

# Evaluation von Schedulingproblemen für die Projektplanung von Großprojekten am Beispiel des kerntechnischen Rückbaus

Felix Hübner, Uli Schellenbaum, Christian Stürck,  
Patrick Gerhards, Frank Schultmann

No. 22 | Mai 2017

WORKING PAPER SERIES IN PRODUCTION AND ENERGY



# Evaluation von Schedulingproblemen für die Projektplanung von Großprojekten am Beispiel des kerntechnischen Rückbaus

Felix Hübner, Uli Schellenbaum, Christian Stürck,  
Patrick Gerhards, Frank Schultmann

Chair of Business Administration, Production and Operations Management,  
Institute for Industrial Production (IIP),  
Karlsruhe Institute of Technology (KIT),  
Hertzstr. 16, building 06.33, 76187 Karlsruhe,  
Tel.: +49 721 608-44677, email: felix.huebner@kit.edu

Die Größenordnungen des flächendeckenden kerntechnischen Rückbaus sind, bezüglich der Kosten und der Projektlaufzeiten, selbst mit den prominentesten Beispielen von Großprojekten kaum zu vergleichen. Die Rückbaukosten eines Reaktors werden auf mehrere hundert Millionen Euro geschätzt und die Fertigstellungsdauer auf mehr als ein Jahrzehnt veranschlagt. Die in der Hochzeit der Nuklearenergie der 1970er Jahre erbauten Kernkraftwerke veralten zunehmend. Der hierdurch in zunehmendem Umfang notwendig werdende Rückbau von Kernkraftwerken stellt vielerlei Herausforderungen an dessen Planung und Durchführung.

Diese Studie beschäftigt sich mit der Planung dieser Großprojekte. Das Ziel dieser Arbeit ist es, ein Planungsproblem zu formulieren, das die Herausforderungen des kerntechnischen Rückbaus adäquat bewältigt. Hierfür werden zunächst die Anforderungen eines kerntechnischen Rückbauprojekts an ein Planungsproblem erarbeitet. Anschließend werden mögliche Schedulingprobleme eingeführt und anhand ihres Verhaltens und ihrer Eigenschaften vergleichend erläutert. Einzelne Schedulingprobleme sowie mögliche Erweiterungen beziehungsweise Verallgemeinerungen werden detailliert betrachtet.

Aus den vorgestellten Problemen und Erweiterungen wird, auf Basis der spezifischen Anforderungen des kerntechnischen Rückbaus, ein Multi-mode Resource Investment Problem with Tardiness Penalty ausgewählt. Entsprechend der Rückbauanforderungen werden außerdem individuelle Anpassungen der Problemformulierung durchgeführt, sodass ein Schedulingproblem entwickelt wurde, das als „Multi-mode Resource Investment Problem unter Betrachtung von allgemeinen Vorgangsbeziehungen und Restbetriebskosten“ bezeichnet werden kann.

# Evaluation von Schedulingproblemen für die Projektplanung von Großprojekten am Beispiel des kerntechnischen Rückbaus

Felix Hübner • Uli Schellenbaum • Christian Stürck •  
Patrick Gerhards • Frank Schultmann

Karlsruhe Institute of Technology (KIT),  
Institute for Industrial Production (IIP)  
Hertzstraße 16,  
D-76187 Karlsruhe, Germany

felix.huebner@kit.edu

christian.stuerck@hsu-hh.de

patrick.gerhards@hsu-hh.de

## **Vorbemerkung:**

Die vorliegende Studie wurde im Rahmen der Masterarbeit von Herrn Uli Schellenbaum in Zusammenarbeit mit seinem Betreuer Herrn Felix Hübner im Herbst und Winter 2016 erarbeitet. Inhaltlicher Austausch fand im Rahmen der Arbeit mit Christian Stürck und Patrick Gerhards von der Helmut Schmidt Universität in Hamburg statt.

# Kurzfassung

Die Größenordnungen des flächendeckenden kerntechnischen Rückbaus sind, bezüglich der Kosten und der Projektlaufzeiten, selbst mit den prominentesten Beispielen von Großprojekten kaum zu vergleichen. Die Rückbaukosten eines Reaktors werden auf mehrere hundert Millionen Euro geschätzt und die Fertigstellungsdauer auf mehr als ein Jahrzehnt veranschlagt. Die in der Hochzeit der Nuklearenergie der 1970er Jahre erbauten Kernkraftwerke veralten zunehmend. Der hierdurch in zunehmendem Umfang notwendig werdende Rückbau von Kernkraftwerken stellt vielerlei Herausforderungen an dessen Planung und Durchführung.

Diese Studie beschäftigt sich mit der Planung dieser Großprojekte. Das Ziel dieser Arbeit ist es, ein Planungsproblem zu formulieren, das die Herausforderungen des kerntechnischen Rückbaus adäquat bewältigt. Hierfür werden zunächst die Anforderungen eines kerntechnischen Rückbauprojekts an ein Planungsproblem erarbeitet. Anschließend werden mögliche Schedulingprobleme eingeführt und anhand ihres Verhaltens und ihrer Eigenschaften vergleichend erläutert. Einzelne Schedulingprobleme sowie mögliche Erweiterungen beziehungsweise Verallgemeinerungen werden detailliert betrachtet.

Aus den vorgestellten Problemen und Erweiterungen wird, auf Basis der spezifischen Anforderungen des kerntechnischen Rückbaus, ein Multi-mode Resource Investment Problem with Tardiness Penalty ausgewählt. Entsprechend der Rückbauanforderungen werden außerdem individuelle Anpassungen der Problemformulierung durchgeführt, sodass ein Schedulingproblem entwickelt wurde, das als „Multi-mode Resource Investment Problem unter Betrachtung von allgemeinen Vorgangsbeziehungen und Restbetriebskosten“ bezeichnet werden kann.

# Abstract

The magnitude of widespread nuclear decommissioning and dismantling, regarding deconstruction costs and project duration, exceeds even most of the prominent large-scale projects. The deconstruction costs of one reactor are estimated at several hundred million Euros and the dismantling period for more than a decade. The nuclear power plants built in the 1970s are coming closer to the end of their planned operating lifespan. Therefore, the decommissioning and dismantling of nuclear facilities, which is posing a multitude of challenges to planning and implementation, is becoming more and more relevant.

This study describes planning methods for large-scale projects. The goal of this paper is to formulate a project planning problem that appropriately copes with the specific challenges of nuclear deconstruction projects. For this purpose, the requirements for appropriate scheduling methods are presented. Furthermore, a variety of possible scheduling problems are introduced and compared by their specifications and their behaviour. A set of particular scheduling problems including possible extensions and generalisations is assessed in detail.

Based on the introduced problems and extensions, a Multi-mode Resource Investment Problem with Tardiness Penalty is chosen to fit the requirements of nuclear facility dismantling. This scheduling problem is then customised and adjusted according to the specific challenges of nuclear deconstruction projects. It can be called a Multi-mode Resource Investment Problem under the consideration of generalized precedence constraints and post-operational costs.

# Inhaltsverzeichnis

<b>Kurzfassung .....</b>	<b>ii</b>
<b>Abstract .....</b>	<b>iii</b>
<b>Inhaltsverzeichnis .....</b>	<b>iv</b>
<b>Abbildungsverzeichnis .....</b>	<b>vi</b>
<b>Tabellenverzeichnis .....</b>	<b>vii</b>
<b>1 Einleitung .....</b>	<b>1</b>
1.1 Hintergrund und Problemstellung .....	1
1.2 Zielsetzung und Aufbau der Studie .....	2
<b>2 Spezifische Anforderungen des kerntechnischen Rückbaus an die Projektplanung .....</b>	<b>3</b>
<b>3 Begriffe und Hintergründe für Projektplanungsprobleme .....</b>	<b>10</b>
3.1 Eingrenzung der Planungsmodelle .....	10
3.2 Klassifizierungsschema .....	11
3.3 Regularität der Zielfunktion .....	13
3.4 Ressourcentypen .....	14
<b>4 Detaillierte Betrachtung einzelner Schedulingprobleme .....</b>	<b>17</b>
4.1 Resource Constrained Project Scheduling Problem .....	17
4.2 Resource Constrained Project Scheduling Problem with Discounted Cashflows .....	26
4.3 Resource Investment Problem .....	31
4.4 Resource Investment Problem with Tardiness Penalty .....	34
4.5 Resource Leveling Project Scheduling Problem .....	37
4.6 Erweiterungen der Schedulingprobleme .....	43
4.6.1 Der multi-mode Schedulingfall .....	43
4.6.2 Allgemeine Vorgangsbeziehungen .....	46
<b>5 Modell zur Berechnung eines kostenoptimierten Rückbauplans .....</b>	<b>49</b>
5.1 Auswahl eines allgemeinen Schedulingproblems .....	49
5.2 Erweiterungen des allgemeinen Schedulingproblems .....	53
5.3 Vollständig angepasstes Schedulingproblem .....	58
5.4 Weiterentwicklungsmöglichkeiten .....	60
<b>6 Zusammenfassung und Ausblick .....</b>	<b>61</b>

**Literaturverzeichnis ..... 63**

# Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Verschiedene Betriebszustände und Rückbauphasen des Kernkraftwerks Stade (E.ON Kernkraft GmbH, 2008, S. 19) .....	4
Abbildung 2: Schritte bis zur Freigabe (Quelle: E.ON Kernkraft GmbH, 2008).....	6
Abbildung 3: Netzplan des Beispielprojekts .....	23
Abbildung 4: Beanspruchung von Ressource A und B für die Durchführung des Beispielprojekts nach dem ES-Schedule .....	24
Abbildung 5: Beanspruchung von Ressource A und B für die Durchführung des Beispielprojekts nach Lösung des RCPSP .....	25
Abbildung 6: Beanspruchung von Ressource A und B für die Durchführung des Beispielprojekts nach Lösung des RCPSPDC .....	30
Abbildung 7: Beanspruchung von Ressource A und B für die Durchführung des Beispielprojekts nach Lösung des RIP.....	34
Abbildung 8: Beanspruchung von Ressource A und B für die Durchführung des Beispielprojekts nach Lösung des RIPT .....	37
Abbildung 9: Beanspruchung von Ressource A und B für die Durchführung des Beispielprojekts nach Lösung des RLPSP .....	42

# Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Vorgangsdaten des Beispielprojekts.....	22
Tabelle 2: Vorgangsdaten des Beispielprojekts inklusive Cashflows .....	29
Tabelle 3: Gegenüberstellung der allgemeinen Schedulingprobleme .....	50

# 1 Einleitung

## 1.1 Hintergrund und Problemstellung

Kostenexplosionen sowie zeitliche Verzögerungen sind im Kontext von Großprojekten allgegenwärtig. Prominente Beispiele für Abweichungen von der geplanten Projektdauer oder vom geplanten Kostenrahmen sind in den gängigen Medien unschwer zu finden. Der Bau der Hamburger Elbphilharmonie (NDR, 2017), der Flughafen Berlin-Brandenburg (rbb, 2017) oder das Bahnprojekt Stuttgart21 (SWR, 2016) stellen Beispiele dar, in denen sowohl der Fertigstellungszeitraum als auch die Kostenplanung mehrfach überschritten wurden.

Als ein abgeschlossenes Projekt stellt die Elbphilharmonie ein konkretes Beispiel für Planungsüberschreitungen in mehreren Dimensionen dar. Mit Baubeginn im Jahr 2007 wurde eine Fertigstellung des Projekts für das Jahr 2011 geplant. Die Schlüsselübergabe fand jedoch erst im Oktober 2016 statt, eine mehr als Verdopplung der geplanten Bauzeit. Die Kosten vervielfachten sich in einem noch größeren Maße, so verzehnfachten sich die Baukosten auf circa 789 Millionen Euro (NDR, 2017). Um solche Entwicklungen in Großprojekten zu verhindern, gilt es, mögliche Probleme bereits in der Planungsphase einzubeziehen. Zweifelsohne sind Planungsverfahren notwendig, die auch für Großprojekte genauere Ergebnisse liefern.

Trotz der enormen Größenordnung dieser Beispielprojekte sind diese bezüglich der Kosten und dem Fertigstellungszeitraum kaum mit denen des flächendeckenden kerntechnischen Rückbaus vergleichbar. Mit einer geschätzten Projektlaufzeit von mehr als einem Jahrzehnt und Kostenschätzungen zwischen 0,3 und 1,1 Milliarden Euro für jedes Kernkraftwerk haben bereits die einzelnen Projekte eine beachtliche Größe (Europäische Kommission, 2016b, S. 33). Das zu erwartende Projektaufkommen vervielfacht diese Größen entsprechend, so würden ohne Laufzeitverlängerungen bis zum Jahr 2030 circa 90% der europäischen Kapazität stillgelegt beziehungsweise erneuert werden (Europäische Kommission, 2016a, S. 4). Vor diesem Hintergrund drängt sich die Notwendigkeit eines zuverlässigen Planungsverfahrens für kerntechnische Rückbauprojekte auf. Durch die hohe Projektanzahl ist hierfür auch die Entwicklung eines spezialisierten Verfahrens für diesen Anwendungsfall sinnvoll.

## 1.2 Zielsetzung und Aufbau der Studie

Diese Arbeit beschäftigt sich mit der Planung von Großprojekten und insbesondere mit der Planung von kerntechnischen Rückbauprojekten. Das Ziel dieser Betrachtung ist es, ein Planungsproblem aufzustellen, das die zeitliche Planung einzelner Arbeitsschritte festlegt. Mithilfe eines solchen Planungsproblems können große Ablaufplanungen automatisiert gelöst werden, sodass die Anwendbarkeit auf eine Vielzahl von kerntechnischen Rückbauprojekten ermöglicht wird. Hierbei wird in dieser Studie explizit ein deterministisches Planungsmodell gesucht, welches in weiteren Arbeiten hinsichtlich der Berücksichtigung von Unsicherheiten ausgeweitet wird. Zur Identifikation eines deterministischen Planungsmodells zur Rückbauplanung kerntechnischer Anlagen wird folgendes Vorgehen angewandt.

Zunächst werden in Kapitel 2 die spezifischen Anforderungen kerntechnischer Rückbauprojekte an die Projektplanung festgehalten. An diesem Anforderungskatalog wird die Realitätstreue eines späteren Planungsmodells gemessen.

In Kapitel 3 werden anschließend Begriffe und Hintergründe zum Verständnis von Schedulingproblemen erläutert.

Darauf aufbauend werden in Kapitel 4 verschiedene Schedulingprobleme vorgestellt. Diese werden anhand ihres Verhaltens und ihrer Eigenschaften vergleichend erläutert. Darüber hinaus werden mögliche Erweiterungen beziehungsweise Verallgemeinerungen detailliert betrachtet.

In Kapitel 5 wird eine Auswahl auf Basis der spezifischen Anforderungen des kerntechnischen Rückbaus getroffen. Nach diesen Anforderungen werden außerdem individuelle Anpassungen der Problemformulierung durchgeführt. Auf diese Weise wird schließlich ein vollständiges Schedulingproblem für die Anwendung im Bereich des kerntechnischen Rückbaus aufgestellt. Das vollständig angepasste Schedulingproblem wird vorgestellt und kritisch auf seine Schwächen überprüft.

Zuletzt werden die beschriebenen Inhalte und die wesentlichen Erkenntnisse der vorliegenden Studie in Kapitel 6 zusammengefasst.

## 2 Spezifische Anforderungen des kerntechnischen Rückbaus an die Projektplanung

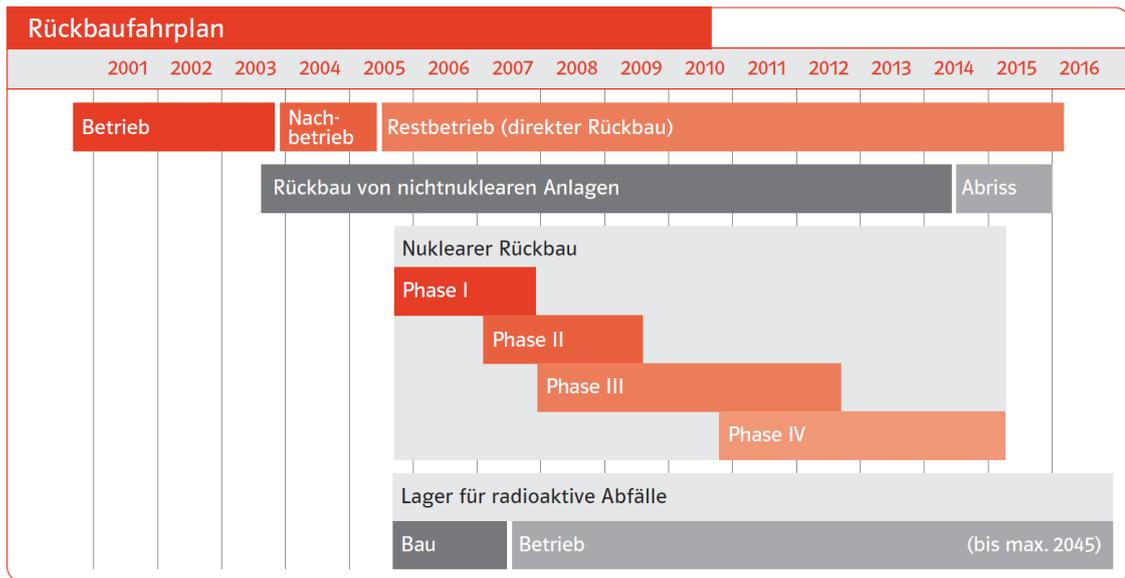
Um eine strukturierte Projektplanung überhaupt erst zu ermöglichen, ist eine detaillierte Betrachtung der notwendigen Abläufe, der Rahmenbedingungen und vor allem dem gewünschten Ausgang notwendig. Eine Betrachtung dieser Teilaspekte im kerntechnischen Rückbau ergibt Anforderungen an die Planung derartiger Projekte in folgenden Bereichen:

- Planungsziel
- Mehrdimensionale Unsicherheiten
- Spezifische Rückbauvorgänge
- Zeitliche Abhängigkeiten der Arbeitsschritte
- Alternative Ausführungen und Technologien
- Notwendige Ressourcen
- Lagerung und Platzbedarf

Die genannten Aspekte werden in diesem Kapitel erklärt und deren Bedeutung für das Gesamtprojekt dargestellt.

Zur Veranschaulichung der Vorgehensweise für die Umsetzung der direkten Rückbaustrategie kann das Kernkraftwerk (KKW) Stade als Beispiel herangezogen werden. Die Grobplanung unterteilt sich in verschiedene Betriebszustände und Rückbauphasen, die in Abbildung 1 dargestellt sind (E.ON Kernkraft GmbH, 2008).

## 2 Spezifische Anforderungen des kerntechnischen Rückbaus an die Projektplanung



**Abbildung 1: Verschiedene Betriebszustände und Rückbauphasen des Kernkraftwerks Stade (E.ON Kernkraft GmbH, 2008, S. 19)**

Mit dem Ende des Leistungsbetriebs eines KKW beginnt die Planung der folgenden Phasen inklusive der Rückbauvorgänge. Diese Planung richtet sich nach dem Planungsziel der beteiligten Parteien, beispielhafte Interessen wären eine möglichst frühe Fertigstellung der Vorgänge oder eine Ausführung zu möglichst geringen Kosten.

Durch eine breite Regulierung, in Deutschland beispielsweise im Atomgesetz, durch ausführliche Genehmigungsprozesse und durch nationale sowie internationale Standards soll die Einhaltung von Sicherheit und Umweltverträglichkeit bereits garantiert werden. Die Verantwortung für die Stilllegung und den Rückbau ist üblicherweise nach dem Verursacherprinzip geregelt, so auch in Deutschland beziehungsweise in Stade. Somit stehen zunächst die Interessen der betreibenden beziehungsweise rückbauenden Gesellschaft im Vordergrund. Da dies wirtschaftlich handelnde Unternehmen sind, kann davon ausgegangen werden, dass die Stilllegung und der Rückbau zu minimalen Kosten angestrebt wird. Die minimalen Kosten als Planungsziel auszuwählen hat den zusätzlichen Vorteil, dass verschiedene betriebswirtschaftliche Größen durch Kosten dargestellt werden können. So kann beispielsweise eine Verlängerung der Projektdauer durch Kosten für den Restbetrieb und Opportunitätskosten aus entgangenen Einnahmen einer anderweitigen Nutzung des Geländes modelliert werden. Aufgrund der Langfristigkeit von Rückbauprojekten, der Planungszeitraum für das KKW Stade beträgt beispielsweise circa 13 Jahre, scheint eine Minimierung der diskontierten Kosten sinnvoll. Auf diese Weise kann der Zeitpunkt von Ausgaben, wie kapitalintensiven Anschaffungen, im Projektverlauf später

## 2 Spezifische Anforderungen des kerntechnischen Rückbaus an die Projektplanung

terminiert werden. Eine Herausforderung stellt hierbei allerdings die Bestimmung eines adäquaten Diskontierungszinssatzes dar (Bartels, 2009, S. 43).

Um die einzelnen Aspekte der Projektplanung weitergehend zu erläutern, wird eine Aufteilung des exemplarischen Rückbauablaufs aus Abbildung 1 herangezogen. Sie enthält folgende Bausteine (E.ON Kernkraft GmbH, 2008, S. 19):

- Rückbau nichtnuklearer Anlagen und Abriss
- Nachbetrieb
- Nuklearer Rückbau (Phase I-IV)
- Restbetrieb
- Lagerung radioaktiver Abfälle

Nach der Abschaltung des Leistungsbetriebs kann unabhängig vom Atomgesetz mit dem Abbau und anschließenden, eventuellen Abriss von nichtnuklearen Anlagen begonnen werden (E.ON Kernkraft GmbH, 2008, S. 13).

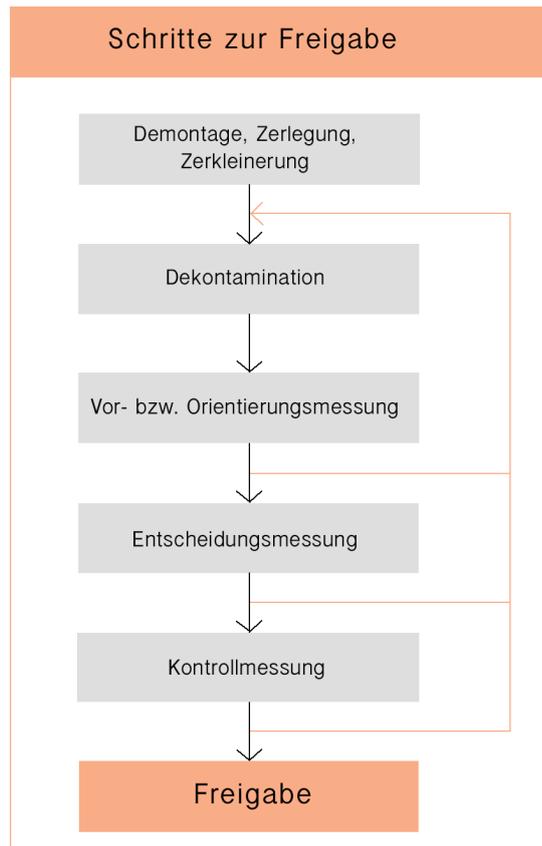
Parallel wird die Nachbetriebsphase eingeleitet. Sie umschließt erste Vorgänge an stark von Strahlung betroffenen Anlagenteilen zur Vorbereitung der Phase des nuklearen Rückbaus. Insbesondere werden in dieser frühen Phase die Brennelemente abtransportiert, Großkomponenten und Systeme dekontaminiert sowie Systeme, die für den weiteren Verlauf nicht mehr erforderlich sind, stillgelegt (E.ON Kernkraft GmbH, 2008, S. 13).

Nach Abschluss der Nachbetriebsvorgänge sind umfangreiche Genehmigungen zur Stilllegung erforderlich (E.ON Kernkraft GmbH, 2008, S. 13). Um diese von der jeweiligen Landesbehörde ausgestellten, atomrechtlichen Genehmigungen zu erhalten, ist ein genauer Projektplan über den zeitlichen Ablauf der einzelnen Rückbauvorgänge einzureichen (E.ON Kernkraft GmbH, 2008, S. 31). Bei späteren Veränderungen an dieser Planung müssen neue Genehmigungen beantragt werden. Ein Prozess der mehrere Jahre andauern und somit das Gesamtprojekt stark verzögern kann. Daher gilt, eine möglichst realitätsnahe, stabile Projektplanung zu erstellen.

Besonders im Bereich des nuklearen Rückbaus birgt diese Forderung allerdings Schwierigkeiten, da vorherrschende Unsicherheiten berücksichtigt werden müssen. Zunächst sind kaum Erfahrungswerte vorhanden. Weltweit existieren nur wenige bereits abgeschlossene kerntechnische Rückbauprojekte (Europäische Kommission, 2016b), auf die zurückgegriffen werden könnte. Außerdem gibt es spezifische Quellen für Unsicherheiten für den Rückbau nuklearer Anlagenteile. Diese Unsicherheiten betreffen die Abfolge beziehungsweise die Anzahl von Rückbauvorgängen. Ein

## 2 Spezifische Anforderungen des kerntechnischen Rückbaus an die Projektplanung

Beispiel für eine solche Unsicherheit ist die Schätzung, wie oft ein Zyklus aus einem Abtragungs- oder Dekontaminationsvorgang und der nachgeschalteten Messung wiederholt werden muss, bevor die geforderten Grenzwerte eingehalten werden. Ein solches Vorgehen ist in Abbildung 2 detailliert dargestellt und findet zum Beispiel bei der schrittweisen Abtragung der Wände des Lagerbeckens statt, wobei eventuell tiefergehende Risse in zusätzlichen Vorgängen herausgeschnitten werden müssen und die Wandung schrittweise freigemessen wird (Brusa et al., 2002, S.13).



**Abbildung 2: Schritte bis zur Freigabe (Quelle: E.ON Kernkraft GmbH, 2008)**

Um diese Schwierigkeiten zu bewältigen, ist ein Projektplanungsverfahren notwendig, das Unsicherheit gegenüber verschiedenen Dimensionen, wie beispielsweise Zeit und Kosten, einbinden kann.

Nach Erhalt der Genehmigungen zur Stilllegung kann die Restbetriebsphase beginnen, während derer sämtliche Rückbauvorgänge von Komponenten und Bausubstanzen, die sich im Wirkungsbereich des Atomgesetzes befinden, ausgeführt werden. Die anfallenden Kosten, um diesen Restbetrieb aufrecht zu erhalten, zusätzlich zu den anstehenden Rückbautätigkeiten, die im nächsten Abschnitt umschrieben werden, betragen durchschnittlich 3-5 Mio. Euro monatlich (Klasen und Seizer, 2015, S. 9). Das

## 2 Spezifische Anforderungen des kerntechnischen Rückbaus an die Projektplanung

anzustrebende Planungsverfahren muss diese indirekten Restbetriebskosten erfassen können und in die Bestimmung der Projektlaufzeit miteinbeziehen.

Die großen Prozesspakete während des Restbetriebs sind Teil des Projektabschnitts "nuklearer Rückbau". Beim Kernkraftwerk Stade wurden die Rückbauarbeiten in vier Rückbauphasen zusammengefasst. In jeder Rückbauphase sind für den Rückbau spezifische Vorgänge auszuführen. Basierend auf deren Abläufe können diese Vorgänge in folgende Kategorien eingeteilt werden (Bach et al., 2005, S. 31)<sup>1</sup>:

- Dekontaminationsarbeiten
- Abbau- und Schneidemethoden
- Transport und Handhabung

Diese Kategorien besitzen jeweils spezifische Eigenschaften aus dem Umfeld des kerntechnischen Rückbaus, die sich direkt auf die zu planenden Prozesse auswirken. An dieser Stelle können diejenigen Dekontaminationsarbeiten nochmals als Beispiel angeführt werden, die mit den typisch zyklischen Abläufen (vgl. Abbildung 2) nur schwer abzuschätzen sind (E.ON Kernkraft GmbH, 2008, S. 26).

Der vorangehende Absatz soll einen kurzen Überblick über die rückbautechnischen Tätigkeiten ermöglichen und die Bedeutung der spezifischen Eigenschaften für die Ablaufplanung herausstellen. Im Rahmen dieser Arbeit soll, abgesehen von einzelnen Beispielen, allerdings nicht weiterführend auf die genaue technische Durchführung der separaten Vorgänge eingegangen werden. Für derartige Ausführungen kann auf Bach et al. (2005) und Brusa et al. (2002) zurückgegriffen werden.

Wie bereits aus der Beschreibung der einzelnen Phasen des Projektabschnitts "nuklearer Rückbau" hervorgeht, sind für viele Rückbauvorgänge zeitliche Beziehungen beziehungsweise Abhängigkeiten einzuhalten. Dies gilt auch im generellen Kontext des Projektmanagements, wobei Vorgänge in aller Regel auf einer Work Breakdown Structure<sup>2</sup> beruhen. Darin befindliche Arbeitspakete werden dann auf einzelne Arbeitsschritte heruntergebrochen. Hierbei sind Abhängigkeiten notwendig, sodass der Gesamtablauf von Vorgängen innerhalb der Arbeitspakete sowie an deren Grenzen erhalten bleibt (PMI, 2013).

Als Beispiel zur Verdeutlichung der Wichtigkeit von zeitlichen Abhängigkeiten können die verschiedenen Vorgänge zum Abbau des Reaktordruckbehälters am italienischen

---

<sup>1</sup> Diese Kategorisierung ist in der Literatur nicht einheitlich definiert. Alternative Einteilungen der Rückbauvorgänge sind von Yanagihara et al. (2001) oder Bartels (2009) eingeführt.

<sup>2</sup> Terminologie aus dem Projektmanagement, welche die oberste Hierarchie der Projektplanung beschreibt und als "Projektstrukturplan" übersetzt werden kann (PMI, 2013).

## 2 Spezifische Anforderungen des kerntechnischen Rückbaus an die Projektplanung

Kernkraftwerk Trino herangezogen werden. Insbesondere war hierbei entscheidend, dass bevor der Druckbehälter entfernt werden konnte, sonstige Komponenten, wie die Kühlmittelpumpe oder der Deckel des Reaktordruckbehälters, bereits aus dem Arbeitsbereich entfernt werden mussten. Nur so war der Druckbehälter überhaupt zugänglich (Brusa et al., 2002, S. 10).

Im Bereich des kerntechnischen Rückbaus spielen zeitliche Abhängigkeiten allerdings noch eine zusätzliche Rolle. Die ausgehende Radioaktivität von einzelnen Komponenten, die über die Betriebszeit des KKW eine hohe Strahlendosis aufgenommen haben, sollen Mitarbeiter und Anlagenteile im Zuge des Rückbaus nur möglichst kurze Zeiträume ausgesetzt werden. Demnach gilt, Arbeitsschritte die hoch belastete Komponenten bearbeiten, nach deren Beginn möglichst schnell fertigzustellen und keine Verzögerungen während dieser Abläufe einzuplanen. Ein Planungsverfahren muss also verschiedene Arten von zeitlichen Abhängigkeiten berücksichtigen können, sodass sowohl festgelegte Reihenfolgen als auch unterbrechungsfreie Abläufe garantiert werden können.

Neben Interdependenzen zwischen Vorgängen haben Vorgänge des kerntechnischen Rückbaus noch eine weitere Eigenschaft, die bei der Projektplanung berücksichtigt werden sollte. Hierbei handelt es sich um die Möglichkeit, manche Vorgänge auf verschiedene Arten auszuführen. Diese verschiedenen Ausführungsarten können Auswirkungen auf unterschiedliche Projektgrößen haben. Durch alternative Ausführungsvarianten ist beispielsweise eine Beschleunigung von Vorgängen möglich, eine Verringerung der Kosten oder der Einsatz von alternativen Ressourcen. Ein Beispiel für die Verwendung von alternativen Ressourcen, etwa zur Lösung eines vorliegenden Ressourcenkonflikts, wäre der Einsatz von Fremdfirmen anstelle von Eigenpersonal für einzelne Arbeitsschritte. So können zum Beispiel handwerkliche Tätigkeiten durch einen externen Dienstleister ausgeführt werden, der die Verantwortlichkeit für einen ganzen Arbeitsschritt übernimmt (Bartels, 2009, S. 54). Andere Beispiele für alternative Ausführungsvarianten sind verschiedene Maschinen oder Technologien zur Durchführung der Vorgänge.

Eine weitere Anforderung an die Projektplanung ist die Bereitstellung der spezifischen Ressourcen, die für die jeweilige Ausführungsart eines Vorgangs, zu jedem Zeitpunkt der Durchführung notwendig sind. Hauptsächlich handelt es sich im Kontext des Rückbaus von Kernkraftwerken um Ressourcen, die über die ganze Projektdauer gleichermaßen zur Verfügung stehen und in jedem zu planenden Zeitintervall neu vergeben werden können. Beispiele aus dem nuklearen Rückbau für diese Arten von Ressourcen sind Mitarbeiter, Anlagen oder Maschinenkapazität, Kapazität in der

## 2 Spezifische Anforderungen des kerntechnischen Rückbaus an die Projektplanung

Dekontaminationseinrichtung oder im Demontageraum zur Durchführung der Vorgänge (Bartels, 2009, S. 54).

Auf die Personalplanung soll an dieser Stelle als Teil der Ressourcenplanung genauer eingegangen werden. Wie bei der Vorstellung der alternativen Ausführungsvarianten erwähnt, ist sowohl Eigen- als auch Fremdpersonal in den Rückbauprozessen involviert. Die Personalstrategie des rückbauenden Unternehmens, welche die eigenen Mitarbeiter betrifft, steht zu weiten Teilen bereits vor dem genauen Projektplanungsverfahren fest. Durch den Rückbau der Kraftwerkskomponenten entfallen zwar viele bisherige Aufgabenfelder des Personals, es entstehen jedoch auch neue Aufgaben für die gut ausgebildetes Fachpersonal notwendig ist. Das zu Betriebszeiten des Kernkraftwerks vorhandene Eigenpersonal soll größtenteils auch in der Nachbetriebs- und Stilllegungsphase weiterbeschäftigt werden. Allerdings werden die Mitarbeiter entsprechenden Alters schrittweise in den Ruhestand entlassen (E.ON Kernkraft GmbH, 2008, S. 21).

Als zusätzlichen Typ involvierter Ressourcen kann der Platz zur Zwischenlagerung von Rückbaumaterial betrachtet werden. Insbesondere kann hier ein Pufferspeicher für die Dekontaminationsanlage angeführt werden. Dieser Speicher soll der Dekontaminationsanlage über das Rückbauprojekt hinweg genügend Material zur Verfügung stellen, ohne die Lagerkapazität zu überschreiten.

Den letzten Strang der Rückbauplanung stellt die Lagerung von radioaktiven Abfällen dar. Rückbaumaterial, wie beispielsweise der abgetragene Beton um den Reaktordruckbehälter, das der Dekontamination nicht zugeführt wird oder nicht erfolgreich freigemessen werden kann, wird verpackt und zunächst eingelagert. Diese Lagervorgänge beeinflussen die Größe der Lagerfläche für radioaktives Restmaterial, die im Rahmen der Projektplanung festgelegt werden muss.

Die somit dargestellten Anforderungen, die sich aus den spezifischen Abläufen des kerntechnischen Rückbaus ergeben, müssen bereits in der Planungsphase beachtet werden. Auf verschiedene Planungsverfahren, die Möglichkeiten zur Anpassung an die vielfältigen Eigenschaften dieses Anwendungsfalls bieten, wird in den folgenden Kapiteln eingegangen.

## 3 Begriffe und Hintergründe für Projektplanungsprobleme

Damit eine Betrachtung verschiedener Projektplanungsprobleme im Rahmen dieser Arbeit durchgeführt werden kann, wird im Einklang mit den allgemeinsten Projekteigenschaften eines Rückbauprojekts das Feld der Planungsoptimierung zunächst grob eingegrenzt. Um die einzelnen Planungsprobleme zu definieren und zu unterscheiden, wird ein allgemeines Klassifizierungsschema aus der vorherrschenden Literatur erläutert. Hierfür wird das grundsätzliche Unterscheidungskriterium der Regularität herangezogen. Anschließend werden die verwendeten Ressourcenarten für eine genauere Beschreibung der einzelnen Planungsprobleme eingeführt.

### 3.1 Eingrenzung der Planungsmodelle

Diese Studie beschäftigt sich lediglich mit dem Vergleich von Schedulingproblemen, der zeitschrittbasierter Planung der Vorgangsabfolge. Hierbei werden Abhängigkeiten zwischen den Vorgängen berücksichtigt sowie die verwendeten Ressourcen einbezogen. Insbesondere werden die verschiedenen Optimierungsziele und deren Auswirkungen auf generierte Pläne untersucht. Des Weiteren wird der Fokus auf deterministischen Planungsaufgaben liegen, sodass die Einführung verschiedener Modelle in ihrer Grundform möglich ist. Eventuelle Erweiterungsmöglichkeiten dieser Modelle auf stochastische Eingabedaten sind möglich, werden allerdings nicht im Rahmen dieser Arbeit betrachtet.

In diesem Zusammenhang werden in dieser Arbeit auch keine Unsicherheiten berücksichtigt. Ziel dieser Arbeit ist es, ein passendes deterministisches Projektplanungsmodell zu identifizieren und an die Anforderungen möglichst anzupassen. Im Rahmen von Weiterentwicklungen können auch Unsicherheiten in der Projektplanung berücksichtigt werden.

Eine weitere Abgrenzung betrifft die Betrachtung des Rückbauprojekts als ein abgeschlossenes Projekt. Denn selbst im Fall von untergeordneten Subprojekten können diese durch die Einführung von Dummyvorgängen<sup>3</sup> für Projektstart und -ende in ein übergreifendes Gesamtprojekt überführt werden (Gonçalves et al., 2015, S. 668).

---

<sup>3</sup> Dummyvorgänge sind Scheinvorgänge, in diesem Fall zur Einführung einer Quelle und Senke für Subprojekte.

Auf diese Weise werden Lösungsansätze für Multi-Projekt Schedulingprobleme ausgeschlossen.

In Kapitel 4 wird bei der Einführung der Optimierungsmodelle lediglich eine Art von Ressourcen betrachtet. Diese erneuerbaren Ressourcen ermöglichen eine anschauliche Erklärung der Modelle und repräsentieren ohnehin den Großteil der verwendeten Ressourcen eines kerntechnischen Rückbauprojekts. Auf die einzelnen Ressourcentypen wird in Kapitel 3.4 genauer eingegangen. Vor der Darstellung der spezifischen Modelle werden zunächst einige grundlegende Begriffe und Kriterien erläutert, die eine Einordnung und den Vergleich der Optimierungsverfahren ermöglichen.

## 3.2 Klassifizierungsschema

In diesem Abschnitt wird ein verbreitetes Klassifizierungsschema für die Einteilung von Schedulingproblemen eingeführt. Mit dessen Hilfe können die in Kapitel 4 vorgestellten Modelle klassifiziert werden. Auf diese Weise wird die Vergleichbarkeit und Definition sowohl innerhalb dieser Arbeit, als auch zwischen verschiedenen Literaturquellen erleichtert. Ähnlich der Klassifizierungen von Neumann et al. (2002) oder Schwindt und Zimmermann (2015) entspricht die hier dargestellte Klassifizierung einer Zusammenfassung der ausführlichen Eigenschaftsliste eingeführt von Brucker et al. (1999). Die Auswahl der aufgeführten Attributwerte beruht auf der Relevanz einzelner Problemeigenschaften für die weitere Betrachtung innerhalb dieser Arbeit. Die Klassifizierung basiert auf einer Beschreibungsform des Machine-Schedulings und übernimmt deren Zusammensetzung aus den drei Attributen  $\alpha|\beta|\gamma$  (Brucker et al., 1999, S. 5). Die Abkürzungen der jeweiligen Attribute entsprechen der Notation von Brucker et al. (1999) und Schwindt und Zimmermann (2015).

**Attribut  $\alpha$**  beschreibt die verwendeten Ressourcen des jeweiligen Schedulingproblems und gibt Auskunft über deren Beschränktheit. Nach Brucker et al. (1999) können, für spezifische Probleme, diesem Attribut noch Werte für die Anzahl und die Schranken der Ressourcen angehängt werden, dies ist jedoch für die Vorstellung allgemeiner Modelle nicht relevant.

Mögliche Werte:

PS      Schedulingproblem mit begrenzten erneuerbaren Ressourcen<sup>4</sup>

---

<sup>4</sup> Ressourcen, die für jedes Zeitintervall neu verwendet werden können und unabhängig von deren Verwendung im nächsten Zeitschritt mit zeitlich konstanter Kapazität zur Verfügung stehen. Definition und Beispiele können in Kapitel 3.4 gefunden werden.

PSt	Schedulingproblem mit begrenzten, zeitlich veränderbaren, erneuerbaren Ressourcen
PS $\infty$	Schedulingproblem mit unbeschränkten erneuerbaren Ressourcen
PSc	Schedulingproblem mit zusätzlich begrenzten kumulativen Ressourcen <sup>5</sup>
MPS	Multi-mode Schedulingproblem mit begrenzten erneuerbaren und nicht-erneuerbaren Ressourcen <sup>6</sup>

**Attribut  $\beta$**  beschreibt die Abhängigkeitstypen der Vorgänge sowie die Vorgangseigenschaften. Das zweite Attribut kann sich aus mehreren Attributen  $\beta_1, \dots, \beta_n$  zusammensetzen, wobei von jedem  $\beta_1, \dots, \beta_n$  maximal ein Wert ausgewählt werden kann.

Mögliche Werte:

$\beta_1: temp:$	Zeitbasierte Vorgangsbeziehungen, beispielsweise mit Wartezeit zwischen Vorgängen (sog. „generalized precedence constraints“)
$\beta_1: prec:$	Vorgangsbeziehungen, die lediglich deren Abfolge regeln
$\beta_2: s_{ij}:$	Spezifische Warte- oder Umrüstzeit bei Wechsel von Vorgang i auf Vorgang j
$\beta_2: o:$	Keine spezifische Warte- oder Umrüstzeit bei Wechsel von Vorgang i auf Vorgang j
$\beta_3: \bar{d}:$	Festgelegte Maximaldauer bis zum Projektabschluss (Deadline)
$\beta_3: o:$	Keine festgelegte Maximaldauer bis zum Projektabschluss
$\beta_4: pmtn:$	Unterbrechungen der Vorgänge sind zu jeder Zeit möglich („preemptive problem“)
$\beta_4: o:$	Unterbrechungen der Vorgänge sind zu keiner Zeit möglich („non-preemptive problem“)

---

<sup>5</sup> Ressourcen von denen zum jeweiligen Zeitpunkt die kumulative Menge, abhängig von der Ressourcenverwendung in vergangenen Zeitschritten, zur Verfügung steht. Definition und Beispiele können in Kapitel 3.4 gefunden werden.

<sup>6</sup> Ressourcen deren Kapazität über den kompletten Projektzeitraum begrenzt ist und während des Projekts nicht aufgestockt wird. Definition und Beispiele können in Kapitel 3.4 gefunden werden.

**Attribut  $\gamma$** , das dritte und somit letzte Attribut, beschreibt die Eigenschaften der Zielfunktion des Problems. Es kann sowohl das spezifische Optimierungskriterium direkt beschrieben werden, als auch geforderte Eigenschaften ohne eine spezifische Funktion festzulegen. Die hierbei angegebene Zielfunktion wird jeweils für ein Minimierungsproblem formuliert.

$f$	Allgemeine Zielfunktion, d.h. sowohl reguläre als auch nicht-reguläre Zielfunktion möglich <sup>7</sup>
$reg$	Reguläre Zielfunktion
$C_{max}$	Dauer des gesamten Projekts
$-\sum c_i^F \beta^{c_i}$	Negativer Kapitalwert des Projekts (NPV *(-1)) <sup>8</sup>
$\sum c_k * \max r_{kt}$	Kosten der Ressourcen über die gesamte Projektdauer
$\sum c_k \sum (r_{kt})^2$	Kosten der Ressourcen je Zeiteinheit $c_k$ multipliziert mit der Summe des quadrierten Ressourcenverbrauchs je Zeiteinheit $r_{kt}$ <sup>9</sup>

### 3.3 Regularität der Zielfunktion

Die Regularität der Zielfunktion ist ein in der Literatur sehr beliebtes Unterscheidungskriterium für Schedulingprobleme und deren Optimierungsziele. Durch diese Eigenschaft wird die Verwendbarkeit einer Vielzahl von Lösungsverfahren ermöglicht, denn sie beschreibt einen grundsätzlichen Zusammenhang zwischen den Entscheidungsvariablen und dem Zielfunktionswert. Für Beispiele solcher Lösungsverfahren kann auf Schultmann (1998, S. 140ff.) zurückgegriffen werden. Im folgenden Abschnitt wird die Regularitätseigenschaft im Kontext von Schedulingproblemen erläutert.

Als reguläre Zielfunktion eines Schedulingproblems wird eine Funktion  $R$  der Endzeitpunkte  $f$  von zu planenden Vorgängen  $i$  bezeichnet, wenn sie monoton wachsend für ein Minimierungsproblem oder monoton fallend für ein Maximierungsproblem ist. Es gilt demnach für reguläre Funktionen  $R$  (in Anlehnung an Schultmann, 1998, S. 127; Vanhoucke, 2013, S. 111ff.; Zimmermann, 2001, S. 45):

Vorgänge  $i = 1, \dots, n$  mit Endzeitpunkten  $f_i \leq f_i'$

---

<sup>7</sup> Die Regularität von Zielfunktionen wird in Kapitel 3.3 beschrieben.

<sup>8</sup>  $\beta$  entspricht dem Diskontierungsfaktor,  $c_i^F$  entspricht dem Cashflow aus Vorgang  $i$ ,  $C_i$  entspricht dem Endzeitpunkt von Vorgang  $i$  (Neumann et al., 2002).

<sup>9</sup> Klassische Zielfunktion des Resource Leveling Problems.

Schedules  $S$  &  $S'$  aus  $f_i$  definiert als  $S = \{f_1, \dots, f_n\}$ ;  $S' = \{f'_1, \dots, f'_n\}$

Für ein Minimierungsproblem:  $R(S) \leq R(S')$  (3.1)

Für ein Maximierungsproblem:  $R(S) \geq R(S')$  (3.2)

Diese Definition lässt sich für eine reguläre Funktion des Scheduling auch wie folgt umschreiben: Wenn bei der Generierung von zwei möglichen Schedules die einzelnen Vorgänge in Schedule 1 jeweils früher oder gleichzeitig beendet werden als dieselben in Schedule 2, ist der Zielfunktionswert von Schedule 1 immer mindestens so gut oder besser (d.h. bei einem Minimierungsproblem genauso groß oder geringer) wie von Schedule 2 (Vanhoucke, 2013, S. 109). Sofern die Zielfunktion Kosten beschreibt, werden sich bei einer regulären Zielfunktion durch eine Verlängerung der Projektdauer keinesfalls die Kosten reduzieren (Bartusch, 1983).

Reguläre Zielfunktionen sind deshalb im Bereich des Scheduling häufig vertreten, da zeitbasierte Optimierungskriterien oftmals die Regularität erhalten. Ein Beispiel ist das in der Literatur am meisten behandelte Zielkriterium, die Projektdauer (Bartels, 2009, S. 22; Vanhoucke, 2013, S. 112). Sofern allerdings mehrere Optimierungskriterien in einer Zielfunktion verbunden werden oder zu entscheidende Zielkonflikte<sup>10</sup> vorhanden sind, wird eine nicht reguläre Zielfunktion indiziert (Vanhoucke, 2013, S. 112).

Neben regulär und nicht regulär lassen sich Zielfunktionen auch den anti-regulären Funktionen zuteilen. Eine Zielfunktion für die entweder Gleichung 3.1 oder 3.2 unter der Bedingungen  $f_i \geq f'_i$  erfüllt ist, wird als anti-regulär bezeichnet (Zimmermann, 2001, S. 45). An dieser Stelle soll allerdings nicht weiter auf anti-reguläre Zielfunktionen eingegangen werden, da diese für Schedulingprobleme nur von untergeordneter Bedeutung sind.

Sofern eine Zielfunktion weder den regulären noch den anti-regulären Funktionen zugeordnet werden kann, wird sie als nicht regulär bezeichnet. Auf weitere spezifische Funktionsbeispiele soll an dieser Stelle verzichtet werden, denn die in Kapitel 4 eingeführten Modelle werden jeweils bezüglich deren Zielfunktion eingeteilt und dienen somit als ausführliche Beispiele.

## 3.4 Ressourcentypen

Im Bereich der hier betrachteten Schedulingprobleme können grundsätzlich verschiedene Arten von Ressourcen einbezogen werden. Auch wenn in den

---

<sup>10</sup> Trade-offs zwischen Optimierungszielen.

Erläuterungen des Kapitels 4 aufgrund der Übersichtlichkeit lediglich ein Ressourcentyp, die erneuerbaren Ressourcen, in die Modelle integriert wird, können generell weitere Ressourcentypen durch zusätzliche Nebenbedingungen eingebunden werden. Zur Klärung der im weiteren Verlauf dieser Arbeit verwendeten Begriffe soll in den folgenden Abschnitten kurz auf die für die vorgestellten Schedulingprobleme verbreiteten Ressourcentypen eingegangen werden (Schwindt und Zimmermann, 2015; Vanhoucke, 2013):

- Erneuerbare Ressourcen
- Nicht-erneuerbare Ressourcen
- Doppelt beschränkte Ressourcen
- Partiiell erneuerbare Ressourcen
- Kumulative und Lagerressourcen

Bei erneuerbaren Ressourcen handelt es sich um Ressourcen, die für jedes Zeitintervall neu verwendet werden können. Sie stehen unabhängig von ihrer Verwendung im vergangenen Projektverlauf zu jedem Zeitschritt gleichermaßen zur Verfügung. Dieser Ressourcentyp wird, in anderen Worten, in jeder Zeitperiode wieder erneuert. In ihrer eigentlichen Form stehen die erneuerbaren Ressourcen über den gesamten Projekthorizont mit konstanter Kapazität zur Verfügung (Vanhoucke, 2013, S. 110). Allerdings können als Sonderform auch zeitlich-veränderbare Kapazitäten der erneuerbare Ressourcen modelliert werden (Hartmann, 2015, S. 164). Als Beispiele für erneuerbare Ressourcen können Maschinenkapazitäten angeführt werden. Die Kapazität kann für jeden Zeitschritt vergeben werden und steht in der nächsten Periode wieder uneingeschränkt zur Verfügung.

Nicht-erneuerbare Ressourcen stellen das Gegenstück der erneuerbaren Ressourcen dar. Ihre Kapazität steht über den gesamten Projekthorizont einmalig zur Verfügung und wird nicht erneuert beziehungsweise wiederhergestellt (Vanhoucke, 2013, S. 110). Dieser Ressourcentyp ist in vielen Schedulingproblemen nicht entscheidungsrelevant, da eine zeitliche Verschiebung von Vorgängen keinen Einfluss auf deren Verbrauch hat. Beispiele für nicht-erneuerbare Ressourcen können allgemein in vorhandenen Rohstoffmengen gefunden werden, ein weiteres Beispiel ist auch eine zur Verfügung stehende Geldsumme (Vanhoucke, 2013, S. 110).

Die doppelt beschränkten Ressourcen sind eine Mischform der erneuerbaren und nicht-erneuerbaren Ressourcen. Dieser Ressourcentyp ist sowohl über den gesamten Projektzeitraum als auch für jeden Zeitschritt einzeln beschränkt (Vanhoucke, 2013, S. 110). Ein Beispiel für diesen Ressourcentyp stellen etwa Emissionen verschiedener Art

dar. Hier können sowohl für jeden Zeitschritt, als auch für die gesamte Projektdauer Grenzwerte vorliegen (Vanhoucke, 2013, S. 110). Durch eine Substitution kann eine doppelt beschränkte Ressource durch eine erneuerbare und eine nicht-erneuerbaren Ressource ersetzt werden (Mika et al., 2005, S. 640). Daher wird im weiteren Verlauf dieser Arbeit nicht spezifischer auf diesen Ressourcentyp eingegangen.

Partiell erneuerbare Ressourcen können als Verallgemeinerung von erneuerbaren und nicht-erneuerbaren Ressourcen betrachtet werden. Denn die zwei letzteren können durch partiell erneuerbare Ressourcen modelliert werden. Die Kapazität von partiell erneuerbaren Ressourcen ist somit an eine festgelegte Menge von Zeitschritten gebunden. Diese Kapazität wird nur verbraucht, wenn der Vorgang auch in den definierten Zeitschritten ausgeführt wird (Alvarez-Valdes et al., 2015, S. 204f.). Durch Festlegung der Kapazität für genau einen Zeitschritt kann eine erneuerbare Ressource modelliert werden. Durch Erweiterung der Menge von Zeitperioden auf alle möglichen Zeitschritte wird eine nicht-erneuerbare Ressource modelliert (Alvarez-Valdes et al., 2015, S. 204). Die genaue Personalplanung innerhalb der Gesamtprojektplanung stellt ein Anwendungsfeld von partiell erneuerbaren Ressourcen dar. Dadurch können die Arbeitszeitbegrenzungen über verschiedene Zeitfenster modelliert werden (Alvarez-Valdes et al., 2015, S. 204).

Kumulative Ressourcen stellen einen Ressourcentyp dar, dessen Kapazität sich zwar in jeder Periode erneuern kann, dessen neue Kapazität allerdings vom vorherigen Verbrauch dieser Ressource abhängig ist. So werden diese Ressourcen mit festgelegter Rate je Zeiteinheit zur Verfügung gestellt und nicht verbrauchte Einheiten zusätzlich in zukünftige Zeitperioden transferiert (Chaleshtari und Shadrokh, 2013, S. 39). Diese Art von Ressourcen steht in Zusammenhang mit der Modellierung von Lagerressourcen. In manchen Fällen stehen Obergrenzen der Lagerhaltung fest, zusätzlich muss in sämtlichen Fällen gewährleistet werden, dass der Lagerbestand im nicht-negativen Bereich liegt. Wie bei den kumulativen Ressourcen, ist zur Festlegung der Kapazität in einer Periode die Betrachtung der bisherigen Verwendung dieser Ressource im Projektverlauf notwendig (Carlier und Moukrim, 2015, S. 178).

Der obige Überblick über die verschiedenen Ressourcentypen stellt keinesfalls eine vollständige Auflistung aller in der Literatur betrachteten Ressourcenarten beziehungsweise -modellierungen dar. Diese Erläuterungen umfassen allerdings die Ressourcenarten, die im Kontext der Schedulingprobleme in Kapitel 4 sowie der tangierenden Literatur verbreitet sind. Für weiterführende Erläuterungen sowie zusätzliche Ressourcenmodellierungen, beispielsweise kontinuierliche Ressourcen zur

Modellierung von Stoffströmen ohne diskrete Zahlenwerte, kann auf Schwindt und Zimmermann (2015) oder Schirmer (1999) zurückgegriffen werden.

# 4 Detaillierte Betrachtung einzelner Schedulingprobleme

In diesem Kapitel werden einzelne Schedulingprobleme vorgestellt. Sie entsprechen der dargestellten Eingrenzung, decken allerdings verschiedene Anwendungsfälle ab. Zunächst wird das bekannte Resource Constrained Project Scheduling Problem eingeführt sowie eine passende Erweiterung der Zielfunktion mit diskontierten Kosten. Anhand dieser Probleme werden Notation, Abkürzungen sowie ein Beispiel für den weiteren Verlauf des Kapitels vorgestellt. Anschließend wird auf die Familie der Resource Investment Probleme eingegangen und schließlich das Resource Leveling Project Scheduling Problem beleuchtet.

## 4.1 Resource Constrained Project Scheduling Problem

Als erstes Problem dieses Kapitels wird das Resource Constrained Project Scheduling Problem (RCPSP) betrachtet. Es ist unter den bis dato meist behandelten Schedulingproblemen und stellt die Grundlage für viele Erweiterungen, wie beispielsweise das Resource Constrained Project Scheduling Problem with Discounted Cashflows (RCPSPDC)<sup>11</sup>, dar (Gu et al., 2015, S. 300). Das RCPSP wird, wie jedes Schedulingproblem, aus Vorgängen, Vorgangsbeziehungen und dem Ressourcenverbrauch dieser Vorgänge gebildet. Die Besonderheit des RCPSP beruht allerdings auf dessen Rahmenbedingungen, gegeben durch die Beschränktheit der verwendeten Ressourcen. Diese Ressourcenkapazitäten dürfen bei der Bildung eines Projektplans nicht überschritten werden (Gu et al., 2015, S. 300). Das Ziel des RCPSP, in seiner allgemeinen Form, ist das Finden eines Projektplans mit minimaler Projektdauer, der gleichzeitig die Ressourcenbeschränkungen zu jedem Zeitpunkt einhält (Colak und Azizoglu, 2014, S. 777).

Für diese Zielfunktion kann durch eine Verschiebung der Startzeitpunkte der Vorgänge nach hinten keinesfalls eine Verbesserung des Zielfunktionswerts, also eine

---

<sup>11</sup> Vgl. Kapitel 4.2.

Verkürzung der Projektdauer, erreicht werden. Die Minimierung der Projektdauer stellt somit ein bekanntes Beispiel für eine reguläre Funktion dar (Kolisch, 2015, S. 6). Bezüglich der Komplexität des RCPSP stellten Blazewicz et al. (1983) fest, dass das RCPSP, als Verallgemeinerung des Job-Shop Problems, den NP-schweren Optimierungsproblemen zugeordnet werden kann. Diese Erkenntnis gilt aufgrund der weiterführenden Verallgemeinerungen auf Basis des RCPSP auch für die davon abgeleiteten Probleme, wie beispielsweise das RCPSPDC (Blazewicz et al., 1983).

Auf Basis dieser Informationen kann das RCPSP bereits in das, unter Kapitel 3.2 vorgestellte, Klassifizierungsschema eingeordnet werden. Bei Verwendung von einfachen Ende-Start Vorgangsbeziehungen und erneuerbaren Ressourcen ergibt sich die Klassifizierung  $PS | prec | C_{max}$ . Dieses Problem kann allgemein wie folgt formuliert werden (in Anlehnung an Vanhoucke, 2013, S. 114f.):

$$\min s_j \tag{4.1}$$

unter den Nebenbedingungen

$$s_i + d_i \leq s_j \quad j = 1, \dots, J; i \in P_j \tag{4.2}$$

$$\sum_{j \in S(t)} q_{jr} \leq Q_r \quad \forall r \in R; t = 1, \dots, \bar{T} \tag{4.3}$$

$$s_1 = 0 \tag{4.4}$$

$$s_j \in \mathbb{Z}_0^+ \quad j = 1, \dots, J \tag{4.5}$$

$i, j$	Vorgang $i, j \in 1, \dots, J$
$J$	Letzter Vorgang, i.d.R. ein Dummy- oder Scheinvorgang, der weder eine Dauer noch eine Ressourceninanspruchnahme besitzt
$P_j$	Menge der direkten Vorgänger von Vorgang $j$
$t$	Zeitintervall $t \in 1, \dots, \bar{T}$
$\bar{T}$	Obere Schranke für die Projektdauer, beispielsweise $\sum_{\forall j} d_j$
$d_j$	Dauer von Vorgang $j$
$S(t)$	Vorgänge, die zum Zeitpunkt $t$ ausgeführt werden
$s_j$	Startzeitpunkt von Vorgang $j$
$r$	Ressource $r \in R \cup R^n$

$R$	Menge aller erneuerbaren Ressourcen
$R^n$	Menge aller nicht-erneuerbaren Ressourcen
$q_{jr}$	Ressourcenverbrauch je Zeitintervall $t$ durch Vorgang $j$ von Ressource $r$
$Q_r$	Kapazität von Ressource $r$

Zur Vereinfachung der Problemformulierung werden als Vorgang 1 und Vorgang J Scheinvorgänge eingeführt. Vorgang 1, die Quelle, wird definiert als Vorgänger für alle Vorgänge, die ansonsten keinen Vorgänger haben. Vorgang J, die Senke, wird definiert als Nachfolger aller Vorgänge, die ansonsten keinen Nachfolger haben. Diese Scheinvorgänge haben weder eine Dauer noch einen Ressourcenverbrauch. Die allgemeine Form des RCPSP minimiert die Projektdauer, dies wird in der Zielfunktion (4.1) durch den Startzeitpunkt des zuletzt auszuführenden Vorgangs J gemessen. Nebenbedingung 4.2 stellt die Einhaltung der Vorgangsbeziehungen aus  $P_j$  sicher. Das bedeutet ausformuliert, dass der Startzeitpunkt eines Vorgangs  $s_j$  frühestens nach dem Startzeitpunkt seines Vorgängers  $s_i$  zuzüglich dessen Dauer  $d_i$  liegen kann. Die Obergrenzen für den Ressourcenverbrauch werden durch Nebenbedingung 4.3 fixiert. Für jeden Zeitpunkt aus  $\bar{T}$  wird die Ressourcenbeanspruchung  $q_{jr}$  über alle laufenden Vorgänge aufsummiert und mit der Schranke  $Q_r$  verglichen. Die Bedingungen 4.4 und 4.5 fixieren den Projektstart auf Zeitpunkt 0 und begrenzen den Wertebereich der Zeitpunkte auf ganze, positive Zahlen.

Neben der beschriebenen, allgemeinen Formulierung des RCPSP können Optimierungsprobleme auch als lineares Programm (LP) oder gemischt-ganzzahliges Programm (MIP) dargestellt werden. Diese alternative Formulierung ermöglicht den direkten Transfer in Programmierumgebungen und sogar die Lösung mit standardisierten Softwarepaketen. Aufgrund des praxisnahen Hintergrunds dieser Arbeit soll diese Formulierung der behandelten Probleme ebenfalls erarbeitet werden. Im Bereich der linearen Schedulingprobleme ist die Formulierung als gemischt-ganzzahliges lineares Programm (MILP) möglich, ein Problem bei dem sowohl Zielfunktion als auch Nebenbedingungen linear und stetig sind. Außerdem liegen die zu bestimmenden Variablen im ganzzahligen Wertebereich. Sowohl die weite Verbreitung von Software zur Lösung von gemischt-ganzzahligen linearen Programmen, als auch die Verfügbarkeit der zugrundeliegenden Theorie rechtfertigen die Anwendung der MILP (Artigues et al., 2015, S. 17f.).

Für die Formulierung gibt es verschiedene Herangehensweisen, die zeit-indizierte Formulierung<sup>12</sup>, die sequentielle/natürliche Datumsformulierung<sup>13</sup> und zuordnungs-/positionsbasierte Datumsformulierung<sup>14</sup>. Diese Formulierungsarten unterscheiden sich nach deren Umfang, insbesondere der Variablenanzahl, und der Stärke der LP-Relaxation. Im weiteren Verlauf dieser Arbeit soll die zeit-indizierte Formulierung verwendet werden. Sie ist im Kontext des Projektschedulings weit verbreitet, lässt sich relativ einfach auf zusätzliche Umstände erweitern und besitzt eine sehr starke LP-Relaxation, wenngleich hierfür ein großer Umfang des Modells in Kauf genommen werden muss (Artigues et al., 2015, S. 18). Unter den zeit-indizierten Formulierungen kann zwischen Formulierungen basierend auf Puls-Variablen<sup>15</sup>, Schritt-Variablen<sup>16</sup> sowie An-Aus Formulierungen<sup>17</sup> unterschieden werden (Artigues et al., 2015, S. 18). Für die Betrachtungen dieser Arbeit wird die problemorientierte Formulierung mit Puls-Variablen ausgewählt. Aufgrund deren Verbreitung in der Literatur bezüglich ressourcen- und zeitbeschränkter Projektschedulingprobleme wird hierdurch Vergleichbarkeit gewährleistet (Schulmann, 1998, S. 112ff.). Hiernach lässt sich ein gemischt-ganzzahliges lineares Programm des RCPSP wie folgt formulieren (in Anlehnung an Schulmann (1998, S. 114)):

$$\min \sum_{t=1}^{\bar{T}} t * x_{jt} \quad (4.6)$$

unter den Nebenbedingungen

$$\sum_{t=1}^{\bar{T}} x_{jt} = 1 \quad j = 1, \dots, J \quad (4.7)$$

$$\sum_{t=1}^{\bar{T}} (t + d_i) * x_{it} \leq \sum_{t=1}^{\bar{T}} t * x_{jt} \quad j = 1, \dots, J; i \in P_j \quad (4.8)$$

$$\sum_{j=1}^J q_{jr} \sum_{\tau=t}^{t+d_j-1} x_{j\tau} \leq Q_r \quad \forall r \in R; t = 1, \dots, \bar{T} \quad (4.9)$$

$$x_{jt} \in \{0, 1\} \quad j = 1, \dots, J; t = 1, \dots, \bar{T} \quad (4.10)$$

$x_{jt}$ : Binäre Entscheidungsvariable, 1 falls Vorgang  $j$  in  $t$  begonnen wird, 0 sonst

---

<sup>12</sup> Engl.: Time-indexed formulation

<sup>13</sup> Engl.: Sequencing/natural- date formulation

<sup>14</sup> Engl.: Positional-date/assignment formulation

<sup>15</sup> Engl.: Pulse variables

<sup>16</sup> Engl.: Step variables

<sup>17</sup> Engl.: On-Off formulations

Die Formulierung des RCPSP als lineares Programm wurde in Anlehnung an die allgemeine Formulierung aufgebaut. So entspricht die Zielfunktion 4.6 ebenfalls der Minimierung der Projektdauer. Entsprechend der zeit-indizierten Formulierung auf Basis von Puls-Variablen wird die binäre Entscheidungsvariable  $x_{jt}$  eingeführt. Sie gibt an, ob Vorgang  $j$  zu Zeitpunkt  $t$  gestartet wird. Um sicherzustellen, dass ein Vorgang im Projektverlauf nur einmal gestartet werden kann, wird Nebenbedingung 4.7 benötigt. Die folgenden Nebenbedingungen 4.8 und 4.9 bestimmen, analog zu 4.2 und 4.3 der allgemeinen Formulierung, die Einhaltung der Vorgangsbeziehungen sowie der Ressourcenkapazitäten. Die aufgeführte Formulierung stellt sogar einen Sonderfall des MILP dar. Die Entscheidungsvariablen  $x_{jt}$  sind durch Bedingung 4.10 auf den binären Wertebereich beschränkt.

Im Vergleich zu anderen Darstellungen der MILP Formulierungen von Projektschedulingproblemen aus der Literatur, wie beispielsweise von Schultmann (1998), fällt bei Betrachtung dieser Formulierung folgendes auf: Die Zielfunktion und die Nebenbedingungen werden oftmals nicht über alle möglichen Zeitpunkte  $\bar{T}$  iteriert, sondern lediglich über die Zeitpunkte zwischen frühestem und spätestem Startzeitpunkt des jeweiligen Vorgangs. Hierfür ist zwar eine Berechnung der ES- und LS-Schedules<sup>18</sup> notwendig, die verringerte Zahl von Iterationen wirkt sich aber im Gegenzug positiv auf die Laufzeit aus. Das an dieser Stelle dargestellte lineare Programm des RCPSP ist trotzdem ohne Einschränkung gültig. Zur Einführung und Vorstellung der Schedulingprobleme soll an dieser Stelle die Komplexität möglichst gering gehalten werden, daher wurde in der obigen Formulierung auf diese Erweiterung verzichtet. Bei der Betrachtung des multi-mode Falls in Kapitel 4.6.1 soll eine Eingrenzung der Startzeitpunkte beispielhaft dargestellt werden.

Zur Veranschaulichung der Funktionsweise des RCPSP wird im folgenden Abschnitt ein Beispielprojekt vorgestellt, das unter den Kriterien des RCPSP gelöst wird. Dasselbe Beispiel wird in den folgenden Kapiteln auf weitere Schedulingprobleme angewandt. Auf diese Weise können die unterschiedlichen Auswirkungen von spezifischen Zielfunktionen oder Beschränkungsarten besonders gut erläutert werden. Das verwendete Beispielprojekt wird in Tabelle 1 dargestellt. Es besteht aus 15 Vorgängen, vor Einführung von Quellen oder Senken, und benötigt zwei erneuerbare Ressourcen. Zur Projektplanung mithilfe des RCPSP werden die jeweiligen Vorgangsdauern, eventuelle Vorgangsbeziehungen, definiert als direkte Vorgänger, sowie der Ressourcenverbrauch je Vorgang benötigt.

---

<sup>18</sup> Earliest-start Schedule und latest-start Schedule.

Tabelle 1: Vorgangsdaten des Beispielprojekts

Vorgang	Dauer	Direkte Vorgänger	Ressourcenverbrauch	
			Ressource A	Ressource B
1	1	-	5	2
2	5	-	7	4
3	3	-	3	8
4	1	1	6	4
5	4	2	3	5
6	7	4; 5	1	2
7	4	3	8	1
8	9	5; 7	2	7
9	1	6; 8	7	4
10	4	-	3	1
11	1	-	1	0
12	2	11	2	0
13	3	-	1	3
14	2	-	2	0
15	2	14	0	2

Zur Visualisierung der Vorgangsbeziehungen kann dieses Beispielprojekt auch wie in Abbildung 3 als Netzplan dargestellt werden. Die Darstellung entspricht der eines Vorgangsknotennetzplans (Activity-on-Node Notation) und zeigt die jeweiligen Vorgänge als Knoten. Zusätzlich zu den 15 Vorgängen aus Tabelle 1 werden bereits ein Startvorgang und ein Endvorgang, die Quelle und Senke, eingezeichnet.

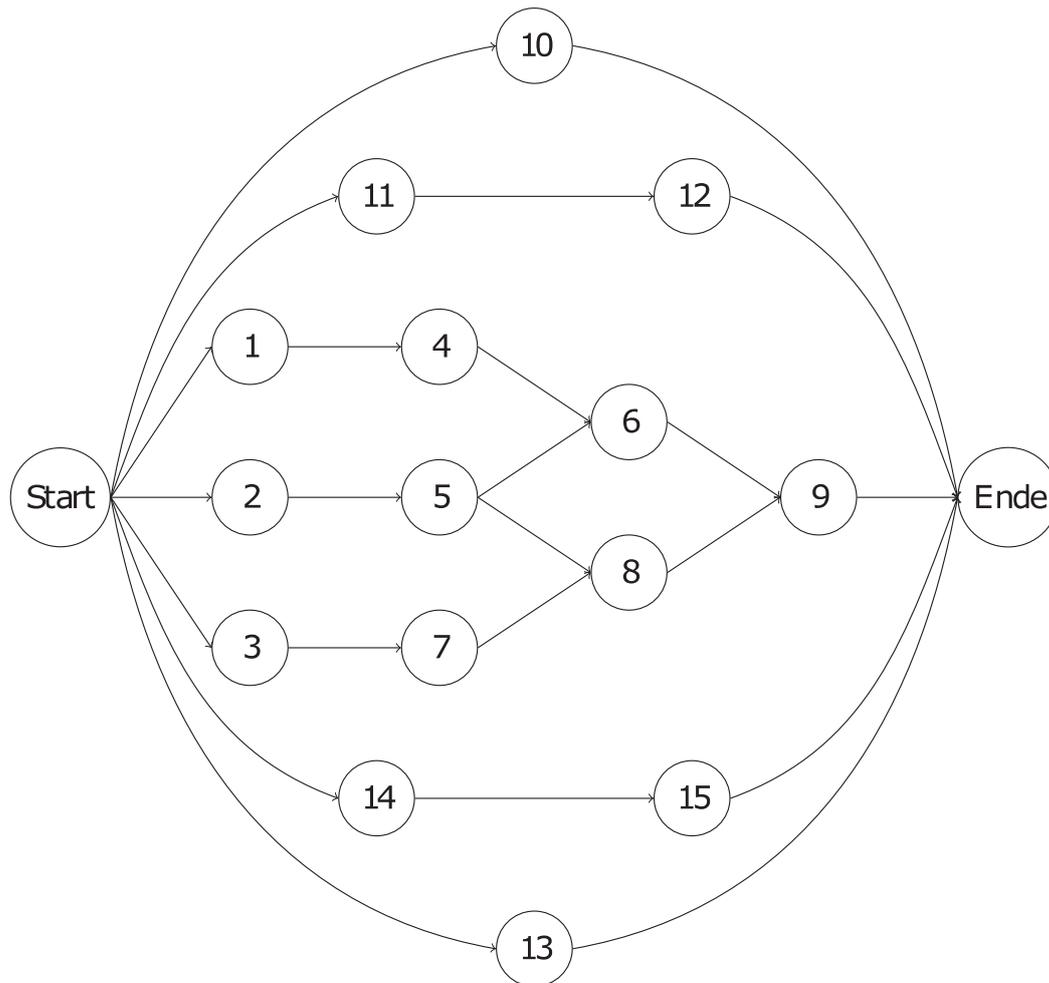
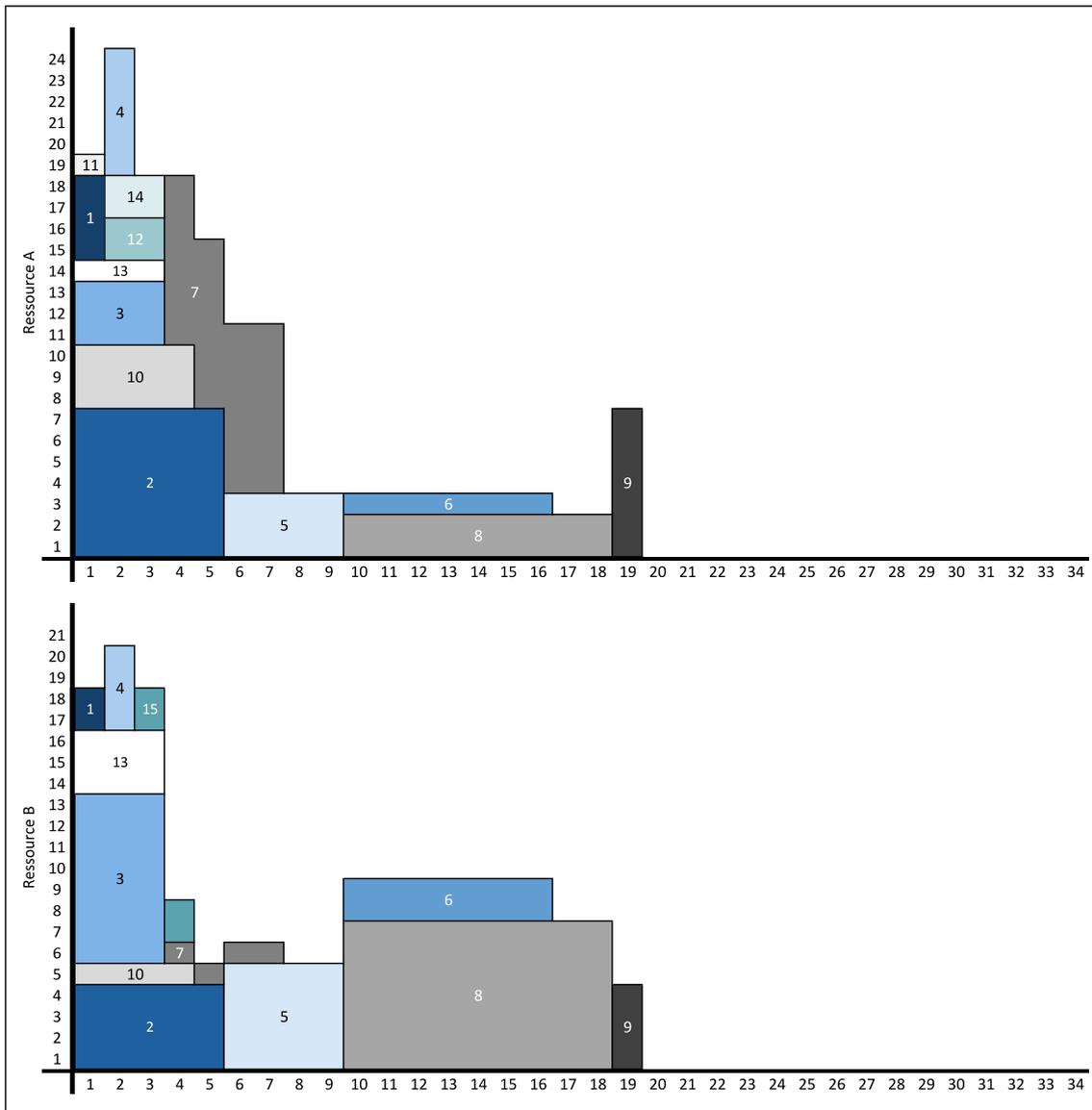


Abbildung 3: Netzplan des Beispielprojekts

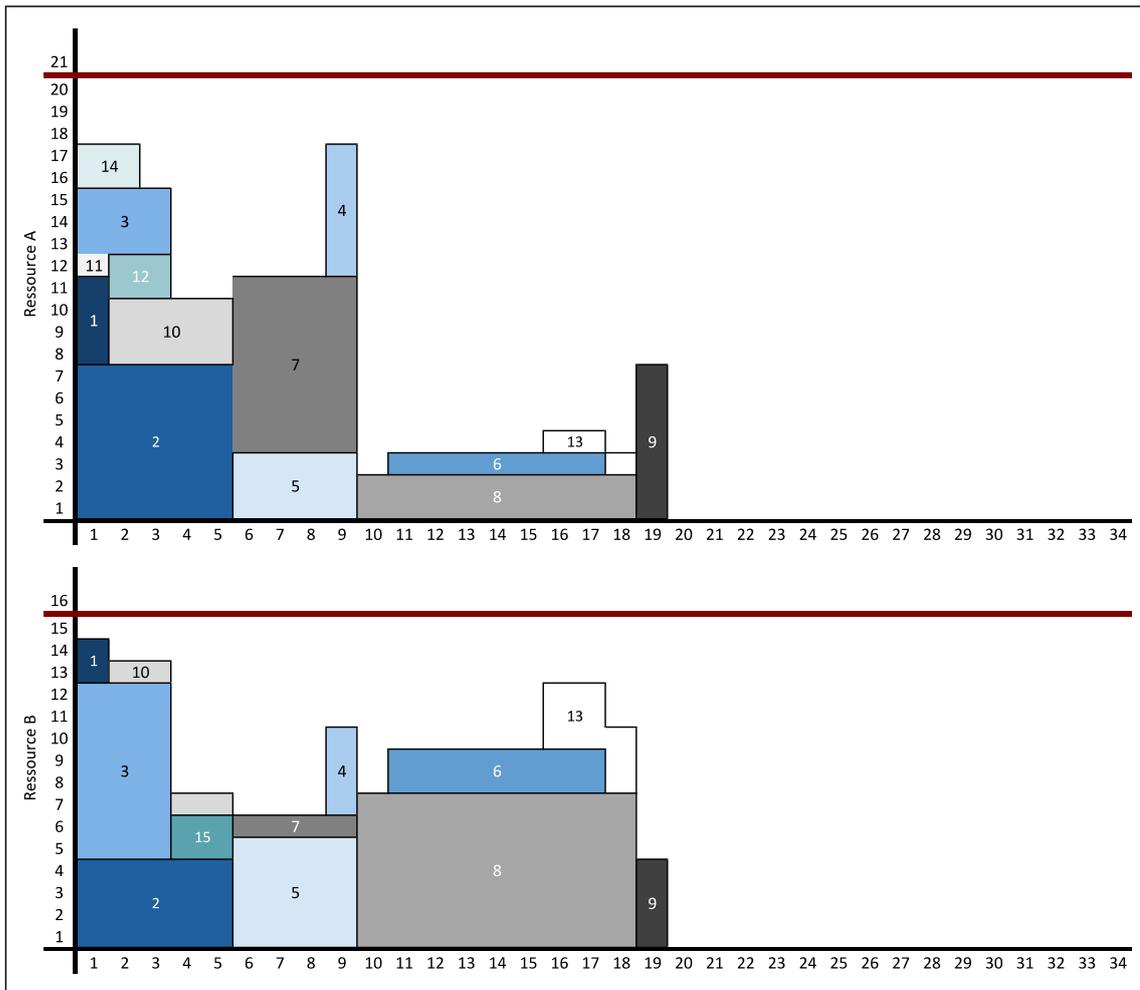
Um die minimale Ausführungsdauer für dieses Beispielprojekt herauszufinden, ohne Ressourcenkapazitäten zu beachten, kann der ES-Schedule entlang des kritischen Pfades berechnet werden. Durch diese CPM-Methode<sup>19</sup> wird für jeden Vorgang der frühestmögliche Startzeitpunkt berechnet, basierend auf dessen Vorgangsbeziehungen. Für eine detaillierte Beschreibung dieses Verfahrens kann auf Bohinc (2010) zurückgegriffen werden. Wird jeder Vorgang zu seinem frühestmöglichen Zeitpunkt ausgeführt, kann das Projekt nach 19 Zeiteinheiten abgeschlossen werden. Die Ressourcenverwendung für die Ressourcen A und B kann aus Abbildung 4 entnommen werden. Für die schnellstmögliche Fertigstellung sind demnach mindestens 24 Einheiten von Ressource A und 20 Einheiten von Ressource B notwendig.

<sup>19</sup> CPM = Critical Path Method, dt: Methode des kritischen Pfads. Nähere Informationen sind in Bohinc (2010) zu finden.



**Abbildung 4: Beanspruchung von Ressource A und B für die Durchführung des Beispielprojekts nach dem ES-Schedule**

Wenn für dieses Beispielprojekt nun Obergrenzen für die verwendeten Ressourcen eingefügt werden, entspricht das Problem einem RCPSP. Die Kapazitäten liegen für dieses Beispiel bei 20 Einheiten für Ressource A und 15 Einheiten für Ressource B. Somit ist der ES-Schedule nicht mehr gültig und neben den Vorgangsbeziehungen müssen auch Ressourcenkapazitäten bei der Planung beachtet werden. Um die Projektdauer unter diesen Aspekten zu minimieren, wird das Beispielprojekt durch das zuvor vorgestellten MILP gelöst. Dieses Problem wird durch CPLEX Version 12.6 mithilfe der Softwareumgebung IBM ILOG CPLEX Optimization Studio minimiert. Nach der Lösung dieses RCPSP unter den obigen Kapazitätsbedingungen beträgt der Zielfunktionswert 19. Dies bedeutet, dass das Projekt trotzdem in 19 Zeiteinheiten durchgeführt werden kann. Das zugehörige Ressourcendiagramm ist in Abbildung 5 dargestellt.



**Abbildung 5: Beanspruchung von Ressource A und B für die Durchführung des Beispielprojekts nach Lösung des RCPS**

Wie im Vergleich zum ES-Schedule erkannt werden kann, ist die Vorgangsreihenfolge allerdings angepasst, sodass die Ressourcenkapazitäten eingehalten werden.

Anhand dieses Beispiels lässt sich der Anwendungsfall sehr gut umschreiben, denn viele Projekte werden unter begrenzter Ressourcenverfügbarkeit ausgeführt. Bereits für das einfache vorgestellte Beispiel übersteigt der Datensatz die Möglichkeiten zur Planung mit einfachen Methoden, wie beispielsweise CPM. Durch die Lösung eines RCPS kann auch unter einer Vielzahl von verwendeten Ressourcen und komplizierten Vorgangsbeziehungen, zuverlässig die kleinstmögliche Projektdauer bestimmt werden.

## 4.2 Resource Constrained Project Scheduling Problem with Discounted Cashflows

Neben der Minimierung der Projektdauer können die Grundlagen des RCPSP auch auf andere Problemstellungen erweitert werden. Ein alternatives Ziel in der Projektplanung, neben der raschen Fertigstellung, ist die Einbeziehung von monetären Aspekten. Wie in Kapitel 2 dargestellt, ist insbesondere vor dem Hintergrund des kerntechnischen Rückbaus eine Planung nach Kostenaspekten wesentlich. In diesem Kapitel wird das Ressource Constrained Project Scheduling Problem with Discounted Cashflows (RCPSPDC) betrachtet. Es stellt eine Erweiterung des RCPSP dar, dessen Unterschied darin liegt, dass die einzelnen Vorgänge jeweils mit Ein- oder Auszahlungen verknüpft sind. Um auch die zeitliche Komponente dieser Zahlungsströme einzubeziehen, werden die Barwerte der jeweiligen Zahlungen verwendet. Dies führt dazu, dass die Auszahlungen, also negative Zahlungsströme, generell so spät wie möglich geplant und Einzahlungen, also positive Zahlungsströme, generell so früh wie möglich geplant werden (Gu et al., 2015, S. 300). Dieses Verhalten hat zur Folge, dass eine Zielfunktion zur Maximierung der diskontierten Zahlungsströme im Allgemeinen nicht regulär ist (Brucker et al., 1999, S. 22). Dies lässt sich durch ein Gegenbeispiel zeigen. Denn durch eine Erhöhung der Endzeitpunkte eines gesamten Schedules  $S$ , dessen Vorgänge nur mit Auszahlungen verknüpft sind, wird in jedem Fall ein mindestens so hoher Zielfunktionswert erreicht.

Ansonsten bleiben die Grundlagen des RCPSP erhalten und das RCPSPDC lässt sich durch  $PS | prec, \bar{d} | - \sum c_i^F \beta^{C_i}$  klassifizieren (Brucker et al., 1999). Nach allgemeiner Formulierung lässt sich das RCPSPDC nun wie folgt aufstellen (in Anlehnung an Vanhoucke, 2013, S. 118):

$$\max \sum_{j=1}^J cf_j * e^{-\alpha * s_j} \quad (4.11)$$

unter den Nebenbedingungen

$$s_i + d_i \leq s_j \quad j = 1, \dots, J; i \in P_j \quad (4.12)$$

$$\sum_{j \in S(t)} q_{jr} \leq Q_r \quad \forall r \in R; t = 1, \dots, \bar{T} \quad (4.13)$$

$$s_1 = 0 \quad (4.14)$$

$$s_j \leq D \quad (4.15)$$

$$s_j \in \mathbb{Z}_0^+ \quad j = 1, \dots, J \quad (4.16)$$

$cf_j$	Zahlungsstrom der mit dem jeweiligen Vorgang $j$ einhergeht; positive $cf_j$ entsprechen Einzahlungen, negative $cf_j$ entsprechen Auszahlungen
$\alpha$	Verwendeter Diskontierungszinssatz in Prozent
$D$	Zeitpunkt, zu dem das Projekt abgeschlossen sein muss (Deadline)

Aus den bereits ausgeführten Gründen, wird das RCPSPDC nun ebenfalls als MIP formuliert (in Anlehnung an (Gu et al., 2015, S. 302):

$$\min - \sum_{j=1}^J \sum_{t=1}^{\bar{T}} cf_j * e^{-\alpha * t} * x_{jt} \quad (4.17)$$

unter den Nebenbedingungen

$$\sum_{t=1}^{\bar{T}} x_{jt} = 1 \quad j = 1, \dots, J \quad (4.18)$$

$$\sum_{t=1}^{\bar{T}} (t + d_i) * x_{it} \leq \sum_{t=1}^{\bar{T}} t * x_{jt} \quad j = 1, \dots, J; i \in P_j \quad (4.19)$$

$$\sum_{j=1}^J q_{jr} \sum_{\tau=t}^{t+d_j-1} x_{j\tau} \leq Q_r \quad \forall r \in R; t = 1, \dots, \bar{T} \quad (4.20)$$

$$\sum_{t=1}^{\bar{T}} t * x_{jt} \leq D \quad (4.21)$$

$$x_{jt} \in \{0, 1\} \quad j = 1, \dots, J; t = 1, \dots, \bar{T} \quad (4.22)$$

Sowohl die allgemeine Formulierung, als auch das lineare Programm entsprechen weitestgehend dem Grundmodell des RCPSP. Lediglich die Zielfunktion 4.11 beziehungsweise 4.17 sowie die Nebenbedingung 4.15 beziehungsweise 4.21 wurden durch die Erweiterung auf das RCPSPDC beeinflusst.

Die Zielfunktionen maximieren jeweils die Summe der anfallenden Zahlungsströme der einzelnen Vorgänge, abhängig von dem Startzeitpunkt des Vorgangs werden die Zahlungen zuvor diskontiert. Der Term  $e^{-\alpha * t}$  zinst den Zahlungsstrom auf Basis des festgelegten Diskontierungszinssatzes  $\alpha$  vom Ausführungszeitpunkt  $t$  zum Projektstart

ab. Bezüglich der Fälligkeit der Ein- oder Auszahlungen innerhalb der Vorgänge wird an dieser Stelle angenommen, dass alle Zahlungen mit dem Start des Vorgangs fällig werden. Je nach Problemstellung kann diese Annahme angepasst werden, indem entweder einzelne oder alle Zahlungsströme entsprechend über die Vorgangsdauer verzinst beziehungsweise diskontiert werden. Um eine am Vorgangsende anfallende Auszahlung abzubilden, muss diese Zahlung lediglich zusätzlich über die Vorgangsdauer diskontiert werden (Vanhoucke, 2013, S. 118).

Die zweite Veränderung gegenüber dem RCPSP liegt in Nebenbedingung 4.15 beziehungsweise 4.21. Mithilfe dieser Nebenbedingung wird eine Fertigstellung des Projekts innerhalb eines vorgegebenen Zeitraums sichergestellt (Vanhoucke, 2013, S. 188f.). Die Notwendigkeit für eine Festlegung eines maximalen Ausführungszeitraums ergibt sich aus den Eigenschaften des RCPSPDC. Der Diskontierungsterm  $e^{-\alpha \cdot t}$  der Zielfunktion begründet, dass sich die zeitliche Verschiebung von Vorgängen auf den Zielfunktionswert auswirkt. Dadurch werden beispielsweise Auszahlungen möglichst spät eingeplant. Ohne eine vorgegebene obere Schranke für die Projektdauer würde jede weitere zeitliche Verschiebung einer Auszahlung in die Zukunft den Zielfunktionswert verbessern. Der Lösungsraum des Problems ohne zeitliche Obergrenze wäre somit nicht geschlossen und das Problem nicht beschränkt. Alternativ kann die Projektdauer auch durch indirekte Kosten pro Projektzeitschritt beziehungsweise Strafkosten begrenzt werden, diese Methoden werden im Bereich des RIPT in Kapitel 4.4 weiter ausgeführt.

Auf die Nebenbedingung 4.13 beziehungsweise 4.20, welche die Einhaltung der Ressourcenbeschränkung sicherstellen, kann an dieser Stelle nochmals eingegangen werden. In Bezug auf diese Ressourcenkapazitäten lassen sich im Rahmen des RCPSPDC zwei Problemarten unterscheiden. Zusätzlich zu dem hier behandelten Fall, in dem die Ressourcenverwendung beschränkt ist, soll der Vollständigkeit wegen der Fall von unbeschränkten Ressourcen erwähnt werden. Es werden ebenfalls die Summe der diskontierten Zahlungsströme maximiert, allerdings lediglich unter den Vorgaben der Vorgangsbeziehungen (De Reyck und Herroelen, 1998, S. 2).

Um die spezifischen Eigenschaften und das Verhalten zu betrachten, wird das RCPSPDC ebenfalls anhand eines Beispiels dargestellt. Es kann auf das in Kapitel 4.1 eingeführte Beispiel zurückgegriffen werden, auf diese Weise können die Planungsergebnisse direkt verglichen werden. Hierfür werden die Vorgangsdaten durch ein weiteres Attribut, den vorgangsbezogenen Cashflow<sup>20</sup>, erweitert. Die angepassten Vorgänge sind in Tabelle 2 dargestellt, der Netzplan aus Abbildung 3 ist

---

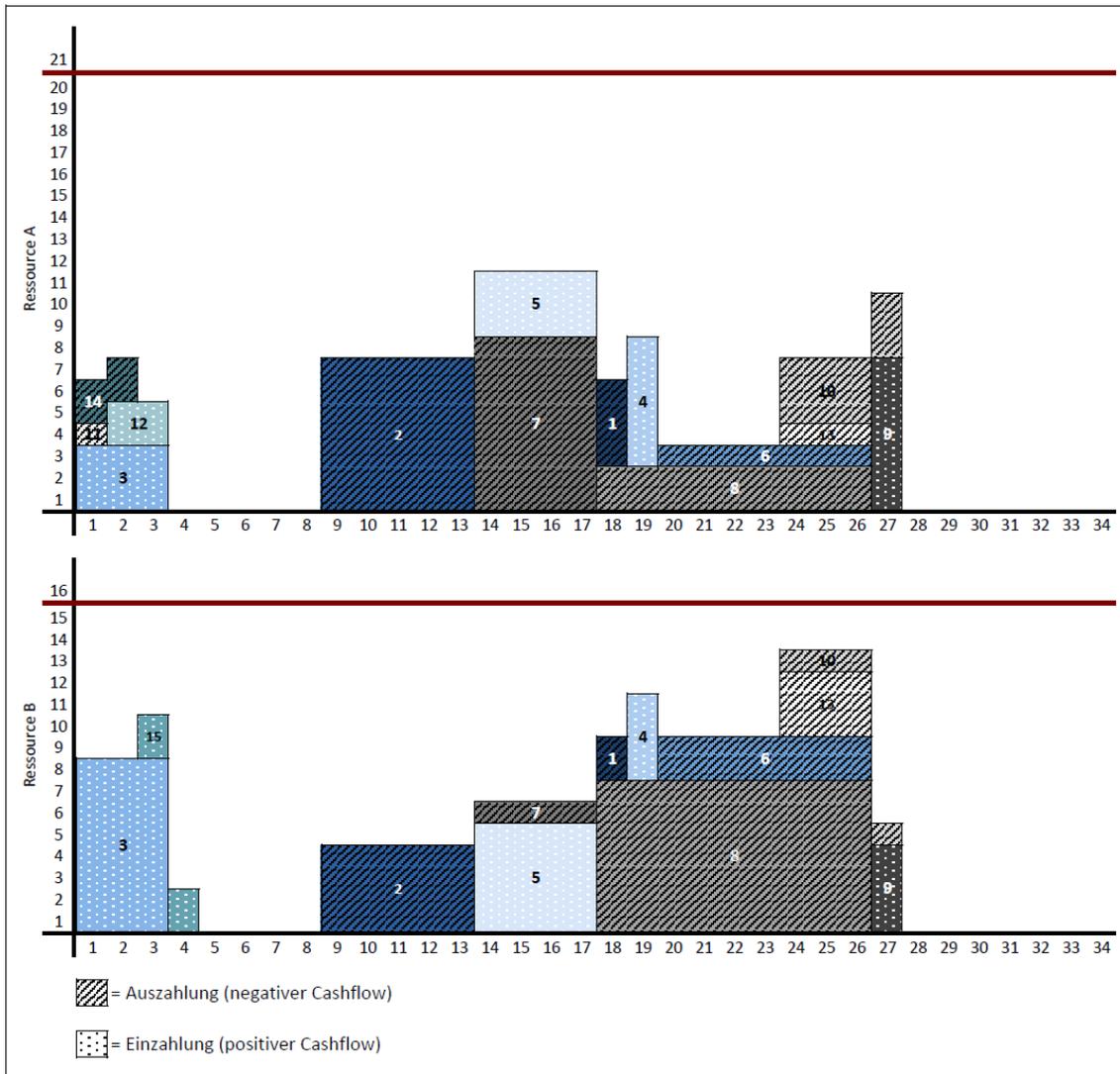
<sup>20</sup> Ein- oder Auszahlungen.

auch weiterhin gültig. Wie bisher sind Ressourcen A und B auf 20 beziehungsweise 15 Einheiten begrenzt. Zusätzlich wird für das RCPSPDC eine maximale Projektdauer von 27 Zeitschritten vorgegeben. Dieses Beispielproblem wird wiederum mit CPLEX Version 12.6 gelöst.

Tabelle 2: Vorgangsdaten des Beispielprojekts inklusive Cashflows

Vorgang	Dauer	Direkte Vorgänger	Ressourcenverbrauch		Cashflow
			Ressource A	Ressource B	
1	1	-	5	2	-14
2	5	-	7	4	-31
3	3	-	3	8	22
4	1	1	6	4	16
5	4	2	3	5	18
6	7	4; 5	1	2	-4
7	4	3	8	1	-9
8	9	5; 7	2	7	-15
9	1	6; 8	7	4	70
10	4	-	3	1	-8
11	1	-	1	0	-10
12	2	11	2	0	30
13	3	-	1	3	-22
14	2	-	2	0	-20
15	2	14	0	2	45

Der errechnete Zielfunktionswert, also der Barwert aller Zahlungsströme, beträgt -36,28. Außerdem wird die maximale Projektdauer ausgeschöpft und das Projekt endet nach 27 Zeitschritten. Das resultierende Ressourcenverbrauchsmuster für Ressource A und B ist in Abbildung 6 zu sehen. In der Darstellung des Ressourcenverbrauchs ist das spezifische Verhalten des RCPSPDC besonders gut beobachtbar, zur visuellen Unterstützung sind Auszahlungen schraffiert und Einzahlungen gepunktet dargestellt.



**Abbildung 6: Beanspruchung von Ressource A und B für die Durchführung des Beispielprojekts nach Lösung des RCPSPDC**

Im Vergleich zum Ressourcenverbrauchsmuster des RCPSP wird deutlich, dass viele Vorgänge ans Ende des Projekts verschoben wurden. Insbesondere Auszahlungsvorgänge, die zuvor zu Beginn des Projekts ausgeführt wurden, beispielsweise Vorgang 1, 2 oder 10, wurden durch die integrierte Diskontierung der Zahlungen an das Projektende verschoben. Die Pause von 5 Zeiteinheiten während des Projekts lässt sich ebenfalls durch die Diskontierung erklären, durch die Wahl einer geringeren Projektdauer ließe sich diese Pause vermeiden. Hier bleibt anzumerken, dass in dieser Formulierung des RCPSPDC keine Fixkosten betrachtet werden, wodurch ein Projektstillstand keine zusätzlichen Kosten verursacht.

### 4.3 Resource Investment Problem

Bisher wurden in diesem Kapitel verschiedene Projektplanungsprobleme betrachtet, für die der maximal mögliche Ressourcenverbrauch festgelegt war. Die Planungsaufgabe lag hierbei also bei der Bestimmung einer Vorgangsabfolge im Rahmen der gegebenen Vorgangsbeziehungen. Im Gegensatz zu diesen Problemen beschäftigt sich ein weiterer Aspekt der Projektplanung mit der Optimierung genau dieser Ressourcengrenzen. Sofern ein gewünschter oder extern vorgegebener Fertigstellungszeitpunkt gegeben ist, wird also sowohl die Reihenfolge der Vorgänge als auch die hierfür notwendige Ressourcenmenge bestimmt (Möhring, 1984, S. 89f.). Solche Planungsprobleme waren zunächst unter dem Namen Resource Availability Cost Problem (RACP) bekannt (Demeulemeester, 1995), später gewann die Bezeichnung Resource Investment Problem (RIP) zunehmend an Bedeutung (Colak und Azizoglu, 2014, S. 777).

An dieser Stelle kann vorweggenommen werden, dass weder das RCPSP noch das RIP dem jeweils anderen Schedulingproblem überlegen oder grundsätzlich vorzuziehen ist. Sie bedienen lediglich verschiedene Anwendungsfälle unterschiedlich genau, so ist beispielsweise für ein Planungsproblem mit wichtigen Fixkostenentscheidungen das RIP generell passend. Trotz dieses breiten Anwendungsspektrums in der Realität wurde das RIP im Vergleich zu anderen Schedulingproblemen verhältnismäßig wenig erforscht. Laut Vanhoucke (2013) könnte dies an der grundsätzlichen Komplexität des RIP liegen (Vanhoucke, 2013, S. 153). Ebenso wie das RCPSP ist auch das RIP den NP-schweren Problemen zuzuordnen (Möhring, 1984, S. 94). Nach dem eingeführten Klassifizierungsschema wird das RIP durch  $PS^\infty | prec, \bar{d} | \sum c_k * \max r_{kt}$  beschrieben. Basierend auf der Argumentation des RCPSPDC ist auch die Zielfunktion des RIP, die Minimierung der Ressourcenkosten, nicht regulär. Durch eine Verschiebung von Vorgängen eines Schedules  $S'$  auf Startzeitpunkte die jeweils mindestens so spät sind wie die eines Schedules  $S$ , kann eine geringere Ressourcenbereitstellung notwendig sein, was den Zielfunktionswert erhöht.

Die Zielfunktion des RIP sowie seine Nebenbedingungen lassen sich allgemein wie folgt formulieren (in Anlehnung an Ranjbar et al., 2008, S. 880 und Vanhoucke, 2013, S. 154):

$$\min \sum_{r \in R} c_r * a_r \quad (4.23)$$

*unter den Nebenbedingungen*

$$s_i + d_i \leq s_j \quad j = 1, \dots, J; i \in P_j \quad (4.24)$$

$$\sum_{j \in S(t)} q_{jr} \leq a_r \quad \forall r \in R; t = 1, \dots, \bar{T} \quad (4.25)$$

$$s_1 = 0 \quad (4.26)$$

$$s_j \leq D \quad (4.27)$$

$$s_j \in \mathbb{Z}_0^+ \quad j = 1, \dots, J \quad (4.28)$$

$$a_r \in \mathbb{Z}_0^+ \quad \forall r \in R \quad (4.29)$$

$c_r$	Kosten je Einheit der Ressource $r$ über den gesamten Projektzeitraum
$a_r$	Entscheidungsvariable für die Anzahl benötigter Einheiten der Ressource $r$ (Kapazität der Ressource $r$ )

Die korrespondierende Formulierung des MI-Programmes des RIP ist untenstehend dargestellt (in Anlehnung an Colak und Azizoglu, 2014, S. 779):

$$\min \sum_{r \in R} c_r * a_r \quad (4.30)$$

*unter den Nebenbedingungen*

$$\sum_{t=1}^{\bar{T}} x_{jt} = 1 \quad j = 1, \dots, J \quad (4.31)$$

$$\sum_{t=1}^{\bar{T}} (t + d_i) * x_{it} \leq \sum_{t=1}^{\bar{T}} t * x_{jt} \quad j = 1, \dots, J; i \in P_j \quad (4.32)$$

$$\sum_{j=1}^J q_{jr} \sum_{\tau=t}^{t+d_j-1} x_{j\tau} \leq a_r \quad \forall r \in R; t = 1, \dots, \bar{T} \quad (4.33)$$

$$\sum_{t=1}^{\bar{T}} t * x_{jt} \leq D \quad (4.34)$$

$$x_{jt} \in \{0, 1\} \quad j = 1, \dots, J; t = 1, \dots, \bar{T} \quad (4.35)$$

$$a_r \in \mathbb{Z}_0^+ \quad \forall r \in R \quad (4.36)$$

Wie an den Zielfunktionen 4.23 und 4.30 zu sehen ist, optimiert das RIP den Projektplan, ebenso wie das RCPSPDC, unter monetären Gesichtspunkten. Gegenüber dem RCPSPDC werden allerdings keine direkt mit den Vorgängen verknüpften Zahlungsströme optimiert, sondern Investitions- beziehungsweise Fixkosten über die gesamte Projektdauer. Diese Kosten setzen sich aus den Investitionskosten für die Bereitstellung einer Einheit der jeweiligen Ressource und der bestimmten Anzahl dieser Ressource zusammen (Vanhoucke, 2013, S. 153f.).

Die Ressourcenmenge  $a_r$  aus der Zielfunktion, die im RCPSP und RCPSPDC als Datenpunkt festgelegt war, ist im RIP eine Entscheidungsvariable und wird durch Nebenbedingung 4.25 beziehungsweise 4.33 gesetzt. Es ist zu erkennen, dass  $a_r$  nicht von einzelnen Zeitschritten abhängig ist, die zu bestimmende Ressourcenmenge gilt somit als Obergrenze über die gesamte Projektdauer. Dies beruht auf dem Ansatz, dass die zu planenden Kosten auf den Kosten der Verfügbarkeit einer zusätzlichen Ressourceneinheit beruhen, unabhängig davon ob die Ressource verwendet wird (Vanhoucke, 2013, S. 154). In anderen Worten beruhen die entscheidungsrelevanten Kosten auf Fixkosten zur Vorhaltung einer spezifischen Ressourcenmenge. Es wird angenommen, dass die variablen Kosten für die Verwendung dieser Ressourcen unabhängig vom Verwendungszeitpunkt und von der Anzahl zur Verfügung stehender Ressourcen sind. Daher sind sie in diesem Modellansatz nicht entscheidungsrelevant und daher nicht vertreten.

Neben der Einführung von  $a_r$  als Entscheidungsvariable stimmen die Nebenbedingungen des RIP bis auf eine Ausnahme mit denen des RCPSP überein. Ähnlich dem RCPSPDC wird im RIP zusätzlich die Nebenbedingung 4.27 beziehungsweise 4.34 zur Einhaltung eines vorgegebenen Fertigstellungsdatums eingeführt. Ohne eine solche Begrenzung könnte eine gleichzeitige Ausführung von Vorgängen umgangen werden, um den Ressourcenverbrauch jeder Ressource  $r$  auf  $\max \{q_{jr}\} \forall j$  zu minimieren.

Analog zu den vorangegangenen Betrachtungen von RCPSP und RCPSPDC soll auch das RIP anhand des bekannten Beispiels veranschaulicht werden. Um die Vergleichbarkeit zu erhalten, soll derselbe Fertigstellungszeitraum von 27 Zeiteinheiten wie bei beim RCPSPDC angewandt werden. Zusätzlich sind für die Ressourcen A und B jeweils Investitionskosten je Einheit festzulegen. Die Bereitstellung einer Einheit von Ressource A kostet 2 Geldeinheiten, die Bereitstellung einer Einheit von Ressource B kostet 1 Geldeinheit. Nach der Lösung des vorgestellten linearen Programms mit CPLEX Version 12.6 kann das Ressourcenverbrauchsmuster in Abbildung 7 gezeigt werden. Im Vergleich zu den Ressourcenverbrauchsmustern des RCPSP und

RCPSPDC wird bei der Betrachtung des RIP klar, dass deutlich weniger Ressourcen zur Durchführung des Projekts notwendig sind. So werden von Ressource A 8 Einheiten und von Ressource B 9 Einheiten benötigt bei einer Dauer von 27 Zeiteinheiten. Das RCPSP benötigt für die Durchführung in 19 Zeiteinheiten hingegen 17 und 14 Einheiten für Ressource A und B respektive. Basierend auf den Kosten von 2 beziehungsweise einer Geldeinheit für die Anschaffung von einer Ressourceneinheit von A und B kostet das Projekt 25 Geldeinheiten. Wird das Ergebnis des RCPSP auf diese Weise ausgedrückt, betragen die Projektkosten 48 Geldeinheiten. Durch die Verwendung des RIP mit vorgegebener Projektdauer können demnach deutlich geringere Projektkosten erreicht werden.

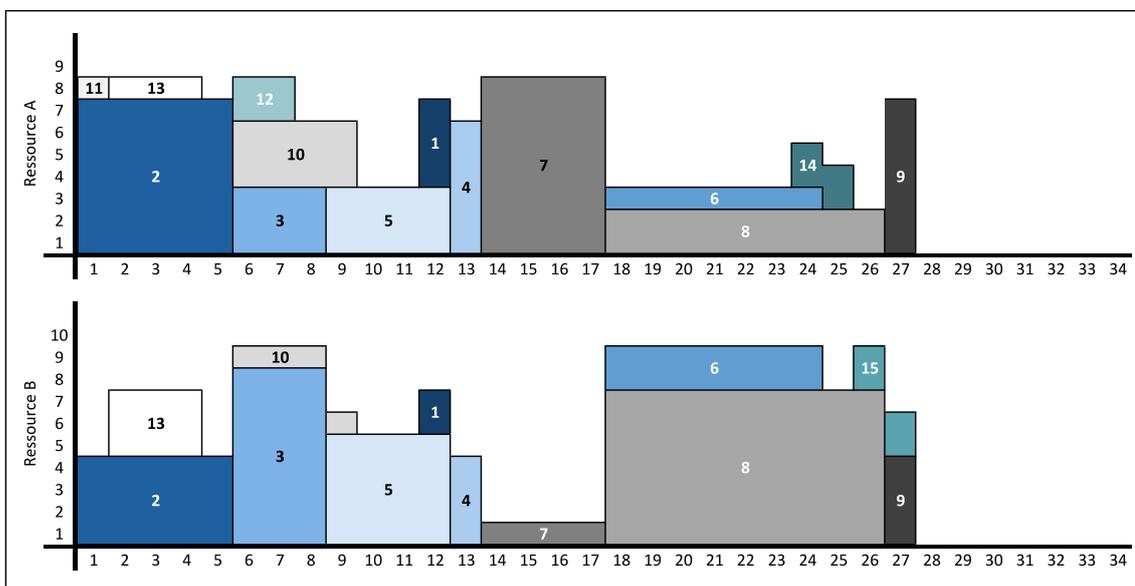


Abbildung 7: Beanspruchung von Ressource A und B für die Durchführung des Beispielprojekts nach Lösung des RIP

## 4.4 Resource Investment Problem with Tardiness Penalty

Das nun betrachtete Resource Investment Problem with Tardiness Penalty entspricht weitestgehend dem RIP, allerdings stellt es eine kleine Erweiterung auf zusätzliche Anwendungsfälle dar. Denn in der Praxis haben Projekte zwar oftmals einen fixen Projektfertigstellungstermin, wie durch das RIP angenommen, eine Überschreitung dieses Termins kann allerdings durchaus eine Entscheidungsmöglichkeit sein. Im RIP wird eine solche Verlängerung der Projektdauer über diesen festgelegten Fertigstellungszeitpunkt generell ausgeschlossen. Das Resource Investment Problem with Tardiness Penalty (RIPT) beziehungsweise Resource Availability Cost Problem with Tardiness Penalty (RACPT) erlaubt hingegen eine Überschreitung des

Fertigstellungstermins gegen festgelegte Strafkosten (Shadrokh und Kianfar, 2007, S. 88). Das Optimierungsziel des RIPT setzt sich demnach aus der Summe der Ressourcenkosten, entsprechend dem RIP, und den anfallenden Strafkosten bei Überschreitung des Fertigstellungstermins zusammen (van Peteghem und Vanhoucke, 2015, S. 340). Analog zur Argumentation aus Kapitel 4.3 ist die Zielfunktion des RIPT, als Erweiterung des RIP, ebenso nicht regulär und das Schedulingproblem den NP-schweren Problemen zuzuordnen (Möhring, 1984).

Die Formulierung des RIPT in allgemeiner Form, klassifiziert als  $PS^\infty | prec, \bar{d} | \sum c_k * \max r_{kt} + p * \max \{0; s_j - D\}$ , ändert sich bei einer Überschreitung des Fertigstellungstermins wie folgt (in Anlehnung an van Peteghem und Vanhoucke, 2015, S. 341):

$$\min \sum_{r \in R} c_r * a_r + p * \max\{0; s_j - D\} \quad (4.37)$$

unter den Nebenbedingungen

$$s_i + d_i \leq s_j \quad j = 1, \dots, J; i \in P_j \quad (4.38)$$

$$\sum_{j \in S(t)} q_{jr} \leq a_r \quad \forall r \in R; t = 1, \dots, \bar{T} \quad (4.39)$$

$$s_1 = 0 \quad (4.40)$$

$$s_j \in \mathbb{Z}_0^+ \quad j = 1, \dots, J \quad (4.41)$$

$$a_r \in \mathbb{Z}_0^+ \quad \forall r \in R \quad (4.42)$$

$p$  Strafkosten für die Überschreitung von  $D$  je Zeiteinheit

Das lineare Programm ändert sich gegenüber dem RIP analog (in Anlehnung an Shadrokh und Kianfar, 2007, S. 89):

$$\min \sum_{r \in R} c_r * a_r + \sum_{t=D+1}^{\bar{T}} p * (x_{jt} * (t - D)) \quad (4.43)$$

unter den Nebenbedingungen

$$\sum_{t=1}^{\bar{T}} x_{jt} = 1 \quad j = 1, \dots, J \quad (4.44)$$

$$\sum_{t=1}^{\bar{T}} (t + d_i) * x_{it} \leq \sum_{t=1}^{\bar{T}} t * x_{jt} \quad j = 1, \dots, J; i \in P_j \quad (4.45)$$

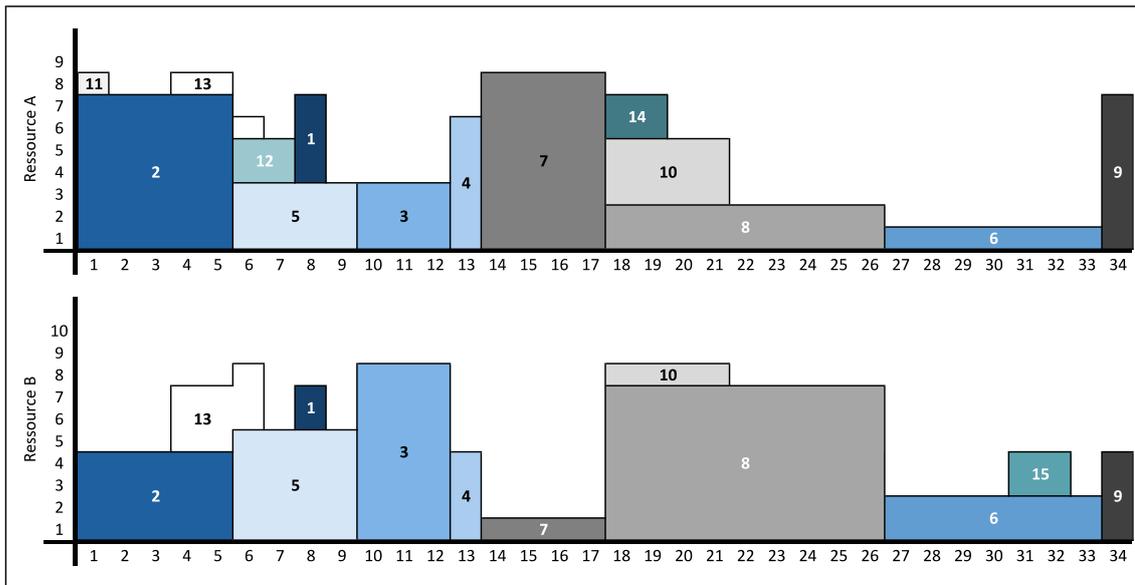
$$\sum_{j=1}^J q_{jr} \sum_{\tau=t}^{t+d_j-1} x_{j\tau} \leq a_r \quad \forall r \in R; t = 1, \dots, \bar{T} \quad (4.46)$$

$$x_{jt} \in \{0, 1\} \quad j = 1, \dots, J; t = 1, \dots, \bar{T} \quad (4.47)$$

$$a_r \in \mathbb{Z}_0^+ \quad \forall r \in R \quad (4.48)$$

Das RIPT entspricht in beiden Formulierungen weitgehend denen des RIP. Die Zielfunktionen 4.23 und 4.30 wurden durch die Addition der Strafkosten erweitert. Die Höhe der Strafkosten  $p$  je überschrittener Zeiteinheit wird ebenso wie der Fertigstellungszeitpunkt  $D$  im Voraus festgelegt. Es lässt sich anmerken, dass durch hinreichend hoch gewählte Strafkosten das Verhalten des RIPT dem des RIP entspräche (van Peteghem und Vanhoucke, 2015, S. 340). Neben den Veränderungen der Zielfunktion wird die Nebenbedingung 4.27 beziehungsweise 4.34 des RIP nicht mehr benötigt. Eine Sicherstellung der Einhaltung der maximalen Projektdauer ist nicht mehr notwendig, die Beschränkung des Zeitraumes wird nun durch die veränderte Zielfunktion impliziert (van Peteghem und Vanhoucke, 2015, S. 340).

Um auch das RIPT anhand des bekannten Beispielprojekts anzuwenden, werden zusätzlich Strafkosten je Zeiteinheit der Überschreitung des Fertigstellungstermins benötigt. Der Fertigstellungstermin wird aus den vorhergehenden Kapiteln mit 27 Zeitschritten übernommen, die Strafkosten sollen 0,1 Geldeinheiten pro Zeitschritt der Überschreitung entsprechen. Nach der Lösung des obigen linearen Programms durch CPLEX Version 12.6 kann das Ressourcenverbrauchsmuster aus Abbildung 8 dargestellt werden.



**Abbildung 8: Beanspruchung von Ressource A und B für die Durchführung des Beispielprojekts nach Lösung des RIPT**

Es ist zu erkennen, dass sich der Ressourcenverbrauch gegenüber dem RIP nochmals verringert hat. Zuvor wurden 8 Einheiten von Ressource A verwendet und 9 Einheiten von Ressource B. Der Projektplan des RIPT benötigt hingegen lediglich jeweils 8 Einheiten von Ressource A und B. Dies entspricht mit  $\max \{q_{jA}\} = \max \{q_{jB}\} = 8, \forall j$  den minimal möglichen Ressourcenmengen. Die Projektdauer verlängert sich allerdings im Gegenzug auf 34 Zeiteinheiten. Die Projektverlängerung um 7 Zeiteinheiten wird aufgrund verhältnismäßig geringer Strafkosten in Kauf genommen. Der Zielfunktionswert, die Projektkosten inklusive der Strafkosten, hat sich dadurch um 0,3 Geldeinheiten gegenüber dem RIP auf 24,7 Geldeinheiten verringert. Daraus resultiert, dass bei der Projektplanung die Überschreitung des festgelegten Projektfertigstellungszeitpunkts, die durch die Anwendung des RIPT erst ermöglicht wird, in manchen Fällen im Hinblick auf Projektkosten sinnvoll sein kann.

## 4.5 Resource Leveling Project Scheduling Problem

Das Resource Leveling Project Scheduling Problem (RLPSP oder RLP) ist den soeben betrachteten Resource Investment Problemen sehr ähnlich. Das Optimierungskriterium bezieht sich, ebenso wie das des RIP, auf den Verbrauch von Ressourcen unter der Einhaltung eines festgelegten Fertigstellungstermins (Vanhoucke, 2013, S. 122f.). Der Unterschied zu allen zuvor betrachteten Problemen liegt darin, dass keines die Verbrauchsmuster der erneuerbaren Ressourcen selbst in die Optimierung miteinbezieht. Bisher wurden sie lediglich aus dem Ergebnis abgelesen und zum anschaulichen Vergleich von verschiedenen Schedules verwendet. Das hat zur Folge,

dass sehr unregelmäßige Verbrauchsmuster entstehen können. Das RLPSP hingegen hat zum Ziel, eine möglichst ausgeglichene Ressourcenverwendung über den Projektverlauf zu planen. Auf diese Weise sollen Spitzenverbräuche und somit Sprünge in der Ressourcenauslastung vermieden werden (Vanhoucke, 2013, S. 122).

Zur besseren Vorstellung der Ziele des RLPSP wird ein Anwendungsbeispiel der Revisionsplanung von Kernkraftwerken herangezogen. Zur Revision wird die Planung der Personalverteilung innerhalb der Gebäudestrukturen aufgrund von Platzmangel mithilfe des RLPSP-Ansatzes durchgeführt. Auf diese Weise kann eine Einhaltung der maximalen Projektdauer, da zusätzliche Opportunitätskosten vermieden werden sollen, sowie eine zuverlässig gleichmäßige Verteilung auf begrenztem Raum gewährleistet werden (Rieck et al., 2012, S. 29). Durch die Lösung eines Schedulingproblems mit dem RLPSP wird eine möglichst ausbalancierte Verwendung von erneuerbaren Ressourcen erreicht. Doch obwohl die Art und Weise der Ressourcenverwendung geplant wird, werden im klassischen RLPSP keine Ressourcenbeschränkungen einbezogen (Vanhoucke, 2013, S. 122f.). Die jeweilige Nebenbedingung kann allerdings mit geringem Aufwand aus den vorangegangenen Schedulingproblemen übernommen werden.

Bezüglich der spezifischen Formulierung der Zielfunktion lässt sich sagen, dass für das RLPSP auf viele verschiedene Messgrößen für einen ausgeglichenen Ressourcenverbrauch zurückgegriffen werden kann (Vanhoucke, 2013, S. 123). In diesem Kapitel liegt der Fokus auf der klassischen Zielfunktion, die die Summe des quadratischen Ressourcenverbrauchs jedes Zeitpunkts über alle Ressourcen minimiert (Demeulemeester, 1995, S. 1591; Rieck und Zimmermann, 2015, S. 362; Rieck et al., 2012, S. 28). Die Quadrierung des Ressourcenbedarfs je Zeiteinheit hat hierbei die Funktion, einzelne Verbrauchsspitzen besonders zu bestrafen. Das sich aus diesen Rahmenbedingungen ergebende RLPSP kann mit Hilfe des eingeführten Klassifizierungsschemas als  $PS^\infty | prec, \bar{d} | \sum c_k \sum r_k^2$  beschrieben werden (Rieck und Zimmermann, 2015, S. 365). Außerdem wird dieses Schedulingproblem der Klasse der NP-schweren Probleme zugeordnet (Rieck und Zimmermann, 2015, S. 362). Ebenso wie bei den Schedulingproblemen der Kapitel 4.2, 4.3 und 4.4 ist die Zielfunktion des klassischen RLPSP nicht regulär (Brucker et al., 1999, S. 22). Als weiterführende Begründung kann das Gegenbeispiel aus Kapitel 4.3 ohne Anpassung angeführt werden.

Dieses RLPSP lässt sich allgemein wie folgt formulieren (in Anlehnung an Brucker et al., 1999, S. 22 und Vanhoucke, 2013, S. 122f.):

$$\min \sum_{r \in R} ct_r \sum_{t=1}^D \left( \sum_{j \in S(t)} q_{jr} \right)^2 \quad (4.49)$$

unter den Nebenbedingungen

$$s_i + d_i \leq s_j \quad j = 1, \dots, J; i \in P_j \quad (4.50)$$

$$s_1 = 0 \quad (4.51)$$

$$s_j \leq D \quad (4.52)$$

$$s_j \in \mathbb{Z}_0^+ \quad j = 1, \dots, J \quad (4.53)$$

$$a_r \in \mathbb{Z}_0^+ \quad \forall r \in R \quad (4.54)$$

$ct_r$  Kosten der erneuerbaren Ressource  $r$  je Zeiteinheit

Diese allgemeine Formulierung ist der Formulierung des RIP in weiten Teilen ähnlich, so sind beispielsweise sämtliche Nebenbedingung auch im RIP wiederzufinden. Lediglich auf die Nebenbedingung zur Festlegung der Entscheidungsvariable  $a_r$  des RIP kann im RLPSP verzichtet werden (Demeulemeester, 1995, S. 1591).

Wie zu Beginn kurz angesprochen, berechnet die Zielfunktion für jede Ressource das Produkt aus den Kosten je Zeitschritt und der Summe der quadrierten Ressourcenverbräuche über alle zu einem Zeitschritt ausgeführten Vorgänge. Der in der Minimierungsfunktion 4.49 dargestellte Term entspricht dem Term des klassischen Resource Leveling Problem. Neben dieser Zielfunktion wird in der Literatur zwei weiteren Minimierungskriterien besondere Aufmerksamkeit gewidmet (Rieck und Zimmermann, 2015, S. 362; Rieck et al., 2012; Vanhoucke, 2013, S. 123). Bei diesen weiteren Zielfunktionen handelt es sich um das sogenannte „Overload“ sowie das sogenannte „Total Adjustment Cost Problem“ (Rieck und Zimmermann, 2015, S. 362). Aus Gründen der Vollständigkeit werden beide Minimierungsansätze kurz vorgestellt.

Das Overload Problem wird durch die folgende Zielfunktion gekennzeichnet (in Anlehnung an (Rieck et al., 2012, S. 364; Vanhoucke, 2013, S. 123):

$$\min \sum_{r \in R} ct_r \sum_{t=1}^D \left( \sum_{j \in S(t)} q_{jr} - Y_r \right)^+ \quad (4.55)$$

$Y_r$  Obergrenze der Ressource  $r$ , für die eine Überschreitung zwar möglich, allerdings mit zusätzlichen Kosten verknüpft ist.

Im Fall des Overload Problems werden bisher nicht integrierte, weiche Ressourcenobergrenzen in die Optimierung miteinbezogen. Das Minimierungsproblem betrifft Kosten, die entstehen wenn eine bestimmte Obergrenze des Ressourcenbedarfs zu einem Zeitschritt überschritten wird. Durch die Funktion  $(a)^+$  werden nur positive Werte für  $a$  beachtet (Rieck und Zimmermann, 2015, S. 362).

Im nächsten Schritt wird die Zielfunktion des Total Adjustment Cost Problem betrachtet (in Anlehnung an Rieck und Zimmermann (2015, S. 364 & 372)):

$$\min \sum_{r \in R} ct_r \sum_{t=1}^D \Delta_{rt}^+ \quad (4.56)$$

$\Delta_{rt}^+$  Positiver Unterschied des Ressourcenverbrauchs von Zeitschritt  $t$  zu Zeitschritt  $t + 1$

Im Gegensatz zu den anderen beiden Problemen wird nicht die absolute Höhe des Ressourcenbedarfs an sich betrachtet, sondern die Kosten der Ressourcenschwankung. Es werden die Kosten für die Erhöhung beziehungsweise Verringerung des Ressourcenverbrauchs minimiert (Rieck und Zimmermann, 2015, S. 362). Wie auch die klassische Zielfunktion, gehören beide soeben betrachteten zusätzlichen Zielfunktionen zu der Klasse der NP-schweren Probleme (Rieck und Zimmermann, 2015, S. 365).

Im Rahmen der Einführung verschiedener Grundmodelle des Projektschedulings wird das Hauptaugenmerk an dieser Stelle allerdings weiter auf der klassischen Zielfunktion liegen. Das gemischt-ganzzahlige Programm lässt sich für die klassische Zielfunktion wie folgt formulieren (in Anlehnung an Rieck et al. (2012, S. 30)):

$$\min \sum_{r \in R} ct_r \sum_{t=1}^D (z_{rt})^2 \quad (4.57)$$

*unter den Nebenbedingungen*

$$\sum_{t=1}^{\bar{T}} x_{jt} = 1 \quad j = 1, \dots, J \quad (4.58)$$

$$\sum_{t=1}^{\bar{T}} (t + d_i) * x_{it} \leq \sum_{t=1}^{\bar{T}} t * x_{jt} \quad j = 1, \dots, J; i \in P_j \quad (4.59)$$

$$\sum_{j=1}^J q_{jr} \sum_{\tau=t}^{t+d_j-1} x_{j\tau} \leq z_{rt} \quad \forall r \in R; t = 1, \dots, \bar{T} \quad (4.60)$$

$$\sum_{t=1}^{\bar{T}} t * x_{jt} \leq D \quad (4.61)$$

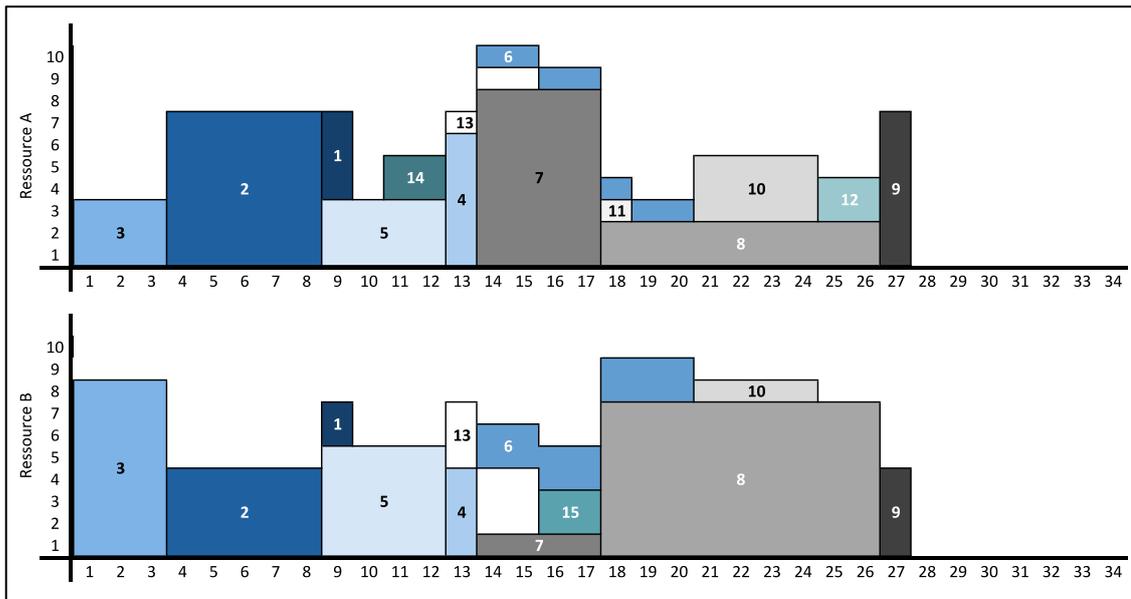
$$x_{jt} \in \{0, 1\} \quad j = 1, \dots, J; t = 1, \dots, \bar{T} \quad (4.62)$$

$$z_{rt} \in \mathbb{Z}_0^+ \quad \forall r \in R; t = 1, \dots, \bar{T} \quad (4.63)$$

$z_{rt}$  Ressourcenbedarf der erneuerbaren Ressource  $r$  zum Zeitpunkt  $t$

Im Vergleich zur allgemeinen Formulierung fällt auf, dass eine zusätzliche Nebenbedingung sowie eine zusätzliche Entscheidungsvariable eingeführt wurden. Die Nebenbedingung 4.60 erinnert an die Bedingung 4.33 des RIP, in der die Ressourcenmenge  $a_r$  über den gesamten Projektzeitraum festgelegt wird. Im RLPSP ist jedoch anstatt der benötigten Ressourcenmenge über den gesamten Projekthorizont der Ressourcenverbrauch pro Zeitschritt erforderlich. Diese Größe wird in der zusätzlichen Entscheidungsvariable  $z_{rt}$  mit Nebenbedingung 4.60 gemessen (Demeulemeester, 1995, S. 1591). Die weiteren Nebenbedingungen entsprechen der allgemeinen Formulierung ähnlich der vorangegangenen Problembetrachtungen und bestimmen die Einhaltung der Vorgangsbeziehungen sowie die Einhaltung des Projektfertigstellungstermins.

Auch dieses gemischt-ganzzahlige Programm wird im folgenden Abschnitt auf das Beispielprojekt angewandt. Die hierfür notwendige maximale Projektdauer von 27 Zeiteinheiten wird aus den vorhergehenden Kapiteln übernommen. Zusätzlich sind für das RLPSP Kosten für die Verwendung der erneuerbaren Ressource pro Zeiteinheit  $ct_r$  festzulegen. Diese entsprechen 0,1 Geldeinheiten pro Zeitschritt für Ressource A und 0,1 Geldeinheiten für Ressource B. Auf diese Weise ist die Gewichtung der Verbrauchsmuster der jeweiligen Ressourcen in der Zielfunktion 4.57 gleich. Nach einer Lösung mit CPLEX Version 12.6 ergeben sich die balancierten Verbrauchsmuster der Abbildung 9.



**Abbildung 9: Beanspruchung von Ressource A und B für die Durchführung des Beispielprojekts nach Lösung des RLPSP**

Der Fokus bei der Betrachtung der Verbrauchsmuster des RLPSP liegt weniger auf dem absoluten Zielfunktionswert oder der absoluten Ressourcenverbrauchsmengen, sondern auf der Reihenfolge und Verteilung der Vorgänge innerhalb des Projektes. Im direkten Vergleich zum Verbrauchsmuster der Ressource B des RIP aus Abbildung 7 wird der Ausgleich der geringen Ressourcennutzung während Vorgang 7 zwischen Zeitschritt 14 bis 17 deutlich. Der Schedule des RLPSP balanciert diese geringe Auslastung mit den Vorgängen 6, 13 und 15 aus.

Abschließend wird auf eine weitere, nicht zu vernachlässigende Eigenschaft des hier vorgestellten RLPSP hingewiesen. Obwohl das hier vorgestellte gemischt-ganzzahlige Programm, wie anhand des Beispiels gezeigt, von modernen Solvern gelöst werden kann, wird die Komplexität dieser Formulierung deutlich. Bereits bei der Ausführung des einfachen Projektbeispiels mit 15 Vorgängen und 2 Ressourcen durch CPLEX Version 12.6 auf einem Intel Core 2 Duo 2,4 GHz PC mit 8GB DDR3 RAM beträgt die Laufzeit zuverlässig circa eine Minute. Zum Vergleich liegen die Laufzeiten zur Lösung eines RCPSP, RCPSPDC, RIP und RIPT basierend auf demselben Datensatz jeweils unter 5 Sekunden.

Dieses Verhalten ist auf die Anwendungen von nichtlinearen Optimierungsverfahren zurückzuführen. Da die Zielfunktion 4.57 des RLPSP nicht linear ist, können viele effiziente Algorithmen, die den MIP-Solvern zur Verfügung stehen, nicht genutzt werden (Rieck und Zimmermann, 2015, S. 373ff.; Rieck et al., 2012, S. 31). Um diesen Umstand zu umgehen, werden in der Literatur allerdings Umformungen des Problems

vorgestellt, die eine lineare Zielfunktion sowie lineare Nebenbedingungen bereitstellen. Dies gilt, neben der klassischen Zielfunktion, auch für die Zielfunktion des Overload Problems. Die Zielfunktion des Total Adjustment Cost Problem ist hingegen bereits linear, stellt allerdings aufgrund der Unstetigkeit und schwachen LP-Relaxationen trotzdem Schwierigkeiten für Solver dar (Rieck und Zimmermann, 2015, S. 375f.; Rieck et al., 2012, S. 31). Weiterführende Erläuterungen zu spezifischen Linearisierungsmethoden und den resultierenden linearen Programmen zu den drei vorgestellten Versionen des RLPSP können in Rieck und Zimmermann (2015) sowie Rieck et al. (2012) gefunden werden.

### 4.6 Erweiterungen der Schedulingprobleme

In diesem Kapitel werden zwei verbreitete Erweiterungen vorgestellt, die auf eine Vielzahl von allgemeinen Schedulingproblemen angewendet werden können. Insbesondere sind diese Erweiterungen in die vorgestellten Schedulingprobleme aus den vorangegangenen Abschnitten integrierbar. Zunächst wird auf die Beschreibung von verschiedenen Ausführungsvarianten der Vorgänge eingegangen. Anschließend auf eine allgemeinere Darstellung von Vorgangsbeziehungen. In den bisher betrachteten Schedulingproblemen wurde implizit nur ein spezifischer Typ von Vorgangsbeziehungen behandelt. Die spezifischen Eigenschaften der Erweiterungen eines Schedulingproblems sollen im Folgenden anhand des klassischen RCPSP erläutert werden. Das RCPSP wurde ausgewählt, da erstens dessen Grundlagen in dieser Arbeit bereits ausführlich betrachtet wurden und zweitens das RCPSP das in der Literatur am weitest verbreitete Schedulingproblem darstellt (Gu et al., 2015, S. 300).

#### 4.6.1 DER MULTI-MODE SCHEDULINGFALL

Eine verbreitete Erweiterung, welche die vorgestellten Schedulingprobleme um einen zusätzlichen Freiheitsgrad ergänzt, stellt die Integration von multi-mode Entscheidungen dar. Durch den Einbezug dieser zusätzlichen Entscheidung wird es möglich, einzelne Vorgänge auf verschiedene Art und Weise auszuführen. Im Kontext dieser Arbeit sind Anwendungsbeispiele besonders bei der Durchführung von Vorgängen mit unterschiedlichen Technologien zu finden (ein konkretes Beispiel ist in Kapitel 2 zu finden). Wie einleitend erwähnt, wird im Folgenden der multi-mode Schedulingfall anhand des RCPSP dargestellt. Eine Sammlung von Anwendungen des multi-mode Falls auf andere Schedulingprobleme und alternative Zielfunktionen können in Mika et al. (2015, S. 478ff.) gefunden werden. Das RCPSP mit verschiedenen Ausführungsvarianten für einzelne Vorgänge wird als Multi-mode

Resource Constrained Project Scheduling Problem (MRCPSP) bezeichnet. Es handelt sich um eine Verallgemeinerung des RCPSP, das hauptsächlich durch zwei Unterschiede gekennzeichnet wird (Mika et al., 2015, S. 445).

Zunächst wird für jeden Vorgang neben seiner Startzeit auch über dessen Ausführungsmodus entschieden. Als Ausführungsmodus wird eine Kombination aus Vorgangsdauer und Ressourcenverbrauch definiert. So können zwischen verschiedenen Ausführungsmodi die Vorgangsdauer, die Art sowie die Anzahl der verwendeten Ressourcen in beliebigen Kombinationen variieren (Mika et al., 2015, S. 445f.). Diese Attribute der Vorgangsdaten waren in den bisherigen Schedulingproblemen festgelegt und konnten während des Planungsverfahrens nicht beeinflusst werden. Aus dem Ressourcenverbrauch und der Vorgangsdauer kann in vielen Fällen die Arbeitsleistung eines Vorgangs errechnet werden, beispielsweise in Mann-Tagen oder zu transportierenden Volumen. Durch die Möglichkeit alternativer Ausführungsvarianten kann diese Arbeitsleistung durch verschiedene Kombinationen dargestellt werden (Vanhoucke, 2013, S. 135). So kann beispielsweise ein Transportvorgang für ein festgelegtes Volumen von Material durch die Verwendung einer variierenden Anzahl von Lastwagen mit verschiedenen Vorgangsdauern fertiggestellt werden.

Der zweite Unterschied betrifft die Entscheidungsrelevanz von nicht-erneuerbaren und doppelt beschränkten Ressourcen. Allerdings genügt in diesem Fall die Betrachtung der nicht-erneuerbaren Ressourcen, da doppelt beschränkte Ressourcen, wie in Kapitel 3.4 erwähnt, durch erneuerbare und nicht-erneuerbare Ressourcen ersetzt werden können (Mika et al., 2005, S. 640). Der Verbrauch von nicht-erneuerbaren Ressourcen wird durch die zusätzliche Auswahl von Ausführungsmodi relevant für das Schedulingverfahren, da in unterschiedlichen Modi verschiedene Ressourcenverbräuche auftreten können. Zuvor war eine Betrachtung von nicht-erneuerbaren Ressourcen nicht notwendig, da durch die Schedulingentscheidung, zu welchem Zeitpunkt ein Vorgang ausgeführt wird, der Verbrauch von nicht-erneuerbaren Ressourcen nicht beeinflusst werden konnte. Dies liegt daran, dass sich die Kapazität dieser Ressourcen über den gesamten Projekthorizont erstreckt und zwischenzeitlich nicht erneuert wird.

Dieses MRCPSP lässt sich ebenso wie die Grundformen der Schedulingprobleme mit Hilfe des Klassifizierungsschemas aus Kapitel 3.2 darstellen. Analog zum RCPSP  $PS | prec | C_{max}$  wird das MRCPSP durch  $MPS | prec | C_{max}$  beschrieben (Mika et al., 2015, S. 445). Wie das RCPSPDC, ist auch das MRCPSP als Verallgemeinerung des RCPSP den NP-schweren Problemen zuzuordnen (Mika et al., 2005, S. 640).

Nachfolgend wird die MIP-Formulierung des betrachteten MRCPSP dargestellt. Aufgrund der geringen Unterschiede zum RCPSP und der Relevanz des MI-Programms im anwendungsbezogenen Kontext dieser Arbeit wird an dieser Stelle auf die allgemeine Formulierung verzichtet. Das gemischt-ganzzahlige Programm lässt sich wie folgt formulieren (in Anlehnung an Coelho und Vanhoucke, 2015, S. 493):

$$\min \sum_{t=ES_j}^{LS_j} t * x_{j1t} \quad (4.64)$$

unter den Nebenbedingungen

$$\sum_{m=1}^{M_j} \sum_{t=ES_j}^{LS_j} x_{jmt} = 1 \quad j = 1, \dots, J \quad (4.65)$$

$$\sum_{m=1}^{M_i} \sum_{t=ES_i}^{LS_i} (t + d_{im}) * x_{imt} \leq \sum_{m=1}^{M_j} \sum_{t=ES_j}^{LS_j} t * x_{jmt} \quad j = 1, \dots, J; i \in P_j \quad (4.66)$$

$$\sum_{j=1}^J \sum_{m=1}^{M_j} q_{jrm} \sum_{\tau=\max\{t-d_{jm}; ES_j\}}^{\min\{t-1; LS_j\}} x_{jmt} \leq Q_r \quad \forall r \in R; t = 1, \dots, \bar{T} \quad (4.67)$$

$$\sum_{j=1}^J \sum_{m=1}^{M_j} k_{jrm} \sum_{t=ES_j}^{LS_j} x_{jmt} \leq Q_r \quad \forall r \in R^n \quad (4.68)$$

$$x_{jmt} \in \{0, 1\} \quad \begin{array}{l} j = 1, \dots, J; \\ m = 1, \dots, M_j; \\ t = 1, \dots, \bar{T} \end{array} \quad (4.69)$$

$m$	Ausführungsvariante (mode) eines Vorgangs aus der Menge $M_j$ aller möglichen Modes für Vorgang $j$
$M_j$	Anzahl der verschiedenen möglichen Ausführungsvarianten (modes) für Vorgang $j$
$ES_j$	Frühestmöglicher Startzeitpunkt von Vorgang $j$
$LS_j$	Spätestmöglicher Startzeitpunkt von Vorgang $j$
$x_{jmt}$	Binäre Entscheidungsvariable: 1 falls Vorgang $j$ in Mode $m$ zum Zeitpunkt $t$ begonnen wird, 0 sonst
$d_{jm}$	Vorgangsdauer des Vorgangs $j$ in Mode $m$
$q_{jrm}$	Ressourceninanspruchnahme einer erneuerbaren Ressource $r \in R$ je Zeitintervall $t$ durch Vorgang $j$ in Mode $m$



Abhängigkeiten lassen sich durch drei Attribute auf weitere Arten von Vorgangsbeziehungen erweitern (Vanhoucke, 2013, S. 18ff.):

- **Verschiedene Vorrangtypen** können neben der Ende-Start Beziehung, bei der ein nachfolgender Vorgang erst nach Ende des Vorgängers begonnen werden kann, ausgewählt werden. Die zusätzlichen Möglichkeiten umfassen Start-Start, der nachfolgende Vorgang darf bereits nach dem Beginn des Vorgängers gestartet werden; Ende-Ende, der nachfolgende Vorgang kann erst abgeschlossen werden, wenn der Vorgänger beendet wurde; sowie Start-Ende Beziehungen, hierbei darf der nachfolgende Vorgang erst abgeschlossen werden, wenn der Vorgänger gestartet wurde.
- **Zeitliche Verzögerungen (time-lags)** zwischen zwei Vorgängen können eingeführt werden. Im Fall der bisherigen Ende-Start Beziehung konnten Vorgänge direkt nach Fertigstellung deren Vorgänger oder später ausgeführt werden. Dies stellt eine Ende-Start Beziehung mit minimaler zeitlicher Verzögerung von 0 dar. Alternativ können im Fall der GPR gewünschte Zeitspannen definiert werden, die zwischen den Vorgängen liegen können oder müssen.
- **Sowohl minimale als auch maximale Verzögerungen** können bei der Einführung von Verzögerungszeitspannen festgelegt werden. Bei einer minimalen Verzögerung zwischen zwei Vorgängen mit Ende-Start Beziehung kann der nachfolgende Vorgang frühestens nach dem Ende des Vorgängers und nach dem Ablauf der Verzögerung gestartet werden. Im Fall einer maximalen Verzögerung darf der Start des nachfolgenden Vorgangs den Endzeitpunkt des ersten Vorgangs plus die Verzögerungszeitspanne nicht überschreiten.

Bei der Betrachtung und Modifikation dieser Vorgangsbeziehungen bleibt zu beachten, dass für die jeweiligen Vorgänge kein konkreter Zeitpunkt oder zeitlicher Bereich der Ausführung festgelegt wird. Die Beschränkungen ergeben sich indirekt aus der Gesamtheit der Vorgangsbeziehungen (Vanhoucke, 2013, S. 18f.). Um eine einheitliche Darstellung zu ermöglichen und die Modellierung von GPR zu vereinfachen, können die Beziehungen in standardisierter Form nach Bartusch et. al (1988) ausgedrückt werden (Bartusch et al., 1988, S. 205; Bianco und Caramia, 2015, S. 78). Dazu werden die jeweiligen Verzögerungszeitspannen, beispielsweise durch Subtrahieren der Vorgangsdauer des Vorgängers im Fall einer Ende-Start Beziehung, in Start-Start Beziehungen umgeformt. Außerdem werden die Verzögerungen zunächst

als minimaler Verzögerungstyp dargestellt. Durch die Definition<sup>22</sup> einer maximalen Verzögerung  $l_{ij}^{max}$  zwischen den Vorgängen  $i$  und  $j$  als  $l_{ij}^{max} := -l_{ij}^{min} \geq 0$  können maximale Verzögerungen durch negative minimale Verzögerungen ersetzt werden, die korrespondierende Ungleichung entspricht nun  $S_i - S_j \leq l_{ij}^{max}$ . Eine Umwandlung von minimalen zu maximalen Verzögerungsforderungen ist somit in einer MIP-Formulierung lediglich durch Negierung der GPR-Nebenbedingung möglich (Neumann et al., 2002, S. 4). Für eine ausführliche beispielhafte Darstellung eines Activity-On-Node Netzplans unter Verwendung von GPR kann auf Neumann et al. (2002, S. 9) zurückgegriffen werden.

Die Erweiterung durch allgemeine Vorgangsbeziehungen lässt sich ebenfalls auf das aus vorherigen Kapiteln bekannte RCPSP anwenden. Eine Klassifizierung nach Kapitel 3.2 entspricht nun  $PS | temp | C_{max}$ , durch die Erweiterung veränderte sich lediglich der  $\beta$ -Wert. Auf Basis des vorgestellten Standardisierungsverfahrens der GPR nach Bartusch et al. (1988) lässt sich auch für diese Erweiterung des RCPSP ein anwendungsnahes, gemischt-ganzzahliges Programm formulieren (abgeleitet von Neumann et al., 2002, S. 24):

$$\min \sum_{t=1}^{\bar{T}} t * x_{jt} \quad (4.70)$$

unter den Nebenbedingungen

$$\sum_{t=1}^{\bar{T}} x_{jt} = 1 \quad j = 1, \dots, J \quad (4.71)$$

$$\sum_{t=1}^{\bar{T}} (t + l_{ji}) * x_{it} \leq \sum_{t=1}^{\bar{T}} t * x_{jt} \quad j = 1, \dots, J; i \in G_j \quad (4.72)$$

$$\sum_{j=1}^J q_{jr} \sum_{\tau=t}^{t+d_j-1} x_{j\tau} \leq Q_r \quad \forall r \in R; t = 1, \dots, \bar{T} \quad (4.73)$$

$$x_{jt} \in \{0, 1\} \quad j = 1, \dots, J; t = 1, \dots, \bar{T} \quad (4.74)$$

$G_j$  Menge der direkten Vorgänger von Vorgang  $j$  mit GPR  
 $l_{ij}$  Minimale zeitliche Verzögerung zwischen dem Startzeitpunkt von Vorgang  $i$  und dem Startzeitpunkt von Vorgang  $j$

<sup>22</sup> Eine ausführliche Definition kann in Neumann et al. (2002, S. 2) gefunden werden.

Beim Vergleich der MIP des RCPSP und RCPSP mit GPR wird deutlich, dass die Standardisierung der Vorgangsbeziehungen durch minimale Verzögerungen auf Basis von Start-Start Beziehungen bereits in ähnlicher Form in der ursprünglichen Formulierung in Kapitel 4.1 enthalten war. Sowohl im MIP als auch in der allgemeinen Formulierung muss lediglich die Dauer  $d_i$  durch die minimale Verzögerung  $l_{ij}$  in der jeweils zweiten Nebenbedingung ersetzt werden. Dies liegt daran, dass eine Ende-Start Beziehung mit minimaler Verzögerung von 0 Zeiteinheiten, wie im RCPSP aus Kapitel 4.1 vorhanden, einer Start-Start Beziehung mit minimaler Verzögerung der Dauer des Vorgängers  $d_i$  entspricht.

Durch die vorgestellten Möglichkeiten im Bereich der Beschreibung von Vorgangsbeziehungen kann zweifelsohne ein breiteres Spektrum von Anwendungsfällen ohne zusätzliche Einschränkungen abgedeckt werden. Ebenso wie die Erweiterung auf den multi-mode Fall, birgt eine Erweiterung eines Schedulingproblems durch GPR allerdings auch eine hinzukommende Komplexitätssteigerung (Elmaghraby und Kamburowski, 1992, S. 1245). Generell ist, durch die Zugehörigkeit des RCPSP zur Klasse der NP-schweren Probleme, die Verallgemeinerung mit GPR ebenfalls den NP-schweren Problemen zuzuordnen (Bartusch et al., 1988, S. 203ff.).

# 5 Modell zur Berechnung eines kostenoptimierten Rückbauplans

In diesem Kapitel wird ein Modell zur Berechnung eines kostenoptimierten Rückbauplans aufgestellt. Hierzu wird zunächst eine Auswahl unter den in Kapitel 4 vorgestellten Schedulingproblemen getroffen (Kapitel 5.1). Die Wahl basiert darauf, dass möglichst viele Anforderungen aus Kapitel 2 erfüllt werden. Im Anschluss wird das gewählte Schedulingmodell erweitert (Kapitel 5.2) und in Kapitel 5.3 vollständig vorgestellt. Weiterentwicklungsmöglichkeiten werden in Kapitel 5.4 aufgezeigt.

## 5.1 Auswahl eines allgemeinen Schedulingproblems

Die bis hierher eingeführten allgemeinen Schedulingprobleme umschließen das RCPSP und das RCPSPDC, das RIP und das RIPT sowie das RLPSP. Wie in Kapitel 4 ausführlich dargestellt, unterscheiden sie sich auf der einen Seite hauptsächlich in ihren Optimierungskriterien und Entscheidungsvariablen sowie auf der anderen Seite in ihren Beschränkungen. Um die direkte Gegenüberstellung zu vereinfachen, werden die

Kernaspekte nochmals zusammengefasst. Die Entscheidung für ein Grundproblem soll anhand der Tabelle 3 erleichtert werden.

Tabelle 3: Gegenüberstellung der allgemeinen Schedulingprobleme

Abkürzung	Name	Klassifizierung	Optimierungskriterium	Entscheidungsvariablen	Beschränkungen
RCPSP	Resource Constraint Project Scheduling Problem	$PS \mid prec \mid C_{max}$	Minimale Projektdauer	Schedule (Startzeitpunkte der Vorgänge)	Ressourcenkapazität, Vorgangsbeziehungen
RCPSPDC	RCPSP with Discounted Cashflows	$PS \mid prec, \bar{d} \mid - \sum c_i^F \beta^{c_i}$	Minimale diskontierte Projektkosten (direkte Vorgangskosten)	Schedule (Startzeitpunkte der Vorgänge)	Ressourcenkapazität, Vorgangsbeziehungen, Fertigstellungszeitpunkt (Deadline)
RIP	Resource Investment Problem	$PS_{\infty} \mid prec, \bar{d} \mid \sum c_k * \max r_{kt}$	Minimale Projektkosten (Ressourcenkosten)	Schedule (Startzeitpunkte der Vorgänge), Ressourcenkapazität	Fertigstellungszeitpunkt (Deadline), Vorgangsbeziehungen
RIPT	RIP with Tardiness Penalty	$PS_{\infty} \mid prec, \bar{d} \mid \sum c_k * \max r_{kt} + p * \max\{0; s_j - D\}$	Minimale Projektkosten (Ressourcenkosten und Kosten für Überschreitung geg. Deadline)	Schedule (Startzeitpunkte der Vorgänge), Ressourcenkapazität	Fertigstellungszeitpunkt (Deadline), Vorgangsbeziehungen
RLPSP	Resource Leveling Project Scheduling Problem	$PS_{\infty} \mid prec, \bar{d} \mid \sum c_k \sum r_k^2$	Ausgeglichene Ressourcenverwendung	Schedule (Startzeitpunkte der Vorgänge), Ressourcenbedarf je Zeitpunkt	Fertigstellungszeitpunkt (Deadline), Vorgangsbeziehungen

Die Darstellung zeigt die Unterschiede zwischen den einzelnen Schedulingproblemen deutlich. So unterscheiden sich alle Probleme im Optimierungskriterium. Das RCPSP minimiert die Projektdauer, das RIP, RIPT und RCPSPDC die Projektkosten, wenn auch auf verschiedene Weise, und das RLPSP sorgt für eine ausgeglichene Ressourcennutzung. Die Unterschiede der Entscheidungsvariablen sind in der Ressourcenbeschränktheit des RCPSP und RCPSPDC, die lediglich den Schedule zum Ergebnis haben, gegenüber den übrigen Problemen zu finden. In Bezug auf die verschiedenen Beschränkungen der Schedulingprobleme sind das RIP, RIPT und RLPSP anstatt von Ressourcenkapazitäten durch einen festgelegten Fertigstellungszeitpunkt beschränkt.

Auf dieser Basis wird die Entscheidung für und wider die einzelnen Probleme getroffen. Es stellt sich hier die Frage, welche Komponenten des Anwendungsfalls als fix und welche als veränderbare Entscheidungsvariablen zu betrachten sind. Daraus ergeben sich die folgenden zwei Fragen:

**Was soll entschieden werden?** Hinterfragt wird, welches Ziel die Optimierung verfolgt. Also nach welchen Kriterien die Entscheidungsvariablen belegt werden.

**Was kann entschieden werden?** Es wird festgelegt, welche Elemente der Ausgangssituation variabel sind und welche Aspekte bereits zum Planungszeitpunkt als gegeben angenommen werden müssen. Daraus ergeben sich die Schranken und Entscheidungsvariablen.

Im Kontext des kerntechnischen Rückbaus wurden im Anforderungskapitel die folgenden Punkte dargestellt. Auf diese Aspekte sind die soeben aufgeführten Fragen anzuwenden. Sie stellen demnach die Grundlage für eine Problemauswahl dar:

- Planungsziel
- Zeitliche Abhängigkeiten der Arbeitsschritte
- Notwendige Ressourcen

Das Planungsziel beschreibt den Zweck, der durch die Optimierung des Schedulingproblems erfüllt werden soll und beantwortet die erste Frage. Laut den Anforderungen aus Kapitel 2 sind beim Rückbau von kerntechnischen Anlagen die Gesamtkosten zu minimieren. Der Fokus liegt demnach auf dem Kostenrahmen und nicht auf der Fertigstellungszeit. Zu entscheiden ist hierbei zunächst die Ausführungsreihenfolge der Vorgänge, um dieses Ziel zu erreichen.

Zeitliche Abhängigkeiten stellen einen Sonderfall dar. Sie tragen zwar auch zu den Rahmenbedingungen des Schedulingproblems bei, sind aber für diese Auswahl nicht

entscheidungsrelevant. Sie werden bei allen betrachteten Problemen auf dieselbe Art abgebildet und eine Erweiterung durch verallgemeinerte Vorgangsbeziehungen kann, sofern benötigt, auf alle Probleme angewandt werden.

Die Betrachtung der notwendigen Ressourcen im kerntechnischen Rückbau ist für die Adressierung der zweiten Frage entscheidend. Somit kann beantwortet werden, welche Ressourcen vorgegeben beziehungsweise beschränkt sind. Dies ist notwendig, denn falls Ressourcenmengen noch nicht vorgegeben sind, kann zusätzlich eine Optimierung deren Kapazitäten in Betracht gezogen werden.

Im Falle des kerntechnischen Rückbaus stellt sich diese Möglichkeit als besonders interessant heraus. Die Abläufe eines Rückbauprojekts bauen nicht auf den bisherigen Betriebsabläufen eines Kernkraftwerks auf und stellen nicht dieselben Anforderungen an die Betriebsmittel. Somit muss eine Vielzahl von Ressourcen ohnehin neu angeschafft werden, deren Kapazitäten durch die Optimierung festgelegt werden können. Beispielsweise können hier mehrfach anzuschaffende Maschinen genannt werden. Außerdem legt die Langfristigkeit eines solchen Rückbauprojekts nahe, selbst begrenzt vorhandene Ressourcenkapazitäten vor dem Hintergrund eines möglichst kostengünstigen Projektverlaufs zu hinterfragen.

Auf Basis dieser Überlegungen wird also ein Problem benötigt, das eine Minimierung der Projektkosten zum Ziel hat und den Einsatz der Ressourcen in Bezug auf dieses Ziel optimiert. Aus der Gegenüberstellung von Tabelle 3 bleiben somit nur das RIP und das RIPT übrig.

Bei genauerer Betrachtung fällt allerdings auf, dass ohne Ressourcenbeschränkung eine zeitliche Beschränkung durch einen Fertigstellungszeitpunkt gefordert ist. Dieser Fertigstellungszeitpunkt kann entweder ein fix vereinbartes Datum sein oder ein vorläufig geplanter Zeitpunkt, der unter Strafkosten überschritten werden kann. Keine der beiden Möglichkeiten trifft uneingeschränkt auf den kerntechnischen Rückbau zu. Es ist weder ein fixer Fertigstellungszeitpunkt vorgeschrieben, noch werden ab einem gewissen Zeitpunkt generelle Strafzahlungen fällig. Der Anwendungsfall des kerntechnischen Rückbaus besitzt allerdings eine spezifische Kostenart, die eine starke Verzögerung von Vorgängen in die Zukunft aus Kostengründen beschränken kann. Diese Restbetriebskosten (vgl. Kapitel 2) eines Kernkraftwerks fallen für jede Zeiteinheit an, in der die Anlage noch nicht vollständig zurückgebaut ist. Ihr Fixkostencharakter kann für einen Spezialfall des RIPT genutzt werden. Der geplante Fertigstellungszeitpunkt des allgemeinen RIPT wird mit dem Zeitpunkt des Projektbeginns belegt und die Verzögerungsstrafkosten mit denen des Restbetriebs.

Auf diese Weise werden die Restbetriebskosten ab Zeitpunkt 0 fällig und stellen die Fixkosten des Projekts dar. Für diese Anwendung wird also das RIPT ohne konkreten Fertigstellungszeitpunkt unter Einbezug der Restbetriebskosten modelliert.

### 5.2 Erweiterungen des allgemeinen Schedulingproblems

In den folgenden Abschnitten wird schrittweise zunächst auf die in Kapitel 4.6 vorgestellten und anschließend auf selbst erstellte Erweiterungen eingegangen. Es wird deren Notwendigkeit und Eignung für den betrachteten Anwendungsfall untersucht, um eine Entscheidung bezüglich deren Integration in das ausgewählte Schedulingproblem zu treffen.

Im ersten Schritt wird nun die Erweiterung durch den multi-mode Schedulingfall betrachtet. Zusammenfassend können durch diese Erweiterung die einzelnen Vorgänge auf verschiedene Art und Weise ausgeführt werden. Hierbei sind, zwischen den Modi, unterschiedliche Vorgangsdauern in Verbindung mit unterschiedlichen Ressourcenverbräuchen abbildbar. Bei einem Rückbauprojekt eines Kernkraftwerks sind ähnliche Entscheidungsmöglichkeiten zwischen verschiedenen Durchführungsarten durchaus gegeben. Beispiele für verschiedene Ausführungsvarianten einzelner Vorgänge können in der Anforderungsdefinition in Kapitel 2 gefunden werden. Durch die Auswahl von anderen Ausführungsvarianten können Vorgänge beispielsweise beschleunigt, es können deren Kosten verringert oder alternative Ressourcen verwendet werden. Diese Wahlmöglichkeiten können somit das Optimierungskriterium ebenfalls beeinflussen. Im Schedulingmodell entspricht jede mögliche Ausführungsart einem, wie in Kapitel 4.6.1 eingeführten, Modus. Auf diese Weise könnte Modus 1 zum Beispiel die Durchführung eines Vorgangs ausschließlich mit Eigenpersonal repräsentieren, Modus 2 mit Fremdpersonal und Modus 3 mit einem Mix aus beiden Möglichkeiten. Da die beschriebenen Eigenschaften des Anwendungsfalls durch die Erweiterung des Schedulingproblems um den multi-mode Fall sehr gut darstellbar sind, wird das RIPT im weiteren Verlauf dieser Arbeit auf mehrere Modi ausgeweitet. Der hierdurch entstehende Komplexitätszuwachs des Problems wird aus Gründen der realitätsnahen Projektmodellierung in Kauf genommen. Im Folgenden wird daher von einem Multi-Mode Resource Investment Problem with Tardiness Penalty (MRIPT) gesprochen.

Zusätzlich zum multi-mode Schedulingfall können verallgemeinerte Vorgangsbeziehungen in das MRIPT integriert werden. Durch die Erweiterung mit

allgemeinen Vorgangsbeziehungen können verschiedene Vorrangtypen<sup>23</sup> sowie minimale oder maximale zeitliche Verzögerungen verwendet werden. Ebenso wie im Fall des multi-mode Scheduling bringt eine Erweiterung des Schedulingproblems wiederum eine Komplexitätssteigerung mit sich. Dies wirkt sich auf die Lösbarkeit größerer Probleminstanzen innerhalb sinnvoller Berechnungszeiten aus. Die zusätzliche Komplexität ist gegen den Nutzen dieser Detaillierung abzuwägen. Im Kontext des kerntechnischen Rückbaus können diese verallgemeinerten Vorgangsbeziehungen auf eine spezifische Art von Vorgängen angewandt werden. Es handelt sich um Vorgänge, die hoch radioaktiv belastetes Material verarbeiten und somit in möglichst kurzen Zeiträumen nach Beginn wieder abgeschlossen werden müssen. Für diese Vorgänge spielt bei der Projektplanung die Kostensicht eine untergeordnete Rolle. Bestmögliche Durchführung mit Blick auf Sicherheit und Strahlenschutz muss garantiert werden. Dieser Umstand setzt für derartige Vorgangsabfolgen eine unterbrechungsfreie Durchführung voraus, das heißt ohne Pausen zwischen einzelnen Arbeitsschritten. Mithilfe von GPR kann eine solche Situation detailliert abgebildet werden. Im Zuge der Modellierung wird, für Arbeitsschritte, welche Teil einer unterbrechungsfreien Abfolge sein sollen, eine maximale Verzögerung von null Zeiteinheiten eingeführt. Um diesem sowohl wichtigen als auch spezifischen Anwendungsfall, den Vorgangsabfolgen mit hochradioaktivem Material, gerecht zu werden, werden im weiteren Verlauf dieser Arbeit allgemeine Vorgangsbeziehungen in das aufzustellende Schedulingproblem integriert.

Um Nachteile in Bezug auf die Problemkomplexität möglichst gering zu halten, werden die betroffenen Vorgänge, die unmittelbare Vorgänger eines Vorgangs  $j$  sind, in einer neu eingeführten Menge  $G_j$  zusammengefasst. Die betreffende Nebenbedingung<sup>24</sup> zur Einhaltung der verallgemeinerten Vorgangsbeziehungen muss somit lediglich über die Menge  $G_j$  ausgeführt werden. Auf diese Weise können die Auswirkungen auf Problemkomplexität und schließlich Berechnungszeit minimiert werden.

Bisher wurde in diesem Kapitel ein Multi-mode Resource Investment Problem unter angepasstem Einbezug von GPR und Restbetriebskosten ausgewählt. In diesem Abschnitt werden weitere Anpassungen an diesem Modell vorgenommen, um einzelnen Anforderungen aus Kapitel 2 gerecht zu werden. In der Literatur konnten für dieses spezifische Schedulingproblem keine weiteren konkreten Anpassungen oder Erweiterung gefunden werden. Die folgenden Modifizierungen des MRIPT wurden

---

<sup>23</sup> Ende-Start, Start-Ende, Start-Start oder Ende-Ende Beziehungen, vgl. Kapitel 4.6.2.

<sup>24</sup> Nebenbedingung (3.72) in Kapitel 4.6.2.

daher durch die Autoren erarbeitet. Diese Anpassungen betreffen die folgenden Aspekte des Problems:

**Zielfunktion:** Bisher sind die Restbetriebskosten in der Zielfunktion integriert. Die Berücksichtigung in Form von Strafkosten hat allerdings zur Folge, dass die Restbetriebskosten über den gesamten Projekthorizont als konstant angenommen werden müssen. Daher wird zusätzlich auf eine Berücksichtigung von zeitlich variablen Restbetriebskosten eingegangen.

**Ressourcenbeschränkungen:** Im bisherigen MRIPT wird mit konstanten Ressourcenkapazitäten über die gesamte Projektdauer geplant, was insbesondere bei Unterschieden der variablen Kosten einzelner Modi zu Ungenauigkeiten führt. Daher wird im Folgenden die Optimierung unter der Betrachtung von fixen und variablen Kosten behandelt.

Die Anpassungen an der Zielfunktion beziehen sich auf die Integration von zeitlich variierenden Restbetriebskosten. Wie in Kapitel 2 dargestellt, stellen die Restbetriebskosten einen bedeutenden Kostenblock eines Rückbauprojekts dar. Durchschnittlich betragen die Restbetriebskosten nach Stilllegung des Kraftwerks 3 bis 5 Millionen Euro monatlich (Klasen und Seizer, 2015). Aufgrund dieser Größenordnung liegt eine möglichst genaue Betrachtung und Planung dieser Kosten nahe. Das bisherige MRIPT Modell kann lediglich eine Konstante je Zeitperiode, wie die bisher dargestellten durchschnittlichen Kosten, berücksichtigen. In der Realität der Rückbauprojekte gestaltet sich der Verlauf der Restbetriebskosten allerdings als nicht konstant. Wie von Klasen und Seizer (2015) dargestellt, nehmen die Restbetriebskosten im Zeitverlauf durchschnittlich ab. Hierbei sind die stufenweisen Kostenreduzierungen nicht abhängig von fixen Zeitpunkten, sondern vom Abschluss einzelner Bauabschnitte. Abschnittsweise sind somit auch Erhöhungen der Restbetriebskosten mit Beginn einzelner Bauabschnitte verbunden. Ein Beispiel für eine Erhöhung der Restbetriebskosten wäre die Inbetriebnahme von zusätzlichen Logistikanlagen, wie Kränen oder andere Handhabungseinrichtungen, für eine Reihe von Vorgängen. Diese Anlagen werden mit Abschluss der genannten Vorgänge nicht mehr benötigt und verringern die Restbetriebskosten wiederum zum Fertigstellungszeitpunkt des Abschnitts.

Um diese Kostensituation adäquat im Modell widerzuspiegeln und die Ungenauigkeit der bisherigen konstanten Restbetriebskosten zu umgehen, sind Änderungen an der Zielfunktion notwendig. Die Reduzierungen der Restbetriebskosten, die nach der Fertigstellung einzelner Bauabschnitte erwartet werden, sind mit den jeweils letzten



durch die Möglichkeit der Auswahl verschiedener Modi, die potentiell unterschiedliche Ressourcen beanspruchen, die Verwendungsdauer einzelner Ressourcen nicht vor der Optimierung bestimmt werden kann. Durch die Anzahl der Ressourcen  $a_r$  wird also lediglich bestimmt, wie viele Einheiten für den Spitzenbedarf verfügbar sein müssen.

Diese Modellierungsform stellt zunächst kein Problem dar, beziehungsweise ermöglicht sogar den Fixkostenanteil der Ressourcen adäquat abzubilden. Ferner sind variable Kosten in vielerlei Hinsicht nicht entscheidungsrelevant, was anhand eines Beispiels erläutert werden kann. Bei der Auswahl der Modi kann zwischen verschiedenen Technologien ausgewählt werden, die unterschiedlichen Maschinen werden allerdings jeweils gleichlange von Eigenpersonal bedient. Auf diese Weise unterscheiden sich die entscheidungsrelevanten Kosten der Modi lediglich in den Fixkosten der Maschinen.

Für eine Beurteilung der Relevanz von variablen Kosten im spezifischen Fall ist folgende Unterscheidung wichtig. So veranlasst nicht die absolute Höhe der variablen Kosten eines Ausführungsmodus dessen Entscheidungsrelevanz, sondern ein etwaiger Unterschied zwischen variablen Kosten desselben Vorgangs in unterschiedlichen Modi.

Im Kontext des kerntechnischen Rückbaus ist dieser Unterschied in variablen Kosten allerdings durch ein prominentes Beispiel beinahe allgegenwärtig. Wie bereits zuvor etabliert, wird das Eigenpersonal als fix betrachtet und verursacht keine variablen Kosten. Eine Vielzahl von Vorgängen kann allerdings alternativ von Drittfirmen ausgeführt werden. Im Gegensatz zum Durchführungsmodus mit Eigenpersonal verursacht eine Ausführung mit Fremdpersonal keine Fixkosten sondern ausschließlich variable Kosten. Somit gibt es für solche Vorgänge starke Unterschiede in den variablen Kosten zwischen verschiedenen Modi.

Um fixe und variable Kosten vollständig in das Schedulingmodell aufzunehmen, werden zusätzliche Ressourcen definiert und in die Zielfunktion aufgenommen. Der Kernaspekt dieser Anpassung ist die zusätzliche nicht-erneuerbare Ressource „variables Kostenbudget“. Unter dieser Entscheidungsvariable werden die gesamten variablen Plankosten über den Projekthorizont zusammengefasst. Das Ziel dieser Modellierungsweise ist eine Vermeidung der zeitschrittbasierter Ressourcenplanung. Die Entscheidungsvariable der Ressourcenanzahl  $a_r$  müsste ansonsten auf die Ressourcenanzahl je Zeiteinheit  $a_{rt}$  erweitert werden, was die Komplexität erheblich steigern würde.

Im Rahmen der alternativen Anpassung werden die variablen Kosten je Vorgang für jeden Modus, abhängig von den verwendeten Ressourcen, vom Anwender angegeben

( $k_{jrm}$ ). Die Integration dieser nicht-erneuerbaren Ressource in der Zielfunktion mit dem Kostenfaktor  $c_r = 1$ , da Kosten bereits in absoluten Geldbeträgen angegeben werden, bewirkt eine Berücksichtigung der variablen Kosten bei der Minimierung.

Da das Schedulingproblem und die sonstigen Ressourcen nicht verändert wurden, werden Fixkosten wie bisher berücksichtigt. Zur korrekten Planung des Fremdpersonals bleibt anzumerken, dass für die Fremdpersonalkapazität keine spezifische Ressource definiert wird. Da die Fremdpersonalkapazität über den Projektzeitraum nicht konstant bleibt, kann sie nicht durch eine Entscheidungsvariable  $a_r$  modelliert werden. Nichtsdestotrotz können Modi mit Verwendung von Fremdpersonal mithilfe der neuen Entscheidungsvariable abgebildet werden. Die absolute Anzahl des eingesetzten Fremdpersonals, je Zeitschritt des Projekts, kann im Nachgang des Planungsverfahrens von der Modusauswahl abgeleitet werden.

Durch diese Anwendung von nicht-erneuerbaren Ressourcen kann auf eine zeitschrittbasierte Ressourcenplanung verzichtet werden. Trotzdem können die Anforderungen des kerntechnischen Anwendungsfalls bezüglich der möglichst genauen Abbildung der Vorgangskostenstruktur erfüllt werden.

Zusätzlich zu den bisherigen Anpassungen der Ressourcenbedingungen des MRIPT folgt eine weitere Personalplanungsbesonderheit. Wie in Kapitel 2 angesprochen, beruht die Eigenpersonalstrategie vollständig auf der Weiterbeschäftigung der bisherigen Mitarbeiter. Hierdurch stehen die maximal einsetzbaren Eigenpersonaleinheiten bereits fest und werden nicht erst im Schedulingverlauf entschieden. Um diese Ressourcenbeschränkung hinzuzufügen wird eine obere Schranke für die Eigenpersonalkapazität gesetzt. Zusätzlich werden die variablen Kosten des Eigenpersonals auf 0 gesetzt, da Eigenpersonal unabhängig von dessen Einsatz dieselben Kosten verursacht.

### 5.3 Vollständig angepasstes Schedulingproblem

Um die bisher einzeln betrachteten Bausteine der Schedulingprobleme im kerntechnischen Rückbauszenario anwenden zu können, müssen diese zunächst zu einem spezifischen Problem zusammengesetzt werden. Im Folgenden werden das ausgewählte Planungsproblem, die Erweiterungen sowie die durchgeführten Anpassungen von Zielfunktion und Ressourcenbeschränkungen in eine Problemformulierung integriert.

Es handelt sich um ein Multi-mode Resource Investment Problem unter Betrachtung von allgemeinen Vorgangsbeziehungen und Restbetriebskosten zur Beschränkung. Nach dem Klassifizierungsschema aus Kapitel 3.2 kann das zusammengesetzte Problem als  $MPS^\infty/MPS |prec/temp | f$  dargestellt werden, wobei  $f$  die angepasste Zielfunktion aus Kapitel 5.2 repräsentiert.

$$\min \sum_{r \in R \cup R^n} c_r * a_r + \sum_{j=1}^J \sum_{m=1}^{M_j} \sum_{t=ES_j}^{LS_j} CR_j * x_{jmt} * (t + d_{jm}) \quad (5.1)$$

unter den Nebenbedingungen

$$\sum_{m=1}^{M_j} \sum_{t=ES_j}^{LS_j} x_{jmt} = 1 \quad j = 1, \dots, J \quad (5.2)$$

$$\sum_{m=1}^{M_i} \sum_{t=ES_i}^{LS_i} (t + d_{im}) * x_{imt} \leq \sum_{m=1}^{M_j} \sum_{t=ES_j}^{LS_j} t * x_{jmt} \quad j = 1, \dots, J; i \in P_j \quad (5.3)$$

$$- \sum_{m=1}^{M_i} \sum_{t=ES_i}^{LS_i} (t + l_{jim}) * x_{imt} \leq - \sum_{m=1}^{M_j} \sum_{t=ES_j}^{LS_j} t * x_{jmt} \quad j = 1, \dots, J; \forall i \in G_j \quad (5.4)$$

$$\sum_{j=1}^J \sum_{m=1}^{M_j} q_{jrm} \sum_{\tau=\max\{t-d_{jm}; ES_j\}}^{\min\{t-1; LS_j\}} x_{jmt} \leq a_r \quad \forall r \in R; t = 1, \dots, \bar{T} \quad (5.5)$$

$$\sum_{j=1}^J \sum_{m=1}^{M_j} k_{jrm} \sum_{t=ES_j}^{LS_j} x_{jmt} \leq a_r \quad \forall r \in R^n \quad (5.6)$$

$$a_r \leq Q_r^{max} \quad \forall r \in R^{max} \quad (5.7)$$

$$x_{jmt} \in \{0, 1\} \quad \begin{array}{l} j = 1, \dots, J; \\ m = 1, \dots, M_j; \\ t = 1, \dots, \bar{T} \end{array} \quad (5.8)$$

Generell orientiert sich das formulierte Problem stark am MRIPT, die Nebenbedingungen 5.2, 5.3, 5.5, 5.6 und 5.8 beruhen direkt darauf.

Die Nebenbedingung 5.4 dient der Einhaltung von allgemeinen Vorgangsbeziehungen. Für die Vorgängermengen  $P_j$  und  $G_j$ , die direkten Vorgänger sowie die direkten Vorgänger unter GPR respektive, gilt  $G_j \subset P_j$ . Auf diese Weise müssen allgemeine Vorgangsbeziehungen nicht auf alle Vorgangsbeziehungen angewandt werden. Durch die Negierung der Nebenbedingung kann, wie in Kapitel 4.6.2 erläutert, eine maximale Verzögerung berücksichtigt werden. Eine maximale Verzögerung von 0 Zeiteinheiten,

um im kerntechnischen Rückbau eine Ausführungsabfolge ohne Pausen zu garantieren, kann durch  $l_{jim} = d_{im} + 0$  modelliert werden.

Die Nebenbedingung 5.7 ermöglicht eine obere Schranke  $R^{max}$  für einzelne Ressourcentypen.

### 5.4 Weiterentwicklungsmöglichkeiten

Mit dieser Problemformulierung werden Anforderungen des kerntechnischen Rückbaus weitestgehend erfüllt. Trotzdem sind Einzelheiten der realen Rückbauabläufe durch das Schedulingproblem nur näherungsweise darstellbar. Auf diese Schwächen des Modells wird im Folgenden eingegangen.

Zunächst wird die Zielfunktion betrachtet. Hierbei werden im groben Rahmen des Resource Investment Problems zwar die Projektkosten minimiert, allerdings wird keine Diskontierung dieser Kosten integriert. Durch die starken Effekte von Restbetriebskosten auf die Startzeiten und aufgrund von zusätzlicher Komplexität wird an dieser Stelle auf diesen Zusatz der Zielfunktion verzichtet.

Wie in Kapitel 5.2 besprochen, kann die Einplanung von Eigenpersonal durch das Schedulingproblem erfolgen, auch die fixe Eigenpersonalkapazität kann über eine obere Schranke festgelegt werden. Eine Planungsungenauigkeit stellt diese Konstante insofern dar, dass zwar keine Neueinstellungen geplant sind, die Personalanzahl allerdings schrittweise abnimmt, da Mitarbeiter in den Ruhestand verabschiedet werden. Diese Abnahme über den Projektverlauf ist mit der vorgestellten Formulierung nicht darstellbar.

Eine weitere Schwäche des Modells stellt die Planung von Lagerflächen während der Rückbauarbeiten dar. Sofern sich Einlagerungs- und Entnahmevorgänge jeweils auf verschiedene Perioden aufteilen, ist eine Planung dieser Lagerkapazitäten nicht integriert. Dazu müsste eine Modellierung von kumulativen Ressourcen verwendet werden. Eine zusätzliche Nebenbedingung wäre erforderlich und die Komplexität des Problems würde sich weiter erhöhen. Zunächst wurde darauf verzichtet, um die Relevanz dieser potentiellen Schwäche zu testen.

Wie in Kapitel 3.1 bereits erläutert, werden die beim kerntechnischen Rückbau bestehenden Unsicherheiten in dieser Studie nicht berücksichtigt. Ziel dieser Studie war es, ein deterministisches Schedulingproblem zu identifizieren und an die Anforderungen anzupassen. Im Rahmen von Weiterentwicklungen kann das in dieser

Arbeit entwickelte Schedulingproblem hinsichtlich der Berücksichtigung von Unsicherheiten erweitert werden.

Neben diesen Einzelheiten stellt das formulierte Modell ein anwendbares Schedulingproblem zur Planung des kerntechnischen Rückbaus dar. Durch eine gezielte Auswahl von Problem, Erweiterungen sowie deren individuelle Anpassung konnte eine möglichst umfassende Erfüllung der Anforderungen aus Kapitel 2 erreicht werden.

## 6 Zusammenfassung und Ausblick

Großprojekte weisen sehr häufig große Abweichungen von ihrer ursprünglichen Planung auf. Einer der Gründe für die Planabweichung liegt in der unzureichenden Planung. Die während der Projektausführung und in der Planung zu berücksichtigenden Unsicherheiten werden bewusst in dieser Studie ausgeklammert. Ziel dieser Studie war es, ein deterministisches Schedulingproblem zu identifizieren, das eine möglichst genaue (deterministische) Planung unter gegebenen Anforderungen ermöglicht. Als Anwendungsbeispiel wurde hierfür das Großprojekt „Rückbau einer kerntechnischen Anlage“ verwendet, welches spezifische Anforderungen an die Planungsmethodik aufweist.

Im Rahmen dieser Studie wurden zunächst Begriffe und Hintergründe für Projektplanungsprobleme beschrieben. Im Anschluss wurden verschiedene Schedulingprobleme und deren Erweiterungsmöglichkeiten aus der Literatur analysiert. Zuletzt wurde ein für den Anwendungsfall passendes Schedulingproblem anhand der zu erfüllenden Anforderungen identifiziert und durch Erweiterungen an diese angepasst.

Das sich ergebene Schedulingproblem basiert auf dem Multi-mode Resource Investment Problem with Tardiness Penalty und kann unter der Berücksichtigung seiner Erweiterungen als „Multi-mode Resource Investment Problem unter Betrachtung von allgemeinen Vorgangsbeziehungen und Restbetriebskosten“ bezeichnet werden. Das aufgestellte Schedulingproblem berechnet einen Schedule und die Kapazitäten der benötigten erneuerbaren und nicht-erneuerbaren Ressourcen unter der Berücksichtigung von Vorgangsbeziehungen, Restbetriebskosten und vorgegebenen oberen Schranken für ausgewählte erneuerbare Ressourcen.

Aufgrund der mit den Erweiterungen zunehmenden Komplexität und der dadurch gestiegenen Rechenzeit, wurden nicht alle möglichen Erweiterungen angewendet. Mögliche Weiterentwicklungen, z.B. hinsichtlich der Berücksichtigung von Lagerplätzen als kumulative Ressourcen, der Diskontierung der Zahlungsflüsse oder der sich zeitlich ändernden oberen Schranken erneuerbarer Ressourcen, können in zukünftigen Arbeiten durchgeführt werden.

# Literaturverzeichnis

- Alvarez-Valdes, Ramon; Tamarit, Jose Manuel; Villa, Fulgencia (2015): Partially Renewable Resources. In: Christoph Schwindt und Jürgen Zimmermann (Hg.): Handbook on Project Management and Scheduling Vol.1. Heidelberg, New York, NY [u.a.]: Springer, S. 203–227.
- Artigues, Christian; Koné, Oumar; Lopez, Pierre; Mongeau, Marcel (2015): Mixed-Integer Linear Programming Formulations. In: Christoph Schwindt und Jürgen Zimmermann (Hg.): Handbook on Project Management and Scheduling Vol.1. Heidelberg, New York, NY [u.a.]: Springer, S. 17–41.
- Bach, Fr.-W.; Pfeifer, W.; Verseemann, R.; Wilk, P.; Valencia, L.; Eisenmann, B.; Hammer, G. (2005): Decommissioning technologies, including recent developments and special features of the dismantling of nuclear research and prototype facilities. In: Kerntechnik 70(1-2), 2005, S. 31-46.
- Bartels, Jan-Hendrik (2009): Anwendung von Methoden der ressourcenbeschränkten Projektplanung mit multiplen Ausführungsmodi in der betriebswirtschaftlichen Praxis. Rückbauplanung für Kernkraftwerke und Versuchsträgerplanung in Automobilentwicklungsprojekten. Dissertation. Wiesbaden: Gabler.
- Bartusch, Martin (1983): Optimierung von Netzplänen mit Anordnungsbeziehungen bei knappen Betriebsmitteln. Dissertation. Technische Hochschule Aachen.
- Bartusch, M.; Möhring, R. H.; Radermacher, F. J. (1988): Scheduling project networks with resource constraints and time windows. In: Annals of Operations Research 16 (1), S. 199–240. DOI: 10.1007/BF02283745.
- Bianco, Lucio; Caramia, Massimiliano (2015): Lower Bounds and Exact Solution Approaches. In: Christoph Schwindt und Jürgen Zimmermann (Hg.): Handbook on Project Management and Scheduling Vol.1. Heidelberg, New York, NY [u.a.]: Springer, S. 77–111.
- Blazewicz, J.; Lenstra, J. K.; Kan, A.H.G.Rinnooy (1983): Scheduling subject to resource constraints: classification and complexity. In: Discrete Applied Mathematics 5 (1), S. 11–24. DOI: 10.1016/0166-218X(83)90012-4.
- Bohinc, Tomas (2010): Grundlagen des Projektmanagements. Methoden, Techniken und Tools für Projektleiter. 2. Aufl. Offenbach am Main: GABAL.

- Brucker, P., Drexl, A., Möhring, R., Neumann, K.; Pesch, E. (1999): Resource-constrained project scheduling: Notation, classification, models and methods. In: European Journal of Operational Research (112), S. 3–41.
- Brusa, L.; DeSantis, R.; Nurden, P.; Walkden, P.; Watson, B. (2002): The decommissioning of the Trino nuclear power plant. Technischer Bericht, Sogin (IT); ND& CU BNFL (GB); BNFL Inc.(US).
- Carlier, Jacques; Moukrim, Aziz (2015): Storage Resources. In: Christoph Schwindt und Jürgen Zimmermann (Hg.): Handbook on Project Management and Scheduling Vol.1. Heidelberg, New York, NY [u.a.]: Springer, S. 177–189.
- Chaleshtari, Ali Shirzadeh; Shadrokh, Shahram (2013): Resource Constrained Project Scheduling Problem subject to Cumulative Resources. In: International Journal of Mining, Metallurgy & Mechanical Engineering 1 (1), S. 38–47.
- Coelho, José; Vanhoucke, Mario (2015): The Multi-Mode Resource-Constrained Project Scheduling Problem. In: Christoph Schwindt und Jürgen Zimmermann (Hg.): Handbook on Project Management and Scheduling Vol.1. Heidelberg, New York, NY [u.a.]: Springer, S. 491–511.
- Colak, Erdem; Azizoglu, Meral (2014): A resource investment problem with time/resource trade-offs. In: Journal of the Operational Research Society 65 (5), S. 777–790. DOI: 10.1057/jors.2013.46.
- De Reyck, Bert; Herroelen, Willy (1998): An optimal procedure for the resource-constrained project scheduling problem with discounted cash flows and generalized precedence relations. In: Computers & Operations Research 25 (1), S. 1–17.
- Demeulemeester, Erik (1995): Minimizing Resource Availability Costs in Time-Limited Project Networks. In: Management Science 41 (10), S. 1590–1598. DOI: 10.1287/mnsc.41.10.1590.
- Elmaghraby, Salah E.; Kamburowski, Jerzy (1992): The Analysis of Activity Networks Under Generalized Precedence Relations (GPRs). In: Management Science 38 (9), S. 1245–1263. DOI: 10.1287/mnsc.38.9.1245.
- E.ON Kernkraft GmbH (2008): Stade: Stilllegung und Rückbau des Kernkraftwerks – vom Kernkraftwerk zur „Grünen Wiese“. Online im Internet: URL <<https://www.eon.com/content/dam/eon-com/Geschaeftsfelder/Nuclear/asset->

profiles/stade-power-plant/kernkraft-rueckbau\_Stade\_de.pdf> (Stand: März 2008, Abfrage am: 11.04.2017).

Europäische Kommission (2016a): Communication from the commission: Nuclear Illustrative Programme. COM(2016) 177 final. Online im Internet: URL <<http://ec.europa.eu/transparency/regdoc/rep/1/2016/EN/1-2016-177-EN-F1-1.PDF>> (Stand: 04.04.2016, Abfrage am: 08.04.2016).

Europäische Kommission (2016b): Commission Staff Working Document. Accompanying the document. Communication from the Commission. Nuclear Illustrative Programme presented under Article 40 of the Euratom Treaty for the opinion of the European Economic and Social Committee. COM(2016) 177 final. Online im Internet: URL <[https://ec.europa.eu/energy/sites/ener/files/documents/1\\_EN\\_autre\\_document\\_travail\\_service\\_part1\\_v10.pdf](https://ec.europa.eu/energy/sites/ener/files/documents/1_EN_autre_document_travail_service_part1_v10.pdf)> (Stand: 04.04.2016, Abfrage am: 29.03.2017).

Gonçalves, José Fernando; de Magalhães Mendes, Jorge José; Resende, Mauricio G.C. (2015): The Basic Multi-Project Scheduling Problem. In: Christoph Schwindt und Jürgen Zimmermann (Hg.): Handbook on Project Management and Scheduling Vol. 2. Heidelberg, New York, NY [u.a.]: Springer, S. 667–683.

Gu, Hanyu; Schutt, Andreas; Stuckey, Peter J.; Wallace, Mark G.; Chu, Geoffrey (2015): Exact and Heuristic Methods for the Resource-Constrained Net Present Value Problem. In: Christoph Schwindt und Jürgen Zimmermann (Hg.): Handbook on Project Management and Scheduling Vol.1. Heidelberg, New York, NY [u.a.]: Springer, S. 299–318.

Hartmann, Sönke (2015): Time-Varying Resource Requirements and Capacities. In: Christoph Schwindt und Jürgen Zimmermann (Hg.): Handbook on Project Management and Scheduling Vol.1. Heidelberg, New York, NY [u.a.]: Springer, S. 163–176.

Klasen, Jörg; Seizer, Burkhard (2015): Managing Complexity of Nuclear Decommissioning & Dismantling Projects – An Advanced Project-Management Approach. Proceedings International Conference on Nuclear Decommissioning (ICOND), 16.-19.11.2015, Bonn.

Kolisch, Rainer (2015): Shifts, Types, and Generation Schemes for Project Schedules. In: Christoph Schwindt und Jürgen Zimmermann (Hg.): Handbook on Project Management and Scheduling Vol.1. Heidelberg, New York, NY [u.a.]: Springer, S. 3–16.

- Mika, Marek; Waligóra, Grzegorz; Węglarz, Jan (2015): Overview and State of the Art. In: Christoph Schwindt und Jürgen Zimmermann (Hg.): Handbook on Project Management and Scheduling Vol.1. Heidelberg, New York, NY [u.a.]: Springer, S. 445–490.
- Mika, Marek; Waligóra, Grzegorz; Węglarz, Jan (2005): 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 (3), S. 639–668. DOI: 10.1016/j.ejor.2003.10.053.
- Möhring, Rolf H. (1984): Minimizing Costs of Resource Requirements in Project Networks Subject to a Fixed Completion Time. In: Operations Research 32 (1), S. 89–120. DOI: 10.1287/opre.32.1.89.
- Neumann, Klaus; Schwindt, Christoph; Zimmermann, Jürgen (2002): Project scheduling with time windows and scarce resources. Temporal and resource-constrained project scheduling with regular and nonregular objective functions. Berlin, New York: Springer (508).
- NDR (2017): Elbphilharmonie: Die wichtigsten Etappen. Online im Internet: URL <[http://www.ndr.de/kultur/elbphilharmonie/elbphilchronologie100\\_page-1.html](http://www.ndr.de/kultur/elbphilharmonie/elbphilchronologie100_page-1.html)> (Stand: 12.01.2017, Abfrage am: 12.04.2017).
- PMI – Project Management Institute (2013): A Guide to the Project Management Body of Knowledge (PMBOK® Guide). 5. Auflage. Pennsylvania: Project Management Institute, Inc.
- Ranjbar, Mohammad; Kianfar, Fereydoon; Shadrokh, Shahram (2008): Solving the resource availability cost problem in project scheduling by path relinking and genetic algorithm. In: Applied Mathematics and Computation 196 (2), S. 879–888. DOI: 10.1016/j.amc.2007.07.022.
- rbb (2017): BER-Chronologie - Der lange Weg zum neuen Flughafen. Online im Internet: URL <<http://www.rbb-online.de/politik/Flughafen-BER/BER-Aktuelles/hintergrund/chronologie-der-lange-weg-zum-ber.html>> (Stand: 17.01.2017, Abfrage am: 12.04.2017).
- Rieck, Julia; Zimmermann, Jürgen (2015): Exact Methods for Resource Leveling Problems. In: Christoph Schwindt und Jürgen Zimmermann (Hg.): Handbook on Project Management and Scheduling Vol.1. Heidelberg, New York, NY [u.a.]: Springer, S. 361–387.

- Rieck, Julia; Zimmermann, Jürgen; Gather, Thorsten (2012): Mixed-integer linear programming for resource leveling problems. In: *European Journal of Operational Research* 221 (1), S. 27–37. DOI: 10.1016/j.ejor.2012.03.003.
- Schirmer, Andreas (1999): *Project scheduling with scarce resources. Models, methods, and applications*. Hamburg: Kovač (100).
- Schultmann, Frank (1998): *Kreislaufführung von Baustoffen. Stoffflussbasiertes Projektmanagement für die operative Demontage- und Recyclingplanung von Gebäuden*. Berlin: Erich Schmidt (Baurecht und Bautechnik, Bd. 10).
- Schwindt, Christoph; Zimmermann, Jürgen (Hg.) (2015): *Handbook on project management and scheduling Vol. 1*, Springer.
- Shadrokh, Shahram; Kianfar, Fereydoon (2007): A genetic algorithm for resource investment project scheduling problem, tardiness permitted with penalty. In: *European Journal of Operational Research* 181 (1), S. 86–101. DOI: 10.1016/j.ejor.2006.03.056.
- SWR (2016): *Historie des Bahnprojekts Stuttgart 21*. Online im Internet: URL <<http://www.swr.de/swraktuell/bw/stuttgart21-chronologie-historie/-/id=1622/did=6730358/nid=1622/aabx4l/index.html>> (Stand: 21.09.2016, Abfrage am: 12.04.2017).
- van Peteghem, Vincent; Vanhoucke, Mario (2015): *Heuristic Methods for the Resource Availability Cost Problem*. In: Christoph Schwindt und Jürgen Zimmermann (Hg.): *Handbook on Project Management and Scheduling Vol.1*. Heidelberg, New York, NY [u.a.]: Springer, S. 339–359.
- Vanhoucke, Mario (2013): *Project Management with Dynamic Scheduling. Baseline Scheduling, Risk Analysis and Project Control*. 2. Auflage. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg.
- Yanagihara, Satoshi; Sukegawa, Takenori; Shiraishi, Kunio (2001): Development of Computer Systems for Planning and Management of Reactor Decommissioning. In: *Journal of Nuclear Science and Technology* 38 (3), S. 193–202. DOI: 10.1080/18811248.2001.9715021.
- Zimmermann, Jürgen (2001): *Ablauforientiertes Projektmanagement. Modelle, Verfahren und Anwendungen*. Habilitation. 1. Aufl. Wiesbaden: Dt. Univ.-Verl. [u.a.].



# Working Paper Series in Production and Energy

---

## recent issues

- No. 9** Kai Mainzer, Russell McKenna, Wolf Fichtner:  
Charakterisierung der verwendeten Modellansätze im  
Wettbewerb Energieeffiziente Stadt
- No. 10** Hannes Schwarz, Valentin Bertsch, Wolf Fichtner:  
Two-stage stochastic, large-scale optimization of a decentralized  
energy system – a residential quarter as case study
- No. 11** Russell McKenna, Erik Merkel, Wolf Fichtner:  
Development of a multi-energy residential service demand model for  
evaluation of prosumers' effects on current and future residential load  
profiles for heat and electricity
- No. 12** Russell McKenna, Erik Merkel, Wolf Fichtner:  
Energy autonomy in residential buildings: a techno-economic  
model-based analysis of the scale effects
- No. 13** Johannes Schäuble, Silvia Balaban, Peter Krasselt, Patrick Jochem,  
Mahmut Özkan, Friederike Schellhas-Mende, Wolf Fichtner, Thomas  
Leibfried, Oliver Raabe:  
Vergleichsstudie von Systemansätzen für das Schnellladen von  
Elektrofahrzeugen
- No. 14** Marian Hayn, Valentin Bertsch, Anne Zander, Stefan Nickel, Wolf Fichtner:  
The impact of electricity tariffs on residential demand side flexibility
- No. 15** Erik Merkel, Robert Kunze, Russell McKenna, Wolf Fichtner:  
Modellgestützte Bewertung des Kraft-Wärme-Kopplungsgesetzes 2016  
anhand ausgewählter Anwendungsfälle in Wohngebäuden
- No. 16** Russell McKenna, Valentin Bertsch, Kai Mainzer, Wolf Fichtner:  
Combining local preferences with multi-criteria decision analysis and linear  
optimisation to develop feasible energy concepts in small communities
- No. 17** Tilman Apitzsch, Christian Klöffler, Patrick Jochem, Martin Doppelbauer,  
Wolf Fichtner:  
Metaheuristics for online drive train efficiency optimization in electric  
vehicles
- No. 18** Felix Hübner, Georg von Grone, Frank Schultmann: Technologien zur  
Zerlegung und zur Dekontamination von kerntechnischen Anlagen
- No. 19** Felix Hübner, Jennifer Jana Jung, Frank Schultmann: Gefahren  
ionisierender Strahlung für Mensch und Umwelt in Bezug auf  
kerntechnische Anlagen
- No. 20** Juri Lüth, Tobias Jäger, Russell McKenna, Wolf Fichtner: Photovoltaik auf  
Gebäuden: eine GIS-gestützte Ermittlung des Potenzials in Baden-  
Württemberg
- No. 21** Felix Hübner, Jennifer Jana Jung, Frank Schultmann: Auswirkungen  
nuklearer Unfälle auf den Menschen und die Umwelt

---

The responsibility for the contents of the working papers rests with the author, not the institute. Since working papers are of preliminary nature, it may be useful to contact the author of a particular working paper about results or caveats before referring to, or quoting, a paper. Any comments on working papers should be sent directly to the author.

**Impressum**

Karlsruher Institut für Technologie

Institut für Industriebetriebslehre und Industrielle Produktion (IIP)  
Deutsch-Französisches Institut für Umweltforschung (DFIU)

Hertzstr. 16  
D-76187 Karlsruhe

KIT – Die Forschungsuniversität in der Helmholtz-Gemeinschaft

Working Paper Series in Production and Energy  
**No. 22**, Mai 2017

ISSN 2196-7296

---

[www.iip.kit.edu](http://www.iip.kit.edu)

[www.kit.edu](http://www.kit.edu)