	16	32	50%	28	43%	-14%			12	29	58,6%	-10,3%		
MP250/49	16	40	60%	29	45%	-38%			15	30	50,0%	-33,3%		
MP250/50	8	8	0%	8	0%	0%			8	8	0,0%	0,0%		
MP250/51	8	8	0%	8	0%	0%			8	8	0,0%	0,0%		
MP250/52	5	5	0%	5	0%	0%			5	5	0,0%	0,0%		
MP250/53	6	21	71%	17	65%	-24%			4	16	75,0%	-31,2%		
MP250/54	20	48	58%	31	35%	-55%			16	32	50,0%	-50,0%		
MP250/55	3	3	0%	3	0%	0%			3	3	0,0%	0,0%		
MP250/56	8	8	0%	8	0%	0%			8	8	0,0%	0,0%		
MP250/57	5	8	37%	11	55%	27%			4	12	66,7%	33,3%		
MP250/58	13	13	0%	15	13%	13%			13	14	7,1%	7,1%		
MP250/59	1	46	98%	18	94%	-156%			1	18	94,4%	-155,6%		

Fortsetzung auf nächster Seite. . .

Anhang C. Ergebnisse numerischer Testläufe - heuristische Lösungsverfahren

... fortgesetzte Tabelle von vorheriger Seite

Instanz	MIP 1 h			GA 5 Min.				GA + MIP 5 Min						
	LB	Obj	Gap	Obj	Gap	LB	Gap	Obj	LB	Obj	Gap	LB	Gap	Obj
MP250/60	6	67	91%	24	75%	-179%			6	23	73,9%	-191,3%		
MP250/61	13	44	70%	25	48%	-76%			10	25	60,0%	-76,0%		
MP250/62	15	32	53%	31	52%	-3%			14	29	51,7%	-10,3%		
MP250/63	4	64	94%	41	90%	-56%			4	40	90,0%	-60,0%		
MP250/64	3	40	92%	20	85%	-100%			3	21	85,7%	-90,5%		
MP250/65	0	38	100%	21	100%	-81%			0	21	100,0%	-81,0%		
MP250/66	8	98	92%	34	76%	-188%			8	31	74,2%	-216,1%		
MP250/67	5	33	85%	18	72%	-83%			5	21	76,2%	-57,1%		
MP250/68	11	15	27%	19	42%	21%			11	20	45,0%	25,0%		
MP250/69	9	60	85%	22	59%	-173%			9	24	62,5%	-150,0%		
MP250/70	12	200	94%	43	72%	-365%			12	44	72,7%	-354,5%		
MP250/71	11	233	95%	46	76%	-407%			11	47	76,6%	-395,7%		
MP250/72	7	89	92%	34	79%	-162%			6	34	82,4%	-161,8%		
MP250/73	7	127	94%	19	63%	-568%			5	21	76,2%	-504,8%		
MP250/74	0	0	0%	0	0%	0%			0	0	0,0%	0,0%		
MP250/75	9	58	84%	35	74%	-66%			5	33	84,8%	-75,8%		
MP250/76	27	313	91%	84	68%	-273%			24	86	72,1%	-264,0%		
MP250/77	23	23	0%	23	0%	0%			23	23	0,0%	0,0%		
MP250/78	0	9	100%	16	100%	44%			0	16	100,0%	43,7%		
MP250/79	10	10	0%	10	0%	0%			10	10	0,0%	0,0%		
MP250/80	6	6	0%	6	0%	0%			6	6	0,0%	0,0%		
MP250/81	3	24	87%	15	80%	-60%			0	16	100,0%	-50,0%		
MP250/82	14	37	62%	27	48%	-37%			13	30	56,7%	-23,3%		
MP250/83	9	52	83%	17	47%	-206%			9	19	52,6%	-173,7%		
MP250/84	13	13	0%	13	0%	0%			13	13	0,0%	0,0%		
MP250/85	42	64	34%	56	25%	-14%			41	56	26,8%	-14,3%		
MP250/86	25	33	24%	32	22%	-3%			14	34	58,8%	2,9%		
MP250/87	25	31	19%	32	22%	3%			17	32	46,9%	3,1%		
MP250/88	3	4	25%	5	40%	20%			3	4	25,0%	0,0%		
MP250/89	2	5	60%	6	67%	17%			2	6	66,7%	16,7%		
MP250/90	19	56	66%	43	56%	-30%			15	43	65,1%	-30,2%		
MP250/91	19	107	82%	51	63%	-110%			19	51	62,7%	-109,8%		
MP250/92	12	41	71%	26	54%	-58%			8	25	68,0%	-64,0%		
MP250/93	6	7	14%	15	60%	53%			4	13	69,2%	46,2%		
MP250/94	9	9	0%	9	0%	0%			9	9	0,0%	0,0%		
MP250/95	9	9	0%	9	0%	0%			9	9	0,0%	0,0%		
MP250/96	2	2	0%	2	0%	0%			2	2	0,0%	0,0%		
MP250/97	0	0	0%	1	100%	100%			0	1	100,0%	100,0%		
MP250/98	6	6	0%	9	33%	33%			6	7	14,3%	14,3%		
MP250/99	20	20	0%	26	23%	23%			20	21	4,8%	4,8%		
MP250/100	14	55	75%	43	67%	-28%			11	41	73,2%	-34,1%		
MP250/101	3	65	95%	21	86%	-210%			1	21	95,2%	-209,5%		
MP250/102	3	40	92%	16	81%	-150%			1	16	93,7%	-150,0%		
MP250/103	31	451	93%	128	76%	-252%			27	129	79,1%	-249,6%		
MP250/104	19	71	73%	49	61%	-45%			19	51	62,7%	-39,2%		
MP250/105	15	95	84%	45	67%	-111%			15	45	66,7%	-111,1%		
MP250/106	1	1	0%	1	0%	0%			1	1	0,0%	0,0%		
MP250/107	4	4	0%	4	0%	0%			4	4	0,0%	0,0%		
MP250/108	2	2	0%	3	33%	33%			2	2	0,0%	0,0%		
MP250/109	10	10	0%	10	0%	0%			10	10	0,0%	0,0%		
MP250/110	2	2	0%	2	0%	0%			2	2	0,0%	0,0%		
MP250/111	0	0	0%	0	0%	0%			0	0	0,0%	0,0%		
MP250/112	0	14	100%	14	100%	0%			0	15	100,0%	6,7%		
MP250/113	18	32	44%	28	36%	-14%			18	28	35,7%	-14,3%		
MP250/114	11	177	94%	54	80%	-228%			10	53	81,1%	-234,0%		
MP250/115	35	202	83%	96	64%	-110%			35	101	65,3%	-100,0%		
MP250/116	38	284	87%	97	61%	-193%			37	96	61,5%	-195,8%		
MP250/117	31	490	94%	134	77%	-266%			26	143	81,8%	-242,7%		
MP250/118	31	95	67%	53	42%	-79%			26	53	50,9%	-79,2%		

Fortsetzung auf nächster Seite. ...

C.4. Verbindung von exakten und heuristischen Verfahren

... fortgesetzte Tabelle von vorheriger Seite

Instanz	MIP 1 h			GA 5 Min.				GA + MIP 5 Min						
	LB	Obj	Gap	Obj	Gap	LB	Gap	Obj	LB	Obj	Gap	LB	Gap	Obj
MP250/119	14	93	85%	44	68%	-111%			13	44	70,5%	-111,4%		
MP250/120	2	124	98%	n.v.	n.v.	n.v.			2	286	99,3%	56,6%		
MP250/121	5	5	0%	5	0%	0%			5	5	0,0%	0,0%		
MP250/122	29	30	3%	33	12%	9%			29	30	3,3%	0,0%		
MP250/123	27	28	4%	29	7%	3%			27	27	0,0%	-3,7%		
MP250/124	23	24	4%	26	12%	8%			14	26	46,2%	7,7%		
MP250/125	13	14	7%	15	13%	7%			8	15	46,7%	6,7%		
MP250/126	15	19	21%	19	21%	0%			14	19	26,3%	0,0%		
MP250/127	18	n.v.	n.v.	100	82%	n.v.			n.v.	102	n.v.	n.v.		
MP250/128	19	25	24%	24	21%	-4%			11	24	54,2%	-4,2%		
MP250/129	17	17	0%	18	6%	6%			17	17	0,0%	0,0%		
MP250/130	20	20	0%	20	0%	0%			20	20	0,0%	0,0%		
MP250/131	10	38	74%	15	33%	-153%			12	15	20,0%	-153,3%		
MP250/132	24	25	4%	26	8%	4%			25	25	0,0%	0,0%		
MP250/133	83	n.v.	n.v.	n.v.	n.v.	n.v.			81	n.v.	n.v.	n.v.		
MP250/134	55	n.v.	n.v.	n.v.	n.v.	n.v.			49	n.v.	n.v.	n.v.		
MP250/135	2	54	96%	22	91%	-145%			0	22	100,0%	-145,5%		
MP250/136	0	34	100%	17	100%	-100%			0	17	100,0%	-100,0%		
MP250/137	13	200	93%	42	69%	-376%			10	45	77,8%	-344,4%		
MP250/138	14	183	92%	39	64%	-369%			13	39	66,7%	-369,2%		
MP250/139	10	35	71%	25	60%	-40%			10	29	65,5%	-20,7%		
MP250/140	9	72	87%	22	59%	-227%			9	25	64,0%	-188,0%		
MP250/141	45	175	74%	86	48%	-103%			45	85	47,1%	-105,9%		
MP250/142	33	264	87%	81	59%	-226%			31	83	62,7%	-218,1%		
MP250/143	18	31	42%	25	28%	-24%			16	32	50,0%	3,1%		
MP250/144	13	37	65%	31	58%	-19%			9	28	67,9%	-32,1%		
MP250/145	37	49	24%	51	27%	4%			27	49	44,9%	0,0%		
MP250/146	9	19	53%	19	53%	0%			8	21	61,9%	9,5%		
MP250/147	15	n.v.	n.v.	74	80%	n.v.			12	73	83,6%	n.v.		
MP250/148	20	351	94%	82	76%	-328%			18	87	79,3%	-303,4%		
MP250/149	2	42	95%	13	85%	-223%			2	14	85,7%	-200,0%		
MP250/150	0	0	0%	0	0%	0%			0	0	0,0%	0,0%		
MP250/151	10	11	9%	25	60%	56%			10	25	60,0%	56,0%		
MP250/152	3	41	93%	22	86%	-86%			3	23	87,0%	-78,3%		
MP250/153	20	325	94%	68	71%	-378%			19	70	72,9%	-364,3%		
MP250/154	23	187	88%	70	67%	-167%			20	74	73,0%	-152,7%		
MP250/155	25	n.v.	n.v.	n.v.	n.v.	n.v.			23	n.v.	n.v.	n.v.		
MP250/156	28	n.v.	n.v.	132	79%	n.v.			23	146	84,2%	n.v.		
MP250/157	19	31	39%	28	32%	-11%			19	25	24,0%	-24,0%		
MP250/158	52	n.v.	n.v.	185	72%	n.v.			50	202	75,2%	n.v.		
MP250/159	10	332	97%	69	86%	-381%			8	68	88,2%	-388,2%		
MP250/160	11	455	98%	53	79%	-758%			10	52	80,8%	-775,0%		
MP250/161	5	123	96%	43	88%	-186%			3	43	93,0%	-186,0%		
MP250/162	17	17	0%	17	0%	0%			17	17	0,0%	0,0%		
MP250/163	0	95	100%	31	100%	-206%			0	31	100,0%	-206,5%		
MP250/164	0	82	100%	25	100%	-228%			0	26	100,0%	-215,4%		
MP250/165	1	1	0%	1	0%	0%			1	1	0,0%	0,0%		
MP250/166	5	5	0%	5	0%	0%			5	5	0,0%	0,0%		
MP250/167	23	47	51%	34	32%	-38%			23	33	30,3%	-42,4%		
MP250/168	17	395	96%	n.v.	n.v.	n.v.			15	n.v.	n.v.	n.v.		
MP250/169	6	63	90%	28	79%	-125%			6	28	78,6%	-125,0%		
MP250/170	23	n.v.	n.v.	100	77%	n.v.			20	96	79,2%	n.v.		
MP250/171	3	8	62%	8	62%	0%			3	9	66,7%	11,1%		
MP250/172	0	13	100%	10	100%	-30%			0	10	100,0%	-30,0%		
MP250/173	10	n.v.	n.v.	101	90%	n.v.			n.v.	99	n.v.	n.v.		
MP250/174	10	n.v.	n.v.	99	90%	n.v.			n.v.	100	n.v.	n.v.		
MP250/175	92	n.v.	n.v.	291	68%	n.v.			n.v.	283	n.v.	n.v.		
MP250/176	62	n.v.	n.v.	269	77%	n.v.			n.v.	279	n.v.	n.v.		
MP250/177	1	16	94%	13	92%	-23%			1	13	92,3%	-23,1%		

Fortsetzung auf nächster Seite...

Anhang C. Ergebnisse numerischer Testläufe - heuristische Lösungsverfahren

... fortgesetzte Tabelle von vorheriger Seite

Instanz	MIP 1 h			GA 5 Min.				GA + MIP 5 Min						
	LB	Obj	Gap	Obj	Gap	LB	Gap	Obj	LB	Obj	Gap	LB	Gap	Obj
MP250/178	10	278	96%	57	82%	-388%		9	57	84,2%	-387,7%			
MP250/179	45	424	89%	122	63%	-248%		n.v.	121	n.v.	-250,4%			
MP250/180	20	99	80%	65	69%	-52%		19	66	71,2%	-50,0%			
MP250/181	25	207	88%	66	62%	-214%		24	67	64,2%	-209,0%			
MP250/182	16	153	90%	52	69%	-194%		15	52	71,2%	-194,2%			
MP250/183	41	n.v.	n.v.	116	65%	n.v.		36	109	67,0%	n.v.			
MP250/184	16	108	85%	44	64%	-145%		15	45	66,7%	-140,0%			
MP250/185	22	223	90%	62	65%	-260%		20	69	71,0%	-223,2%			
MP250/186	13	127	90%	61	79%	-108%		13	62	79,0%	-104,8%			
MP250/187	22	262	92%	82	73%	-220%		21	84	75,0%	-211,9%			
MP250/188	10	10	0%	10	0%	0%		10	10	0,0%	0,0%			
MP250/189	1	46	98%	25	96%	-84%		1	25	96,0%	-84,0%			
MP250/190	7	381	98%	70	90%	-444%		2	69	97,1%	-452,2%			
MP250/191	2	39	95%	13	85%	-200%		2	15	86,7%	-160,0%			
MP250/192	7	7	0%	7	0%	0%		7	7	0,0%	0,0%			
MP250/193	21	n.v.	n.v.	118	82%	n.v.		n.v.	118	n.v.	n.v.			
MP250/194	8	n.v.	n.v.	127	94%	n.v.		n.v.	133	n.v.	n.v.			
MP250/195	37	n.v.	n.v.	122	70%	n.v.		33	123	73,2%	n.v.			
MP250/196	59	n.v.	n.v.	148	60%	n.v.		57	164	65,2%	n.v.			
MP250/197	29	n.v.	n.v.	n.v.	n.v.	n.v.		28	n.v.	n.v.	n.v.			
MP250/198	46	n.v.	n.v.	n.v.	n.v.	n.v.		31	n.v.	n.v.	n.v.			
MP250/199	12	n.v.	n.v.	71	83%	n.v.		11	71	84,5%	n.v.			
MP250/200	11	474	98%	67	84%	-607%		9	72	87,5%	-558,3%			
MP250/201	9	10	10%	12	25%	17%		10	10	0,0%	0,0%			
MP250/202	30	124	76%	62	52%	-100%		30	69	56,5%	-79,7%			
MP250/203	13	99	87%	28	54%	-254%		13	22	40,9%	-350,0%			
MP250/204	1	206	100%	14	93%	-1371%		1	13	92,3%	-1484,6%			
MP250/205	11	120	91%	82	87%	-46%		9	87	89,7%	-37,9%			
MP250/206	32	212	85%	91	65%	-133%		29	90	67,8%	-135,6%			
MP250/207	54	397	86%	143	62%	-178%		n.v.	140	n.v.	-183,6%			
MP250/208	52	n.v.	n.v.	132	61%	n.v.		47	128	63,3%	n.v.			
MP250/209	10	23	57%	19	47%	-21%		8	25	68,0%	8,0%			
MP250/210	26	34	24%	36	28%	6%		21	37	43,2%	8,1%			
MP250/211	43	438	90%	115	63%	-281%		40	122	67,2%	-259,0%			
MP250/212	48	n.v.	n.v.	129	63%	n.v.		n.v.	125	n.v.	n.v.			
MP250/213	19	106	82%	49	61%	-116%		18	49	63,3%	-116,3%			
MP250/214	8	21	62%	19	58%	-11%		8	18	55,6%	-16,7%			
MP250/215	4	41	90%	19	79%	-116%		3	21	85,7%	-95,2%			
MP250/216	4	n.v.	n.v.	39	90%	n.v.		1	42	97,6%	n.v.			
MP250/217	8	658	99%	50	84%	-1216%		7	57	87,7%	-1054,4%			
MP250/218	43	410	90%	125	66%	-228%		39	135	71,1%	-203,7%			
MP250/219	11	329	97%	58	81%	-467%		9	57	84,2%	-477,2%			
MP250/220	10	236	96%	60	83%	-293%		10	58	82,8%	-306,9%			
MP250/221	11	80	86%	35	69%	-129%		11	25	56,0%	-220,0%			
MP250/222	3	25	88%	19	84%	-32%		3	16	81,2%	-56,2%			
MP250/223	9	102	91%	37	76%	-176%		9	28	67,9%	-264,3%			
MP250/224	67	n.v.	n.v.	160	58%	n.v.		62	154	59,7%	n.v.			
MP250/225	1	n.v.	n.v.	86	99%	n.v.		1	85	98,8%	n.v.			
MP250/226	5	n.v.	n.v.	76	93%	n.v.		n.v.	84	n.v.	n.v.			
MP250/227	35	349	90%	88	60%	-297%		33	91	63,7%	-283,5%			
MP250/228	24	364	93%	85	72%	-328%		20	84	76,2%	-333,3%			
MP250/229	8	467	98%	79	90%	-491%		n.v.	78	n.v.	-498,7%			
MP250/230	6	58	90%	57	89%	-2%		6	53	88,7%	-9,4%			
MP250/231	9	122	93%	56	84%	-118%		9	56	83,9%	-117,9%			
MP250/232	17	119	86%	70	76%	-70%		16	72	77,8%	-65,3%			
MP250/233	12	221	95%	68	82%	-225%		8	73	89,0%	-202,7%			
MP250/234	44	335	87%	88	50%	-281%		42	86	51,2%	-289,5%			
MP250/235	80	n.v.	n.v.	n.v.	n.v.	n.v.		71	n.v.	n.v.	n.v.			
MP250/236	96	879	89%	n.v.	n.v.	n.v.		90	n.v.	n.v.	n.v.			

Fortsetzung auf nächster Seite. . .

... fortgesetzte Tabelle von vorheriger Seite

Instanz	MIP 1 h			GA 5 Min.				GA + MIP 5 Min						
	LB	Obj	Gap	Obj	Gap	LB	Gap	Obj	LB	Obj	Gap	LB	Gap	Obj
MP250/237	24	97	75%	56	57%	-73%			24	59	59,3%	-64,4%		
MP250/238	23	214	89%	69	67%	-210%			23	67	65,7%	-219,4%		
MP250/239	28	542	95%	113	75%	-380%			28	117	76,1%	-363,2%		
MP250/240	53	n.v.	n.v.	n.v.	n.v.	n.v.			49	n.v.	n.v.	n.v.		
MP250/241	10	249	96%	n.v.	n.v.	n.v.			8	n.v.	n.v.	n.v.		
MP250/242	39	n.v.	n.v.	n.v.	n.v.	n.v.			39	n.v.	n.v.	n.v.		
MP250/243	52	n.v.	n.v.	n.v.	n.v.	n.v.			48	n.v.	n.v.	n.v.		
MP250/244	48	n.v.	n.v.	n.v.	n.v.	n.v.			40	n.v.	n.v.	n.v.		
MP250/245	12	n.v.	n.v.	96	87%	n.v.			11	101	89,1%	n.v.		
MP250/246	21	218	90%	58	64%	-276%			19	57	66,7%	-282,5%		
MP250/247	117	n.v.	n.v.	n.v.	n.v.	n.v.			108	n.v.	n.v.	n.v.		
MP250/248	80	n.v.	n.v.	n.v.	n.v.	n.v.			76	n.v.	n.v.	n.v.		
MP250/249	6	n.v.	n.v.	79	92%	n.v.			5	70	92,9%	n.v.		
MP250/250	31	502	94%	100	69%	-402%			30	104	71,2%	-382,7%		
Mittelwert	16,98	100,43	57%	43,19	53%	-109%			14,79	44,68	54%	-107%		

Tabelle C.20. – MP250 gelöst unter ZF2 mit GA als Konstruktionsheuristik für das MIP, Zielfunktionswerte nach 5+5 Minuten Laufzeit.

Anhang C. Ergebnisse numerischer Testläufe - heuristische Lösungsverfahren

Instanz	MIP 1 h			GA 5 Min.				GA + MIP 5 Min						
	LB	Obj	Gap	Obj	Gap	LB	Gap	Obj	LB	Obj	Gap	LB	Gap	Obj
MP250/1	8,5	8,5	0%	8,5	0%	0%			8,5	8,5	0,0%	0,0%		
MP250/2	9,6	9,6	0%	9,6	0%	0%			9,6	9,6	0,0%	0,0%		
MP250/3	3,79	3,79	0%	3,79	0%	0%			3,79	3,79	0,0%	0,0%		
MP250/4	-0,48	-0,48	0%	-0,47	-2%	-2%			-0,48	-0,48	0,0%	0,0%		
MP250/5	8,7	8,7	0%	8,7	0%	0%			8,7	8,7	0,0%	0,0%		
MP250/6	7,72	7,72	0%	7,76	1%	1%			7,72	7,72	0,0%	0,0%		
MP250/7	7,7	7,75	1%	9,71	21%	20%			7,7	7,75	0,6%	0,0%		
MP250/8	12,62	39,59	68%	25,89	51%	-53%			10,9	27,95	61,0%	-41,6%		
MP250/9	18,43	41,6	56%	32,79	44%	-27%			15,68	30,72	49,0%	-35,4%		
MP250/10	21,59	21,65	0%	22,56	4%	4%			21,65	21,65	0,0%	0,0%		
MP250/11	12,73	12,73	0%	15,61	18%	18%			12,61	13,66	7,7%	6,8%		
MP250/12	14,19	73,14	81%	41,72	66%	-75%			10,37	42,79	75,8%	-70,9%		
MP250/13	20,92	73,47	72%	49,85	58%	-47%			17,69	50,88	65,2%	-44,4%		
MP250/14	12,78	12,78	0%	12,78	0%	0%			12,78	12,78	0,0%	0,0%		
MP250/15	14,72	14,72	0%	14,72	0%	0%			14,72	14,72	0,0%	0,0%		
MP250/16	24,31	25,16	3%	25,18	3%	0%			25,16	25,16	0,0%	0,0%		
MP250/17	7,87	7,87	0%	7,87	0%	0%			7,87	7,87	0,0%	0,0%		
MP250/18	2,12	2,12	0%	2,15	1%	1%			2,12	2,12	0,0%	0,0%		
MP250/19	6	6	0%	6,04	1%	1%			6	6	0,0%	0,0%		
MP250/20	16,64	42,35	61%	34,72	52%	-22%			14,94	34,71	57,0%	-22,0%		
MP250/21	7,85	44,41	82%	25,84	70%	-72%			7,34	24,85	70,5%	-78,7%		
MP250/22	13,33	149,36	91%	68,75	81%	-117%			12,08	68,82	82,4%	-117,0%		
MP250/23	9,47	9,47	0%	9,56	1%	1%			9,47	9,47	0,0%	0,0%		
MP250/24	8,45	58,09	85%	37,72	78%	-54%			8,31	36,69	77,4%	-58,3%		
MP250/25	18,3	121,63	85%	42,61	57%	-185%			17,87	41,62	57,1%	-192,2%		
MP250/26	-1,15	150,59	101%	23,5	105%	-541%			-1,16	22,14	105,2%	-580,2%		
MP250/27	-1,17	463,75	100%	23,43	105%	-1879%			-1,24	24,08	105,1%	-1825,9%		
MP250/28	14,85	47,08	68%	28,64	48%	-64%			13,82	27,54	49,8%	-71,0%		
MP250/29	13,83	146,74	91%	47,81	71%	-207%			13,51	50,53	73,3%	-190,4%		
MP250/30	15,54	95,34	84%	53,66	71%	-78%			15,39	54,48	71,8%	-75,0%		
MP250/31	5,64	5,7	1%	15,56	64%	63%			4,65	6,63	29,9%	14,0%		
MP250/32	7,07	193,51	96%	40,7	83%	-375%			6,86	45,66	85,0%	-323,8%		
MP250/33	-0,59	127,02	100%	44,44	101%	-186%			0,7	46,51	98,5%	-173,1%		
MP250/34	3,62	119,66	97%	51,42	93%	-133%			3,34	53,28	93,7%	-124,6%		
MP250/35	-0,43	-0,43	0%	0,73	159%	159%			-0,43	-0,43	0,0%	0,0%		
MP250/36	1,55	1,55	0%	1,55	0%	0%			1,55	1,55	0,0%	0,0%		
MP250/37	0,56	0,56	0%	0,56	0%	0%			0,56	0,56	0,0%	0,0%		
MP250/38	4,82	4,82	0%	5,84	17%	17%			4,82	4,82	0,0%	0,0%		
MP250/39	18,74	35,52	47%	32,83	43%	-8%			17,73	36,77	51,8%	3,4%		
MP250/40	11,01	13,82	20%	14,82	26%	7%			9,85	14,75	33,2%	6,3%		
MP250/41	7,57	126,33	94%	45,96	84%	-175%			7,66	45,9	83,3%	-175,2%		
MP250/42	17,02	210,26	92%	50,92	67%	-313%			17,01	50,95	66,6%	-312,7%		
MP250/43	1,21	37,06	97%	13,64	91%	-172%			0,89	13,63	93,5%	-171,9%		
MP250/44	9,79	25,09	61%	14,86	34%	-69%			9,4	15,82	40,6%	-58,6%		
MP250/45	7,24	41,8	83%	35,41	80%	-18%			5,9	35,38	83,3%	-18,1%		
MP250/46	-0,79	18,42	104%	10,57	107%	-74%			-0,79	11,53	106,9%	-59,8%		
MP250/47	-0,8	14,04	106%	11,56	107%	-21%			-0,81	15,32	105,3%	8,4%		
MP250/48	12,68	35,43	64%	27,88	55%	-27%			11,62	28,71	59,5%	-23,4%		
MP250/49	14,46	42,4	66%	29,66	51%	-43%			13,25	28,74	53,9%	-47,5%		
MP250/50	7,85	7,85	0%	7,85	0%	0%			7,85	7,85	0,0%	0,0%		
MP250/51	7,51	7,51	0%	7,51	0%	0%			7,51	7,51	0,0%	0,0%		
MP250/52	4,51	4,51	0%	4,52	0%	0%			4,51	4,51	0,0%	0,0%		
MP250/53	4,38	20,64	79%	16,91	74%	-22%			2,59	16,94	84,7%	-21,8%		
MP250/54	18,88	46,47	59%	30,85	39%	-51%			16,34	30,84	47,0%	-50,7%		
MP250/55	2,42	2,45	1%	2,53	4%	3%			2,43	2,47	1,6%	0,8%		
MP250/56	7,24	7,25	0%	7,33	1%	1%			7,24	7,25	0,1%	0,0%		
MP250/57	5,48	7,54	27%	11,65	53%	35%			3,22	11,46	71,9%	34,2%		
MP250/58	12,75	12,75	0%	14,72	13%	13%			11,91	14,52	18,0%	12,2%		
MP250/59	0,01	161,54	100%	19,44	100%	-731%			-0,01	20,67	100,0%	-681,5%		

Fortsetzung auf nächster Seite. . .

C.4. Verbindung von exakten und heuristischen Verfahren

... fortgesetzte Tabelle von vorheriger Seite

Instanz	MIP 1 h			GA 5 Min.			GA + MIP 5 Min							
	LB	Obj	Gap	Obj	Gap	LB	Gap	Obj	LB	Obj	Gap	LB	Gap	Obj
MP250/60	5,18	51,75	90%	23,94	78%	-116%	5,13	23,84	78,5%	-117,1%				
MP250/61	13,55	26,33	49%	25,39	47%	-4%	9,39	28,25	66,8%	6,8%				
MP250/62	15,78	34,49	54%	31,84	50%	-8%	14,86	32,66	54,5%	-5,6%				
MP250/63	3,36	81,58	96%	41,5	92%	-97%	2,82	40,43	93,0%	-101,8%				
MP250/64	2,43	72,7	97%	20,58	88%	-253%	2,4	21,46	88,8%	-238,8%				
MP250/65	-0,54	77,81	101%	20,78	103%	-274%	-0,54	23,64	102,3%	-229,1%				
MP250/66	7,35	105,33	93%	31,6	77%	-233%	7,29	53,01	86,2%	-98,7%				
MP250/67	4,19	71,48	94%	20,84	80%	-243%	4,17	23,61	82,3%	-202,8%				
MP250/68	10,66	18,38	42%	18,68	43%	2%	9,53	23,46	59,4%	21,7%				
MP250/69	9,48	28,47	67%	23,53	60%	-21%	8,57	23,5	63,5%	-21,1%				
MP250/70	12,45	186,93	93%	45,83	73%	-308%	12,17	46,85	74,0%	-299,0%				
MP250/71	10,36	193,01	95%	48,68	79%	-296%	10,45	53,18	80,3%	-262,9%				
MP250/72	6,09	104,52	94%	33,66	82%	-211%	6,15	34,73	82,3%	-201,0%				
MP250/73	3,93	123,49	97%	21,57	82%	-473%	3,7	25,46	85,5%	-385,0%				
MP250/74	-0,76	-0,75	-1%	-0,56	-36%	-34%	-0,76	-0,65	-16,9%	-15,4%				
MP250/75	9,58	37,14	74%	34,39	72%	-8%	4,79	33,57	85,7%	-10,6%				
MP250/76	25,32	307,92	92%	84,57	70%	-264%	22,71	83,63	72,8%	-268,2%				
MP250/77	22,38	22,38	0%	22,38	0%	0%	22,38	22,38	0,0%	0,0%				
MP250/78	-0,95	18,44	105%	16,23	106%	-14%	-0,96	17,22	105,6%	-7,1%				
MP250/79	9,62	9,62	0%	9,63	0%	0%	9,62	9,62	0,0%	0,0%				
MP250/80	5,33	5,34	0%	6,49	18%	18%	5,34	5,34	0,0%	0,0%				
MP250/81	-0,18	84,91	100%	14,9	101%	-470%	0	17,89	100,0%	-374,6%				
MP250/82	13,22	28,67	54%	26,83	51%	-7%	12,81	29,55	56,6%	3,0%				
MP250/83	8,55	31,44	73%	21,81	61%	-44%	8,6	23,74	63,8%	-32,4%				
MP250/84	12,67	12,68	0%	12,83	1%	1%	12,67	12,68	0,1%	0,0%				
MP250/85	44,17	54,46	19%	56,51	22%	4%	39,45	55,49	28,9%	1,9%				
MP250/86	25,32	30,76	18%	32,91	23%	7%	12,76	35,54	64,1%	13,4%				
MP250/87	20,47	31,76	36%	32,83	38%	3%	15,69	32,77	52,1%	3,1%				
MP250/88	2,78	3,71	25%	3,87	28%	4%	2,76	3,78	27,0%	1,9%				
MP250/89	2,14	6,68	68%	4,8	55%	-39%	1,67	4,79	65,1%	-39,5%				
MP250/90	15,18	64,17	76%	42,6	64%	-51%	14,93	43,57	65,7%	-47,3%				
MP250/91	18,7	112,02	83%	50,88	63%	-120%	18,68	55,59	66,4%	-101,5%				
MP250/92	11,42	49,87	77%	25,41	55%	-96%	6,96	26,27	73,5%	-89,8%				
MP250/93	3,56	20,62	83%	11,61	69%	-78%	3,53	14,45	75,6%	-42,7%				
MP250/94	8,45	8,45	0%	8,5	1%	1%	8,45	8,45	0,0%	0,0%				
MP250/95	8,53	8,53	0%	9,57	11%	11%	8,53	8,53	0,0%	0,0%				
MP250/96	1,21	1,22	1%	2,22	45%	45%	1,21	1,21	0,0%	-0,8%				
MP250/97	-0,76	-0,74	-3%	0,36	311%	306%	-0,76	0,29	362,1%	355,2%				
MP250/98	5,7	5,7	0%	8,81	35%	35%	4,1	8,59	52,3%	33,6%				
MP250/99	19,72	20,68	5%	25,44	22%	19%	18,66	23,65	21,1%	12,6%				
MP250/100	13	54,3	76%	43,07	70%	-26%	9,2	50,87	81,9%	-6,7%				
MP250/101	1,17	54,54	98%	20,59	94%	-165%	0,93	21,73	95,7%	-151,0%				
MP250/102	3,23	26,66	88%	16,78	81%	-59%	1,43	18,77	92,4%	-42,0%				
MP250/103	29,4	353,49	92%	118,08	75%	-199%	n.v.	132	n.v.	-167,8%				
MP250/104	20,39	125,5	84%	49,7	59%	-153%	19,31	47,69	59,5%	-163,2%				
MP250/105	14,38	141,25	90%	44,75	68%	-216%	14,86	46,6	68,1%	-203,1%				
MP250/106	0,43	0,43	0%	0,43	0%	0%	0,43	0,43	0,0%	0,0%				
MP250/107	3,24	3,24	0%	3,25	0%	0%	3,24	3,24	0,0%	0,0%				
MP250/108	1,88	1,88	0%	2,91	35%	35%	1,88	1,88	0,0%	0,0%				
MP250/109	9,79	9,79	0%	11,82	17%	17%	9,79	9,79	0,0%	0,0%				
MP250/110	1,48	1,48	0%	1,49	1%	1%	1,48	1,48	0,0%	0,0%				
MP250/111	-0,64	-0,64	0%	-0,64	0%	0%	-0,64	-0,64	0,0%	0,0%				
MP250/112	-0,51	4,48	111%	13,48	104%	67%	-0,61	15,34	104,0%	70,8%				
MP250/113	16,59	23,36	29%	27,38	39%	15%	16,48	24,36	32,3%	4,1%				
MP250/114	8,69	175	95%	54,84	84%	-219%	10,46	60,73	82,8%	-188,2%				
MP250/115	34,23	296,41	88%	95,4	64%	-211%	33,85	102,91	67,1%	-188,0%				
MP250/116	35,48	219,36	84%	97,73	64%	-124%	35,49	97,8	63,7%	-124,3%				
MP250/117	31,87	377,83	92%	154,6	79%	-144%	26,19	156,61	83,3%	-141,3%				
MP250/118	30,35	86,88	65%	53,55	43%	-62%	25,79	56,53	54,4%	-53,7%				

Fortsetzung auf nächster Seite. ...

Anhang C. Ergebnisse numerischer Testläufe - heuristische Lösungsverfahren

... fortgesetzte Tabelle von vorheriger Seite

Instanz	MIP 1 h			GA 5 Min.				GA + MIP 5 Min						
	LB	Obj	Gap	Obj	Gap	LB	Gap	Obj	LB	Obj	Gap	LB	Gap	Obj
MP250/119	12,22	165,71	93%	45,59	73%	-263%			11,8	48,42	75,6%	-242,2%		
MP250/120	0,49	108,93	100%	n.v.	n.v.	n.v.			0,49	n.v.	n.v.	n.v.		
MP250/121	3,36	92,45	96%	4,6	27%	-1910%			3,41	6,14	44,5%	-1405,7%		
MP250/122	27,81	34,81	20%	35,78	22%	3%			25,85	34,77	25,7%	-0,1%		
MP250/123	26	27,84	7%	29,8	13%	7%			24,18	27,87	13,2%	0,1%		
MP250/124	21,96	24,18	9%	24,17	9%	0%			13,32	26,08	48,9%	7,3%		
MP250/125	11,55	14,58	21%	15,57	26%	6%			6,47	14,38	55,0%	-1,4%		
MP250/126	13,43	17,31	22%	17,64	24%	2%			11,82	18,5	36,1%	6,4%		
MP250/127	17,61	n.v.	n.v.	102,79	83%	n.v.			14,38	101,94	85,9%	n.v.		
MP250/128	19,07	24,61	23%	24,77	23%	1%			11,25	23,64	52,4%	-4,1%		
MP250/129	16,66	16,66	0%	18,61	10%	10%			16,65	16,67	0,1%	0,1%		
MP250/130	19,57	19,57	0%	19,57	0%	0%			19,57	19,57	0,0%	0,0%		
MP250/131	9,98	14,87	33%	15,87	37%	6%			9,57	16,85	43,2%	11,8%		
MP250/132	24,59	25,55	4%	25,74	4%	1%			23,73	25,59	7,3%	0,2%		
MP250/133	84,18	n.v.	n.v.	n.v.	n.v.	n.v.			80,22	n.v.	n.v.	n.v.		
MP250/134	53,18	n.v.	n.v.	n.v.	n.v.	n.v.			48,95	n.v.	n.v.	n.v.		
MP250/135	0,5	32,37	98%	23,34	98%	-39%			-0,46	24,28	101,9%	-33,3%		
MP250/136	-0,12	32,53	100%	18,43	101%	-77%			1,31	16,08	91,9%	-102,3%		
MP250/137	10,93	124,5	91%	48,08	77%	-159%			11,31	50,17	77,5%	-148,2%		
MP250/138	12,25	149,31	92%	43,25	72%	-245%			11,87	51,57	77,0%	-189,5%		
MP250/139	9,91	64,93	85%	24,52	60%	-165%			9,57	29,45	67,5%	-120,5%		
MP250/140	8,75	28,29	69%	21,52	59%	-31%			8,32	23,6	64,7%	-19,9%		
MP250/141	45,73	n.v.	n.v.	88,79	48%	n.v.			44,6	95,85	53,5%	n.v.		
MP250/142	32,22	343,31	91%	85,94	63%	-299%			31,63	96,79	67,3%	-254,7%		
MP250/143	16,51	32,15	49%	26,57	38%	-21%			15,49	31,39	50,7%	-2,4%		
MP250/144	12,85	30,26	58%	29,75	57%	-2%			9,27	29,47	68,5%	-2,7%		
MP250/145	30,95	55,17	44%	48,2	36%	-14%			26,6	58,29	54,4%	5,4%		
MP250/146	7,27	22,55	68%	20,96	65%	-8%			7,04	19,85	64,5%	-13,6%		
MP250/147	14,44	347,93	96%	78,35	82%	-344%			11,48	78,11	85,3%	-345,4%		
MP250/148	18,72	340,62	95%	83,22	78%	-309%			17,01	88,8	80,8%	-283,6%		
MP250/149	0,67	59,81	99%	13,25	95%	-351%			0,66	15,85	95,8%	-277,3%		
MP250/150	-0,57	-0,57	0%	-0,55	-4%	-4%			-0,57	-0,57	0,0%	0,0%		
MP250/151	9,19	27,09	66%	26,87	66%	-1%			9,19	25,67	64,2%	-5,5%		
MP250/152	2,33	86,49	97%	26,7	91%	-224%			2,29	25,63	91,1%	-237,5%		
MP250/153	19,1	306,2	94%	71,52	73%	-328%			18,35	83,55	78,0%	-266,5%		
MP250/154	22,36	265,62	92%	74,58	70%	-256%			18,89	79,53	76,2%	-234,0%		
MP250/155	24,81	n.v.	n.v.	n.v.	n.v.	n.v.			21,73	n.v.	n.v.	n.v.		
MP250/156	24,92	n.v.	n.v.	148,05	83%	n.v.			22,54	153,4	85,3%	n.v.		
MP250/157	18,29	31,48	42%	28,51	36%	-10%			18,28	29,41	37,8%	-7,0%		
MP250/158	51,68	n.v.	n.v.	193,84	73%	n.v.			n.v.	204,64	n.v.	n.v.		
MP250/159	9,22	318,55	97%	69,77	87%	-357%			8,43	70,7	88,1%	-350,6%		
MP250/160	10,15	196,13	95%	52,22	81%	-276%			9,38	58,59	84,0%	-234,7%		
MP250/161	3,15	215,1	99%	44,39	93%	-385%			2,58	46,42	94,4%	-363,4%		
MP250/162	16,21	16,21	0%	16,22	0%	0%			16,21	16,21	0,0%	0,0%		
MP250/163	-0,98	151,33	101%	30,46	103%	-397%			-1,01	38,39	102,6%	-294,2%		
MP250/164	-1,2	130,01	101%	25,57	105%	-408%			-1,22	28,48	104,3%	-356,5%		
MP250/165	0,08	0,11	27%	0,35	77%	69%			0,08	0,16	50,0%	31,2%		
MP250/166	3,98	3,98	0%	4,05	2%	2%			3,98	3,98	0,0%	0,0%		
MP250/167	19,39	67,93	71%	34,73	44%	-96%			19,39	35,63	45,6%	-90,7%		
MP250/168	14,32	341,89	96%	n.v.	n.v.	n.v.			13,96	n.v.	n.v.	n.v.		
MP250/169	5,62	90,48	94%	29,79	81%	-204%			5,62	31,71	82,3%	-185,3%		
MP250/170	20,34	n.v.	n.v.	102,82	80%	n.v.			19,41	99,6	80,5%	n.v.		
MP250/171	2,57	5,96	57%	13,07	80%	54%			0,88	9,93	91,1%	40,0%		
MP250/172	3,2	10,86	71%	10,89	71%	0%			-0,85	16,1	105,3%	32,5%		
MP250/173	10,16	n.v.	n.v.	101,9	90%	n.v.			n.v.	111,54	n.v.	n.v.		
MP250/174	7,58	n.v.	n.v.	96,65	92%	n.v.			n.v.	99,73	n.v.	n.v.		
MP250/175	91,32	n.v.	n.v.	309,29	70%	n.v.			n.v.	307,4	n.v.	n.v.		
MP250/176	62,08	n.v.	n.v.	293,53	79%	n.v.			n.v.	286,75	n.v.	n.v.		
MP250/177	-0,54	37,08	101%	12,21	104%	-204%			-0,54	12,54	104,3%	-195,7%		

Fortsetzung auf nächster Seite...

C.4. Verbindung von exakten und heuristischen Verfahren

... fortgesetzte Tabelle von vorheriger Seite

Instanz	MIP 1 h			GA 5 Min.				GA + MIP 5 Min						
	LB	Obj	Gap	Obj	Gap	LB	Gap	Obj	LB	Obj	Gap	LB	Gap	Obj
MP250/178	9,15	240,75	96%	58,24	84%	-313%	8,22	63,99	87,2%	-276,2%				
MP250/179	45,48	420,02	89%	121,9	63%	-245%	43,08	128,65	66,5%	-226,5%				
MP250/180	19,96	237,3	92%	66,91	70%	-255%	20,23	63,94	68,4%	-271,1%				
MP250/181	23,09	204,61	89%	66,39	65%	-208%	23	71,23	67,7%	-187,3%				
MP250/182	17,64	194,36	91%	54,32	68%	-258%	16,53	59,8	72,4%	-225,0%				
MP250/183	42,17	n.v.	n.v.	117,59	64%	n.v.	35,94	115,78	69,0%	n.v.				
MP250/184	14,52	147,97	90%	46,56	69%	-218%	14,23	48,56	70,7%	-204,7%				
MP250/185	20,73	220,93	91%	66,46	69%	-232%	19,79	65,1	69,6%	-239,4%				
MP250/186	13,11	134,96	90%	62,84	79%	-115%	13,75	62,64	78,0%	-115,5%				
MP250/187	21,28	269,65	92%	90,29	76%	-199%	20,44	80,22	74,5%	-236,1%				
MP250/188	9,62	9,62	0%	11,58	17%	17%	9,62	9,62	0,0%	0,0%				
MP250/189	0,25	101,06	100%	26,58	99%	-280%	0,19	24,43	99,2%	-313,7%				
MP250/190	5,79	234,04	98%	70,76	92%	-231%	4,8	77,62	93,8%	-201,5%				
MP250/191	0,49	32,08	98%	15,51	97%	-107%	0,48	19,89	97,6%	-61,3%				
MP250/192	6,35	6,35	0%	6,41	1%	1%	6,35	6,35	0,0%	0,0%				
MP250/193	21,53	n.v.	n.v.	124,19	83%	n.v.	n.v.	142,62	n.v.	n.v.				
MP250/194	9,62	n.v.	n.v.	129,32	93%	n.v.	4,07	120,14	96,6%	n.v.				
MP250/195	37,44	n.v.	n.v.	125,68	70%	n.v.	33,92	125,51	73,0%	n.v.				
MP250/196	59,05	436,89	86%	141,53	58%	-209%	56,58	165,34	65,8%	-164,2%				
MP250/197	30,52	n.v.	n.v.	n.v.	n.v.	n.v.	29,59	n.v.	n.v.	n.v.				
MP250/198	47,52	n.v.	n.v.	n.v.	n.v.	n.v.	32,83	n.v.	n.v.	n.v.				
MP250/199	10,52	n.v.	n.v.	77,51	86%	n.v.	10,12	75,44	86,6%	n.v.				
MP250/200	12,36	449,56	97%	73,4	83%	-512%	9,33	73,11	87,2%	-514,9%				
MP250/201	9,11	9,11	0%	11,19	19%	19%	6,65	9,11	27,0%	0,0%				
MP250/202	29	108,6	73%	60,69	52%	-79%	29,36	64,59	54,5%	-68,1%				
MP250/203	11,29	161,82	93%	31,47	64%	-414%	11,27	29,85	62,2%	-442,1%				
MP250/204	-0,65	237,4	100%	15,39	104%	-1443%	-0,69	20,22	103,4%	-1074,1%				
MP250/205	9,76	281,54	97%	84,61	88%	-233%	8,66	88,68	90,2%	-217,5%				
MP250/206	31,09	250,87	88%	93,7	67%	-168%	29,68	96,41	69,2%	-160,2%				
MP250/207	53,44	470,2	89%	144,88	63%	-225%	n.v.	145,29	n.v.	-223,6%				
MP250/208	50,9	n.v.	n.v.	131,52	61%	n.v.	46,62	138,25	66,3%	n.v.				
MP250/209	8,62	29,24	71%	25,53	66%	-15%	6,71	25,38	73,6%	-15,2%				
MP250/210	21,37	36,2	41%	39,3	46%	8%	19,53	39,1	50,1%	7,4%				
MP250/211	41,55	499,31	92%	119,78	65%	-317%	39,87	132,88	70,0%	-275,8%				
MP250/212	47,27	n.v.	n.v.	134,85	65%	n.v.	n.v.	127,95	n.v.	n.v.				
MP250/213	18,77	109,42	83%	55,77	66%	-96%	18,33	52,69	65,2%	-107,7%				
MP250/214	7,12	39,2	82%	19,54	64%	-101%	7,12	26,02	72,6%	-50,7%				
MP250/215	2,55	79,91	97%	24,53	90%	-226%	2,52	38,46	93,4%	-107,8%				
MP250/216	1,57	563,42	100%	63,41	98%	-789%	0,16	70,92	99,8%	-694,4%				
MP250/217	7,73	n.v.	n.v.	64,98	88%	n.v.	5,66	75,85	92,5%	n.v.				
MP250/218	42,86	n.v.	n.v.	126,9	66%	n.v.	38,46	138,72	72,3%	n.v.				
MP250/219	10,53	266,81	96%	60,4	83%	-342%	9,37	67,2	86,1%	-297,0%				
MP250/220	8,74	222,77	96%	60,35	86%	-269%	8,26	63,4	87,0%	-251,4%				
MP250/221	9,45	74,93	87%	30,33	69%	-147%	9,39	28,02	66,5%	-167,4%				
MP250/222	1,97	68,43	97%	29,37	93%	-133%	2,02	19,25	89,5%	-255,5%				
MP250/223	8,07	112,03	93%	28,26	71%	-296%	7,91	34,04	76,8%	-229,1%				
MP250/224	66,54	n.v.	n.v.	159,33	58%	n.v.	61,81	167,72	63,1%	n.v.				
MP250/225	0,58	354,99	100%	89,51	99%	-297%	0,14	89,64	99,8%	-296,0%				
MP250/226	1,94	478,25	100%	73,22	97%	-553%	0,45	87,19	99,5%	-448,5%				
MP250/227	34,15	338,39	90%	90,55	62%	-274%	32,31	98,51	67,2%	-243,5%				
MP250/228	24,97	n.v.	n.v.	89,37	72%	n.v.	19,39	91,45	78,8%	n.v.				
MP250/229	7,71	479,64	98%	77,43	90%	-519%	4,3	80,43	94,7%	-496,3%				
MP250/230	5,85	134,47	96%	58,3	90%	-131%	5,28	61,64	91,4%	-118,2%				
MP250/231	7,54	128,92	94%	59,13	87%	-118%	7,47	n.v.	n.v.	n.v.				
MP250/232	16,59	233,78	93%	66,03	75%	-254%	15,9	68,38	76,7%	-241,9%				
MP250/233	9,57	391,45	98%	72,58	87%	-439%	6,93	74,31	90,7%	-426,8%				
MP250/234	43,05	328,11	87%	95,02	55%	-245%	41,1	86,31	52,4%	-280,2%				
MP250/235	81,16	n.v.	n.v.	n.v.	n.v.	n.v.	70,41	n.v.	n.v.	n.v.				
MP250/236	93,06	814,47	89%	n.v.	n.v.	n.v.	88,72	n.v.	n.v.	n.v.				

Fortsetzung auf nächster Seite. ...

... fortgesetzte Tabelle von vorheriger Seite

Instanz	MIP 1 h			GA 5 Min.			GA + MIP 5 Min							
	LB	Obj	Gap	Obj	Gap	LB	Gap	Obj	LB	Obj	Gap	LB	Gap	Obj
MP250/237	24,06	61,75	61%	58,5	59%	-6%	23,32	64,11	63,6%	3,7%				
MP250/238	22,95	199,88	89%	68,5	66%	-192%	21,92	74,28	70,5%	-169,1%				
MP250/239	28,74	536,94	95%	112,91	75%	-376%	26,95	112,08	76,0%	-379,1%				
MP250/240	52,24	n.v.	n.v.	n.v.	n.v.	n.v.	49,26	n.v.	n.v.	n.v.				
MP250/241	10,57	338,03	97%	n.v.	n.v.	n.v.	8,9	n.v.	n.v.	n.v.				
MP250/242	38,73	243,4	84%	n.v.	n.v.	n.v.	38,53	n.v.	n.v.	n.v.				
MP250/243	54,73	n.v.	n.v.	n.v.	n.v.	n.v.	48,11	n.v.	n.v.	n.v.				
MP250/244	47,23	n.v.	n.v.	n.v.	n.v.	n.v.	38,64	n.v.	n.v.	n.v.				
MP250/245	10,02	n.v.	n.v.	101,73	90%	n.v.	8,34	115,97	92,8%	n.v.				
MP250/246	20,29	198,63	90%	60,79	67%	-227%	18,85	61,6	69,4%	-222,5%				
MP250/247	115,43	n.v.	n.v.	n.v.	n.v.	n.v.	110,6	n.v.	n.v.	n.v.				
MP250/248	85,51	n.v.	n.v.	n.v.	n.v.	n.v.	76,72	n.v.	n.v.	n.v.				
MP250/249	4,97	n.v.	n.v.	83,19	94%	n.v.	3,84	82,34	95,3%	n.v.				
MP250/250	30,67	483,37	94%	109,33	72%	-342%	28,91	122,45	76,4%	-294,7%				
Mittelwert	16,2	112,5	60,6%	44,64	58,0%	-141,8%	13,95	46,32	59,0%	-129,2%				

Tabelle C.21. – MP250 gelöst unter ZF3 mit GA als Konstruktionsheuristik für das MIP, Zielfunktionswerte nach 5+5 Minuten Laufzeit.

Abkürzungsverzeichnis

DIN	Deutsches Institut für Normung
EFT	Earliest Finish Time (<i>Frühester Fertigstellungszeitpunkt einer Aktivität</i>)
EST	Earliest Start Time (<i>Frühester Startzeitpunkt einer Aktivität</i>)
FRCPS	Flexible Resource Constrained Project Scheduling Problem (<i>Flexibles ressourcenbeschränktes Projektplanungsproblem</i>)
GA	Genetic Algorithm (<i>Genetischer Algorithmus</i>)
GPM	GPM Deutsche Gesellschaft für Projektmanagement e.V.
LFT	Latest Finish Time (<i>Spätester Fertigstellungszeitpunkt einer Aktivität</i>)
LP	Linear Program (<i>Lineares Programm</i>)
LST	Latest Start Time (<i>Spätester Startzeitpunkt einer Aktivität</i>)
MIP	Mixed Integer Program (<i>Gemischt-ganzzahliges Programm</i>)
OR	Operations Research
PMI	Project Management Institute
PSP	Projektstrukturplan
RCMPSP	Resource Constrained Multi Project Scheduling Problem (<i>Ressourcenbeschränktes Multiprojektplanungsproblem</i>)
RCPS	Resource Constrained Project Scheduling Problem (<i>Ressourcenbeschränktes Projektplanungsproblem</i>)
SA	Simulated Annealing (<i>simulierte Abkühlung</i>)
TS	Tabu Search (<i>Tabusuche</i>)
ZF	Zielfunktion

Abbildungsverzeichnis

2.1. Beispielhafter Auszug aus einem Projektstrukturplan	9
2.2. Beispielhafter Auszug aus einem Projektablaufplan als Gantt-Diagramm	11
2.3. Verschiedene Möglichkeiten der Ressourcenallokation	18
3.1. Beispiel für das Aktivitätennetzwerk eines Projekts	26
3.2. Visualisierung der Start- und Endzeitpunkte und der Ausführungsperi- oden von Aktivitäten	28
3.3. Mehrere Projekte in einem Aktivitätennetzwerk	31
3.4. Einfaches Einplanen von Aktivitäten	35
3.5. Nach der Aktivitätenliste τ geplanter Projektablaufplan	37
3.6. Aufbau einer Aktivitätenliste nach Prioritätsregeln	39
3.7. Abhängigkeiten in einem Aktivitätennetzwerk	40
5.1. Zusammenhang von möglichen Ausführungsperioden und Ressourcen- allokationsvariablen	68
6.1. Lokale und globale Optimalität bei der Platzierung von Aktivitäten . .	77
6.2. Ablaufschema des genetischen Algorithmus	84
8.1. Ausschnitt aus einem möglichen Aktivitätennetzwerk der Fallstudie . .	137

Tabellenverzeichnis

2.1. Beispiele für die Klassifizierung von Projektressourcen	7
5.1. Mögliche Ressourcenkonfigurationen einer Aktivität	63
7.1. EP150 gelöst per MIP unter ZF1, Limit = 1 Stunde	111
7.2. MP50 gelöst per MIP unter ZF2 und ZF3, Limit = 1 Stunde	113
7.3. MP250 gelöst per MIP unter ZF2 und ZF3, Limit = 1 Stunde	114
7.4. MP50 gelöst per MIP unter ZF2 und ZF3, Limit = 12 Stunden	115
7.5. Parameter für den genetischen Algorithmus	117
7.6. Ergebnisse der Parameterbestimmung mit SMAC	120
7.7. Zusammengefasste Ergebnisse der Algorithmusevaluation	123
7.8. Zusammengefasste Ergebnisse MIP und GA	125
7.9. Zusammengefasste Ergebnisse GA vor MIP	127
7.10. Zusammengefasste Ergebnisse des Vergleichs zwischen GA und weiteren Heuristiken	130
8.1. Instanzen und Optimierungsergebnisse der Fallstudie	139
A.1. Testinstanzenmenge EP150 für die Einzelprojektplanung	164
A.2. Testinstanzenmenge MP50 für die Multiprojektplanung	165
A.3. Testinstanzenmenge MP250 für die Multiprojektplanung	170
B.1. Detaillierte Ergebnisse zu EP150, MIP, 1 Stunde	172
B.2. Detaillierte Ergebnisse zu MP50, MIP, 1 Stunde	173
B.3. Detaillierte Ergebnisse zu MP50, MIP, 12 Stunden	174
B.4. Detaillierte Ergebnisse zu MP250, MIP, 1 Stunde	179
C.1. Verschiedene GA-Konfiguration auf MP50, 5 Minuten, ZF2, $\chi^R = 1$. .	182
C.2. Verschiedene GA-Konfiguration auf MP50, 5 Minuten, ZF3, $\chi^R = 1$. .	183
C.3. Verschiedene GA-Konfiguration auf MP50, 5 Minuten, ZF2, $\chi^R = 2$. .	184
C.4. Verschiedene GA-Konfiguration auf MP50, 5 Minuten, ZF3, $\chi^R = 2$. .	185
C.5. Verschiedene GA-Konfiguration auf MP50, 5 Minuten, ZF2, $\chi^R = 1, \chi^C =$ 0	186
C.6. Verschiedene GA-Konfiguration auf MP50, 5 Minuten, ZF2, $\chi^R = 1,$ alternative Parameter	187
C.7. GA mit EP150, 5 Minuten, ZF1, Vergleich mit MIP-Ergebnissen	190
C.8. GA mit MP50, 5 Minuten, ZF2, Vergleich mit MIP-Ergebnissen	191

C.9. GA mit MP50, 5 Minuten, ZF3, Vergleich mit MIP-Ergebnissen	192
C.10. GA mit MP250, 5 Minuten, ZF2, Vergleich mit MIP-Ergebnissen	197
C.11. GA mit MP250, 5 Minuten, ZF3, Vergleich mit MIP-Ergebnissen	202
C.12. GA mit MP50, 30 Minuten, ZF2, Vergleich mit MIP-Ergebnissen	203
C.13. GA mit MP50, 30 Minuten, ZF3, Vergleich mit MIP-Ergebnissen	204
C.14. GA und weitere Heuristiken mit EP150 und ZF1	207
C.15. GA und weitere Heuristiken mit MP50 und ZF2	208
C.16. GA und weitere Heuristiken mit MP250 und ZF2	213
C.17. GA + MIP auf EP150, je 5 Minuten, ZF1	216
C.18. GA + MIP auf MP50, je 5 Minuten, ZF2	217
C.19. GA + MIP auf MP50, je 5 Minuten, ZF3	218
C.20. GA + MIP auf MP250, je 5 Minuten, ZF2	223
C.21. GA + MIP auf MP250, je 5 Minuten, ZF3	228