

Band 33 _ PRODUKTION UND ENERGIE

Felix Hübner

PLANUNG UND MODELLIERUNG DES RÜCKBAUS
KERNTECHNISCHER ANLAGEN UNTER DER
BERÜCKSICHTIGUNG VON UNSICHERHEITEN

EIN BEISPIEL ZUR PLANUNG VON GROSSPROJEKTEN



Scientific
Publishing

Felix Hübner

Planung und Modellierung des Rückbaus kerntechnischer Anlagen unter der Berücksichtigung von Unsicherheiten

Ein Beispiel zur Planung von Großprojekten

PRODUKTION UND ENERGIE

Karlsruher Institut für Technologie (KIT)
Institut für Industriebetriebslehre und Industrielle Produktion
Deutsch-Französisches Institut für Umweltforschung

Band 33

Eine Übersicht aller bisher in dieser Schriftenreihe
erschienenen Bände finden Sie am Ende des Buches.

Planung und Modellierung des Rückbaus kerntechnischer Anlagen unter der Berücksichtigung von Unsicherheiten

Ein Beispiel zur Planung von Großprojekten

von
Felix Hübner

Dissertation, Karlsruher Institut für Technologie
KIT-Fakultät für Wirtschaftswissenschaften

Tag der mündlichen Prüfung: 4. Februar 2019
Referent: Prof. Dr. rer. pol. Frank Schultmann
Korreferent: Prof. Dr. Stefan Nickel

Impressum



Karlsruher Institut für Technologie (KIT)
KIT Scientific Publishing
Straße am Forum 2
D-76131 Karlsruhe

KIT Scientific Publishing is a registered trademark
of Karlsruhe Institute of Technology.
Reprint using the book cover is not allowed.

www.ksp.kit.edu



*This document – excluding the cover, pictures and graphs – is licensed
under a Creative Commons Attribution-Share Alike 4.0 International License
(CC BY-SA 4.0): <https://creativecommons.org/licenses/by-sa/4.0/deed.en>*



*The cover page is licensed under a Creative Commons
Attribution-No Derivatives 4.0 International License (CC BY-ND 4.0):
<https://creativecommons.org/licenses/by-nd/4.0/deed.en>*

Print on Demand 2019 – Gedruckt auf FSC-zertifiziertem Papier

ISSN 2194-2404

ISBN 978-3-7315-0911-0

DOI 10.5445/KSP/1000091848

Planung und Modellierung des Rückbaus kerntechnischer Anlagen unter der Berücksichtigung von Unsicherheiten

Ein Beispiel zur Planung von Großprojekten

zur Erlangung des akademischen Grades eines

**Doktors der Ingenieurwissenschaften
(Dr.-Ing.)**

von der KIT-Fakultät für Wirtschaftswissenschaften
des Karlsruher Instituts für Technologie (KIT)

genehmigte

Dissertation

von

Felix Hübner

Tag der mündlichen Prüfung: 4. Februar 2019

Referent: Prof. Dr. rer. pol. Frank Schultmann

Korreferent: Prof. Dr. Stefan Nickel

Vorwort

Die vorliegende Arbeit entstand im Rahmen meiner Zeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Industriebetriebslehre und Industrielle Produktion (IIP) am Karlsruher Institut für Technologie (KIT) in den Jahren 2014 bis 2018. Insbesondere die Ergebnisse aus dem BMBF-geförderten Forschungsprojekt MogaMaR (Modellentwicklung eines ganzheitlichen Projektmanagementsystems für kerntechnische Rückbauprojekte, Förderkennzeichen: 02S9113A bzw. 15S9113A) flossen maßgeblich in die Erstellung meiner Dissertation ein.

Ich danke allen, die mich bei der Erstellung meiner Dissertation unterstützt haben. Allen voran möchte ich meinen Dank Herrn Prof. Dr. rer. pol. Frank Schultmann für die Betreuung meiner Arbeit und das stets angenehme Arbeitsklima am IIP aussprechen. Des Weiteren danke ich Herrn Prof. Dr. Stefan Nickel für die Übernahme des Korreferats. Außerdem möchte ich Prof. Noel Lindsay und seinen Mitarbeitern am Institut Entrepreneurship, Commercialisation and Innovation Centre (ECIC) an der University of Adelaide danken, die mich während meines vom Karlsruhe House of Young Scientists (KHYS) geförderten Aufenthaltes unterstützten.

Danken möchte auch meiner Familie und besonders Hanna für ihre Unterstützung und ihr Verständnis. Nicht zu vergessen sind die vielen Kolleginnen und Kollegen am IIP, die mich stets bei der Erstellung meiner Dissertation unterstützten und auch darüber hinaus Freunde geworden sind. Insbesondere danke ich Dr.-Ing. Rebekka Volk, Elias Naber und Richard Müller für die tolle Zusammenarbeit und Unterstützung. Außerdem möchte ich Herrn Patrick Gerhards und Herrn Dr. Christian Stürck von der Helmut-Schmidt-Universität für die konstruktive Zusammenarbeit danken.

Es war mir ein Anliegen, die vorliegende Dissertation als Nachschlagewerk für Fragen rund um die Planung von Großprojekten und insbesondere der Planung des Rückbaus von kerntechnischen Anlagen zu schreiben. Aus diesem Grund enthält diese Dissertation umfangreiche Informationen zu den Rahmenbedingungen eines solchen Großprojekts und zeigt weitere Quellen auf, aus denen zusätzliche Informationen entnommen werden können. Indem jedes Kapitel eine kurze Einleitung und eine Einordnung in den Gesamtkontext der Arbeit enthält, kann jedes Kapitel vom Leser bei einem ausreichenden Hintergrundwissen unabhängig von anderen Kapiteln dieser Arbeit gelesen werden. Der Leser kann somit bei der Durchsicht des Inhaltsverzeichnisses selber entscheiden, zu welchen Themen er sich genauer informieren möchte, ohne dazu vorher zwangsläufig weitere Kapitel lesen zu müssen. Um dem Leser eine Hilfestellung zu geben, welche Hintergrundinformationen zum Verständnis eines Kapitels notwendig sind, werden in jedem Kapitel die grundlegenden Informationen und ein Verweis auf die Kapitel in dieser Arbeit mit ausführlicheren Informationen aufgeführt.

In der vorliegenden Arbeit wurde darauf geachtet, dass, sofern möglich, alle Aussagen durch die Angabe von Literatur belegt wurden. Hierzu wurde die Harvard-Zitierweise verwendet. Um zu vermeiden, dass die gleichen Quellen zu häufig genannt werden, wurde die Zitierweise wie folgt angepasst: Sofern sich eine Quelle auf den Inhalt eines Satzes bezieht, wurde diese im Text vor dem Satzende genannt. Wenn sich verschiedene Aussagen mehrerer Sätze auf eine Quelle beziehen, wird die Quelle nach dem Satzende der letzten zu zitierenden Aussage gestellt. Die Quelle bezieht sich damit auf den gesamten vorangehenden Absatz, selbst wenn andere Quellen in dem Absatz aufgeführt werden.

Felix Hübner

Karlsruhe, im Februar 2019

Kurzfassung

Diese Dissertation beinhaltet die Entwicklung eines Planungswerkzeugs für Großprojekte, welches exemplarisch an die Anforderungen kerntechnischer Rückbauprojekte angepasst und auf ein Referenzprojekt angewendet wird.

Großprojekte wie der Rückbau kerntechnischer Anlagen weisen häufig Kostenüberschreitungen und eine länger als geplante Ausführungsdauer auf. Dies ist einerseits auf Probleme im Management sowie der Steuerung dieser Projekte und andererseits auf eine unzureichende Planung zurückzuführen. In dieser Dissertation liegt der Fokus auf der Verbesserung der Planung durch eine computergestützte Optimierung.

Während der Planung sollten alternativ einsetzbare Technologien, die technischen Vorgangsbeziehungen und die einzuhaltenden Sicherheitsmaßnahmen aufgrund der vorherrschenden Radioaktivität sowie der gesundheitsschädigenden ionisierenden Strahlung berücksichtigt werden. Darüber hinaus ist die Planung insbesondere aufgrund von wenigen Erfahrungswerten im kerntechnischen Rückbau unter der Berücksichtigung von Unsicherheiten durchzuführen. Da alle Rückbauarbeiten und die einzusetzenden Ressourcen, wie beispielsweise Technologien und Mitarbeiter, genau einzuplanen und vor der Ausführung zu genehmigen sind, ergibt sich die Herausforderung der Planung über einen langen Zeitraum und in einer ausreichenden Detailtiefe. Eine Überarbeitung bereits genehmigter Pläne sollte aufgrund eines erneuten, mehrjährigen Genehmigungsverfahrens aus Kosten- und Zeitgründen vermieden werden. Unter der Berücksichtigung der genannten Anforderungen ist es das Ziel, einen Termin- und Ablauf- sowie einen Ressourcenplan mit minimalen Kosten zu bestimmen.

Da Planungswerkzeuge zur computergestützten Optimierung für kerntechnische Rückbauprojekte bisher nicht existieren, wird in dieser Dissertation ein solches Planungswerkzeug entwickelt. Das entwickelte Planungswerkzeug berechnet unter der Berücksichtigung der Anforderungen an kerntechnische Rückbauprojekte einen integrierten Termin- und Ablauf-, Ressourcen- und Kostenplan auf operativer Planungsebene, der den Rückbau mit minimalen Kosten zum Ziel hat und der unter der Berücksichtigung von Unsicherheiten während der Projektausführung möglichst planmäßig ausführbar ist. Hierzu können zunächst aus einem erstmalig bereitgestellten Expertensystem für ein neu zu planendes Projekt relevante Erfahrungsdaten abgeschlossener Projekte mit Hilfe von regelbasierten Abfragen extrahiert werden. Die vom Anwender übernommenen oder angepassten Daten können Unsicherheiten bzgl. der Wahrscheinlichkeit der Vorgangsausführung sowie der Vorgangsdauer unterliegen. Basierend auf diesen Unsicherheiten werden beliebig viele Szenarien generiert, für die jeweils ein kostenoptimierter Plan berechnet wird. Anschließend werden alle optimierten Pläne hinsichtlich ihrer Ausführbarkeit mit Hilfe von Robustheitskriterien evaluiert. Je Plan können somit insbesondere die Kennzahlen der Projektgesamtkosten und die Wahrscheinlichkeit einer Ausführbarkeit angegeben werden. Die Wahrscheinlichkeit der Ausführbarkeit kann durch eine Sensitivitätsanalyse genauer untersucht werden. Mit Hilfe dieser Kennzahlen und der Sensitivitätsanalyse erhält der Anwender ein besseres Verständnis über mögliche Ablaufpläne, um mit dieser Entscheidungsunterstützung einen möglichst planmäßig ausführbaren Plan zu identifizieren.

Inhaltsverzeichnis

Vorwort	i
Kurzfassung	iii
Abbildungsverzeichnis	xi
Tabellenverzeichnis	xvii
Abkürzungsverzeichnis	xxi
Symbolverzeichnisse	xxvii
1 Einleitung	1
1.1 Ausgangslage und Problemstellung	1
1.2 Zielsetzung, Forschungsfrage und Lösungsweg.....	8
2 Rahmenbedingungen zum Rückbau kerntechnischer Anlagen	13
2.1 Begriffsdefinitionen und -erläuterungen zum Rückbau kerntechnischer Anlagen	14
2.1.1 Kerntechnische Anlagen.....	14
2.1.2 Leistungsbetrieb, Stilllegung, Nach- und Restbetrieb	16
2.1.3 Rückbau und Grüne Wiese.....	23
2.2 Physikalische Grundlagen und Anlagentypen	26
2.2.1 Entstehung von Radioaktivität und ionisierender Strahlung.....	27
2.2.2 Funktionsweise des Reaktorkerns.....	32
2.2.3 Beschreibung von Reaktortypen und deren Funktionsweisen	35
2.2.4 Radioaktiv belastete Bereiche einer kerntechnischen Anlage	43
2.3 Auswirkungen ionisierender Strahlung auf Lebewesen und mögliche Schutzmaßnahmen	45

2.3.1	Biologische Wirkung ionisierender Strahlung auf den Organismus	45
2.3.2	Maßnahmen zum Strahlenschutz und deren Einfluss auf die Rückbauplanung	54
2.3.3	Klassifizierung radioaktiver Abfälle	60
2.4	Technologien zum Trennen und zur Dekontamination kerntechnischer Anlagen	65
2.4.1	Technologien zum Trennen von Bauteilen in kerntechnischen Anlagen	68
2.4.2	Technologien zur Dekontamination kerntechnischer Anlagen	77
2.4.3	Auswahl von Technologien zum Trennen und zur Dekontamination kerntechnischer Anlagen	89
2.5	Vorgaben und Rechtsgrundlagen für den Rückbau kerntechnischer Anlagen	95
2.5.1	Internationale Verträge, Übereinkommen und Standards	96
2.5.2	Das deutsche Atomrecht	100
2.5.3	Verwertung und Entsorgung von Reststoffen	128
2.6	Der Rückbau kerntechnischer Anlagen als Projekt	135
2.6.1	Fokus der Projektplanung dieser Arbeit	138
2.6.2	Operative Planung in Rückbauprojekten	144
2.6.3	Zielkriterien der Planung und Zielkonflikte	149
2.6.4	Kosten und Finanzierung des kerntechnischen Rückbaus	153
2.6.5	Unsicherheit beim Rückbau kerntechnischer Anlagen ...	161
2.6.6	Projektmanagement-Software zur Planung und zur Steuerung von Projekten	172
2.7	Schlussfolgerungen und sich ergebene Anforderungen an die Planung kerntechnischer Rückbauprojekte	180

3	Projektplanungsmethoden zum Rückbau	
	kerntechnischer Anlagen	183
3.1	Ziele und Anforderungen an eine Planungsmethode.....	184
3.2	Begriffe und Hintergründe	191
3.2.1	Klassifizierungsschema.....	191
3.2.2	Regularität der Zielfunktion	195
3.2.3	Ressourcenarten	196
3.3	Analyse allgemeiner deterministischer Projektplanungsmethoden.....	200
3.3.1	Resource-Constrained Project Scheduling Problem.....	201
3.3.2	Resource-Constrained Project Scheduling Problem with Discounted Cashflows	207
3.3.3	Resource Investment Problem	210
3.3.4	Resource Investment Problem with Tardiness Penalty...	213
3.3.5	Resource Leveling Project Scheduling Problem	216
3.3.6	Erweiterungen der Scheduling Probleme	219
3.4	Analyse bisher verwendeter Planungsansätze für Rückbauprojekte	227
3.4.1	Operative Planungsansätze für Rückbauprojekte	227
3.4.2	Strategische Planungsansätze für Rückbauprojekte	237
3.4.3	Verwendbarkeit der identifizierten Planungsansätze für die operative Rückbauplanung kerntechnischer Anlagen	239
3.5	Netzplantechnik	241
3.5.1	Graphentheoretische Grundlagen der Netzplantechnik	242
3.5.2	Unterscheidung CPM, MPM, PERT und GERT	247
3.5.3	Besondere Eigenschaften von GERT für den Anwendungsfall Rückbauplanung unter Unsicherheit	249
3.6	Planung und Projektausführung unter Unsicherheit.....	252
3.7	Schlussfolgerungen und Notwendigkeit eines neuen Planungswerkzeugs	260

4	Konzeption eines Planungswerkzeugs für den Rückbau	
	kerntechnischer Anlagen	263
4.1	Modellaufbau und Abgrenzungen	264
4.2	Expertensystem	267
	4.2.1 Datenbankentwicklung.....	268
	4.2.2 Implementierung und Verwendung des Expertensystems	287
	4.2.3 Integration existierender Daten in das Expertensystem	299
4.3	Szenariosimulation	300
	4.3.1 Simulation der Nachfolger.....	302
	4.3.2 Simulation der Vorgangsdauern.....	305
	4.3.3 Implementierung.....	321
4.4	Mathematisches Modell und Algorithmen zur Berechnung eines kostenoptimierten Rückbauplans	328
	4.4.1 Auswahl eines allgemeinen Scheduling Problems als Grundmodell	329
	4.4.2 Erweiterung des Grundmodells.....	333
	4.4.3 Nuclear Dismantling Project Scheduling Problem (NDPSP).....	340
	4.4.4 Weiterentwicklungsmöglichkeiten des Nuclear Dismantling Project Scheduling Problems.....	345
	4.4.5 Verfahren zur Lösung des Nuclear Dismantling Project Scheduling Problems	349
	4.4.6 Implementierung.....	380
4.5	Auswahl eines robusten Rückbauplans	382
	4.5.1 Eigenschaften von Plänen und Definition von Robustheit	383
	4.5.2 Robustheitstypen	386
	4.5.3 Robustheitsmaße für die Solution Robustness	396
	4.5.4 Robustheitsmaße der Sequence Robustness	422

4.5.5	Verwendung ausgewählter Robustheitsmaße	428
4.5.6	Implementierung.....	437
5	Anwendung des Planungswerkzeugs auf ausgewählte kerntechnische Rückbauprojekte	439
5.1	Beschreibung untersuchter Projekte.....	440
5.1.1	Rückbau eines DWR inklusive RDB-Einbauten	444
5.1.2	Rückbau eines SWR inklusive RDB-Einbauten sowie Rückbau des Maschinenhauses	452
5.1.3	Rückbau einer Gesamten Anlage bis zur Grünen Wiese.....	457
5.2	Bestimmung optimierter Rückbaupläne und deren Robustheit.....	466
5.2.1	Szenariosimulation und Kalibrierung der Parameter für die Optimierung.....	466
5.2.2	Bestimmung der Zeitlimits des MLS- und des ALNS-Algorithmus sowie Berechnung optimierter Schedules	477
5.2.3	Validierung der optimierten Schedules.....	493
5.2.4	Güte des Lösungsverfahrens	493
5.2.5	Wahl eines robusten Schedules	511
5.3	Sensitivitätsanalysen bei der Variation der Gewichtungen der Robustheitsmaße	516
6	Schlussfolgerungen und Ausblick	523
6.1	Zusammenfassung und Beantwortung der Forschungsfrage.....	523
6.2	Kritische Würdigung des Planungswerkzeugs und Ausblick auf zukünftige Forschungsarbeiten.....	530
A.	Anhang	535
A.1	State of the art Trennverfahren	536
A.2	State of the art Dekontaminationsverfahren	541
A.3	Vorgänge des Referenzprojekts Rückbau eines SWR.....	548

A.4	Vorgänge des Referenzprojekts Rückbau einer Gesamtanlage	551
A.5	Langzeittests des MLS-Algorithmus mit einem Zeitlimit von 28.800 Sekunden für das Referenzprojekt des Rückbaus einer Gesamtanlage	562
A.6	Langzeittests des ALNS-Algorithmus mit einem Zeitlimit von 28.800 Sekunden für das Referenzprojekt des Rückbaus einer Gesamtanlage	565
A.7	Eigenschaften der simulierten Test-Szenarien für das Referenzprojekt des Rückbaus einer Gesamtanlage	568
A.8	Eigenschaften optimierter Schedules des Referenzprojekts des Rückbaus einer Gesamtanlage	572
A.9	Optimierte Schedules und deren Eigenschaften inkl. der gewichteten Summe der Robustheitsmaße des Referenzprojekts des Rückbaus einer Gesamtanlage.....	585
B.	Literaturverzeichnis	599

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 2.1:	Lebenszyklus und Stilllegungsstrategien einer kerntechnischen Anlage	19
Abbildung 2.2:	Reaktionskette von Wirkungen ionisierender Strahlung im Organismus.....	50
Abbildung 2.3:	Belastungspfade des Menschen durch radioaktive Elemente im natürlichen Kreislauf.....	56
Abbildung 2.4:	Das deutsche Atomrecht	103
Abbildung 2.5:	Gesetzlicher Rahmen für den Rückbau kerntechnischer Anlagen	104
Abbildung 2.6:	Beteiligte Akteure beim Genehmigungsverfahren zum Rückbau einer kerntechnischen Anlage	115
Abbildung 2.7:	Fokus der Arbeit.....	141
Abbildung 2.8:	Planungsaufgaben beim Rückbau kerntechnischer Anlagen	142
Abbildung 2.9:	Rückbauplanung mit den Projektphasen Auditierung, Demontageplanung und Verwertungsplanung.....	147
Abbildung 2.10:	Kostenschätzung Rückbau, Zwischenlagerung und Transport sowie Endlagerung in Deutschland	155
Abbildung 2.11:	Schematische Darstellung der jährlichen Rückbaukosten.....	161
Abbildung 2.12:	Unsicherheitskonzept nach Knight (1921)	164
Abbildung 3.1:	Mögliche Knoteneingangs- und Knotenausgangskombinationen von GERT-Netzplänen	251

Abbildung 3.2:	Grafische Darstellung der Knoten in GERT-Netzwerken	251
Abbildung 3.3:	Projektplanung unter Unsicherheit mit und ohne Baseline Schedules sowie resultierende Handlungen während der Projektausführung.....	254
Abbildung 4.1:	Überblick über die Bestandteile des entwickelten Planungswerkzeugs zur Planung kerntechnischer Rückbauprojekte	265
Abbildung 4.2:	Datenbankentwurfsmodell dieser Arbeit.....	271
Abbildung 4.3:	Konzeptionelles Datenmodell zum Speichern von Erfahrungswerten kerntechnischer Rückbauprojekte	276
Abbildung 4.4:	Relation "Reaktortyp"	279
Abbildung 4.5:	Relation "Projekt"	280
Abbildung 4.6:	Relation "Ressource".....	281
Abbildung 4.7:	Relation "Vorgang".....	282
Abbildung 4.8:	Relation "Anordnung".....	283
Abbildung 4.9:	Relation "Modus".....	284
Abbildung 4.10:	Relation "Allokation".....	285
Abbildung 4.11:	Logisches Design des Expertensystems, implementiert in Microsoft Access	286
Abbildung 4.12:	Verweise auf Objektbibliotheken in Microsoft Access	288
Abbildung 4.13:	Formular "f_Start" beim Starten des Expertensystems	289
Abbildung 4.14:	Formular "Formular_Reaktortyp"	290
Abbildung 4.15:	Formular "f_Projekt".....	291
Abbildung 4.16:	Formular "f_Vorgänge" mit Unterformularen	292

Abbildung 4.17: Formular "f_Ressource"	294
Abbildung 4.18: Formular "f_Allokation"	295
Abbildung 4.19: Formular "f_Start" mit ausgewähltem Reaktortyp	296
Abbildung 4.20: Formular "f_Start" mit ausgewähltem Reaktortyp und ausgewähltem Rückbauprojekt	298
Abbildung 4.21: Beispiel einer stochastischen Vorgangsstruktur	304
Abbildung 4.22: Trianguläre (a) und trapezförmige (b) Zugehörigkeitsfunktion	309
Abbildung 4.23: Verschiedene Verteilungen der Beta-Funktion.....	314
Abbildung 4.24: Darstellung einer Dreiecks- und Gleichverteilung mit der Beta-Funktion.....	315
Abbildung 4.25: Beispielnetzwerk	321
Abbildung 4.26: Möglicher Netzwerkdurchlauf eines Szenarios des Beispielnetzwerks.....	327
Abbildung 4.27: Grafische Darstellung zur Berechnung anfallender Restbetriebskosten	337
Abbildung 4.28: Beispiel als Vorgangsknotennetz mit zugehörigen Projektdateien (durchgezogene Pfeile symbolisieren normale Nachfolgerbeziehungen, gepunktete Pfeile symbolisieren no-wait Vorrangbeziehungen).....	354
Abbildung 4.29: Beispiel zur Bestimmung eines Schedules mit PSGS für $\pi 1$ und $M 1$	360
Abbildung 4.30: Beispiel zur Bestimmung eines Schedules mit PSGS für $\pi 2$ und $M 1$	361
Abbildung 4.31: Anpassung der Startzeitpunkte von freien Vorgängen im destroy Schritt wenn $ESid < ESi$	375
Abbildung 4.32: Anpassung der Startzeitpunkte von freien Vorgängen im destroy Schritt wenn $LSid > LSi$	375

Abbildung 5.1:	Vorgangsknotennetzplan des Referenzprojekts Rückbau DWR inklusive RDB-Einbauten	447
Abbildung 5.2:	Normale und no-wait Nachfolger im Referenzprojekt Rückbau DWR inklusive RDB-Einbauten	450
Abbildung 5.3:	Stochastische Ausführung paralleler Stränge sequentieller Vorgänge im Referenzprojekt Rückbau DWR inklusive RDB-Einbauten	451
Abbildung 5.4:	Vorgangsknotennetzplan des Referenzprojekts Rückbau eines SWR inklusive RDB-Einbauten sowie Rückbau des Maschinenhauses (rot umkreist)	455
Abbildung 5.5:	Rückbau des Maschinenhauses des Referenzprojekts Rückbau eines SWR inklusive RDB-Einbauten sowie Rückbau des Maschinenhauses	456
Abbildung 5.6:	Vorgangsknotennetzplan des Referenzprojekts Rückbau einer Gesamtanlage bis zur Grünen Wiese ...	461
Abbildung 5.7:	Vorbereitende Maßnahmen im Referenzprojekt „Rückbau einer Gesamtanlage bis zur Grünen Wiese“	463
Abbildung 5.8:	Verlauf des Zielfunktionswerts „Projektgesamtkosten“ in Abhängigkeit der Rechendauer des MLS-Algorithmus für Szenario 101 des Referenzprojekts des Rückbaus einer Gesamtanlage	478
Abbildung 5.9:	Verlauf des Zielfunktionswerts „Projektgesamtkosten“ und der relative optimality gap in Abhängigkeit der Rechendauer des ALNS- Algorithmus für Szenario 101 des Referenzprojekts des Rückbaus einer Gesamtanlage	482

Abbildung 5.10: Verlauf des Zielfunktionswerts „Projektgesamtkosten“ und der relative optimality gap in Abhängigkeit der Rechendauer des MLS- und des ALNS-Algorithmus für Szenario 101 des Referenzprojekts des Rückbaus einer Gesamtanlage ...	483
Abbildung 5.11: Projektgesamtkosten und relative optimality gap von Szenario 101 des DWR-Referenzprojekts bei der ausschließlichen Optimierung	496
Abbildung 5.12: Projektgesamtkosten und relative optimality gap von Szenario 101 des DWR-Referenzprojekts bei der Optimierung mit Warmstartlösung	497
Abbildung 5.13: Projektgesamtkosten und relative optimality gap von Szenario 101 des DWR-Referenzprojekts bei der Optimierung mit dem in dieser Arbeit entwickelten Lösungsverfahren	498
Abbildung 5.14: Projektgesamtkosten und relative optimality gap von Szenario 101 des SWR-Referenzprojekts bei der ausschließlichen Optimierung	500
Abbildung 5.15: Projektgesamtkosten und relative optimality gap von Szenario 101 des SWR-Referenzprojekts bei der Optimierung mit Warmstartlösung	501
Abbildung 5.16: Projektgesamtkosten und relative optimality gap von Szenario 101 des SWR-Referenzprojekts bei der Optimierung mit dem in dieser Arbeit entwickelten Lösungsverfahren	503
Abbildung 5.17: Projektgesamtkosten und relative optimality gap von Szenario 101 des Referenzprojekts „Gesamter Rückbau“ bei der Optimierung mit dem in dieser Arbeit entwickelten Lösungsverfahren	505

Abbildung 5.18: Kostenverlauf in Abhängigkeit der Rechendauer der Zielfunktionswerte sowie der relative optimality gaps des Lösungsverfahrens, der ausschließlichen Optimierung und der Optimierung mit Warmstartlösung für Szenario 101 des DWR-Referenzprojekts 508

Abbildung 5.19: Kostenverlauf in Abhängigkeit der Rechendauer der Zielfunktionswerte sowie der relative optimality gaps des Lösungsverfahrens, der ausschließlichen Optimierung und der Optimierung mit Warmstartlösung für Szenario 101 des SWR-Referenzprojekts. Verlauf bis keine Verbesserung mehr gefunden wurde. 509

Abbildung 5.20: Zusammenhang zwischen gewichteter Summe und Kosten der optimierten Schedules des Referenzprojekts des Rückbaus einer Gesamtanlage 514

Abbildung 5.21: Verschiebung der Schedule-Bewertungen bei geänderten Gewichtungen der Robustheitsmaße im Robustheits-Kosten-Diagramm im Vergleich zu Abbildung 5.20 für das Referenzprojekt des Rückbaus einer Gesamtanlage 520

Tabellenverzeichnis

Tabelle 2.1:	Reaktortypen und deren Anzahl in Betrieb befindlicher sowie Anzahl stillgelegter Reaktoren.....	36
Tabelle 2.2:	Anzahl Kreisläufe vom Reaktor bis zur Turbine, verwendetes Kühlmittel und verwendeter Moderator je Reaktortyp	39
Tabelle 2.3:	Kernenergie rückstellungen zum 31.12.2014	157
Tabelle 2.4:	Geschätzte Entsorgungskosten aus dem kerntechnischen Rückbau vereinheitlicht und inflationiert	158
Tabelle 2.5:	Entsorgungskosten vereinheitlicht inflationiert inkl. nuklearspezifischer Kostensteigerung.....	159
Tabelle 3.1:	Anforderungen an die Projektplanungsmethode	190
Tabelle 3.2:	Überblick über operative Planungsansätze für Rückbauprojekte	235
Tabelle 4.1:	Gegenüberstellung der allgemeinen Scheduling Probleme	330
Tabelle 4.2:	Vergleich von Robustheitstypen	394
Tabelle 4.3:	Abwandlungsmöglichkeiten zur Bewertung von Puffern	412
Tabelle 4.4:	Pufferfunktionen nach Khemakhem und Chtourou (2013)	414
Tabelle 4.5:	Gewichtungen für Pufferfunktionen nach Khemakhem und Chtourou (2013)	416
Tabelle 4.6:	Im Rahmen dieser Arbeit gewählte Robustheitsmaße	434

Tabelle 4.7: Den ausgewählten Maßen zugeordnete Gewichte für die Untersuchung in Kapitel 5.2.5 436

Tabelle 5.1: Charakteristika des Referenzprojekts Rückbau DWR inklusive RDB-Einbauten 445

Tabelle 5.2: Vorgangsnamen des Referenzprojekts Rückbau DWR inklusive RDB-Einbauten 448

Tabelle 5.3: Charakteristika des Referenzprojekts Rückbau SWR inklusive RDB-Einbauten sowie Rückbau des Maschinenhauses 453

Tabelle 5.4: Charakteristika des Referenzprojekts Rückbau einer Gesamtanlage bis zur Grünen Wiese 459

Tabelle 5.5: Eigenschaften der simulierten Szenarien zur Kalibrierung und zum Testen 469

Tabelle 5.6: Kalibrierungsergebnisse bei 2000 Experimenten in *irace* und unterschiedlichen Zeitlimits 474

Tabelle 5.7: Intervallgrenzen für den MLS-Algorithmus der Szenarien 101 bis 105 des Referenzprojekts des Rückbaus einer gesamten Anlage (bestimmt in Langzeittests mit einer Rechendauer von 28.800 Sekunden) 480

Tabelle 5.8: Langzeittests des MLS-Algorithmus mit einem Zeitlimit $T=28.800$ Sekunden (480 Minuten = 8 Stunden) mit den Angaben der Rechendauern bis keine Verbesserung des Zielfunktionswertes innerhalb des Zeitlimits mehr gefunden wird (angewendet auf die Szenarien 101 bis 105 des Referenzprojekts des Rückbaus einer Gesamtanlage) 481

Tabelle 5.9:	Intervallgrenzen und relative optimality gaps der übergebenen Startlösung für den ALNS-Algorithmus der Szenarien 101 bis 105 des Referenzprojekts des Rückbaus einer gesamten Anlage (bestimmt in Langzeittests mit 28.800 Sekunden Rechendauer (480 Minuten = 8 Stunden), wovon dem MLS-Algorithmus 2.806 Sekunden und dem ALNS-Algorithmus 25.994 Sekunden Rechendauer zugeteilt wird).....	485
Tabelle 5.10:	Langzeittests des ALNS-Algorithmus mit einem Zeitlimit $T=28.800$ Sekunden (480 Minuten = 8 Stunden; wovon dem MLS-Algorithmus 2.806 Sekunden und dem ALNS-Algorithmus 25.994 Sekunden Rechendauer zugeteilt wird) mit den Angaben der Rechendauern bis keine Verbesserung des Zielfunktionswertes innerhalb des Zeitlimits mehr gefunden wird (angewendet auf die Szenarien 101 bis 105 des Referenzprojekts des Rückbaus einer Gesamtanlage).....	486
Tabelle 5.11:	average gap nach der Anwendung des MLS- sowie des ALNS-Algorithmus bei unterschiedlicher Aufteilung der Gesamtrechendauer von 3.600 Sekunden auf die beiden Algorithmen. Aufsteigend sortiert nach dem Zeitlimit x des MLS-Algorithmus	488
Tabelle 5.12:	Auswahl an optimierten Schedules und deren Eigenschaften des Referenzprojekts des Rückbaus einer Gesamtanlage sortiert nach der relative optimality gap	492

Tabelle 5.13: Gegenüberstellung der Rechendauern, der berechneten Zielfunktionswerte und der relative optimality gaps. Ergebnisse der Optimierung mit Hilfe des entwickelten Lösungsverfahrens, der ausschließlichen Optimierung und der Optimierung mit Warmstartlösung. Je Referenzprojekt auf Szenario 101 angewendet. 506

Tabelle 5.14: Optimierte Schedules und deren Eigenschaften des Referenzprojekts des Rückbaus einer Gesamtanlage sortiert nach der gewichteten Summe der Robustheit (Rang)..... 512

Tabelle 5.15: Eigenschaften des günstigsten und robustesten Schedules sowie einiger der potentiell interessanten Schedules des Referenzprojekts des Rückbaus einer Gesamtanlage auf der grünen Linie aus Abbildung 5.20, sortiert nach der gewichteten Summe der Robustheitsmaße 515

Tabelle 5.16: Angepasste Gewichtungsfaktoren der verwendeten Robustheitsmaße zur Durchführung einer Sensitivitätsanalyse 518

Abkürzungsverzeichnis

AHP	Analytic Hierarchy Process
ALNS	Adaptive Large Neighbourhood Search
ARCS	Austrian Research Centre Seibersdorf
ARS	Akutes Strahlensyndrom
AtDeckV	Verordnung über die Deckungsvorsorge nach dem Atomgesetz (Atomrechtliche Deckungsvorsorge-Verordnung – AtDeckV)
AtG	Gesetz über die friedliche Verwendung der Kernenergie und den Schutz gegen ihre Gefahren (Atomgesetz)
AtKostV	Kostenverordnung zum Atomgesetz
AtVfV	Verordnung über das Verfahren bei der Genehmigung von Anlagen nach §7 des Atomgesetzes (Atomrechtliche Verfahrensverordnung – AtVfV)
AtZüV	Verordnung für die Überprüfung der Zuverlässigkeit zum Schutz gegen Entwendung oder Freisetzung radioaktiver Stoffe nach dem Atomgesetz (Atomrechtliche Zuverlässigkeitsüberprüfungs-Verordnung – AtZüV)
BAFA	Bundesamt für Wirtschaft und Ausfuhrkontrolle

BAStrISchG	Gesetz über die Errichtung eines Bundesamtes für Strahlenschutz
BfE	Bundesamt für kerntechnische Entsorgung
BfKEG	Gesetz über die Errichtung eines Bundesamtes für kerntechnische Entsorgung
BfS	Bundesamt für Strahlenschutz
BIM	Building information models
BImSchG	Gesetz zum Schutz vor schädlichen Umwelteinwirkungen durch Luftverunreinigungen, Geräusche, Erschütterungen und ähnliche Vorgänge (Bundes-Immissionschutzgesetz – BImSchG)
BMUB	Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit
CANDEREM	Canadian Decontamination and Remediation Process
CCM	Critical chain method
CCPM	Critical chain project management
CORD	Chemical Oxidation Reducing Decontamination
CPM	Critical Path Method
DBMS	Datenbankmanagementsystem
DPS	Destroy Predecessors And Successors (Destroy Operator)
DTI	Destroy Time Interval (Destroy Operator)

EAGV	Vertrag zur Gründung der Europäischen Atomgemeinschaft
EndlagerVIV	Verordnung über Vorausleistungen für die Einrichtung von Anlagen des Bundes zur Sicherstellung und zur Endlagerung radioaktiver Abfälle (Endlagervorausleistungsverordnung – EndlagerVIV)
EntsorgFondsG	Gesetz zur Errichtung eines Fonds zur Finanzierung der kerntechnischen Entsorgung (Entsorgungsfondsgesetz – EntsorgFondsG)
ER-Modell	Entity-Relationship-Modell
ESK	Entsorgungskommission
EURATOM	Europäischen Atomgemeinschaft
EVU	Energieversorgungsunternehmen
EW	Exempt Waste
FLP	Fuzzy linear program
GAN	General Activity Network
GERT	Graphical Evaluation and Review Technique
GG	Grundgesetz
GPR	Generalized Precedence Relations
GRS	Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit
HAW	Hochradioaktive Wärme entwickelnde Abfälle

HLW	High level waste
IAEA	International Atomic Energy Agency
IEA	International Energy Agency
ILW	Intermediate level waste
KTA	Kerntechnischer Ausschuss
LLW	Low level waste
LOMI	Low Oxidation State Metal Ion
LP	Lineares Programm (engl. „linear program“)
MEDOC	Metal Decontamination by Oxidation with Cerium
MILP	Gemischt-ganzzahliges lineares Programm (engl. „Mixed Integer Linear Program“)
MIP	Gemischt-ganzzahliges Programm (engl. „Mixed integer program“)
MLS	Multi-Start local Search
MPM	Metra Potential Method
MRCPSP	Multi-Mode Resource-Constrained Project Scheduling Problem
MZFR	Mehrzweckforschungsreaktor (auf dem Gelände des Karlsruher Instituts für Technologie, Campus Nord)
NDPSP	Nuclear Dismantling Project Scheduling Problem
NEA	Nuclear Energy Agency

OECD	Organisation for Economic Co-operation and Development
PERT	Program Evaluation and Review Technique
PMS	Projektmanagement-Software
PPS-Systeme	Projektplanungs- und Steuerungssysteme
PSGS	Parallel Schedule Generation Scheme
RACP	Resource Availability Cost Problem
RACPT	Resource Availability Cost Problem with Tardiness Penalty
RCPSP	Resource-Constrained Project Scheduling Problem
RCPSPDC	Resource-Constrained Project Scheduling Problem with Discounted Cashflows
RDBMS	Relationales DBMS
REDOX	Reducing Oxidation
RIP	Resource Investment Problem
RIPT	Resource Investment Problem with Tardiness Penalty
RLPSP	Resource Leveling Project Scheduling Problem
RSK	Reaktorsicherheitskommission
SSK	Strahlenschutzkommission
StandAG	Gesetz zur Suche und Auswahl eines Standortes für ein Endlager für hochradioaktive Abfälle (Standortauswahlgesetz – StandAG)

StrISchV	Verordnung über den Schutz vor Schäden durch ionisierende Strahlen (Strahlenschutzverordnung – StrISchV)
StrVG	Gesetz zum vorsorgenden Schutz der Bevölkerung gegen Strahlenbelastung (Strahlenschutzvorsorgegesetz – StrVG)
UIG	Umweltinformationsgesetz
UNO	United Nations Organization
UVP	Umweltverträglichkeitsprüfung
UVPG	Gesetz über die Umweltverträglichkeitsprüfung
VAK	Versuchsatomkraftwerk Kahl
VLLW	Very low level waste
VSLW	Very short lived waste
VwVfG	Verwaltungsverfahrensgesetz
WAIS	Wasserabrasiv-Injektorstrahlschneiden
WAK	Wiederaufbereitungsanlage Karlsruhe (auf dem Gelände des Karlsruher Instituts für Technologie, Campus Nord)
WASS	Wasserabrasiv-Suspensionsstrahlschneiden
WNA	World Nuclear Association

Symbolverzeichnis

Symbolverzeichnis zur Szenariosimulation (Kapitel 4.3)

G	GERT-Netzplan
E	Menge an Vorgängen eines GERT-Netzplans
N	Menge an Knoten eines GERT-Netzplans
i, j	Vorgang $i, j \in 1, \dots, J$
J	Letzter Vorgang, i.d.R. ein Dummy-Vorgang, der weder eine Dauer noch eine Ressourceninanspruchnahme besitzt
p_i	Ausführungswahrscheinlichkeit des Vorgangs i
O_k	Menge aller vom Knoten k ausgehenden Vorgänge
mf_i	Maximale Anzahl an Ausführungen eines Vorgangs i
u	Untere Zahl der Grundmenge einer Zugehörigkeitsfunktion einer Fuzzy-Zahl
m	Mittlere Zahl der Grundmenge einer Zugehörigkeitsfunktion einer Fuzzy-Zahl
o	Obere Zahl der Grundmenge einer Zugehörigkeitsfunktion einer Fuzzy-Zahl

m_l	Linke Intervallgrenze, bei der die Zugehörigkeitsfunktion einer Fuzzy-Zahl den Wert 1 annimmt
m_r	Rechte Intervallgrenze, bei der die Zugehörigkeitsfunktion einer Fuzzy-Zahl den Wert 1 annimmt
t_o	Optimistische, d. h. kürzeste, Vorgangsdauer eines stochastisch verteilten Vorgangs
t_p	Pessimistische, d. h. längste, Vorgangsdauer eines stochastisch verteilten Vorgangs
t_ω	Wahrscheinlichste Vorgangsdauer eines stochastisch verteilten Vorgangs
p, q	Formparameter der Beta-Verteilung

Symbolverzeichnis zur Beschreibung von Schedulingproblemen (Kapitel 3.3 sowie Kapitel 4.4.1 bis 4.4.4)¹

A	Menge aller Vorgänge eines Schedules
E	Menge, in der alle „normalen“ Vorgänger-Nachfolger-Beziehungen enthalten sind
E^{nw}	Menge, in der alle no-wait Vorrangbeziehungen enthalten sind
M_i	Anzahl der verschiedenen möglichen Ausführungsvarianten (Modi) für Vorgang i
m	Ausführungsvariante (Modus) eines Vorgangs aus der Menge M_i aller möglichen Modi für Vorgang i
t	Zeitpunkte $t \in 1, \dots, \bar{T}$
ES_j	Frühestmöglicher Startzeitpunkt von Vorgang j
LS_j	Spätestmöglicher Startzeitpunkt von Vorgang j
\bar{T}	Obere Schranke für die Projektdauer, beispielsweise $\sum_{j \in A} d_j$
$d_{i,m}$	Dauer von Vorgang i in Modus m ; es gilt: $d_{i,m} \in \mathbb{Z}_0^+$
$S(t)$	Vorgänge, die zum Zeitpunkt t ausgeführt werden
s_j	Startzeitpunkt von Vorgang j

¹ Hierbei werden lediglich Symbole beschrieben, die nicht bereits im Symbolverzeichnis zum Kapitel 4.3 aufgeführt sind oder die in diesen Kapiteln eine andere Bedeutung haben.

R	Menge aller erneuerbaren Ressourcen
R^n	Menge aller nicht-erneuerbaren Ressourcen
R^c	Menge aller kumulativen Ressourcen
\underline{R}_k^c	Mindestkapazität der kumulativen Ressource $k \in R^c$
\overline{R}_k^c	Höchstkapazität der kumulativen Ressource $k \in R^c$
r_{0k}^c	Vorbelegung der kumulativen Ressource $k \in R^c$ zum Zeitpunkt 0
$-r_{iS_k}^c$	Anzahl entnommener Einheiten aus der kumulativen Ressource $k \in R^c$ zu Beginn (t_{iS}) eines Vorgangs i ; es gilt $-r_{iS_k}^c \in \mathbb{Z}_{\geq 0}$
$r_{iC_k}^c$	Anzahl eingefügter Einheiten in die kumulative Ressource $k \in R^c$ zum Abschlusszeitpunkt (t_{iC}) des Vorgangs i ; es gilt $r_{iC_k}^c \in \mathbb{Z}_{\geq 0}$
k	Ressource $k \in R \cup R^n$
$r_{i,k,m}$	Ressourcenverbrauch/Ressourcenbedarf der erneuerba- ren Ressource $k \in R$ durch Vorgang i in Modus m ; es gilt: $r_{i,m,k} \in \mathbb{Z}_0^+$
$q_{i,k,m}$	Ressourcenverbrauch/Ressourcenbedarf der nicht- erneuerbaren Ressource $k \in R^n$ durch Vorgang i in Modus m ; es gilt: $q_{i,k,m} \in \mathbb{Z}_0^+$
a_k	Entscheidungsvariable für die Anzahl benötigter Einheiten der Ressource k (benötigte Kapazität der Ressource k)

a_k^{max}	Maximale Kapazität von Ressource k ; es gilt: $a_k^{max} \in \mathbb{Z}^+$
$x_{i,m,t}$	Binäre Entscheidungsvariable, 1 falls Vorgang i in Modus m zum Zeitpunkt t begonnen wird, 0 sonst
c_k	Kostenfaktor für eine Einheit der Ressource $k \in R \cup R^n$; es gilt $c_k \in \mathbb{Z}_0^+$
cf_j	Zahlungsstrom, der mit dem jeweiligen Vorgang j einhergeht; positive cf_j entsprechen Einzahlungen, negative cf_j entsprechen Auszahlungen
b_i	Höhe der Reduktion oder Höhe des Anstiegs der Restbetriebskosten je Zeiteinheit nach der Fertigstellung von Vorgang i ; es gilt $b_i \in \mathbb{Z}$
α	Verwendeter Diskontierungszinssatz in Prozent
D	Zeitpunkt, zu dem das Projekt abgeschlossen sein muss (Deadline)
p	Höhe der Strafkosten für die Überschreitung von D je Zeiteinheit
ct_k	Kosten der erneuerbaren Ressource k je Zeiteinheit
z_{kt}	Ressourcenbedarf der erneuerbaren Ressource k zum Zeitpunkt t
l_{ij}	Minimale zeitliche Verzögerung zwischen dem Startzeitpunkt von Vorgang i und dem Startzeitpunkt von Vorgang j

Symbolverzeichnis zur Beschreibung des Lösungsalgorithmus des Scheduling Problems dieser Arbeit (Kapitel 4.4.5) sowie zur Kalibrierung und Verwendung der Parameter (Kapitel 5.2)²

$\overline{E^{nw}}$	Menge, in der alle rückwärtsgerichteten Pfeile der no-wait Vorrangbeziehung enthalten sind ($\overline{E^{nw}} = \{(j, i): (i, j) \in E^{nw}\}$)
C_p	Strong component mit der Nummerierung p
$C(G_C)$	Menge, in der alle strong components zusammengefasst werden: $C = \{C_1, \dots, C_p\}$
A_C	Menge aller Vorgänge der strong component C
π	Reihenfolge der Einplanung der strong components, die sogenannte sequence der strong components
C_{π_s}	Strong component aus der sequence π , die in der Iteration s eingeplant wird
M	Modusvektor, der die Moduszuweisung aller Vorgänge einer sequence enthält
$\delta_{i,j}$	Minimaler start-to-start time lag zwischen den Vorgängen i und j

² Hierbei werden lediglich Symbole beschrieben, die nicht bereits im Symbolverzeichnis zu den Kapiteln 3.3 sowie 4.4.1 bis 4.4.4 aufgeführt sind oder die in diesem Kapitel eine andere Bedeutung haben.

Δ^t	Kostenänderung aufgrund der Einplanung einer strong component zum Zeitpunkt t
t^{best}	Zeitpunkt, zu dem die geringsten Kostenänderungen Δ^t bei der Einplanung einer strong component anfallen
c^{best}	Von einem Algorithmus identifizierter Schedule mit den geringsten Kosten
T	Zeitlimit zur Durchführung des MLS-Algorithmus
p^M	Pertubationsparameter für den Modusvektor (begrenzt die maximale Anzahl an Perturbationen des Modusvektors auf $p^M * A $)
p^S	Pertubationsparameter für die sequence der strong components (begrenzt die maximale Anzahl an Perturbationen der sequence der strong components auf $p^S * C $)
M^{best}	Modusvektor, der bisher zu einem Schedule mit den geringsten Kosten geführt hat
π^{best}	Sequence der strong components, die bisher zu einem Schedule mit den geringsten Kosten geführt hat
π^{it}	Sequence der strong components, die durch die Perturbation von π^{best} erstellt wurde
M^{it}	Modusvektor, der durch die Perturbation von M^{best} erstellt wurde

c^{it}	Schedule, der durch die Perturbation mit π^{it} und M^{it} erstellt wurde
$c^{initial}$	Zulässiger Schedule für den ALNS-Algorithmus als Startlösung ($c^{initial}$ ist das Ergebnis des MLS-Algorithmus)
$c^{proposed}$	Ein durch den recreate Operator berechneter Schedule
$freeVar$	Maximale Anzahl an Entscheidungsvariablen im ALNS-Algorithmus
$varPerMode$	Maximale Anzahl an Entscheidungsvariablen je Modus im ALNS-Algorithmus
D	Im ALNS-Algorithmus beschreibt D keine Deadline, sondern ist die Menge an verfügbaren destroy Operatoren
P	Menge an Wahrscheinlichkeiten, anhand welcher destroy Operatoren gewählt werden. Die Wahrscheinlichkeiten ergeben in Summe eins ($\sum_{p \in P} p = 1$). In Kapitel 5.2.1 werden die Wahrscheinlichkeiten der in dieser Arbeit verwendeten destroy Operatoren bestimmt.
$initialFreeVar$	Initiale Angabe der maximalen Anzahl an Entscheidungsvariablen im ALNS-Algorithmus
$initialVarPerMode$	Initiale Angabe der Anzahl an Entscheidungsvariablen je Modus im ALNS-Algorithmus

<i>initialTimePerIteration</i>	Initiale Angabe der Zeitbeschränkung je Iteration (für den MIP-Solver) im ALNS-Algorithmus
<i>timePerIteration</i>	Zeitbeschränkung je Iteration (für den MIP-Solver) im ALNS-Algorithmus
α	Faktor zum Vergrößern von <i>freeVar</i>
β	Faktor zum Vergrößern von <i>varPerMode</i>
<i>destroyed candidate (DC)</i>	In dieser Variable werden für einen Schedule Listen über die Modi, in denen die Vorgänge des Schedules ausgeführt werden können, sowie für jeden Vorgang der früheste (ES_i^d) und späteste Startzeitpunkt (LS_i^d) gespeichert.
ES_i^d	Frühester Startzeitpunkt eines freien Vorgangs i
LS_i^d	Spätester Startzeitpunkt eines freien Vorgangs i
s_i	Startzeitpunkt eines freien Vorgangs i im initialen Schedule vor dem destroy Schritt
T^{max}	Gesamtdauer des untersuchten Schedules

**Symbolverzeichnis zur Beschreibung von Robustheitskriterien
(Kapitel 4.5)**

P	Menge der Pläne, die verglichen werden sollen
$a, b, p = 1 \dots m \in P$	Pläne a, b und p aus der Menge P der insgesamt m Pläne
D_a	Dauer des Plans a
V	Menge an Vorgängen
$i, j = \{1, \dots, J\} \in V$	Vorgänge i und j aus der Menge V der insgesamt n Vorgänge
	Wird ein Vorgang in einem der Pläne mehrfach ausgeführt, so wird jede Wiederholung als eigenständiger Vorgang behandelt und notiert
$V^a \subseteq V$	Menge der Vorgänge, die in Plan a vorgesehen sind
$VV^a \subseteq V^a$	Menge voneinander verschiedener Vorgänge in Plan a . Wiederholte Vorgänge sind hier nur einmal enthalten.
d_i^a	Dauer von Vorgang i in Plan a
K	Menge der Ressourcentypen
$r_{ik}^a, k \in K$	Menge an Ressourcen von Typ k , die Vorgang i in Plan a benötigt, um ausgeführt zu werden
R_k^a	Menge der von Typ k insgesamt verfügbaren Ressourcen in Plan a

$r(i)$	Vorgangsrang: Maximale Anzahl an Vorgängen die beendet sein müssen, damit Vorgang i starten kann.
GP_i^a	Gesamtpuffer von Vorgang i in Plan a . Der Gesamtpuffer ist die Zeit, die Vorgang i nach hinten verschoben werden kann, ohne die Gesamtprojektdauer zu verlängern.
FP_i^a	Freier Puffer von Vorgang i in Plan a : Zeiteinheiten, die Vorgang i später enden kann, als geplant, ohne den Start des nachfolgenden Vorgangs zu verschieben.
GS_i^a	Geplanter Startzeitpunkt von Vorgang i in Plan a
S_i	Bei der Ausführung des Plans tatsächlich eintretender Startzeitpunkt von Vorgang i
$Pred(i)^a$	Menge der unmittelbaren Vorgänger von Vorgang i in Plan a
$Succ(i)^a$	Menge der unmittelbaren Nachfolger von Vorgang i in Plan a
$\overline{Pred(i)}^a$	Menge aller Vorgänger von Vorgang i in Plan a
$\overline{Succ(i)}^a$	Menge aller Nachfolger von Vorgang i in Plan a
$AA(i)^a$	Menge der Vorgänge, die in Plan a enden, bevor Vorgang i in Plan a beginnt

SSP_p^a	Aggregierter Freier Puffer der Vorgänge auf Pfad p in Plan a
$SP\%_i^a$	Anspruchsniveau bzgl. des Freien Puffers von Vorgang i in Plan a
NP^a	Anzahl der Pfade in Plan a
NSP_p^a	Anzahl an Vorgängen auf Pfad p in Plan a , die echt positiven Freien Puffer haben

1 Einleitung

1.1 Ausgangslage und Problemstellung

Mit jährlichen Ausgaben zwischen sechs und neun Billionen US-Dollar (dies entspricht ca. 8 % des globalen Bruttoinlandsprodukts) stellt die Ausführung von Großprojekten³ den größten „Investment Boom“ der Menschheitsgeschichte dar (Flyvbjerg, 2014, S. 6). Großprojekte zeichnen sich unter anderem durch hohe Kosten von teilweise über einer Milliarde US-Dollar oder Euro, lange Ausführungsdauern sowie viele unterschiedliche private und öffentliche Stakeholder aus (Flyvbjerg, 2014, S. 6). Flyvbjerg (2014) gibt zu bedenken, dass Großprojekte nicht mit kleineren Projekten vergleichbar sind und daher in einer anderen Weise gemanagt werden müssen⁴.

Viele Beispiele von Großprojekten zeigen, dass die ursprüngliche Planung nicht eingehalten werden konnte und in diesen Fällen in der Regel die Ausführungszeiten länger und die Projektkosten höher sind als geplant (Flyvbjerg, 2014, S. 10; Flyvbjerg et al., 2003, S. 1ff., 12ff.; Love et al., 2014; Skamris und Flyvbjerg, 1997). Gemäß Flyvbjerg (2014, S. 9f.) überschreiten 90 % aller Großprojekte die ursprünglich geplanten Kosten, wobei Kostenüberschreitungen bis zu 50 % gewöhnlich und Kostenüberschreitungen

³ Eine Abgrenzung von Großprojekten, die gemäß Flyvbjerg (2014) Kosten in Höhe von Hundert Millionen US-Dollar verursachen, zu Projekten anderer Größe, wie beispielsweise Megaprojekte, deren Kosten in Milliarden US-Dollar gemessen werden, ist in Flyvbjerg (2014, S. 6) zu finden. Im Folgenden wird der Begriff *Großprojekt* verwendet und bezeichnet Projekte mit Kosten von mehreren Hundert Millionen bis zu wenigen Milliarden US-Dollar oder Euro.

⁴ Weitere Informationen zu Großprojekten und deren Management sind in Flyvbjerg (2014, S. 6) zu finden.

über 50 % nicht ungewöhnlich sind. Flyvbjerg et al. (2003) fanden heraus, dass Kostenüberschreitungen von 50 bis 100 % in großen Transportprojekten normal und Kostenüberschreitungen von über 100 % nicht unüblich sind (Flyvbjerg et al., 2003, S. 44). Häufig liegen die Probleme in einer unzureichenden Planung und Steuerung der Großprojekte, die zu Planabweichungen führen (Flyvbjerg et al., 2003). Planabweichungen haben wiederum zur Folge, dass ungeplante Maßnahmen notwendig werden, sodass unter anderem ungeplante Zusatzkosten entstehen (Flyvbjerg, 2014, S. 12).

Beispiele von Großprojekten mit Zeit- und Kostenüberschreitungen sind viele zu finden. Flyvbjerg (2014) führen eine Liste solcher Projekte auf. Beispielsweise überstiegen die Kosten für den Bau des Schottischen Parlamentsgebäudes die ursprüngliche Planung um 1.600 % und der Bau des Sydney Opera Houses war 1.400 % teurer als geplant. In Deutschland weisen die prominenten Beispiele des Baus der Hamburger Elbphilharmonie (NDR, 2017), der Bau des Flughafens Berlin-Brandenburg (rbb, 2018) oder das Bahnprojekt Stuttgart21 (SWR, 2016) eine erhebliche Überschreitung der Projektdauer sowie der geplanten Projektkosten auf. Zum Zeitpunkt der Erstellung dieser Arbeit ist das Bauprojekt der Hamburger Elbphilharmonie bereits abgeschlossen. Dieses weist im Vergleich zu den ersten Plänen eine zeitliche Verzögerung um sechseinhalb Jahre und eine Verzehnfachung der ursprünglich geplanten Kosten auf (NDR, 2017).

Der Rückbau⁵ einer kerntechnischen Anlage stellt ebenfalls ein Großprojekt dar, welches mit einer Dauer von mehreren Jahren bis Jahrzehnten und Kosten von teilweise mehr als einer Milliarde Euro ebenfalls als Großprojekt bezeichnet werden kann (Europäische Kommission, 2016b, S. 33; OECD, 2016, S. 72; Stahl und Strub, 2012; Thierfeldt und Schartmann,

⁵ Eine Definition und Abgrenzung der Begriffe *Rückbau* und *Stilllegung* erfolgt in Kapitel 2.1.2 und der Begriff des *Rückbaus* wird in Kapitel 2.1.3 detaillierter beschrieben.

2012, S. 40). Bisher fertiggestellte und derzeit noch laufende kerntechnische Rückbauprojekte weisen ebenfalls große Abweichungen bzgl. der Projektdauer und der Projektkosten vom ursprünglichen Plan auf. Beispielsweise wurden die geplanten Kosten der kerntechnischen Rückbauprojekte des Mehrzweckforschungsreaktors (MZFR) und der Wiederaufbereitungsanlage (WAK) am Campus Nord des Karlsruher Instituts für Technologie bisher um 51 % (MZFR) bzw. um 58 % (WAK) überschritten (Forschungszentrum Karlsruhe, 2001; KIT, 2012/2014). Da in den kommenden Jahrzehnten viele Großprojekte des Rückbaus kerntechnischer Anlagen anstehen werden (NEA, 2015; Hübner et al., 2017b), wird in dieser Arbeit die Planung von Großprojekten anhand dieses Fallbeispiels exemplarisch untersucht und optimiert.

Die Stromerzeugung mit Hilfe der Kernkraft erlebte weltweit in den 1950er und 1960er Jahren ihren Aufschwung. Als Reaktion auf die weltweite Ölkrise im Jahr 1973 versuchten viele Staaten mit dem Bau neuer Kernkraftwerke ihre Abhängigkeit vom Erdöl zu verringern. Daher stieg weltweit die Anzahl der jährlich neu gebauten Kernkraftwerke zum Ende der 1970er Jahre auf 20 bis 40 (NEA, 2015). Durch die Unterstützung der Politik wurde auch in Deutschland der Neubau von Kernkraftwerken vorangetrieben (Neles, 2012, S. 1ff.). Die Gefahren, die von der Kernenergienutzung ausgehen, wurden in den Jahren 1979 im Kernkraftwerk Three Mile Island 2 und 1986 im Kernkraftwerk in Tschernobyl aufgrund des Austritts radioaktiver Nuklide Realität (Laufs, 2013). Unter anderem aus diesem Grund entschieden sich einige Staaten, wie beispielsweise Schweden, auf den Bau neuer Kernkraftwerke bzw. auf die Nutzung bereits fertiggestellter Kernkraftwerke zu verzichten (NEA, 2015; Hübner et al., 2017b). In Deutschland erfolgte eine Reaktion auf diese beiden Katastrophen erst einige Jahre später mit der „Vereinbarung zwischen der Bundesregierung und den Energieversorgungsunternehmen vom 14. Juni 2000“. Dieser Vertrag der damaligen Bundesregierung mit den Betreibern der deutschen Kernkraftwerke sieht unter anderem für jedes

Kernkraftwerk eine Restproduktionsmenge vor. Mit der Novellierung des Atomgesetzes (AtG) im Jahr 2002 wurde dieser Vertrag rechtlich umgesetzt (BMUB, 2002). Diese Novelle des Atomgesetzes⁶ legte die Restproduktionsmengen deutscher Kernkraftwerke erstmalig fest und war somit der Grundstein für den Ausstieg aus der Kernenergie in Deutschland. Im Jahr 2010 wurde dieser Ausstiegsbeschluss durch verlängerte Restlaufzeiten der Kernkraftwerke im Atomgesetz^{7,8} nochmals zeitlich hinausgezögert. Die in Folge eines Tsunamis entstandene Katastrophe im Kernkraftwerk Fukushima Daiichi in Japan führte zu einer Rücknahme der Laufzeitverlängerungen deutscher Kernkraftwerke und zu einem beschleunigten Ausstieg aus der Kernenergie in Deutschland. Die 13. Novelle des AtG⁹ aus dem Jahr 2011 legt die sofortige Abschaltung acht deutscher Kernkraftwerke und die schrittweise Abschaltung der restlichen neun Kernkraftwerke bis zum Jahr 2022 fest. (Di Fabio et al., 2013, S. 13ff.; Hohmuth, 2014, S. 68)

Nicht nur in Deutschland ist der sogenannte Atomausstieg ein Thema. Die Ereignisse im japanischen Kernkraftwerk führten auch in anderen Ländern wie der Schweiz, Belgien und Frankreich zu einer veränderten Atompolitik (IEA, 2014, S. 361; Wolling und Arlt, 2014, S. 11). Beispielsweise stimmten die Abgeordneten der französischen Nationalversammlung am 10.10.2014 für den ersten Artikel eines neuen Energiewende-Gesetzes, der die Senkung des Anteils der Kernkraft an der Stromproduktion von derzeit etwa 75 auf 50 % im Jahr 2025 festschreibt. Damit werden in Frankreich nach Einschätzung der French Nuclear Energy Society (SFEN) zusätzlich zum Kernkraftwerk Fessenheim an der deutsch-französischen Grenze 22

⁶ Gesetz zur geordneten Beendigung der Kernenergienutzung zur gewerblichen Erzeugung von Elektrizität vom 22. April 2002, BGBl. I Nr. 26 2002, S. 1351.

⁷ Elfte Gesetz zur Änderung des Atomgesetzes vom 8. Dezember 2010, BGBl. 2010 I Nr. 62, S. 1814.

⁸ Zwölftes Gesetz zur Änderung des Atomgesetzes vom 8. Dezember 2010, BGBl. 2010 I Nr. 62, S. 1814.

⁹ Dreizehntes Gesetz zur Änderung des Atomgesetzes vom 31. Juli 2011, BGBl. 2011 I Nr. 43, S. 1704.

weitere Atomreaktoren zur Stilllegung anstehen (Die Welt, 2014). Im Juli 2017 rechnete der damalige französische Umweltminister Nicolas Hulot damit, bis zum Jahr 2025 bis zu 17 Kernreaktoren abzuschalten (CDE, 2017; Zeit, 2017). Dieser Zeitplan wurde zwar Ende 2017 erneut verzögert (zdf, 2017), das Ziel der Abschaltung und des Rückbaus französischer Kernkraftwerke bleibt allerdings langfristig bestehen.

Neben politischen sind auch zunehmend wirtschaftliche und technische Gründe Auslöser für die Stilllegung¹⁰ von Kernkraftwerken. (Laraia, 2012, S. 15 f.; Thierfeldt und Schartmann, 2012) Dies betrifft nicht nur Kernkraftwerke zur Stromerzeugung, sondern auch Forschungsreaktoren (im Folgenden werden Kernkraftwerke und Forschungsreaktoren zusammengefasst als *kerntechnische Anlagen* bezeichnet). Bei Forschungsreaktoren kann allerdings auch der Abschluss eines Forschungsprogramms Grund für die Stilllegung sein (Laraia, 2012, S. 15 f.).

Weltweit gesehen gewinnt die Stilllegung von kerntechnischen Anlagen somit zunehmend an Bedeutung. „Wenn die heute noch laufenden Anlagen durchschnittlich 40 Jahre in Betrieb bleiben, dann werden in den nächsten zehn Jahren weltweit rund 160 Reaktoren, in den nächsten 20 Jahren sogar 350 Reaktoren abgeschaltet und dann abgerissen.“ (Neles, 2012, S. 18) Von den derzeit 455 in Betrieb befindlichen und im Power Reactor Information System (PRIS) der International Atomic Energy Agency (IAEA) gelisteten Reaktoren sind 98 (21,54 %) Reaktoren 40 Jahre oder älter. In den nächsten drei Jahren werden weitere 45 Reaktoren die Altersgrenze von 40 Jahren überschreiten. (IAEA, 2018a) Da die Kernreaktoren der sogenannten ersten Generation für eine Lebenszeit von ca. 30 Jahren und „neuere“ Kernreaktoren für 40 bis 60 Jahre Betriebszeit ausgelegt sind (WNA, 2018), ist davon auszugehen, dass einige dieser älteren Reaktoren altersbedingt stillgelegt und rückgebaut werden. Genauso verhält es sich

¹⁰ Der Begriff der *Stilllegung* wird in Kapitel 2.1.2 diskutiert und beschrieben.

bei den weltweit 225 in Betrieb befindlichen und den 13 kurzzeitig herunter gefahrenen (engl. temporary shutdown) Forschungsreaktoren, von denen 142 älter als 40 Jahre sind (IAEA, 2018b). Gemäß der World Nuclear Association (WNA) haben, Stand März 2018, 115 kommerzielle Reaktoren, 48 Prototyp- und Experimentalreaktoren und über 250 Forschungsreaktoren ihr Laufzeitende erreicht (WNA, 2018). Nur sehr wenige dieser Anlagen befinden sich im Rückbau oder werden bereits rückgebaut. Die meisten dieser Reaktoren warten noch auf ihren Rückbau.

Der Rückbau von kerntechnischen Anlagen rückt somit sowohl national als auch international in den Fokus der Energie- und Rückbauwirtschaft und wird in den kommenden Dekaden ein zunehmend wichtiger Bestandteil der Aktivitäten im nuklearen Sektor sein (Europäische Kommission, 2016b; NEA, 2015). Die Europäische Kommission rechnet damit, dass bis zum Jahr 2025 mehr als ein Drittel der 143 Reaktoren der EU-27 stillgelegt und anschließend rückgebaut werden (Wuppertal Institut für Klima, Umwelt, Energie GmbH, 2012). Im Nuclear Illustrative Program der Europäischen Kommission wird mit der Stilllegung von mehr als 50 Reaktoren bis zum Jahr 2025 gerechnet. Bis zum Jahr 2040 rechnet die Kommission damit, dass ca. 105 GW_e Leistung aus Kernkraftwerken stillgelegt werden. (Europäische Kommission, 2016a) Weltweit rechnet die Internationale Energieagentur (IEA) in ihrem World Energy Outlook 2014 bis zum Jahr 2040 mit der Stilllegung und dem Rückbau von fast 200 Reaktoren, was einer Kapazität von etwa 150 GW entspricht (IEA, 2014, S. 27, 383, 388). Vor allem in der EU, den USA, Russland und Japan rechnet die IEA mit den meisten kerntechnischen Rückbauprojekten (IEA, 2014, S. 383, 388). Die Studie von Hübner et al. (2017b) kam unter der Annahme verschiedener Szenarien zu ähnlichen Ergebnissen. Demnach beginnt bis zum Jahr 2027 je

nach Szenario weltweit bei 69 bis zu 103 Reaktoren von Kernkraftwerken der Rückbau (Hübner et al., 2017b).¹¹

Bisher sind nach Angaben der IEA bis zum Jahr 2014 weltweit lediglich zehn Reaktoren rückgebaut worden (IEA, 2014). Im Gegensatz dazu spricht die Europäische Kommission im Jahr 2016 von weltweit 16 (Europäische Kommission, 2016b) und die World Nuclear Association im Jahr 2017 von weltweit 17 (WNA, 2018) vollständig rückgebauten Kernreaktoren. Nach Angaben der Europäischen Kommission sind in Europa erst drei Reaktoren vollständig stillgelegt und rückgebaut worden (Europäische Kommission, 2016a,b). Die erfolgreich abgeschlossenen Rückbauprojekte sowie laufende Rückbauprojekte belegen, dass kerntechnische Anlagen trotz der Einzigartigkeit jeder Anlage heutzutage technisch sicher rückgebaut werden können (OECD, 2016; Thierfeldt und Schartmann, 2012, S. 21). Neben dem technischen Rückbau, der unter der Einhaltung aller Sicherheitsaspekte durchgeführt wird, spielt auch die ökonomische Betrachtung kerntechnischer Rückbauprojekte eine zentrale Rolle. Aufgrund fehlender Erfahrungswerte beim Rückbau kerntechnischer Anlagen (Europäische Kommission, 2016a; OECD, 2016) und aufgrund fehlender Planungsmethoden für die Rückbauplanung weisen bisher abgeschlossene bzw. laufende Rückbauprojekte zum Teil deutliche Abweichungen von den ursprünglichen Termin- und Kostenplanungen auf (OECD, 2016).

Insbesondere aufgrund der aktuell fehlenden Erfahrungswerte aber auch mit zunehmender Erfahrung ist die Planung unter der Berücksichtigung von Unsicherheiten durchzuführen. Darüber hinaus ist der Rückbau aufgrund des Strahlenschutzes vor seiner Ausführung zu genehmigen. Im Rahmen eines mehrjährigen Genehmigungsverfahrens ist ein hinreichend detaillierter Rückbauplan vorzulegen. Um diesen Anforderungen gerecht

¹¹ Informationen zum Markt kerntechnischer Rückbauprojekte, insbesondere eine Abschätzung der Anzahl anstehender kerntechnischer Rückbauprojekte unterschiedlicher Länder und deren Marktattraktivität, sind in Hübner et al. (2017b) zu finden.

zu werden und um Planänderungen und die damit verbundenen neuen Genehmigungsverfahren zu vermeiden, ist ein Rückbauplan nicht nur unter Unsicherheit und auf einer hinreichend detaillierten Ebene zu erstellen, sondern unter der gleichzeitigen Berücksichtigung verschiedener Einflussfaktoren, wie Dauern, Kosten und Ressourcenbedarfe einzelner Vorgänge. Unter der Berücksichtigung der genannten Herausforderungen wurden Rückbaupläne bisher zumeist händisch erstellt. Computergestützte, optimierende Verfahren zur Planung werden bisher nicht eingesetzt. Software wurde bei der Planung lediglich zur Speicherung und Visualisierung des „im Kopf erstellten“ Projektplans verwendet. Allerdings beinhaltet die Planung des Rückbaus einer kerntechnischen Anlage auf einer hinreichend detaillierten Ebene unter der gleichzeitigen Berücksichtigung von Unsicherheiten so viele Vorgänge, Ressourcen, Abhängigkeiten und Ausführungsalternativen, dass diese durch reines Nachdenken so gut wie nicht zu überblicken und zu optimieren ist.

1.2 Zielsetzung, Forschungsfrage und Lösungsweg

Um den in Kapitel 1.1 erläuterten Herausforderungen zu begegnen, wurde in dieser Arbeit ein Verfahren entwickelt, mit dem eine hinreichend detaillierte Planung unter der Berücksichtigung von Unsicherheiten ausgeführt werden kann. Aufgrund der Komplexität der Planung bietet sich die computergestützte Erstellung und Optimierung der Planung an. Mit Hilfe von computergestützten Algorithmen kann die umfangreiche Datenlage strukturiert erfasst und in einen sinnvollen und robusten Ablaufplan gebracht werden.

Dies stellt die Zielsetzung der vorliegenden Arbeit dar, in der ein computergestütztes Planungswerkzeug entwickelt wurde, mit dem ein hinreichend detaillierter Projektplan eines Großprojekts unter der Berücksichtigung von Unsicherheiten erstellt werden kann. Im Rahmen der

Bestimmung eines solchen Plans spielt vor allem die Identifikation eines robusten, d. h. gegenüber unerwarteten Ereignissen und Entwicklungen unempfindlichen, Plans eine zentrale Rolle.

Um diese Zielsetzung der vorliegenden Arbeit zu erreichen, soll folgende Forschungsfrage beantwortet werden:

Wie kann ein kostenminimaler, ex ante stabiler Projektplan für ein komplexes Großprojekt unter der Berücksichtigung von Unsicherheiten und unter Berücksichtigung relevanter Rahmenbedingungen entwickelt werden?

Zur Beantwortung dieser Forschungsfrage wird exemplarisch das Beispiel und somit die Rahmenbedingungen eines Großprojekts des kerntechnischen Rückbaus herangezogen. Ziel dieser Arbeit ist allerdings die Entwicklung eines übertragbaren Ansatzes, der durch geringe Anpassungen auch zur Planung von Großprojekten anderer Art eingesetzt werden kann.

Um ein Planungswerkzeug für den Rückbau kerntechnischer Anlagen unter der Berücksichtigung von Unsicherheiten zu erstellen, werden zunächst in Kapitel 2 die Rahmenbedingungen dieses Anwendungsfalls herausgearbeitet. Nach der Definition relevanter Begriffe (Kapitel 2.1) werden die bei der Planung zu berücksichtigenden technischen Rahmenbedingungen in Kapitel 2.2 näher beschrieben. Die besondere Berücksichtigung der Gefahrenstoffe und insbesondere der in kerntechnischen Anlagen herrschenden Radioaktivität werden durch die Beschreibung ihrer Gefahren für Lebewesen und die sich daraus beim Rückbau zu beachtenden Schutzmaßnahmen in Kapitel 2.3 erläutert. Einsetzbare Technologien (Kapitel 2.4) und rechtliche Rahmenbedingungen (Kapitel 2.5) sind sowohl bei der Planung als auch bei der Ausführung kerntechnischer Rückbauprojekte zu berücksichtigen. Das Großprojekt des Rückbaus einer kerntechnischen Anlage wird in Kapitel 2.6 hinsichtlich

verschiedener Planungsebenen beschrieben und der Fokus dieser Arbeit wird herausgearbeitet. Schlussfolgerungen des zweiten Kapitels sowie Anforderungen an ein Planungswerkzeug werden in Kapitel 2.7 zusammengefasst.

Basierend auf diesen Anforderungen werden in Kapitel 3 existierende Methoden zur Planung kerntechnischer Rückbauprojekte untersucht. Hierzu werden zunächst die Ziele und Anforderungen an ein Planungswerkzeug (Kapitel 3.1) abgeleitet sowie Begriffe zum weiteren Verständnis definiert (Kapitel 3.2). Als Grundlage für eine Analyse bisher verwendeter Planungsmethoden für Rückbauprojekte (Kapitel 3.4) werden in Kapitel 3.3 zunächst allgemeine Scheduling Methoden aus der Literatur vorgestellt und auf ihre Anwendbarkeit auf den Anwendungsfall des Rückbaus kerntechnischer Anlagen untersucht. Außerdem werden für den weiteren Verlauf der Arbeit die relevanten Eigenschaften der Netzplantechnik (Kapitel 3.5) und der Planung unter Unsicherheit (Kapitel 3.6) beschrieben. Aus den gewonnenen Erkenntnissen der Anforderungen an ein Planungswerkzeug zum Rückbau kerntechnischer Anlagen (Kapitel 2.7) sowie den Erkenntnissen existierender Planungsmethoden und der Planung von Großprojekten unter Unsicherheit werden relevante Eigenschaften eines geeigneten Planungswerkzeugs definiert (Kapitel 3.7).

Basierend auf den Anforderungen (Kapitel 3.1) und den identifizierten Eigenschaften (Kapitel 3.7) wird in Kapitel 4 ein Planungswerkzeug für den Rückbau kerntechnischer Anlagen konzipiert und die Implementierung wird beschrieben. Der allgemeine Modellaufbau wird zunächst in Kapitel 4.1 gezeigt. Im Anschluss werden die einzelnen Bestandteile des Planungswerkzeugs vom Expertensystem (Kapitel 4.2), über die Simulation von Szenarien (Kapitel 4.3), der Entwicklung einer Scheduling Methode zur Lösung deterministischer Probleme (Kapitel 4.4) bis zur Wahl eines robusten Rückbauplans (Kapitel 4.5) näher beschrieben.

Das in dieser Arbeit entwickelte Planungswerkzeug wird anschließend in Kapitel 5 mit Hilfe von drei Referenzprojekten kalibriert, verifiziert und getestet. Die verwendeten Referenzprojekte werden zunächst in Kapitel 5.1 beschrieben. Anschließend werden die einzelnen, durchzuführenden Schritte des Planungswerkzeugs anhand der Referenzprojekte vorgestellt (Kapitel 5.2). Zuletzt werden die berechneten Rückbaupläne beschrieben und evaluiert (Kapitel 5.3).

Abschließend wird diese Arbeit in Kapitel 6 zusammengefasst und kritisch gewürdigt. In diesem Zusammenhang wird dem Leser ein Ausblick auf zukünftige Forschungsarbeiten gegeben.

2 Rahmenbedingungen zum Rückbau kerntechnischer Anlagen

Der Rückbau kerntechnischer Anlagen ist ein spezieller Anwendungsfall des Gebäuderückbaus und zugleich ein spezieller Anwendungsfall von Großprojekten. Im Gegensatz zu den Prozessen sowie der Planung des Rückbaus von Gebäuden, welche bereits in vielen Arbeiten eingehend untersucht wurden (vgl. u. a. Schultmann (1998) oder Volk (2017)), stellt der Rückbau von kerntechnischen Anlagen ein neues Wissensgebiet sowohl in der Forschung als auch in der Praxis dar. Insbesondere die hohen Sicherheitsanforderungen aufgrund der gesundheitsgefährdenden ionisierenden Strahlung, der komplexe Aufbau und die Größe kerntechnischer Anlagen sind Gründe für die Existenz spezieller Anforderungen dieser Projekte, die sich von denen des Rückbaus von Gebäuden unterscheiden. Aufgrund dieser speziellen Projektanforderungen ergeben sich auch spezielle Anforderungen an dessen Planung.

Im Folgenden werden die Rahmenbedingungen erläutert, die sich aus den geschilderten Besonderheiten des Rückbaus kerntechnischer Anlagen ergeben. Das Verständnis dieser Rahmenbedingungen ist relevant, um diese in der Planung berücksichtigen zu können. Zunächst werden Begriffe erläutert und definiert (Kapitel 2.1). Da die Funktionsweise und technische Auslegung von Reaktoren einen Einfluss auf den Rückbau und damit auf die Planung hat, werden die physikalischen Grundlagen und verschiedene Anlagentypen in Kapitel 2.2 vorgestellt. Während des Rückbaus sind zu jeder Zeit die hohen Sicherheitsanforderungen einzuhalten. Diese Sicherheitsanforderungen bestehen unter anderem aufgrund der Auswirkungen ionisierender Strahlungen auf Lebewesen. Sowohl die Auswirkungen als auch vorgesehene Maßnahmen zum Schutz vor den Auswirkungen werden

in Kapitel 2.3 beschrieben. Insbesondere aufgrund der ionisierenden Strahlung sind spezielle Technologien beim Rückbau einzusetzen, die in Kapitel 2.4 vorgestellt werden. In Kapitel 2.5 werden die beim Rückbau einer kerntechnischen Anlage zu berücksichtigenden rechtlichen Vorgaben aufgezeigt. Auf der Grundlage dieser Anforderungen kann der Rückbau einer kerntechnischen Anlage als Großprojekt klassifiziert werden. Die wichtigsten Eigenschaften dieses Projekts sowie der sich hieraus ergebende Fokus der Projektplanung in dieser Arbeit unter den zuvor vorgestellten Rahmenbedingungen werden in Kapitel 2.6 aufgezeigt. Das Kapitel wird mit den sich an die Rückbauplanung ergebenden Schlussfolgerungen und Anforderungen in Kapitel 2.7 zusammengefasst.

2.1 Begriffsdefinitionen und -erläuterungen zum Rückbau kerntechnischer Anlagen

In dieser Arbeit werden einige zentrale Begriffe verwendet, die im Folgenden für ein eindeutiges Verständnis definiert und erläutert werden.

2.1.1 Kerntechnische Anlagen

Die Bezeichnung kerntechnische Anlage wird in verschiedenen Kontexten für unterschiedliche Arten von Anlagen verwendet. In § 2 Abs. 3a AtG¹² sind kerntechnische Anlagen alle Anlagen, die durch das Atomgesetz genehmigt werden müssen. Im Sinne des Atomgesetzes sind kerntechnische Anlagen

¹² Gesetz über die friedliche Verwendung der Kernenergie und den Schutz gegen ihre Gefahren (Atomgesetz), kurz AtG, vom 20.07.2017, BGBl. I 2017, S. 2808.

- a) „ortsfeste Anlagen zur Erzeugung oder zur Bearbeitung oder Verarbeitung oder zur Spaltung von Kernbrennstoffen oder zur Aufarbeitung bestrahlter Kernbrennstoffe [...],
- b) Aufbewahrungen von bestrahlten Kernbrennstoffen [...],
- c) Zwischenlagerungen für radioaktive Abfälle, wenn die Zwischenlagerungen direkt mit der jeweiligen kerntechnischen Anlage im Sinne des Buchstaben a oder b in Zusammenhang stehen und sich auf dem Gelände der Anlagen befinden“ (§2 Abs. 3a AtG)

Den Schwerpunkt dieser Arbeit bildet der Rückbau¹³ von Leistungs- und Forschungsreaktoren sowie der sie umgebenden Anlage (Punkt a: ortsfeste Anlagen zur Spaltung von Kernbrennstoffen). Aus diesem Grund wird in den folgenden Kapiteln der Begriff kerntechnische Anlage als Synonym für Leistungs- und Forschungsreaktoren und die jeweils zugehörige Anlage verwendet. Da der Rückbau von Endlagern (b) und Zwischenlagern (c) in absehbarer Zeit nicht ansteht, wird dieser im Rahmen dieser Arbeit nicht betrachtet. Darüber hinaus bestehen weltweit nur sehr wenige Anlagen zur Erzeugung, Bearbeitung oder Verarbeitung von Kernbrennstoffen sowie wenige Anlagen zur Aufbereitung bestrahlter Kernbrennstoffe (vgl. Punkt a). Somit liegt der Fokus dieser Arbeit auch nicht auf dem Rückbau dieser Anlagen.

Leistungsreaktoren sind Anlagen zur Erzeugung elektrischer Energie. Forschungsreaktoren werden dagegen nicht kommerziell, sondern für Forschungsexperimente eingesetzt. Bei beiden Anlagenarten existieren verschiedene Reaktortypen, die in Kapitel 2.2.3 näher beschrieben werden.

¹³ Der Begriff *Rückbau* wird in Kapitel 2.1.2 vom Begriff der *Stilllegung* abgegrenzt und in Kapitel 2.1.3 näher erläutert.

2.1.2 Leistungsbetrieb, Stilllegung, Nach- und Restbetrieb

Der Lebenszyklus einer kerntechnischen Anlage sieht zunächst die Errichtung und den Betrieb vor. Der Betrieb von Kernkraftwerken zur Stromerzeugung wird auch als *Leistungsbetrieb* bezeichnet und unterliegt einer Betriebserlaubnis sowie der atomrechtlichen Überwachung (§ 7 Abs. 1a AtG; BMUB, 2009). Nach der Beendigung des (Leistungs-)Betriebs wird die Anlage stillgelegt (vgl. Abbildung 2.1).

Der Begriff der *Stilllegung* in Bezug auf kerntechnische Anlagen ist nicht einheitlich definiert. Laraia (2012) diskutiert sehr ausführlich die Herkunft und die verschiedenen Bedeutungen des Begriffs der Stilllegung in verschiedenen Sprachen. In einigen Sprachen umfasse der Begriff der Stilllegung lediglich die Einstellung des Leistungsbetriebs. Allerdings beinhaltet der Begriff der Stilllegung gemäß seiner ursprünglichen Bedeutung aus dem Englischen („decommissioning“) die Einstellung des Leistungsbetriebs, alle Arbeiten und notwendigen gesetzlichen sowie administrativen Maßnahmen, die zur Entlassung einer kerntechnischen Anlage aus der atomrechtlichen Überwachung notwendig sind (Laraia, 2012, S. 1f.). Diese Definition des Begriffs der Stilllegung wird von weiteren Autoren verwendet (IAEA, 2007; Thierfeldt und Schartmann, 2012; WNA, 2018). Die englische Bezeichnung „Decommissioning and Dismantling“ beinhaltet somit einen übergeordneten und einen untergeordneten Begriff, da der Abbau („Dismantling“) bereits in der Stilllegung („Decommissioning“) enthalten sei (Laraia, 2012, S. 1f.).

Auch nach Ansicht der Deutschen Bundesregierung beinhaltet die Stilllegung einer kerntechnischen Anlage alle Maßnahmen, die nach der Erteilung einer Genehmigung zur Stilllegung durchgeführt werden, sodass diese Anlage keiner atomrechtlichen Überwachung mehr bedarf (Bundesregierung, 2015). Allerdings kann unter der Stilllegung einer kerntechnischen Anlage auch die „[...] endgültige Einstellung des auslegungsgemäßen Betriebs [...]“ (BMUB, 2010) bis zur konventionellen Weiternutzung oder

der Weiternutzung der Anlage im Geltungsbereich des Atomgesetzes verstanden werden (BMUB, 2010).

In Anlehnung an die Definition der Deutschen Bundesregierung werden im Folgenden unter der Stilllegung einer kerntechnischen Anlage die Einstellung des Leistungsbetriebs und die anschließenden Maßnahmen inkl. des Abbaus aller nuklearen¹⁴ Bauteile, die zur Entlassung der Anlage aus der atomrechtlichen Überwachung notwendig sind, verstanden. Es kann sich daran entweder eine konventionelle Weiternutzung der Gebäudestrukturen oder die vollständige Beseitigung aller Gebäudeteile anschließen. Der Abbau nuklearer oder nicht-nuklearer Bauteile sowie der Abbau von Gebäudestrukturen wird auch als *Rückbau*¹⁵ bezeichnet. In der Rechtsterminologie und somit auch im Atomgesetz wird zwar lediglich vom *Abbau* gesprochen, allerdings existieren vielfältige Publikationen, welche die Beseitigung von Gebäudestrukturen als Rückbau bezeichnen (vgl. bspw. Schultmann, 1998, 2003). Aus diesem Grund werden im Folgenden beide Begriffe synonym als Oberbegriff für alle Tätigkeiten verwendet, die nach dem Abschalten einer kerntechnischen Anlage stattfinden „[...] und darauf gerichtet [sind], die Anlage in tatsächlicher und rechtlicher Hinsicht zu beseitigen“ (Wittkamp, 2012, 12). Insbesondere umfassen diese Begriffe alle Vorgänge, die operativ auf der Baustelle ausgeführt werden.

Die Stilllegung einer kerntechnischen Anlage kann aus politischen, technischen oder wirtschaftlichen Gründen erfolgen (WNA, 2018; Thierfeldt und Schartmann, 2012). In Deutschland fiel beispielsweise im Jahr 2011 die politische Entscheidung des beschleunigten Ausstiegs aus der Kernenergienutzung zur Stromerzeugung. Diese Entscheidung hatte gesetzliche

¹⁴ Unter nuklearen Bauteilen werden alle Bauteile verstanden, die speziell für den Betrieb einer kerntechnischen Anlage notwendig sind und der atomrechtlichen Überwachung bedürfen.

¹⁵ Der Begriff *Rückbau* und seine enthaltenen allgemeinen Maßnahmen sind in Kapitel 2.1.3 beschrieben.

Beschlüsse zur Folge, welche die sofortige Einstellung des Leistungsbetriebs einiger Reaktoren und die stufenweise Abschaltung der übrigen Leistungsreaktoren bis zum Jahr 2022 in Deutschland festlegt. Technische Gründe für die Stilllegung von Reaktoren treten beispielsweise aufgrund von altersbedingten Verschleißerscheinungen oder veralteter Technik auf. Sehr häufig gehen mit technischen Gründen auch wirtschaftliche Gründe für eine Stilllegung einher, wenn beispielsweise Nachrüstmaßnahmen aus wirtschaftlicher Sicht nicht sinnvoll sind. Dies war beispielsweise beim Kernkraftwerk Gundremmingen A der Fall (Thierfeldt und Schartmann, 2012). Die Stilllegung von Reaktoren aus wirtschaftlichen Gründen kann auch aufgrund eines unerwartet sinkenden Strompreises, falschen Kalkulationen bei der Planung der Anlage oder erhöhten Kosten, z. B. durch neue Gesetze¹⁶ und Sicherheitsanforderungen oder steigende Rohstoffpreise, erfolgen.

Zur Beseitigung einer kerntechnischen Anlage bestehen prinzipiell drei Möglichkeiten, sogenannte *Stilllegungsstrategien* (vgl. Abbildung 2.1) (IAEA, 2011a; Thierfeldt und Schartmann, 2012):

1. Der direkte Rückbau (engl. „immediate dismantling“): Abbau der kerntechnischen Anlage oder von Anlagenteilen, sodass diese im Anschluss aus der atomrechtlichen Aufsicht entlassen werden können. Der direkte Rückbau findet in der Regel im Anschluss an die Einstellung des Leistungsbetriebs und der Nachbetriebsphase der Anlage statt.

¹⁶ Ein Beispiel hierfür ist das Wasserentnahmeentgelt in einigen Bundesländern in Deutschland. In Baden-Württemberg kostet es Kraftwerksbetreiber 0,01 €/m³ (voraussichtliche Erhöhung auf 0,015 €/m³ ab 01.01.2019, Haushaltsbegleitgesetz 2015/16 Baden-Württemberg) Wasser aus oberirdischen Gewässern zur Kühlung zu entnehmen. Durch die Einführung dieser Abgabe bzw. seine Erhöhung kommen zusätzliche Kosten auf die Betreiber zu. Bei üblichen Entnahmemengen von 100 m³ Wasser pro Sekunde und Kosten von 0,01 €/m³ Wasser entstehen Kosten in Höhe von 1 € pro Sekunde und damit 86.400 € pro Tag.

2. Sicherer Einschluss (engl. „deferred dismantling“ oder „safe enclosure“): „Der sichere Einschluss umfasst den Zustand und Vorgänge in einer abgeschalteten kerntechnischen Anlage nach Abtransport des Kernbrennstoffes, bei dem diese in ihren wesentlichen Bestandteilen im jeweiligen Zustand und für eine längere Zeit unverändert bleibt und das radioaktive Inventar sicher eingeschlossen bleibt.“ (BMUB, 2009) Anschließend erfolgt der Rückbau der Anlage.

3. Verschüttung (engl. „Entombment“): Bei der Verschüttung der Anlage, beispielsweise mit Beton ist es nicht das Ziel, die kerntechnische Anlage zu beseitigen, sondern einen dauerhaften sicheren Einschluss zu gewährleisten.

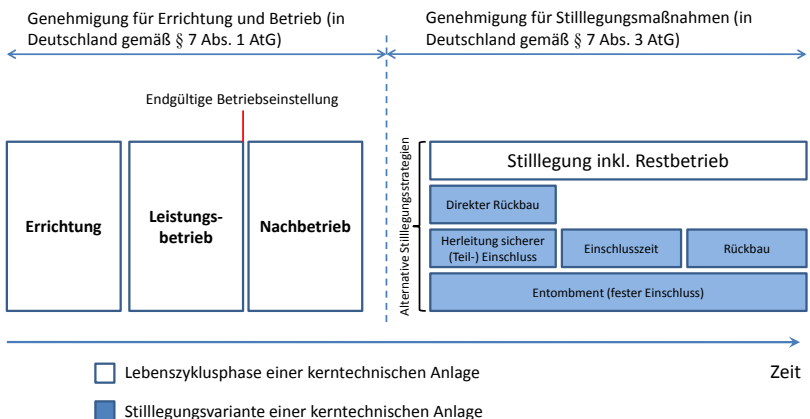


Abbildung 2.1: Lebenszyklus und Stilllegungsstrategien einer kerntechnischen Anlage (in Anlehnung an Brendebach (2015), IAEA (2011a) und Zeiher (2009))

Der größte Vorteil des direkten Rückbaus besteht darin, dass das Betriebspersonal und damit detaillierte Informationen über eine rückzubauende kerntechnische Anlage noch verfügbar sind. Dieses Know-how wird als

wichtiger Faktor für einen sicheren und kostengünstigen Rückbau angesehen. Aufgrund der Weiterbeschäftigung des Betriebspersonals beim direkten Rückbau werden direkte soziale Auswirkungen sowie die wirtschaftlichen Folgen für die Region, in der die kerntechnische Anlage steht, gemildert. Des Weiteren stehen Komponenten und Systeme, wie beispielsweise die Lüftungsanlagen, Leittechnik, Sicherheitseinrichtungen etc., einsatzfähig zur Verfügung und müssen nicht über eine längere Zeit kostenintensiv betrieben und in Stand gehalten werden. Allerdings besteht beim direkten Rückbau eine höhere Radioaktivität, sodass die Abbauarbeiten aufgrund der höheren Strahlenbelastung aufwendiger sind. Einerseits sind aufgrund der hohen Strahlung mehr Schutzmaßnahmen für Mitarbeiter vorzunehmen und die technischen Anforderungen an ferngesteuerte Zerlegetechniken (vgl. Kapitel 2.4) steigen. Ein weiterer Nachteil des direkten Rückbaus ist das erhöhte kontaminierte Abfallaufkommen, welches kostenintensiv verpackt und gelagert werden muss. Beim Rückbau nach einem sicheren Einschluss von üblicherweise 30 bis 60 Jahren steht zwar nicht mehr die gesamte Betriebsmannschaft zur Verfügung, sodass neues qualifiziertes Personal gefunden werden muss, allerdings hat sich die Radioaktivität aufgrund des radioaktiven Zerfalls verringert. Dadurch werden die Abbauarbeiten technisch einfacher, es besteht eine geringere Strahlenbelastung für das Betriebspersonal und das Volumen an radioaktivem Abfall nimmt ab. Mit dem Abklingen der Radioaktivität nimmt allerdings der messtechnische Aufwand zur radiologischen Bewertung zu. Des Weiteren müssen Systeme und Komponenten in Stand gehalten oder auf den neuesten Stand der Technik gebracht werden. Ein wesentlicher Nachteil des sicheren Einschlusses ist, dass die Anlage während des Einschlusses überwacht werden muss. Dadurch entstehen hohe Kosten, ohne dass Rückbauarbeiten ausgeführt werden. (DATF, 2013; IAEA, 2011a; Huger und Woodcock, 2016, S. 125; Thierfeldt und Schartmann, 2012, Zeiher, 2009, S. 10) Des Weiteren müssen die Gebäude oder Gebäudebereiche nach außen hin dicht verschlossen, das Eindringen Unbefugter gesichert sein und ein radiologisches Überwachungsprogramm realisiert werden (Zeiher,

2009, S. 8). Da der Aspekt der Dosisreduktion beim sicheren Einschluss heutzutage nur noch von untergeordneter Bedeutung ist, wird der sichere Einschluss heutzutage manchmal aus finanziellen Gründen angestrebt (Thierfeldt und Schartmann, 2012, S. 150). Die Stilllegungsstrategie der Verschüttung sieht vor, dass radioaktiv belastetes Material von einem strukturell langlebigen Material umhüllt bzw. eingekapselt wird. Hierbei ist ebenfalls ein langfristiges radiologisches Überwachungsprogramm notwendig (IAEA, 2011a, S. 10). Es besteht auch die Möglichkeit, die Strategien des direkten Rückbaus mit dem sicheren Einschluss zu kombinieren, indem beispielsweise einzelne Anlagenteile, wie die Dampferzeuger, zerlegt abgebaut und für einige Jahre zur Abklinglagerung verwahrt werden (Thierfeldt und Schartmann, 2012, S. 33).

Die International Atomic Energy Agency (IAEA) empfiehlt den direkten Rückbau als bevorzugte Rückbaustrategie anzuwenden (IAEA, 2014). Allerdings muss im Einzelfall geprüft werden, welche Stilllegungsstrategie am sinnvollsten ist. Unter diesen Umständen kann es auch sein, dass bei der Prüfung der Aspekte einer spezifischen kerntechnischen Anlage der sichere Einschluss empfohlen wird. Zur Wahl einer Stilllegungsstrategie für eine spezifische Anlage müssen immer allgemeine und spezifische Faktoren berücksichtigt werden. Dies sollte nach Anraten der IAEA mit Hilfe einer sogenannten multi-attribute analysis ausgewertet werden. (IAEA, 2005) Die Stilllegungsstrategie der Verschüttung (Entombment) ist nicht in allen Ländern mit kerntechnischen Anlagen erlaubt (Huger und Woodcock, 2016, S. 125). In Deutschland wird im „Leitfaden zur Stilllegung, zum sicheren Einschluss und zum Abbau von Anlagen oder Anlagenteilen nach § 7 des Atomgesetzes“ die Verschüttung als Stilllegungsstrategie ausgeschlossen (BMUB, 2009). In vielen westlichen Ländern wird heutzutage der direkte Rückbau als Stilllegungsstrategie favorisiert (Thierfeldt und Schartmann, 2009, S.146 ff).

In Deutschland ist entsprechend dem Verursacherprinzip der Betreiber einer kerntechnischen Anlage auch für dessen Rückbau verantwortlich

(Bundesregierung, 2015). Zugleich obliegt ihm die Wahl der Stilllegungsstrategie, wobei nur der direkte Rückbau oder der sichere Einschluss als Wahlmöglichkeiten gegeben sind (§ 7 Abs. 3 AtG, BMUB, 2009, S. 5). Die Strategien direkter Rückbau und sicherer Einschluss gemäß § 7 Abs. 3 AtG sind als gleichwertig anzusehen (BMUB, 2009, S. 5; Deutscher Bundestag, 2011). Neben dem direkten Rückbau oder dem sicheren Einschluss besteht ebenso die Möglichkeit die Anlage aus dem Geltungsbereich des Atomgesetzes zu entlassen und diese konventionell weiter zu nutzen (ESK, 2015, S. 4). Des Weiteren besteht die Möglichkeit die Anlage im Geltungsbereich des Atomgesetzes zu belassen und sie für andere Zwecke zu nutzen (ESK, 2015, S. 4). Vorstellbar wäre zum Beispiel der Umbau eines Kernkraftwerkes zu einem zentralen Zwischenlager, in welchem Großteile aus anderen Kernkraftwerken bis zur möglichen Endlagerung zwischengelagert werden. Nach Aussage der Bundesregierung wurde in Deutschland „[...] der sichere Einschluss als Stilllegungsstrategie bisher selten angewandt und ist derzeit bei keiner stillzulegenden Anlage beabsichtigt.“ (Bundesregierung, 2015).

In der Übergangszeit zwischen Betrieb und dem direkten Rückbau bzw. dem sicheren Einschluss findet der sogenannte *Nachbetrieb* statt. Während des Nachbetriebs klingen die Brennstäbe ab und werden aus dem Reaktor entfernt. Diese sogenannte Abklinglagerung ist eine „längerfristige Lagerung von radioaktiven Reststoffen, damit deren Radioaktivität so weit abklingt, dass die weitere Behandlung und Beseitigung unter optimierten Strahlenschutzbedingungen durchgeführt werden können [...]“ (BMUB, 2010). Während die Brennstäbe so lange gelagert werden, bis sie nur noch so viel Wärme entwickeln, dass sie ohne aufwändige Kühlung gelagert werden können, kann durch eine Abklinglagerung abgebauter und

radioaktiv belasteter¹⁷ Bauteile sogar „[...] eine Freigabe zur schadlosen Verwertung und Beseitigung erfolgen [...]“ (BMUB, 2010).

Nach der Abklinglagerung werden die Brennstäbe aus dem Reaktor bzw. aus dem Abklingbecken entfernt. Sofern der „[...] Kernbrennstoff nur noch in so geringen Mengen vorhanden ist, dass eine Kritikalität ausgeschlossen werden kann (Brennstäbe und Defektstäbe sind entfernt)“, wird von der sogenannten *Kernbrennstofffreiheit* gesprochen (ESK, 2015; BMUB, 2010). Die Dauer der Nachbetriebsphase ist hauptsächlich vom Zeitbedarf bis zum vollständigen Abtransport der Brennelemente abhängig und liegt in der Regel zwischen 24 und 36 Monaten (Zeihner, 2009). Es ist anzumerken, dass in der Nachbetriebsphase nicht in allen kerntechnischen Anlagen die Brennelemente aus der Anlage entfernt werden. Beispielsweise können die Brennelemente im Abklingbecken oder einem zweiten Brennelementlagerbecken verbleiben, während bereits erste Rückbauarbeiten im Reaktorraum vorgenommen werden.

Während des sicheren Einschlusses und während dem Rückbau einer kerntechnischen Anlage findet der sogenannte *Restbetrieb* statt. Dieser dient dazu, die für den Rückbau notwendigen Einrichtungen am Laufen zu halten. Beispielsweise gehören hierzu die Aufrechterhaltung der Lüftungsanlage, der Brandmeldeanlage und der sicherheitstechnischen Komponenten sowie die Weiterbeschäftigung des Sicherheitspersonals. (Thierfeldt und Schartmann, 2012)

2.1.3 Rückbau und Grüne Wiese

In dieser Arbeit stehen der Rückbau einer kerntechnischen Anlage und insbesondere dessen Planung im Vordergrund. Wie bereits beschrieben

¹⁷ Eine detaillierte Klassifikation, wie Bauteile radioaktiv belastet sein können, ist in Kapitel 2.2.1 genauer beschrieben.

wurde, kann der Rückbau direkt im Anschluss an die Betriebseinstellung und der Nachbetriebsphase oder nach einer gewissen Einschusszeit im Rahmen des sicheren Einschusses erfolgen.

Die sofortige oder verzögerte vollständige Beseitigung der Anlage hat das Ziel, dass ein freies Gelände, das weder bebaut noch radioaktiv belastet ist, übergeben werden kann. Dieser Zustand wird als *Grüne Wiese* bezeichnet. (BMUB, 2010). Die durchzuführenden Arbeiten zur Beseitigung einer kerntechnischen Anlage werden als *Abbau* oder *Rückbau* bezeichnet (vgl. Kapitel 2.1.2).

Neben der vollständigen Beseitigung einer Anlage bis zur Grünen Wiese besteht auch die Möglichkeit, lediglich die Anlage aus der atomrechtlichen Überwachung zu entlassen und Gebäudeteile für andere Zwecke zu nutzen (vgl. Erklärungen in Kapitel 2.1.2). Dazu müssen das Anlagengebäude sowie das freie Gelände soweit bearbeitet werden, dass diese die zulässigen Grenzwerte der Strahlenexposition unterschreiten (vgl. Kapitel 2.5.3).

Sowohl bei der vollständigen Beseitigung als auch bei der Beseitigung aller radioaktiv belasteten Anlagenteile sind Rückbauaktivitäten durchzuführen, die im Folgenden beschrieben werden. Um die möglichen Rückbau-Alternativen zu beschreiben, werden zunächst die Aktivitäten *Entrümpelung*, *Entkernung* und *Demontage* erläutert. Bei der *Entrümpelung* werden nicht befestigte, ortsveränderliche Materialien und Gegenstände in einem Gebäude beseitigt. Häufig bildet die Entrümpelung somit den ersten Schritt beim Abbruch eines Gebäudes (LfU, 2001). Die *Entkernung* hingegen beschreibt die Beseitigung von am Gebäude befestigten oder im Gebäude eingebauten Anlagen und Gegenständen, welche die Standsicherheit des Bauwerks nicht beeinflussen. Hierzu gehören beispielsweise Fenster, Türen oder Isoliermaterialien (LfU, 2001). Unter dem Begriff *Demontage* wird schließlich die Trennung beziehungsweise Zerlegung von vorgefertigten Teilen und der tragenden Gebäudeteile sowie die anschließende Beseitigung verstanden (Korth, 1996)

In Bezug auf den Abbruch von Bauwerken gibt es drei grundsätzliche Vorgehensweisen: der konventionelle, der teilselektive und der selektive Abbruch (LfU, 2001). Der Oberbegriff Abbruch beschreibt dabei die vollständige oder teilweise Beseitigung von Bauwerken, baulichen Anlagen oder deren Teilen (Rentz, 1998). Welche der drei Abbruchalternativen letztendlich angewendet wird, hängt sowohl von wirtschaftlichen (z. B. Abbruch- und Demontagekosten, Entsorgungskosten) als auch von umweltrelevanten Kriterien (z. B. Steigerung der Verwertungsquote, Förderung eines hochwertigen Recyclings) ab (LfU, 2001). Für eine ausführlichere Beschreibung der einzelnen Kostenarten sowie deren Beeinflussung durch die Wahl des Abbruchverfahrens sei an dieser Stelle auf LfU (2001) verwiesen.

Im Fall des konventionellen Abbruchs werden Bauwerke meist durch Zertrümmern zerstört, ohne dass zwingende Anforderungen hinsichtlich der Entrümpelung oder Entkernung existieren. Die bei einem konventionellen Abbruch anfallenden Abfälle sind somit ein heterogenes Gemisch aus allen enthaltenen Baustoffen des Gebäudes. Diese Tatsache wirkt sich sowohl auf die Sortierung und Entsorgung (höhere Entsorgungskosten) als auch auf die Verwertung der Abbruchabfälle negativ aus, da aufgrund der Gemischbildung häufig eine Verunreinigung durch Schad- und Störstoffe aus einzelnen Bauteilen stattfindet (LfU, 2001).

Um die Vermischung der anfallenden Abfälle zu verringern und eine bessere Verwertung zu gewährleisten, wird das Gebäude beim teilselektiven Abbruch daher vor dem eigentlichen Abbruch zumindest teilweise entrümpelt und entkernt. Wie umfangreich die Demontearbeiten und die Vorsortierung beim teilselektiven Abbruch sind, ist von Fall zu Fall unterschiedlich. Es kann sowohl eine Annäherung an den konventionellen als auch an den im folgenden Absatz erläuterten selektiven Abbruch stattfinden (LfU, 2001).

Im Rahmen des selektiven Abbruchs werden alle Bau-, Konstruktions- und Ausrüstungsteile nach ihrer Materialzusammensetzung beziehungsweise ihrer Funktion demontiert. Eine sortenreine Trennung der Abbruchabfälle soll eine möglichst hohe Wiederverwendungs- beziehungsweise Verwertungsquote erreichen. Dies ist allerdings mit einem erhöhten Zeit- und Kostenaufwand verbunden. (LfU, 2001) Da die im Rahmen des selektiven Abbruchs durchgeführten Demontearbeiten häufig in umgekehrter Reihenfolge des Auf- und Einbaus erfolgen, wird diese Abbruchmethode auch als Rückbau bezeichnet (Rentz, 1998). Die Demontage wird in der DIN 18007 als zerstörungsfreier Rückbau definiert. Neben der Demontage von Bauteilen umfasst der Rückbau jedoch auch konventionelle Abbruchtechniken wie beispielsweise das Zertrümmern (Schultmann, 1998).

Da eine Trennung der anfallenden Bauabfälle nicht nur auf ihre Verwertungsmöglichkeiten, sondern auch auf die mit ihnen verbundenen Entsorgungskosten großen Einfluss besitzt (BBR, 1998), ist dies insbesondere beim kerntechnischen Rückbau zu beachten. Durch eine möglichst sortenreine Trennung der Materialien soll der Anteil des radioaktiven Abfalls, der mit hohen Kosten gelagert werden muss, minimiert werden. Beim Rückbau kerntechnischer Anlagen findet somit der selektive Rückbau Anwendung.

2.2 Physikalische Grundlagen und Anlagentypen

Der Rückbau kerntechnischer Anlagen unterliegt hohen Sicherheitsstandards, da von diesen Anlagen ein gesundheitsgefährdendes Risiko ausgeht (vgl. Kapitel 2.3). Die Entstehung dieser Gefahr durch Radioaktivität (Kapitel 2.2.1), die Verwendung radioaktiver Zerfälle zum Betrieb kerntechnischer Anlagen (Kapitel 2.2.2), unterschiedliche Reaktortypen (Kapitel 2.2.3) und die davon abhängigen radioaktiv belasteten Bereiche (Kapitel 2.2.4) werden im Folgenden näher beschrieben.

2.2.1 Entstehung von Radioaktivität und ionisierender Strahlung

In kerntechnischen Anlagen finden während der Betriebsphase Reaktionen statt, an denen mehrere atomare Teilchen beteiligt sind. Die grundlegenden Eigenschaften dieser Teilchen (vor allem *Elektronen*, *Positronen*, *Protonen*, *Neutronen*, *Photonen* und *Neutrinos*) werden im Folgenden nicht näher erläutert und werden als bekannt vorausgesetzt. Nähere Informationen zu den chemischen Grundlagen und den Eigenschaften der Teilchen können u. a. in Bethge et al. (2008), Lamarsh und Baratta (2001) sowie Stolz (2005) nachgelesen werden. Im Folgenden werden lediglich die Eigenschaften von Atomen beschrieben, die zur Radioaktivität und zur Aussendung von ionisierender Strahlung führen.

Die verschiedenen Arten von Atomen mit unterschiedlicher Anzahl an *Protonen* und *Neutronen* werden als *Nuklide* bezeichnet. Um verschiedene *Nuklide* eines Elements zu unterscheiden, wird neben dem Elementsymbol die *Atommasse* A (oben) auch die Anzahl an *Protonen* im Kern Z (unten) angegeben, z. B. ${}^1_1\text{H}$, ${}^2_1\text{H}$, ${}^4_2\text{H}$. Atome mit der gleichen Anzahl an *Protonen*, aber einer unterschiedlichen Anzahl an *Neutronen* werden als *Isotope* bezeichnet. (Bethge et al., 2008; Bünemann, 1992; Lamarsh und Baratta, 2001; Stolz, 2005)

Nicht alle Kombinationen an *Protonen* und *Neutronen* ergeben einen stabilen Atomkern. Vielmehr existieren *Isotope* mit gleicher Anzahl an *Protonen*, aber unterschiedlicher Anzahl an *Neutronen*, die einen instabilen Atomkern bilden. Dieses Phänomen ist besonders bei schweren Atomkernen zu beobachten. Bei schweren Kernen ist insbesondere die Abstoßungskraft zwischen den positiv geladenen Protonen aufgrund ihrer großen Anzahl höher. Zum Ausgleich dieser Abstoßungskräfte und zur Stabilisation des Kerns ist eine höhere Anzahl an Neutronen notwendig, da diese die Atommasse und damit die zusammenhaltende Kraft zwischen den Nukleonen erhöhen. Dadurch können die Abstoßungskräfte

ausgeglichen werden. Nach diesem Prinzip des Ausgleichs zwischen den Abstoßungskräften zwischen den Protonen und den zusammenhaltenden Kräften aller Nukleonen fördert eine zu geringe Anzahl an erforderlichen Neutronen oder eine zu hohe Anzahl an Protonen im Kern die Instabilität des Atomkerns. (Kiefer, 2012, S.11; Mortimer et al., 2015) Es konnte grundsätzlich nachgewiesen werden, dass alle Elemente deren Ordnungszahl größer als 83 ist, instabil sind (Schröder und Schröder, 2015, S.10).

Instabile Atome streben nach einem stabilen Zustand, indem sie sich entweder ohne äußere Einwirkungen durch einen Zerfallsprozess in Atome anderer Elemente wandeln oder indem sie in einen günstigeren Energiezustand übergehen. Sowohl während des Zerfallsprozesses als auch beim Übergang in einen günstigeren Energiezustand wird eine charakteristische Strahlung ausgesendet. Atome mit diesen Eigenschaften werden als radioaktive Nuklide bezeichnet, ihr Umwandlungsprozess (der Zerfall des Atoms) als Radioaktivität und die Emissionen, die bei einem radioaktiven Zerfall entstehen, als ionisierende Strahlung. (Bethge et al., 2008; Kiefer, 2012; Lamarsh und Baratta, 2001; Mortimer et al., 2015; Schröder und Schröder, 2015; Stolz, 2005; Ziegler und Allelein, 2013) Koelzer (2015) definiert den Begriff der Radioaktivität als „Eigenschaft bestimmter Stoffe, sich ohne äußere Einwirkung umzuwandeln und dabei eine charakteristische Strahlung auszusenden.“ (Koelzer, 2015, S. 164)

Instabile Atomkerne können mit ihren spezifischen Eigenschaften in der Natur vorkommen oder künstlich erzeugt werden (vgl. Kapitel 2.2.2). Stoffe, die in der Natur vorkommen und sich ohne äußere Einwirkungen unter der Aussendung einer Strahlung umwandeln, werden als natürlich radioaktiv bezeichnet. Im Gegensatz dazu wird von künstlicher Radioaktivität gesprochen, wenn Stoffe ein Produkt von Kernumwandlungen in Kernreaktoren oder Beschleunigern sind. (Koelzer, 2015, S. 164) Zur Messung der Radioaktivität dient die sogenannte *Aktivität*. Um sie zu ermitteln, wird die durchschnittliche Anzahl der Kernzerfälle durch die dazu benötigte Zeit geteilt: 1 Bq (Becquerel) = 1 Kernzerfall pro Sekunde.

(Vogt und Schultz, 2011, S. 11) Die Größenordnungen der Aktivität lassen sich anhand einiger Beispiele einschätzen. Die Aktivität der abgebrannten Brennelemente im Kernkraftwerk Philippsburg 1 wurde auf $4,41 \cdot 10^{18}$ Bq und das Gesamtaktivitätsinventar der Anlage wurde für das Bezugsjahr 2017 mit den bestrahlten Brennelementen auf $4,45 \cdot 10^{18}$ Bq geschätzt (EnBW, 2014, S. 47). Der Mensch enthält natürliche Radionuklide mit einer Aktivität zwischen 8.000 und 9.000 Bq (BfS, 2017, S. 20).

Die bei der Umwandlung radioaktiver Stoffe emittierte ionisierende Strahlung kann in vier Strahlungsarten klassifiziert werden: *Alpha-Strahlung*, *Beta-Strahlung*, *Gamma-Strahlung* und *Neutronenstrahlung* (Küppers, 2012, S. 44). Alpha-, Beta- und Neutronenstrahlung werden auch als Teilchenstrahlung bezeichnet, da die Strahlung aus emittierten Teilchen besteht (Neles und Pistner, 2012, S. 42).

Die *Alpha-Strahlung* (α -Strahlung) besteht aus Protonen und hat eine sehr geringe Reichweite von wenigen Zentimetern in der Luft. Von außen kann sie beim Menschen keinen hohen Schaden anrichten, da sie bereits durch die Hornhaut oder ein Blatt Papier abgeschirmt werden kann. Im Inneren eines Menschen kann sie jedoch große Schäden am Zellgewebe bewirken. Aus diesem Grund sollte der Inkorporation radioaktiver Teilchen vorgebeugt werden (vgl. auch Kapitel 2.3.2). (Küppers, 2012, S. 44ff.; Mortimer et al., 2015; Ziegler und Allelein, 2013)

Grundsätzlich handelt es sich bei der *Beta-Strahlung* (β -Strahlung) um ein positiv (Positron) oder negativ (Elektron) geladenes Teilchen, welches beim radioaktiven Zerfall emittiert wird. Die Reichweite in der Luft beträgt einige Meter und kann durch wenige Millimeter dickes Metall oder Beton abgeschirmt werden. Die Betastrahlung kann durch die menschliche Haut dringen und ist daher sehr gefährlich. (Küppers, 2012, S. 47f.; Mortimer et al., 2015; Ziegler und Allelein, 2013)

Die *Gamma-Strahlung* (γ -Strahlung) ist im Gegensatz zur Alpha- und Beta-Strahlung keine Teilchenstrahlung, sondern eine elektromagnetische Welle mit sehr hohem Energiegehalt. Die Abschirmung gestaltet sich schwierig, da die Strahlung beim Durchschreiten von Material ihre Energie teilweise an das Material abgibt. Daher hängt die benötigte Dicke der Abschirmung von der Intensität der Strahlung ab. Die Reichweite beträgt in der Luft einige hundert Meter. (Küppers, 2012, S. 48f.; Mortimer et al., 2015; Ziegler und Allelein, 2013)

Die *Neutronenstrahlung* bezeichnet das Emittieren von einzelnen Neutronen. Die Reichweite von schnellen Neutronen kann in der Luft mehrere Kilometer betragen. Langsame Neutronen hingegen haben in Materie keine hohe Durchdringung. (Küppers, 2012, S. 49f.; Vogt und Schultz, 2011) Die Gefahr der Neutronenstrahlung besteht darin, „[...] dass sie in anderen Atomkernen eingefangen werden können und diese durch sogenannte *Aktivierung* in Radionuklide umwandeln.“ (Küppers, 2012, S. 49f.). Somit wird das aktivierte Material selbst radioaktiv. Von *aktiviertem Material* wird gesprochen, wenn Aktivität fest in einem Material eingebunden ist. Befindet sich aktiviertes bzw. radioaktives Material auf der Oberfläche eines Stoffes, der selber nicht aktiviert ist, so wird dieser Stoff als *kontaminiert* bezeichnet¹⁸ (Thierfeldt und Schartmann, 2012, S. 4) Grundsätzlich wird zwischen fester Kontamination und loser Kontamination unterschieden. Bei fester Kontamination besteht eine feste Bindung zwischen dem radioaktiven Stoff und der Oberfläche des kontaminierten Materials. Im Gegensatz dazu liegt bei loser Kontamination lediglich eine lose Ablagerung auf der Oberfläche des kontaminierten Materials vor¹⁹. (IAEA, 1998, S. 24)

¹⁸ Mögliche Dekontaminationsmaßnahmen sind in Kapitel 2.4.2 näher beschrieben.

¹⁹ Eine detailliertere Beschreibung möglicher Kontaminationen sind in Kapitel 2.4.2 aufgeführt.

Materie in kerntechnischen Anlagen, die durch Neutronenbeschuss aktiviert wurde, muss beim Rückbau aufgrund der von ihr ausgehenden Gefahr für Lebewesen (vgl. Kapitel 2.3.1) besonders behandelt werden (vgl. Kapitel 2.3.2 und Kapitel 2.4) und stellt radioaktiven Abfall dar. Im Gegensatz dazu kann Kontamination durch geeignete Dekontaminationsmaßnahmen (vgl. Kapitel 2.4.2) entfernt werden, sodass die gereinigten Abfälle leichter entsorgt werden können.

Der bei einem radioaktiven Zerfall neu entstandene Kern ist nicht immer stabil, sodass in einer sogenannten Zerfallskette (oder Zerfallsreihe) weitere Kernzerfälle möglich sind (Lamarsh und Baratta, 2001, S. 19f.; Neles und Pistner, 2012, S. 40). Eine Zerfallskette endet erst, wenn ein nicht mehr radioaktives Nuklid entsteht (Koelzer, 2015, S. 246). Beispielsweise zerfällt das in der Natur vorkommende Nuklid Uran-238 in einer langen Zerfallsreihe, der sogenannten Uran-Radium-Reihe, in das stabile Nuklid Blei-206 (Volkmer, 2007). Die Zerfallsvorgänge erfolgen stochastisch, sodass für ein spezielles Nuklid nicht vorhergesagt werden kann, zu welchem Zeitpunkt ein Kern zerfällt. Es kann lediglich eine Wahrscheinlichkeit über die Zerfallsvorgänge einer großen Menge radioaktiver Nuklide aufgestellt werden. Diesem Prinzip der großen Zahlen folgt die sogenannte Halbwertszeit, die den Zeitraum angibt, nach dem noch die Hälfte der Ausgangsmenge des beobachteten, radioaktiven Nuklids vorhanden ist (Kiefer, 2012, S.11; Koelzer, 2015, S. 86; Neles und Pistner, 2012, S. 40) Die andere Hälfte ist entweder in ein weiteres radioaktives Nuklid oder in ein stabiles Atom zerfallen. Die Halbwertszeit kann nach diesem Prinzip für jedes Nuklid ermittelt werden und ist je nach Nuklid unterschiedlich. Je nach Zerfallsreihe, kann es mehrere Tausend oder sogar Millionen Jahre dauern, bis diese endet und ein stabiles Nuklid entsteht, das nicht weiter zerfällt. (Kiefer, 2012, S. 11; Koelzer, 2015, S. 86, 246)

2.2.2 Funktionsweise des Reaktorkerns

Insbesondere die Komponenten des Reaktorkerns und der von ihm umgebenen Anlagenteile sind stark aktiviert oder kontaminiert. Aus diesem Grund gelten für den Rückbau dieser Anlagenteile besondere Sicherheitsvorkehrungen (vgl. Kapitel 2.3.2) und gesetzliche Auflagen (vgl. Kapitel 2.5), die einen wesentlichen Einfluss auf den Rückbau und die Planung haben. Die Kenntnis, welche Materialien kontaminiert oder aktiviert sind oder sein könnten, ist für den Rückbau und seine Planung essentiell. Für ein besseres Verständnis der Gründe für die benötigten Sicherheitsvorkehrungen und gesetzlichen Auflagen sowie als Grundlage zur Erkennung radioaktiv belasteter Materialien und Bereiche, werden im Folgenden die allgemeine Funktionsweise und der allgemeine Aufbau eines Kernreaktors beschrieben. Ausführliche Informationen können u. a. Koelzer (2015), Krieger (2013), Lamarsh und Baratta (2001) sowie Laufs (2013) entnommen werden.

In kerntechnischen Anlagen wird die Radioaktivität durch die Kernspaltung ausgelöst, welche im Reaktorkern einer kerntechnischen Anlage abläuft. Thermische Reaktoren, die in der Regel in konventionellen Kernkraftwerken eingesetzt werden, beinhalten u. a. *Brennstäbe*, einen *Moderator* und ein *Kühlmittel*. Im Gegensatz dazu enthält ein *Schneller Brüter* keinen *Moderator*, sondern lediglich die *Brennstäbe* und ein *Kühlmittel*²⁰.

Eine Kernspaltung kann auf verschiedene Arten und mit verschiedenen Elementen erfolgen. In thermischen Reaktoren wird in der Regel Uran-235 oder Plutonium-239 verwendet (Krieger, 2013, S. 332; Laufs, 2013, S. 14). Neben Uran- und Plutoniumnukliden existieren weitere schwere Atomkerne, welche gespalten werden können. Die spaltbaren Isotope werden in Tablettenform gepresst und in sogenannten Brennstäben zusammen-

²⁰ Eine detailliertere Betrachtung verschiedener Reaktortypen kann Kapitel 2.2.3 entnommen werden.

gefasst (Neles und Pistner, 2012, S. 64f.). Die Brennstäbe moderner Leistungsreaktoren enthalten meist Uran-238, welches mit ein paar Prozent (3 bis 5 %) an Uran-235 angereichert ist (Lamarsh und Baratta, 2001; Neles und Pistner, 2012, S. 33f.). Um einen Atomkern zu spalten, wird dieser mit Neutronen beschossen. Durch den Einfang eines Neutrons wird der Atomkern zur Spaltung angeregt. Bei sehr schweren Teilchen kann die Kernspaltung auch spontan auftreten. Bei der Kernspaltung entstehen in der Regel zwei (selten auch drei) Spaltprodukte, zwei bis drei Neutronen und Energie. Die freigesetzte Energie entsteht aus der Differenz der mittleren Bindungsenergien je Nukleon des ursprünglichen Urankerns und der Spaltprodukte (bei Uran wird je Nukleon etwa 0,9 MeV an Energie freigesetzt). Bei der Verwendung von Uran-235 wird pro Spaltung ein Energiebetrag von rund 210 MeV frei. Diese Energie verteilt sich auf die Spaltprodukte (175 MeV kinetische Energie), die Spaltneutronen (5 MeV kinetische Energie), die bei der Spaltung direkt auftretende Gamma-Strahlung (7 MeV), die Beta- und Gamma-Strahlung beim Zerfall der radioaktiven Spaltprodukte (13 MeV) sowie auf die Neutrinos (10 MeV). Die freigewordenen Neutronen können wiederum weitere Urankerne zur Kernspaltung anregen. Dabei entsteht eine Kettenreaktion an Kernspaltungen. (Koelzer, 2015, S. 116ff.; Lamarsh und Baratta, 2001, S. 117ff.; Neles und Pistner, 2012, S. 29f.)

Diese Kettenreaktion wird durch den sogenannten *Multiplikatorfaktor* k beschrieben. Dieser gibt an, ob jedes *Neutron* durch seine Spaltung an Atomkernen mehr als ein (überkritisch) oder durchschnittlich weniger als ein neues *Neutron* (unterkritisch) freisetzt. Die *Kritikalität* wird durch den Faktor $k = \frac{\text{Anzahl Kernspaltungen in einer Generation}}{\text{Anzahl an Kernspaltungen in der vorherigen Generation}}$ angegeben. Ist $k > 1$, dann steigt die Zahl der Kernspaltungen und die dabei emittierte Energie sowie die Anzahl der emittierten *Neutronen* von Generation zu Generation an. Dieser Zustand wird als überkritisch bezeichnet. Im Gegensatz dazu sinkt bei $k < 1$ die Anzahl an Kernspaltungen und der dabei emittierten Energie sowie der emittierten *Neutronen* von Generation zu

Generation. Ist $k = 1$, dann bleibt die Anzahl an Kernspaltungen sowie die emittierte Energie und die Anzahl an emittierten *Neutronen* konstant, sodass von einem kritischen Zustand gesprochen wird. Um die *Kritikalität* der Kernspaltung zu kontrollieren, werden in Kernreaktoren sogenannte Steuerstäbe verwendet. Die *Steuerstäbe* bestehen aus neutronenabsorbierendem Material, wie beispielsweise Cadmium, Bor oder Silber (Neles und Pistner, 2012, S. 64f.). Werden die *Steuerstäbe* in den *Reaktorkern* eingeführt, dann kann der *Multiplikatorfaktor* beeinflusst werden, sodass die Kritikalität erhöht oder gesenkt und somit spezifische Leistungsstufen eingestellt werden können. (Krieger, 2013; Lamarsh und Baratta, 2001, S. 117ff.)

Die bei der Kernspaltung frei gewordenen Neutronen werden durch einen sogenannten *Moderator* abgebremst, sodass die schnellen Neutronen für neue Kernspaltungen genutzt und die Kettenreaktion somit kontrolliert abläuft. Als Moderatoren kommen unterschiedliche Elemente zum Einsatz. Meist werden Wasser, Schwerwasser oder Graphit als Moderator eingesetzt. Die durch die Kernspaltung freigesetzte Energie wird durch ein *Kühlmittel* in Form von Wärme abtransportiert. Als Kühlmittel werden in der Regel Wasser, Schwerwasser oder bestimmte Gase eingesetzt (vgl. Kapitel 2.2.3). In einigen Reaktoren, insbesondere bei thermischen Reaktoren, dient Wasser bzw. Schwerwasser sowohl als Moderator als auch als Kühlmittel. In sogenannten *Schnellen Brütern* eignet sich Wasser nicht als Kühlmittel, daher wird in diesem Reaktortyp meist flüssiges Natrium, seltener auch Gase als Kühlmittel eingesetzt (vgl. Kapitel 2.2.3). Die beim Kernzerfall anfallende Wärme wird dazu genutzt, um damit direkt oder indirekt über einen Wärmetauscher Wasserdampf zu erzeugen. Der Wasserdampf wird in Leistungsreaktoren dazu genutzt, um eine Turbine anzutreiben, die über einen gekoppelten Generator Strom erzeugt. Dieser Prozess ist der gleiche wie in konventionellen Kraftwerken. (Lamarsh und Baratta, 2001, S. 129)

Um den *Reaktorkern* befindet sich (meist bei Schnellen Brüttern) die *Reaktorhülle* (blanket), welche die Ausbreitung *freier Neutronen* außerhalb des Reaktorkerns verhindern soll. Damit auch freie Neutronen, die aus dem Reaktorkern entweichen, für weitere Kettenreaktionen nutzbar sind, befindet sich um den Reaktorkern (und die Reaktorhülle) ein *Reflektor*, der die Aufgabe hat, die entwichenen Neutronen zurück in den Reaktorkern abzulenken (zu reflektieren).

Alle beschriebenen Komponenten befinden sich im *Reaktordruckbehälter* (oder auch *Reaktordruckgefäß* genannt und als *RDB* abgekürzt). Um die thermische Belastung des Reaktordruckbehälters durch entweichende γ -Strahlung zu reduzieren, existiert in manchen Reaktoren zwischen dem Reflektor und dem Reaktordruckgefäß ein *thermisches Schild*. Der Reaktordruckbehälter wird von einem *Biologischen Schild* umgeben, welches den Austritt ionisierender Strahlung aus dem Reaktordruckbehälter verhindern soll. Der gesamte Reaktor und alle seine Komponenten sind nach außen durch einen Sicherheitsbehälter aus Stahl, dem sogenannten *Containment*, abgeschlossen. (Ziegler und Allelein, 2013, S. 244)

Die Wahrscheinlichkeit ist sehr hoch, dass fast alle Bauteile im Reaktorkern aktiviert oder zumindest kontaminiert sind. Dies hat zur Folge, dass die im Reaktorkern verwendeten Materialien besonders behandelt werden müssen (beispielsweise mit speziellen Maschinen, vgl. Kapitel 2.4) und zu einem großen Teil zum endzulagernden radioaktiven Abfallaufkommen beitragen.

2.2.3 Beschreibung von Reaktortypen und deren Funktionsweisen

Die Konstruktion und Funktionsweise eines Reaktors hat großen Einfluss auf die Verbreitung radioaktiver Stoffe innerhalb einer Anlage und damit

auch Einfluss auf die Bedingungen sowie die Reihenfolge des Rückbaus. Aus diesem Grund wird im Folgenden auf die verschiedenen Reaktortypen und ihre Funktionsweisen eingegangen.

Nachdem der erste Reaktor der Welt am 02.12.1942 in Chicago kritisch wurde, sind viele Arten von Reaktoren entwickelt und gebaut worden. Neben den Leistungsreaktoren für die zivile Stromerzeugung existieren Reaktoren für die Forschung, für medizinische Experimente, zum Antrieb von Schiffen, Raketen, Flugzeugen und Satelliten (Lamarsh und Baratta, 2001, S. 129). Im Folgenden werden lediglich Reaktortypen für Leistungs- und Forschungsreaktoren beschrieben²¹. In Tabelle 2.1 werden die verschiedenen Reaktortypen zusammengefasst.

Tabelle 2.1: Reaktortypen und deren Anzahl in Betrieb befindlicher sowie Anzahl stillgelegter Reaktoren (Quelle: IAEA, 2018a)

Bezeichnung deutsch	Bezeichnung englisch	Abkürzung	Anzahl Reaktoren in Betrieb	Anzahl stillgelegter Reaktoren
Druckwasserreaktor	Pressurized Light-Water-Moderated and Cooled Reactor	PWR	299	50
Siedewasserreaktor	Boiling Light-Water-Cooled and Moderated Reactor	BWR	75	40

²¹ Dies entspricht der Definition des Begriffs *kerntechnische Anlage* (vgl. Kapitel 2.1.1) und dem Fokus der Arbeit.

Schwerwasser-moderierter und schwerwas-sergekühlter Reaktor	Pressurized Heavy-Water-Moderated and Cooled Reactor	PHWR	49	8
Leichtwas-sergekühlter, graphitmod-erierter Reaktor	Light-Water-Cooled, Graphite-Moderated Reac-tor	LWGR	15	9
Gasgekühlter, graphitmod-erierter Reaktor	Gas-Cooled, Graphite-Moderated Reac-tor	GCR	14	38
Schneller Brüter	Fast Breeder Re-actor	FBR	3	8
Hochtempera-turreaktor	High-Temperature Gas-Cooled Reactor	HTGR	0	4
Schwerwasser-moderierter und gasgekühl-ter Reaktor	Heavy-Water-Moderated, Gas-Cooled Reactor	HWGCR	0	4
Schwerwasser-moderierter, siedewasser-gekühlter Reak-tor	Heavy-Water-Moderated, Boil-ing Light-Water-Cooled Reactor	HWLWR	0	2
Schwerwasser-dampf-reaktor	Steam-Generating Heavy-Water Re-actor	SGHWR	0	1
Andere			0	2

Da der Aufbau des Reaktortyps Einfluss auf den Rückbau und dessen Planung hat, werden die unterschiedlichen Reaktortypen im Folgenden kurz vorgestellt. Hierbei werden lediglich die wesentlichen und für den weiteren Verlauf dieser Arbeit relevanten Eigenschaften und Unterschiede der unterschiedlichen Reaktortypen beschrieben. Ausführliche Informationen zu den einzelnen Reaktortypen sind u. a. in Lamarsh und Baratta (2001), Neles und Pistner (2012) sowie Ziegler und Allelein (2013) zu finden. Es sei angemerkt, dass sich zwar abhängig vom Reaktortyp der technische Rückbau unterscheidet, dass aber das in dieser Arbeit zur Planung des Rückbaus entwickelte Planungswerkzeug aufgrund anpassbarer Parametrisierung für jeden beliebigen Reaktortyp anwendbar ist.

In einem Leistungsreaktor wird unabhängig vom Reaktortyp die beim Kernzerfall anfallende Wärme dazu genutzt, um damit Wasserdampf zu erzeugen. Dieser Wasserdampf treibt eine Turbine an, die mit einem Generator verbunden ist, sodass Strom erzeugt wird (Neles und Pistner, 2012, S. 62). In Forschungsreaktoren wird in der Regel nicht die entstehende Wärme zur Stromerzeugung genutzt, sondern die entstehende Strahlung, z. B. die Neutronenstrahlung, wird für Versuche verwendet. Je Reaktortyp werden unterschiedliche Elemente als Kühlmittel und Moderator verwendet. Der Wasserdampf in einem Leistungsreaktor wird abhängig vom Reaktortyp entweder direkt im Reaktor oder durch die Wärmeübertragung mit Hilfe eines Wärmetauschers in einem Sekundärkreislauf erzeugt. In Tabelle 2.2 sind die wesentlichen Unterschiede der Reaktortypen dargestellt, da sie während des Rückbaus und bei der Planung berücksichtigt werden müssen.

Tabelle 2.2: Anzahl Kreisläufe vom Reaktor bis zur Turbine, verwendetes Kühlmittel und verwendeter Moderator je Reaktortyp²²

Reaktortyp	Anzahl Kreisläufe vom Reaktor bis zur Turbine	Kühlmittel	Moderator
PWR	Primär- und Sekundärkreislauf	Leichtwasser (H ₂ O)	Leichtwasser (H ₂ O)
BWR	Primärkreislauf	Leichtwasser (H ₂ O)	Leichtwasser (H ₂ O)
PHWR	Primär- und Sekundärkreislauf	Schwerwasser (D ₂ O)	Schwerwasser (D ₂ O)
LWGR	Primärkreislauf	Leichtwasser (H ₂ O)	Graphit (C)
GCR	Primär- und Sekundärkreislauf	Gas (CO ₂)	Graphit (C)
FBR	Primär-, Sekundär- und Tertiärkreislauf	Natrium (Na)	-
HTGR	Primär- und Sekundärkreislauf	Helium (He)	Graphit (C)
HWGCR	Primär- und Sekundärkreislauf	Gas (CO ₂)	Schwerwasser (D ₂ O)
HWLWR	Primärkreislauf	Leichtwasser (H ₂ O)	Schwerwasser (D ₂ O)
SGHWR	Primärkreislauf	Leichtwasser (H ₂ O)	Schwerwasser (D ₂ O)

Im Folgenden werden lediglich zusätzliche Informationen zu den Reaktortypen beschrieben, wenn diese nicht der Tabelle 2.2 entnommen werden können.

²² Die Quellen sind den nachfolgenden Erläuterungen je Reaktortyp zu entnehmen.

Die verbreitetsten Reaktortypen der Leistungsreaktoren sind *Leichtwasserreaktoren* (LWR), die mit (leichtem) Wasser moderiert und gekühlt werden. Zu den Leichtwasserreaktoren zählen der *Druckwasser-* (PWR) und der *Siedewasserreaktor* (BWR) (Lamarsh und Baratta, 2001, S. 137). Die Konzepte dieser Reaktortypen wurden und werden fortlaufend weiterentwickelt, wobei im Folgenden nicht auf diese Weiterentwicklungen, die sogenannten Generationen, eingegangen wird²³. Beim Reaktortyp **BWR** wird das Wasser direkt im Reaktorkern bei einem Druck von ca. 70 bar verdampft und nach einem *Wasserabscheider* und *Dampftrockner* ohne Wärmeübertragung zur Dampfturbine geleitet.

Dagegen wird in Anlagen des Reaktortyps **PWR** das Wasser im Reaktordruckbehälter mit Hilfe von *Druckhaltern* unter einem ausreichend hohen Druck gehalten (ca. 158 bar (Bünemann, 1992, S. 28)), sodass es trotz der Erwärmung nicht verdampft. In einem *Dampferzeuger* oberhalb des Reaktordruckbehälters wird die Wärme des sogenannten Primärkreislaufs auf einen Sekundärkreislauf übertragen, wobei das Wasser im Sekundärkreislauf verdampft. Im Anschluss wird der Wasserdampf in einem *Dampftrockner* getrocknet, damit der Wasserdampf einen optimalen Zustand für die Dampfturbine hat. Der Sekundärkreislauf ist auch räumlich vom Primärkreislauf getrennt, da sich die Turbine, der Generator und der Kondensator sowie übrige Leitungen des Sekundärkreislaufes in einem an das Reaktorgebäude angeschlossenen Maschinenhaus befinden (Hering und Schulz, 1987, S. 31).

²³ Gemäß Neles und Pistner (2012) bezeichnet die erste Reaktorgeneration die Prototypreaktoren der 1950er- und 1960er-Jahre, die zweite Generation die ersten großen Leistungsreaktoren der 1970er- und 1980er-Jahre und die dritte Generation die derzeit verfügbaren Reaktorkonzepte als evolutionäre Weiterentwicklung der vorherigen Konzepte (zum Beispiel der Europäische Druckwasserreaktor EPR). Als Generation IV werden Konzepte bezeichnet, die sich noch in der Entwicklung befinden und möglichst die Probleme der älteren Generationen durch neuartige Konzepte beseitigen sollen (Neles und Pistner, 2012, S. 79).

Der Wasserdampf treibt die Dampfturbine an und wird anschließend in einem *Kondensator* zu flüssigem Wasser kondensiert, sodass dieses wiederum Wärme aufnehmen kann. Beim BWR wird das Wasser direkt in den Reaktorkern geleitet und beim PWR ist eine Wärmeaufnahme des Primärkreislaufs über den Wärmetauscher erneut möglich. Zur Kondensation wird ein Kühlkreislauf benötigt, der beispielsweise Wasser aus Flüssen oder Meeren verwendet und/oder eine Kühlung durch Kühltürme realisiert. (Lamarsh und Baratta, 2001, S. 137ff.)

Bei **Schwerwasserreaktoren** wird schweres Wasser zur Kühlung und zur Moderation eingesetzt. Da schweres Wasser im Vergleich zu leichtem Wasser deutlich weniger freie Neutronen absorbiert, kann als Brennstoff auch Natururan eingesetzt werden. (Neles und Pistner, 2012, S. 73). Schwerwasserreaktoren werden vor allem in Kanada verwendet, wo der sogenannte CANDU-Reaktor (CANDU = Canada Deuterium Uranium) entwickelt und eingesetzt wird. Der CANDU ist ein Druckschwerwasserreaktor (PHWR = pressurized heavy water reactor). Nähere Informationen zum CANDU-Reaktor sind u. a. in NEA (2006) sowie Ziegler und Allelein (2013) zu finden.

Gasgekühlte und graphitmoderierte Reaktoren wurden insbesondere im Vereinigten Königreich (UK) entwickelt. Es wurden zunächst der sogenannte Magnox-Reaktor und später der weiterentwickelte Advanced Gascooled Reactor (AGR) gebaut. Eine Weiterentwicklung von gasgekühlten und graphitmoderierten Reaktoren sind **Hochtemperaturreaktoren** (HTGR). Im Magnox-Reaktor wird Natururan und in seinem Nachfolger angereichertes Uran als Brennstoff verwendet (NEA, 2006, S. 20). Als Moderator wird Graphit verwendet. Die im Druckbehälter entstehende Wärme wird wie beim PWR über einen Dampferzeuger an einen Sekundärkreislauf übergeben, der wiederum auf eine Turbine geleitet wird.

Der **Schnelle Brüter** nutzt die Eigenschaft, dass ein Uran-238-Atom durch Neutroneneinfang und zwei Beta-Zerfälle in Plutonium-239 zerfällt, welches wiederum als Kernbrennstoff dient. Dadurch kann mehr Brennstoff erzeugt werden als verbraucht wird. Da zur Spaltung von Natururan sowie abgereichertem Uran schnelle Neutronen benötigt werden, dürfen die schnellen Neutronen nicht moderiert werden. Um dies zu erreichen, wird flüssiges Natrium als Kühlmittel verwendet, welches sich allerdings aufgrund seiner Reaktivität mit Wasser und seiner Selbstentzündung an der Luft in einem Natriumkreislauf befindet. Durch einen weiteren Puffer-Natriumkreislauf werden das Wasser und mögliche Reaktionen weiter vom RDB weggerückt. In einem tertiären Wasserdampf-Kreislauf wird Wasserdampf auf eine Turbine geleitet. (Ziegler und Allelein, 213, S. 343ff.) Da Natrium mit Luft stark reagiert, wird die Anlage als Sicherheitsmaßnahme unter einer Schutzatmosphäre aus inertem Gas gehalten (Bünemann, 1992, S.50 ff.).

Leichtwassergekühlte und graphitmoderierte Reaktoren werden vor allem von Russland gebaut und exportiert. Das russische Konzept dieses Reaktortyps wird auch als RBMK (Reaktor Bolschoi Moschtschnosti Kanalny, dt. Hochleistungs-Reaktor mit Kanälen) bezeichnet. (NEA, 2006, S. 20) Wie beim BWR wird das verdampfte Wasser direkt, d. h. ohne einen Wärmetauscher und ohne einen Sekundärkreislauf, auf die Turbine geleitet. Der Graphitblock erwärmt sich während des Betriebs auf ca. 700 Grad Celsius. Da Graphit bei diesen hohen Temperaturen mit Luft reagieren würde, wird der Graphitblock durch inerte Gase umgeben.

Neben den bereits genannten Reaktortypen, existieren noch weitere Reaktortechnologien, welche aber weder in einer größeren Anzahl gebaut wurden, noch eine Relevanz in der kommerziellen Nutzung haben. Aus diesem Grund werden insbesondere die Reaktortypen der schwerwassermoderierten leichtwassergekühlten Reaktoren (HWLWR), worunter auch der SGHWR gezählt wird, HWLW-Reaktoren und HWGCR-Reaktoren nicht näher beschrieben.

Allgemein ist anzumerken, dass bei manchen Bauweisen, wie beispielsweise dem CANDU, dem RMBK, dem HWLWR oder dem SGHWR kein Reaktordruckbehälter, sondern Druckröhren existieren, in denen das Kühlmittel zirkuliert. Diese sogenannten Druckröhrenreaktoren sind somit anders zurück zu bauen als Reaktoren mit Reaktordruckbehältern.

2.2.4 Radioaktiv belastete Bereiche einer kerntechnischen Anlage

Während des Rückbaus sind verschiedene Bereiche einer kerntechnischen Anlage aufgrund der erhöhten Radioaktivität besonders vorsichtig zu bearbeiten. Der Kernbrennstoff ist das am höchsten radioaktiv belastete Material in einer kerntechnischen Anlage. Folglich sollte der direkte Kontakt mit dem Kernbrennstoff vermieden werden. Des Weiteren wird aufgrund des vom Kernbrennstoff ausgehenden, erhöhten gesundheitlichen Risikos eine möglichst frühe Entfernung dieser hochradioaktiven Stoffe aus der Anlage während des gesamten Rückbaus angestrebt oder es werden zunächst Arbeiten ausgeführt, die nicht in der Nähe des Kernbrennstoffes stattfinden. Zur weiteren Reduktion des Aktivitätsinventars werden in der Nachbetriebsphase in der Regel auch Betriebsabfälle entsorgt. (Thierfeldt und Schartmann, 2012) Da die Neutronenfreisetzungen während der Spaltvorgänge in Kernreaktoren zu einer Aktivierung getroffener Materialien führen, sind insbesondere der Reaktordruckbehälter sowie seine Einbauten, die Stützkonstruktion, die Abschirmung (Biologischer Schild und benachbarte Komponenten), die Steuer- und Messeinrichtungen, das Kühlwasser und das Schutzgas mit hoher Wahrscheinlichkeit aktiviert. (Neles und Pistner, 2012, S. 160f.; Thierfeldt und Schartmann, 2012, S. 77; Vogt und Schultz, 2011, S.37) Während des Betriebs entstehen häufig Korrosionsprodukte, die im Kühlmittel gelöst und im Kern aktiviert werden, und es entweichen teilweise Spaltprodukte direkt von den Brennelementen. Diese aktivierten Teilchen lagern sich vorwiegend an Biegungen im Rohrsystem sowie in den Leitungen innerhalb des Dampferzeugers bei

Druckwasserreaktoren ab. Das Wasserbecken zur Abklinglagerung ist ebenfalls häufig durch aktivierte Teilchen kontaminiert. Bei Reaktoren ohne Sekundärkreislauf können diese Teilchen aufgrund des fehlenden Sekundärkreislaufs auch die Leitungen zur Turbine sowie die Turbine selbst kontaminieren (IAEA, 1998, S. 24; NEA, 2003, S. 68; Neles und Pistner, 2012, S. 65f.; Volkmer, 2007; Ziegler und Allelein, 2013, S. 281). Trotz des Sekundärkreislaufs bei Druckwasserreaktoren kann es auch bei diesem Reaktortyp aufgrund von Leckagen oder Betriebsfehlern zur Kontamination im Sekundärkreislauf und der Turbine kommen (dies ist bei Druckwasserreaktoren allerdings sehr unwahrscheinlich, sodass das Maschinenhaus i.d.R. frei von Kontamination ist). Durch in der Luft gelöste aktivierte Stoffe können auch die Wände im Reaktorgebäude und das Ventilationssystem kontaminiert sein. (IAEA, 1998, S. 27ff.) Sehr selten kann es auch zu einer Kontamination von Flächen außerhalb des Gebäudes kommen (Thierfeldt und Schartmann, 2012, S. 99).

Um die Arbeiter während dem Rückbau dieser Anlagenteile vor der Strahlung aktivierter Teile zu schützen, müssen besondere Vorkehrungen getroffen werden. Aus diesem Grund werden beispielsweise spezielle Techniken zum Trennen unter Wasser, fernhantierte Techniken zum Trennen (vgl. Kapitel 2.4.1) oder spezielle Abschirmungen eingesetzt.

Nach der Entfernung aktivierter Bauteile stellen vor allem kontaminierte Bauteile und Gebäudeteile eine Gesundheitsgefährdung für die Mitarbeiter dar. Zur Behandlung kontaminierter Bauteile und Gebäudeteile werden spezielle Dekontaminationstechnologien eingesetzt (vgl. Kapitel 2.4.2).

2.3 Auswirkungen ionisierender Strahlung auf Lebewesen und mögliche Schutzmaßnahmen²⁴

Eine der Hauptursachen dafür, dass der Rückbau kerntechnischer Anlagen aufwendig geplant, genehmigt und durchgeführt werden muss, liegt in den Gefahren der ionisierenden Strahlung. Zum Schutz vor diesen Gefahren, werden bestimmte Maßnahmen durchgeführt (vgl. Kapitel 2.3.2), es bestehen spezielle Anforderungen an die eingesetzten Technologien (vgl. Kapitel 2.4) und es existiert ein aufwendiges Genehmigungsverfahren (vgl. Kapitel 2.5.2.5). Dies muss in der Planung berücksichtigt werden und beeinflusst diese. Um die Gründe für die technischen sowie genehmigungsrechtlichen Anforderungen besser nachvollziehen zu können, wird im Folgenden die biologische Wirkung ionisierender Strahlung auf den Organismus von Lebewesen (Kapitel 2.3.1), Maßnahmen zum Schutz vor diesen Auswirkungen beim geordneten Rückbau (Kapitel 2.3.2) und eine Klassifizierung der beim kerntechnischen Rückbau anfallenden Gefahrenstoffe (Kapitel 2.3.3) beschrieben.

2.3.1 Biologische Wirkung ionisierender Strahlung auf den Organismus

Trifft ionisierende Strahlung (vgl. Kapitel 2.2.1) auf Materie, insbesondere auf Organe und Gewebe von Lebewesen, kommt es zu Wechselwirkungen. Wechselwirkungen entstehen, da die bestrahlte Materie die Energie der ionisierenden Strahlung absorbiert. Zur vergleichbaren Messung wird die Energiemenge, die von der bestrahlten Materie absorbiert wird, durch die Masse der bestrahlten Materie geteilt. Der resultierende Wert wird als *Dosis* oder *Energiedosis* bezeichnet. Die Einheit der Energiedosis ergibt sich

²⁴ Teile dieses Kapitels sind Hübner et al. (2017d) entnommen.

als 1 Gy (Gray) = 1 J/kg. (Kiefer, 2012, S. 201f.). Je Art der ionisierenden Strahlung (vgl. Kapitel 2.2.1) ergibt sich eine unterschiedliche, relative biologische Wirksamkeit. Je höher der sogenannte lineare Energietransfer (LET), desto größer ist die biologische Wirksamkeit. Der lineare Energietransfer gibt die Ionisationsdichte der Strahlungsart längs der Teilchenbahn an (Hauptmanns et al., 1987, S. 61). Um die biologischen Wirkungen auf Materie verschiedener Strahlungsarten vergleichbar zu machen, wird die Energiedosis abhängig von der Strahlenart mit einem spezifischen Faktor multipliziert. Dieser Wert beträgt für γ -Strahlen 1, für Neutronenstrahlung 10 und für α -Strahlen 20. Demnach besitzen α -Teilchen einen hohen linearen Energietransfer, während β - und γ -Strahlen den locker ionisierenden Strahlungsarten zugeordnet werden (Hauptmanns et al., 1987, S. 61f.). Der sich ergebende Wert, der die unterschiedliche, relative biologische Wirksamkeit verschiedener Strahlenarten berücksichtigt, wird als *Äquivalentdosis* bezeichnet. Die Einheit der Äquivalentdosis ist Sievert (Sv). (Hagen, 1994, S. 630f.)

Verschiedene Organe von Lebewesen sind auf dieselbe Äquivalentdosis unterschiedlich strahlenempfindlich. Mit Hilfe von Gewichtungsfaktoren für verschiedene Organe wird die Strahlenempfindlichkeit der verschiedenen Organe mit einbezogen. Die auf Organe bezogene Strahlenempfindlichkeit wird als *effektive Äquivalentdosis* bezeichnet. Die Einheit wird ebenfalls in Sievert angegeben. Das Gesamtrisiko der betroffenen Person kann durch das Aufsummieren der Organdosen, unter Berücksichtigung ihrer unterschiedlichen Empfindlichkeit, ermittelt werden. (Hagen, 1994, S. 630f.) Die Gewichtungsfaktoren für verschiedene Gewebearten und Organe sind beispielsweise in der deutschen Strahlenschutzverordnung in Anlage VI, Teil C.2 oder in BfS (2017, S. 17) angegeben. Zur Einordnung der Größenordnung der effektiven Äquivalentdosis werden im Folgenden einige Beispiele genannt. Die natürliche kosmische Strahlung auf den Menschen in Deutschland besitzt eine effektive Äquivalentdosis von 0,3 mSv pro Jahr. Dazu nimmt der Mensch pro Jahr etwa 0,3 mSv pro Jahr

durch die Nahrung auf. Auf einem Flug von Frankfurt nach New York erhält ein Reisender eine effektive Dosis von ca. 0,03 – 0,08 mSv und pro Jahr verursacht die Röntgendiagnostik im Durchschnitt eine jährliche effektive Dosis von 1,7 mSv pro Person. Eine Computertomografie des Bauchraums führt zu einer effektiven Dosis von 8-20 mSv. Gemäß der Strahlenschutzverordnung dürfen radioaktive Ableitungen aus Kernkraftwerken im Normalbetrieb den Wert von 0,3 mSv pro Jahr nicht übersteigen. Im Mittel beträgt die Strahlenexposition der Bevölkerung durch Kernkraftwerke in Deutschland ca. 0,01 mSv pro Jahr. (BfS, 2017) Damit Stoffe aus einer kerntechnischen Anlage freigegeben und damit in den Stoffkreislauf zurückgeführt werden dürfen, müssen diese den Grenzwert von 0,01 mSv unterschreiten (vgl. Kapitel 2.5.3). Ein durchschnittlich abgebranntes Brennelement eines Druckwasserreaktors verursacht nach einer einjährigen Abkühlphase in einem Abstand von einem Meter noch eine effektive Dosis von ca. 198 Sv pro Stunde und nach 50 Jahren 7,88 Sv pro Stunde. Die aufgenommene Dosis sinkt allerdings stark mit dem Abstand zum Brennelement. So sind nach 50 Jahren noch 0,063 Sv aus einer Entfernung von fünf Metern zum Brennelement zu beobachten. (Lloyd et al. 1994, S. 2)

Kinder reagieren im Allgemeinen sensibler auf ionisierende Strahlung als Erwachsene. Einerseits liegt dies daran, dass sie eine durchlässigere Haut besitzen, zum anderen befindet sich das Immunsystem von Kindern noch in der Entwicklungsphase. Des Weiteren können bei Kindern aufgrund ihrer schnelleren Atmung mehr radioaktive Stoffe in den Körper gelangen. Da sich Kinder beim Spielen öfters und länger auf kontaminierten Böden aufhalten als Erwachsene, sind diese mit höherer Wahrscheinlichkeit ionisierender Strahlung ausgesetzt. (Rosen, 2012, S. 8)

Die Strahlungsarten haben auf getroffene Atome und Moleküle unterschiedliche Wirkungen und werden grob in direkt ionisierende und indirekt ionisierende Strahlung unterteilt. Direkt ionisierende Strahlung ionisiert Atome durch das Entfernen von Elektronen aus der Atomhülle des getroffenen Atoms. Zur direkt ionisierenden Strahlung gehören u. a. die

α - und β -Strahlung. Demgegenüber ionisiert die indirekte ionisierende Strahlung Atome nicht direkt, sondern gibt ihre Energie an geladene Teilchen ab, welche wiederum für die Ionisation anderer Atome verantwortlich sind. Zur indirekten ionisierenden Strahlung werden u. a. die γ - und Neutronenstrahlung gezählt. (Vogt und Schultz, 2011, S. 44ff.) Da Wasserstoffkerne lediglich aus einem Proton bestehen, die eine ähnliche Masse wie Neutronen besitzen, kann Wasser zur Schwächung der Neutronenstrahlung verwendet werden (z. B. im Reaktorkern als Moderator, vgl. Kapitel 2.2.3). Da die Zellen von Lebewesen einen sehr hohen Wasseranteil besitzen, kann insbesondere Neutronenstrahlung im Organismus zur Ionisation von Wasseratomen führen. Neben der Ionisation können durch eine sogenannte homolytische Spaltung reaktionsfreudige Radikale entstehen (Kiefer, 2012, S. 34). Diese verursachen Schäden an anderen Zellen, die nicht direkt durch die Strahlung getroffen wurden (Schneider und Burkart, 1998; Vogt und Schultz, 2011, S. 80).

Die von der (direkt oder indirekt) ionisierenden Strahlung ausgehende Gesundheitsgefährdung entsteht, wie beschrieben, aufgrund der Veränderung der Zellen im Organismus von Lebewesen. Hierbei wird zwischen deterministischen und stochastischen Schäden bzw. Strahlungseffekten unterschieden. Charakteristisch für einen deterministischen Strahleneffekt ist, dass eine Schwellendosis überschritten werden muss, damit eine Wirkung eintritt. Dies bedeutet, dass sobald die Schwellendosis überschritten wird, eine Wirkung auf den Organismus hervorgerufen wird und das Ausmaß der Wirkung mit zunehmender Dosis steigt. Dabei hängt die Schwellendosis vom Individuum und seiner individuellen Empfindlichkeit ab. (Vogt und Schultz, 2011, S. 81ff.) Für eine kurzzeitige Ganzkörperbestrahlung liegt der Schwellenbereich zwischen 0,1 Gy und 1 Gy (SSK, 2006, S. 7). Im Gegensatz zu deterministischen Strahleneffekten können stochastische Strahlenschäden bereits bei einer geringen Menge an ionisierender Strahlung auftreten. Ob bei stochastischen Effekten eine Schwellendosis vorliegt und ob zwischen Dosis und Wirkung eine lineare Beziehung vorliegt,

konnte bisher weder bewiesen noch widerlegt werden (Vogt und Schultz, 2011). Gezeigt werden konnte aber, dass das Ausmaß der schädigenden Wirkung nicht von der Dosis abhängig ist und bereits bei einer geringen Menge an ionisierender Strahlung schädigende Wirkungen auftreten können. Ausgelöste Mutationen und Krebserkrankungen basieren auf dem Zufallsprinzip und können unabhängig von der Dosis auftreten (Kauffmann et al., 2011, S. 41). Mit steigender Dosis nimmt lediglich die Wahrscheinlichkeit zu, dass die Strahlung Schäden verursacht. (Herrmann et al., 2006, S. 142; Schneider und Burkart, 1998) Die Art der Abhängigkeit zwischen Dosis und Risiko (linear, quadratisch etc.) verhält sich je Art der Erkrankung unterschiedlich. Beispielsweise wird bei soliden Tumoren eine lineare Abhängigkeit (Vogt und Schultz, 2011) und eine linear-quadratische Abhängigkeit für eine Leukämie-Erkrankung angenommen (National Research Council of the National Academies, 2006, S. 6). Diskutiert wird, ob ionisierende Strahlung geringer Dosis die Zellfunktionen positiv beeinflussen kann. Nähere Informationen zu diesem Thema sind u. a. in Rodemann (2000) und Kauffmann et al. (2011) zu finden.

Die Wirkung ionisierender Strahlung kann im Organismus unterschiedlich sein. In Abbildung 2.2 ist die Reaktionskette von Wirkungen ionisierender Strahlung im Organismus vereinfacht dargestellt. Die im Folgenden beschriebenen Wirkungen ionisierender Strahlungen auf den Organismus beziehen sich vor allem auf Säugetiere, wie den Menschen und andere Tiere. Ähnliche Schäden wie bei Säugetieren können auch bei Pflanzen auftreten. Nähere Informationen über die Auswirkungen ionisierender Strahlen auf Samen und Pflanzen sind in Fendrik und Bors (1991) zu finden.

Vogt und Schultz (2011) unterscheiden somatische Zelldefekte, d. h. die Schädigung entsteht in den Körperzellen eines Organismus, und genetische Zelldefekte, die Veränderungen in den Keimzellen bewirken und dadurch Auswirkungen auf die Nachkommen haben. Deterministische Strahlenschäden entstehen aufgrund von somatischen Zelldefekten. Stochastische Strahlenschäden können sowohl aufgrund somatischer als auch aufgrund

von genetischen Zelldefekten auftreten. Die verschiedenen Wirkungen werden im Folgenden kurz ausgeführt.

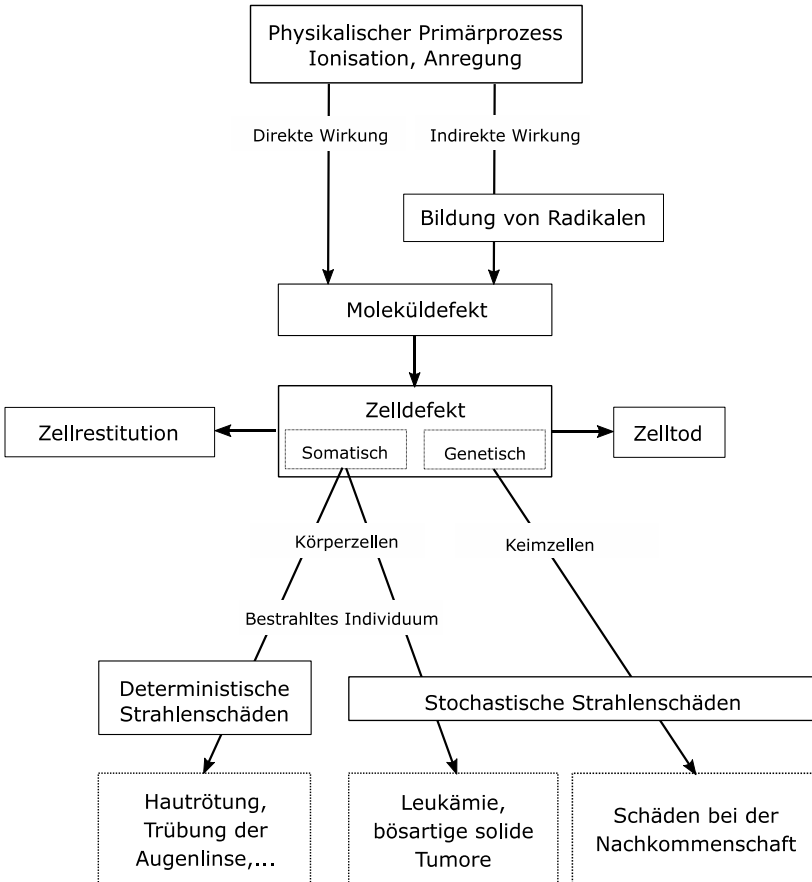


Abbildung 2.2: Reaktionskette von Wirkungen ionisierender Strahlung im Organismus (Quelle: Vogt und Schultz, 2011)

Deterministische Strahlenschäden

Oberhalb der individuellen Schwellendosis jedes Individuums können deterministischen Schäden auftreten. Die Wirkung sowie der Zeitpunkt der Schäden nach der Bestrahlung sind zudem von der Dosismenge und ihrer Verteilung auf den Organismus abhängig (Vogt und Schultz, 2011, S. 82). Hierbei sind ebenfalls die oben beschriebene unterschiedliche Empfindlichkeit der Organe auf ionisierende Strahlung (*effektive Äquivalentdosis*) sowie die Strahlungsart (beispielsweise können γ -Strahlen tiefer in das Gewebe eindringen als Teilchenstrahlen) von Bedeutung (Kauffmann et al., 2011). Sofern die betroffenen Stellen und die jeweilige Dosis bekannt sind, kann die Gesundheitsgefahr für den Organismus abgeschätzt und geeignete Maßnahmen getroffen werden.

Bei gleicher *Äquivalentdosis* hat diese bei der Bestrahlung von Extremitäten eine geringere Schadenswirkung als eine Bestrahlung des gesamten Körpers. Wenn ionisierende Strahlung mit einer Dosis von mehr als 1-2 Gy in kurzer Zeit auf den gesamten Körper trifft, treten innerhalb einer kurzen Latenzzeit Folgen ein, die als Akute Strahlenkrankheit oder Akutes Strahlensyndrom (ARS) bezeichnet werden. (Vogt und Schultz, 2011, S. 82ff.). Grundlage für das Akute Strahlensyndrom sind durch ionisierende Strahlung zerstörte Zellgruppen. Der Schweregrad und Krankheitsverlauf hängt von der *effektiven Äquivalentdosis* (d. h. von der Äquivalentdosis und der unterschiedlichen Empfindlichkeit einzelner Organe) ab. Das Knochenmark und der Darm sind aufgrund ihrer hohen Zellteilungsrate besonders anfällig für schädigende Wirkungen ionisierender Strahlungen (Kiefer, 2012, S. 64). Die Funktionsfähigkeit des Knochenmarks und das damit verbundene blutbildende System werden bei Dosen bis zu 2 Gy geschädigt. Die Latenzzeit kann einige Stunden betragen. Im Gegensatz zu geringeren Dosen, bei denen die Überlebenschancen sehr gut und Therapiemaßnahmen in den meisten Fällen nicht nötig sind, führen hohe Dosen in kürzester Zeit zu einer lebensbedrohlichen Situation des getroffenen Organismus. Innerhalb weniger Stunden können schwere Schäden im Blutbild auftreten,

die mit Symptomen wie Fieber, Durchfall, Erbrechen, inneren Blutungen und Elektrolytstörungen einhergehen. In der Regel sind die Überlebenschancen aufgrund von Multiorganversagen sehr gering. (Kiefer, 2012, S. 66; Schröder und Schröder, 2015) Aufgrund von hohen effektiven Äquivalentdosen kommt es ebenfalls zu Schäden von Keimdrüsen, Knochenmark, Magen-Darm-Trakt, Lunge, Haut, und dem Herz-Kreislauf-System, die häufig zu verschiedenen Krebsarten führen. Schädigende Wirkungen des Nervensystems treten bei einer Dosis zwischen 20 und 50 Gy auf. (Kiefer, 2012; Vogt und Schultz, 2011) Eine detaillierte Darstellung von deterministischen Strahlenwirkungen auf den Organismus nach kurzzeitiger Ganzkörperexposition mit durchdringender Strahlung in Abhängigkeit der Energiedosis ist in Vogt und Schultz (2011) zu finden.

Somatische Defekte können nicht nur durch eine kurzzeitige, hohe Dosis, sondern ebenso aufgrund einer lang andauernden Bestrahlung auftreten. Allerdings ist die schädigende Wirkung einer gleich großen, absoluten über die Zeit verteilten Dosismenge geringer als bei einer kurzzeitigen, hohen Bestrahlung. Eine Dauerbestrahlung überschreitet häufig nicht den Schwellenwert zur Verursachung deterministischer Schäden. Vielmehr treten bei einer Dauerbestrahlung stochastische Schäden auf, die im Folgenden beschrieben werden. (Vogt und Schultz, 2011, S. 82ff.)

Stochastische Strahlenschäden

Im Gegensatz zu deterministischen Strahlenschäden, die spätestens nach einigen Tagen der Bestrahlung auftreten und erkennbar sind, kann bei stochastischen Strahlenschäden nicht vorhergesagt werden, ob der Organismus Schädigungen erfahren hat, da diese häufig erst nach vielen Jahren oder Jahrzehnten auftreten. Des Weiteren können Schädigungen der DNA und dadurch negative Auswirkungen auf Kinder nicht vorhergesagt werden. Allgemein ist es schwer, stochastische Strahlenschäden nachzuweisen, da die Ursachen für Schädigungen des Organismus und Auslöser von Krankheiten nicht eindeutig bestimmt werden können. Viele andere

Faktoren können gleiche Schädigungen und Krankheitsmuster hervorrufen, sodass eine eindeutige Bestimmung einer Krankheitsursache erschwert wird (Schneider und Burkart, 1998, S. 723). Um trotzdem Werte für stochastische Schäden abschätzen zu können, werden Kohortenstudien durchgeführt. Ziel dieser Studien ist es, die Auswirkungen ionisierender Strahlung auf eine große Anzahl an betroffenen Personen zu dokumentieren. Mit Hilfe dieser Studien können Häufigkeiten für stochastische Schäden annähernd ermittelt werden. Obwohl in solchen Studien nicht die genaue Dosis der einzelnen Teilnehmer bestimmt und weitere beeinflussende Faktoren gleicher Krankheitsbilder nicht umfassend berücksichtigt werden können, kann unter Berücksichtigung der natürlichen Entstehung von Tumoren das erhöhte Risiko durch ionisierende Strahlung mit hohen Dosen ermittelt werden. Insbesondere der Vergleich zwischen Gruppen, die nachweislich erhöhter ionisierender Strahlung ausgesetzt, und Gruppen, die nachweislich keiner erhöhten ionisierenden Strahlung ausgesetzt waren, lässt Rückschlüsse auf stochastische Strahlenschäden zu. Beispielsweise wurden Studien an den Überlebenden der Atombombenabwürfe von Hiroshima und Nagasaki oder an Personen, die beruflich mit ionisierender Strahlung in Berührung kommen, oder Bestrahlungspatienten sind, durchgeführt. (Kauffmann et al., 2011; Vogt und Schultz, 2011, S. 85)

Es konnte nachgewiesen werden, dass ionisierende Strahlung zu DNA-Schäden im Zellkern²⁵ führen kann. Teilweise können diese DNA-Schäden durch innere Vorgänge repariert werden, sodass die Bestrahlung in diesen Fällen keine Auswirkungen auf die Funktionsfähigkeit der Zelle hat. Allerdings können Änderungen der DNA, die durch ionisierende Strahlung hervorgerufen wurden, bestehen bleiben, wenn der Reparaturmechanismus eingeschränkt ist. (Blettner et al., 2012) Wenn sich die beschädigten Zellen

²⁵ Mögliche Folgen und Schädigungen der DNA durch ionisierende Strahlung werden in Blettner et al. (2012) und Hagen (1994) näher beschrieben.

teilen oder wenn Mutationen entstehen (Kiefer, 2012, S. 180), wird verändertes Erbgut an die Tochterzellen weitergegeben. Sofern es auf diese Weise zu einer unkontrollierten Vermehrung der beschädigten Zellen kommt, können sich sogar noch nach einer langen Zeit nach der Bestrahlung Tumore entwickeln. Auf diese Weise können Spätschäden, wie beispielsweise eine Krebserkrankung, auftreten. Leukämie tritt in einem Zeitfenster von fünf bis zehn Jahren nach der Bestrahlung auf. Solide Tumore besitzen eine Latenzzeit²⁶ von über 20 Jahren. Allerdings teilen oder mutieren nicht alle Zellen, sodass Zellen mit Zelldefekten auch ohne eine Zellteilung absterben können. (Blettner et al., 2012) Die Latenzzeit einer Schadenswirkung hängt maßgeblich von der Anzahl an Zellen sowie dem Zyklus der Zellerneuerung ab (Schneider und Burkart, 1998). Neben diesen stochastisch somatischen Strahlenschäden kann die Bestrahlung auch stochastisch genetische Strahlenschäden verursachen. Mit Hilfe von Experimenten mit bestrahlten Mäusen konnte nachgewiesen werden, dass erblich bedingte Schädigungen der Nachkommen, wie beispielsweise Missbildungen, auftreten können (Kiefer, 2012, S. 69ff.). Mutierte DNA kann an die direkten Nachkommen vererbt werden. Es ist aber auch möglich, dass vererbte Veränderungen der DNA erst nach mehreren Generationen auftreten. (Vogt und Schultz, 2011, S. 89ff.)

2.3.2 Maßnahmen zum Strahlenschutz und deren Einfluss auf die Rückbauplanung

Menschen und die Umwelt sind sowohl natürlicher als auch zivilisatorischer, d. h. künstlich erzeugter, Strahlung ausgesetzt (Herrmann et al., 2006, S. 139f.). Allerdings ist die Äquivalentdosis der zivilisatorischen Strahlung insbesondere aufgrund der verwendeten Brennstoffe, der Aktivierung und Kontamination in kerntechnischen Anlagen um ein Vielfaches höher

²⁶ In diesem Fall die Zeitspanne, die nach dem Verschwinden der ersten Symptome (nach einer Strahlenexposition) vergeht, bis weitere Wirkungen auftreten (Kiefer, 2012, S. 66).

als die natürliche Strahlung. Aus diesem Grund geht von diesen Stoffen während des Betriebs und während des Rückbaus von kerntechnischen Anlagen eine erhöhte Gefahr für Menschen und die Umwelt aus.

Um Mitarbeiter, die Bevölkerung sowie die Umwelt vor den gesundheitlichen Gefahren der ionisierenden Strahlung (vgl. Kapitel 2.3.1) zu schützen, bestehen bereits während des Betriebs von kerntechnischen Anlagen Schutzmaßnahmen. Grundsätzlich soll die Strahlenexposition begrenzt und der Austritt radioaktiver Elemente in die Umwelt verhindert werden. Dies gilt auch für den Rückbau kerntechnischer Anlagen (BMUB, 2010). Bei einem Austritt radioaktiver Elemente in die Umwelt sind Menschen, Tiere und Pflanzen direkt und indirekt sowohl lokal als auch weltweit gefährdet. Exemplarisch sind in Abbildung 2.3 die Belastungspfade des Menschen durch radioaktive Elemente im natürlichen Kreislauf aufgezeigt.

Insbesondere aufgrund der langen Halbwertszeit vieler radioaktiver Elemente stellen diese auch nach vielen Jahrzehnten noch ein gesundheitsgefährdendes Risiko für Menschen, Tiere und die Umwelt dar. Radioaktive Nuklide können bis in die Stratosphäre aufsteigen, verbleiben dann häufig in wasserlöslicher Form in der Atmosphäre und können viele Jahre später durch Niederschläge über den gesamten Globus verteilt werden. Auf diese Weise werden Nahrungsmittel und andere landwirtschaftliche Erzeugnisse verseucht, da sie die radioaktiven Nuklide teilweise durch Diffusion oder über die Wurzeln aufnehmen. Somit besteht für den Menschen eine Gefahr beim Verzehr von Pflanzen. Ebenso besteht für den Menschen ein gesundheitsgefährdendes Risiko wenn Tiere, denen belastetes Futter gegeben wurde, oder deren Erzeugnisse, wie Milch oder Eier, verzehrt werden. Des Weiteren kann die Umwelt durch Überschwemmungen oder Bewässerung mit belastetem Wasser verseucht werden. (Hill, 1978; Ratschinski, 1979, S. 371ff.) Radioaktive Elemente können ebenfalls in Meere, Seen und Flüsse niederregnen, sodass sowohl das Wasser als auch darin lebende Tiere belastet sind. Radionuklide sammeln sich beispielsweise in Plankton an. In schwach durchströmten

Seen existiert viel Plankton, sodass Fische einer höheren Belastung ausgesetzt sind. (Kröger und Chakraborty, 1989, S. 103ff.) Über die Nahrungskette können gefährliche Stoffe wiederum in den menschlichen Körper gelangen.

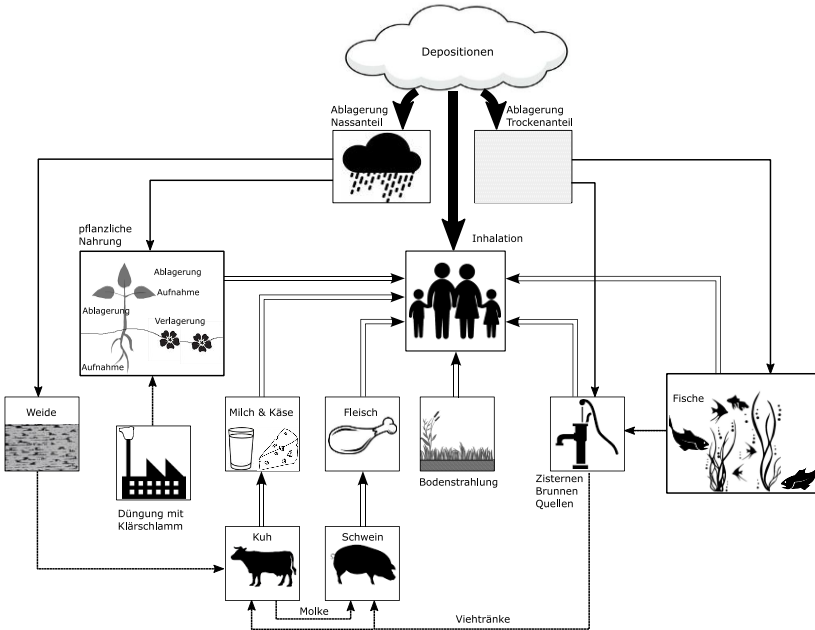


Abbildung 2.3: Belastungspfade des Menschen durch radioaktive Elemente im natürlichen Kreislauf (Quelle: Kröger und Chakraborty, 1989)

Insgesamt soll daher sowohl beim Betrieb als auch während des Rückbaus von kerntechnischen Anlagen ein Austritt radioaktiver Elemente aus der Anlage vermieden werden. Ein Austritt radioaktiver Elemente aus der Anlage kann entweder durch technische Störfälle oder durch ein mutwilliges Herbeiführen auftreten. Um ein mutwilliges, d. h. bewusstes,

Herbeiführen des Austritts radioaktiver Elemente, beispielsweise durch einen Terroranschlag, zu verhindern, bestehen während des Betriebs und während des Rückbaus spezielle Sicherheitsmaßnahmen. Das Sicherheitspersonal am Eingang zum Anlagengelände überprüft alle Menschen, die das Gelände betreten auf Waffen oder andere gefährdende Materialien. Vergleichbar mit einer Kontrolle am Flughafen werden alle Personen durchsucht und ihre Personalien aufgenommen. Ebenso werden alle Maschinen, Ausrüstungen und Materialien, die auf das Gelände gebracht werden sollen, zuvor überprüft. Personen, die keine Mitarbeiter der Anlage sind, z. B. Besucher, müssen vom zuständigen Wachpersonal auf dem Anlagengelände begleitet werden. Zum Schutz vor Terroranschlägen von außerhalb der Anlage sind spezielle Schutzmechanismen, z. B. zur Abwehr von Luftangriffen, installiert. Alle Sicherheitsmaßnahmen bestehen nicht nur während des Betriebs der kerntechnischen Anlage, sondern müssen auch während des Rückbaus aufgrund der immer noch von ihr ausgehenden Gefahr für die Menschen und Umwelt aufrechterhalten und teilweise angepasst werden.

Um den Austritt radioaktiver Elemente aus der Anlage aufgrund technischer Störfälle zu verhindern, sind spezielle technische Vorkehrungen notwendig. Beispielsweise herrscht im Reaktorgebäude ständig ein geringer Unterdruck, sodass ein Ausströmen von radioaktiven Partikeln über die Luft aus dem Gebäude verhindert wird. Der ständig aufrecht zu erhaltene Unterdruck sowie die besondere Filterung der Luft im Reaktorgebäude stellt hohe Anforderungen an die Lüftungsanlage, die auch während dem Rückbau in Betrieb und aufgrund der sich verändernden Gebäudestrukturen ständig angepasst werden muss. Damit keine radioaktiven Partikel durch Menschen oder Gegenstände, die das Reaktorgebäude verlassen, außerhalb der Anlage transportiert und in die Umwelt gelangen können, werden alle Materialien und Menschen, die das Reaktorgebäude verlassen, auf Kontamination überprüft. Im Falle einer Kontamination ist

ein Verlassen des Kontrollbereichs²⁷ nur nach erfolgreicher Dekontamination erlaubt. Darüber hinaus werden spezielle Maschinen eingesetzt (vgl. Kapitel 2.4), die häufig unter Wasser arbeiten, sodass eine unkontrollierte Verbreitung radioaktiver Partikel verhindert wird. Insgesamt ergeben sich daraus hohe Schutzmaßnahmen, die insbesondere während des Rückbaus kerntechnischer Anlagen aufrecht zu erhalten sind und daher auch in der Rückbauplanung berücksichtigt werden müssen.

Neben der Gefahr, dass radioaktive Nuklide in die Umwelt gelangen, werden auch Schutzmaßnahmen gegen die Strahlenexposition der in der Anlage arbeitenden Mitarbeiter vorgenommen. Grundsätzlich ist gemäß dem sogenannten ALARA-Prinzip²⁸ (As Low As Reasonably Achievable) die Strahlenexposition von Betriebspersonal und Umgebung zu minimieren (BMUB, 2010). Die Gefahr von Strahlung für die Mitarbeiter hängt vor allem mit ihrer Fähigkeit zusammen, dass diese von außen in den menschlichen Körper eindringt.

Entscheidend bei der Gefahrenabschätzung und somit für die Maßnahmen zum Schutz vor ionisierender Strahlung ist die Art der Strahlung. Bei α - und β -Strahlen ist der Abstand zu den Strahlungsquellen und eine geeignete Abschirmung relevant. Da α - und β -Strahlen bereits von der Luft absorbiert werden, ist ein größtmöglicher Abstand von der Strahlungsquelle als Schutzmaßnahme bereits ausreichend. Denn α -Strahlen können Luft lediglich zwischen 2,5 und 9 cm und β -Strahlen bis zu 8,5 m durchdringen. In der Nähe der Strahlungsquellen von α - und β -Strahlen ist eine Abschirmung mit spezieller Kleidung und weiteren Abschirmvorrichtungen möglich. (Mortimer et al., 2015) Die größte Gefahr für Menschen geht von α - und β -Strahlen durch Inkorporation aus, da diese ohne eine Absorption, z. B. durch Luft, direkt auf Zellgewebe einwirkt (Mortimer et al., 2015, S. 651). Um eine Inkorporation zu vermeiden, ist das Essen in belasteten

²⁷ Der Begriff des Kontrollbereichs wird in Kapitel 2.5.2.3 definiert.

²⁸ Bzgl. des ALARA-Prinzips vgl. Kapitel 2.5.2.3.

Bereichen, insbesondere dem Kontrollbereich, verboten. Des Weiteren sind bei Staubentwicklungen Atemschutzmasken zu tragen.

Im Gegensatz zu α - und β -Strahlen beeinflusst das Medium Luft die elektromagnetischen Wellen der γ -Strahlung kaum. Die Intensität der γ -Strahlung kann durch Abschirmung lediglich reduziert aber nicht verhindert werden. γ -Strahlen besitzen folglich bei einer äußeren Bestrahlung aufgrund ihrer Eindringtiefe die höchste Schadenswirkung im Vergleich zu α - und β -Strahlung (Mortimer et al., 2015, S. 650f.). Daher sollte zum Schutz vor γ -Strahlung die Entfernung möglichst groß sein und eine Abschirmung möglichst gut vorgenommen werden. Des Weiteren sollte die Dauer, während der ein Lebewesen γ -Strahlung ausgesetzt ist, minimiert werden. (Mortimer et al., 2015, S. 651)

Zur Schwächung der Neutronenstrahlung bieten sich Protonen an, da deren Masse fast genauso groß ist wie die von Neutronen. Deshalb eignet sich das Medium Wasser wegen der Wasserstoffkerne sowie Material aus Kunststoff zur Reduktion der Strahlung. (Kiefer, 2012, S. 32f.) Aus diesem Grund wird im Kernreaktor häufig Wasser als Moderator verwendet (vgl. Kapitel 2.2.3). Für den technischen Rückbau spielt Wasser als Abschirmung ebenfalls eine wichtige Rolle.

Zusammenfassend werden zum Schutz des Betriebspersonals, sofern dies möglich ist, folgende Schutzmaßnahmen durchgeführt:

- Verwendung von Abschirmvorrichtungen (BMUB, 2010),
- Fernhantierte Demontage, Dekontamination und Verpackung von Stoffen mit Strahlenexposition²⁹ (BMUB, 2010),
- Einhaltung einer größtmöglichen Entfernung von Gefahrenstoffen,
- Minimierung der Dauer der Strahlenexposition.

²⁹ Bzgl. fernhantierter Technologien vgl. Kapitel 2.4.

Alle Schutzmaßnahmen, um einen Austritt radioaktiver Elemente aufgrund technischer Störfälle zu vermeiden und alle Aktivitäten in kerntechnischen Anlagen werden von speziell ausgebildetem Personal, die sogenannten Strahlenschutzbeauftragten, übernommen. Alle Aktivitäten, bei denen ionisierende Strahlung negative Auswirkungen auf Mitarbeiter oder die Umwelt haben kann, werden von den Strahlenschutzbeauftragten beobachtet (vgl. Kapitel 2.5.2.3). Die von den Mitarbeitern aufgenommenen Dosen werden zudem dokumentiert. Dies ist auch während des Rückbaus einer kerntechnischen Anlage aufrechtzuerhalten. In der deutschen Strahlenschutzverordnung³⁰ (StrSchV) wird beispielsweise geregelt, wie hoch die maximale Dosis von Mitarbeitern betragen darf (bzgl. der Strahlenschutzverordnung vgl. Kapitel 2.5.2.3).

Vorgesehene Sicherheits- und Schutzmaßnahmen sowie deren Anpassungen während des Rückbaus müssen in der Rückbauplanung berücksichtigt werden. (BMUB, 2010)

2.3.3 Klassifizierung radioaktiver Abfälle

Auch die beim Rückbau kerntechnischer Anlagen anfallenden radioaktiven Abfälle sind gesundheitsgefährdend, sodass diese abgeschirmt und endgelagert werden müssen. Die Zwischen- und Endlagerung sind nicht der Fokus dieser Arbeit. Im Folgenden soll daher lediglich eine kurze Zusammenfassung über die Klassifizierung radioaktiver Abfälle gegeben werden.

Die beim Rückbau einer kerntechnischen Anlage anfallenden Abfälle können nach ihrer Herkunftsart unterschieden werden, wobei dies noch keine Aussage über die Strahlungsart und dem Umgang mit diesen Abfällen beinhaltet. Abfälle werden als *Primärabfall* bezeichnet, wenn diese aus der

³⁰ Verordnung über den Schutz vor Schäden durch ionisierende Strahlen (Strahlenschutzverordnung - StrSchV) vom 11. Dezember 2014, BGBl. I 2014, S. 2010.

Anlage selbst stammen, d. h. beispielsweise abgebaute Anlagen- oder Bauteile, Rohre, Bauschutt nach dem Abbruch der Gebäudestrukturen, elektrische Einrichtungen oder das Biologische Schild. Alle Abfälle, die erst nach der Stilllegung, d. h. im Zuge des Rückbaus, zusätzlich zu den Primärabfällen hinzukommen, werden als *Sekundärabfälle* bezeichnet. Dies können beispielsweise Dekontaminationsflüssigkeiten, Abrasivmittel zum Trennen und Dekontaminieren (vgl. Kapitel 2.4) oder durch die Rückbauarbeiten radioaktiv belastete Werkzeuge sein. (Thierfeldt und Schartmann, 2012)

Unabhängig von der Herkunft der beim kerntechnischen Rückbau anfallenden Abfälle können diese freigemessen werden oder müssen verpackt und in ein Endlager für radioaktive Abfälle verbracht werden. Für den weiteren Umgang mit radioaktiven Abfällen ist eine Klassifizierung vorzunehmen.

International existieren verschiedene Klassifizierungen. Im Folgenden werden die Klassifizierungen der IAEA und von Deutschland vorgestellt. Die Europäische Kommission verwendet das Klassifizierungssystem der IAEA.

Klassifizierungssystem der International Atomic Energy Agency

Im Jahr 2009 hat die IAEA ihre seit dem Jahr 1994 geltende Richtlinie aktualisiert. Durch die Aktualisierung wurde der Fokus stärker auf die Langzeitsicherheit der Abfälle gelegt, die verschiedenen Arten von radioaktiven Abfällen wurden umfassender beleuchtet und entsprechende Entsorgungswege wurden aufgezeigt (IAEA, 2009, S. 2, 27). Somit ergibt sich folgende Klassifizierung (IAEA, 2009, S. 8ff.):

- **Exempt Waste (EW):** Dieser Abfall enthält so geringe Mengen an Radionukliden, dass dieser keiner behördlichen Beaufsichtigung bedarf und somit konventionell entsorgt werden kann. Eine Freigabe³¹ kann erfolgen, wenn die effektive Dosis für ein Individuum 10 $\mu\text{Sv/a}$ nicht überschreitet.
- **Very short lived waste (VSLW):** Dieser Abfall enthält kurzlebige Radionuklide, welche eine Aktivität oberhalb des Freigabelimits aufweisen. Da kurzlebige Radionuklide eine Halbwertszeit kleiner als 30 Jahre besitzen (IAEA, 2009, S. 7), kann dieser Abfall einer Abklinglagerung unterzogen werden, sodass dieser im Anschluss als konventioneller Abfall entsorgt werden kann, sofern er dann die Freigabelimits unterschreitet. Um Abfall als VSLW zu klassifizieren, sind insbesondere die Halbwertszeit und das Ausmaß des Anteils von langlebigen Radionukliden im Abfall relevant. In der Regel werden flüssige und gasförmige radioaktive Abfälle mit einer Halbwertszeit von 100 Tagen in diese Kategorie gezählt.
- **Very low level waste (VLLW):** Ist die Aktivität von Abfällen lediglich minimal größer als die Freigabegrenze und bedürfen diese Abfälle gleichzeitig keiner speziellen Isolation, dann dürfen diese Abfälle in oberflächennahen Deponien gelagert werden, in denen auch andere Gefahrenstoffe lagern. Allerdings unterliegen die Deponien einer behördlichen Kontrolle. Die IAEA definiert keine konkreten Kriterien für die Einordnung in diese Kategorie, da diese abhängig von der Sicherheitseinstufung durch die zuständige Behörde ist und die bauliche Struktur sowie die Umgebungsbedingungen jeder Deponie unterschiedlich sein können (IAEA, 2009, S. 11). Typische Abfälle dieser Kategorie sind Bauschutt und Erde mit geringer Aktivität.

³¹ Der Begriff der *Freigabe* wird in Kapitel 2.5.3 definiert und von der *Herausgabe* abgegrenzt.

- **Low level waste (LLW):** Hierunter fallen Abfälle, die über den Freigabegrenzen liegen, eine gewisse, aber begrenzte Menge an langlebigen Radionukliden enthalten und einer robusten Isolierung bedürfen, welche einige hundert Jahre hält. Die Lagerung kann in oberflächennahen gebauten Endlagern geschehen. In dieser Abfallklasse können sowohl kurzlebige Radionuklide mit höherer Aktivität als auch langlebige Radionuklide mit geringerer Aktivität enthalten sein. Abhängig von der Art der Radionuklide können die Lagerstätten unterschiedlich ausgelegt werden, was von den zuständigen Behörden und deren Sicherheitsanalysen abhängig ist. Für langlebige Radionuklide empfiehlt die IAEA die Festlegung von Aktivitätslimits je nach Endlagerstätte. Einige Staaten haben als Grenze 400 Bq/g im Durchschnitt und 4000 Bq/g festgelegt.
- **Intermediate level waste (ILW):** Sofern die Abfälle eine hohe Anzahl an langlebigen Radionukliden besitzen, bedürfen diese einer größeren Abschirmung und sind daher für eine oberflächennahe Lagerung ungeeignet. Stattdessen sollten diese Abfälle in bis zu einigen hundert Metern Tiefe gelagert werden. Die IAEA weist in ihrer Klassifikation darauf hin, dass eine scharfe Trennung zwischen LLW und ILW hinsichtlich des Aktivitätslevels nicht auszusprechen ist, da Grenzwerte für die Aktivität immer von den entsprechenden baulichen Spezifikationen der Lagerstätten abhängen.

- **High level waste (HLW):** Diese Abfälle beinhalten Stoffe mit einer so hohen Aktivität, dass diese eine signifikante Menge Wärme durch den radioaktiven Zerfallsprozess abgeben und/oder es handelt sich um Stoffe mit einer großen Menge an kurz- und langlebigen Radionukliden. Aus diesem Grund bedürfen diese Abfälle einer größeren Isolation und Abschirmung als bei Abfall der Klasse ILW, was durch die Lagerung in tiefen und geologisch stabilen Schichten erfolgen sollte. Das entscheidende Merkmal dieser Abfallklasse ist die signifikante Hitzeentwicklung. Abfall der Klasse HLW hat typischerweise eine Aktivität von 1016 bis 1018 Bq/m³, was beispielsweise für abgebrannte Brennelemente oder für Abfälle aus der Wiederaufbereitung von Brennelementen gilt.

Klassifizierungssystem in Deutschland

In Deutschland werden radioaktive Abfälle anhand ihrer Wärmentwicklung klassifiziert. Mit zunehmender Radioaktivität nimmt auch die Wärmeentwicklung zu (Neles und Pistner, 2012, S. 162).

In die Kategorie **wärmeentwickelnder Abfälle** fallen im Allgemeinen bestrahlte Brennelemente und Abfälle aus deren Wiederaufbereitung (BMUB, 2015, S. 4). „Radioaktive Abfälle mit **vernachlässigbarer Wärmeentwicklung** werden hauptsächlich beim Betrieb und während des Rückbaus der Leistungsreaktoren generiert.“ (BMUB, 2015, S. 4).

Diese Klassifizierung ist das Ergebnis des Planfeststellungsverfahrens für das Endlager Konrad. Das Wirtsgestein von Konrad soll maximal um drei Grad Kelvin vom eingelagerten Abfall beeinflusst werden, um eine Belastung des Gesteins durch Temperaturschwankungen auszuschließen (Neles und Pistner, 2012, S. 162). Aus diesem Grund fallen Abfälle, die dieses Maß einhalten, in die Kategorie **Abfälle mit vernachlässigbarer Wärmeentwicklung** und können im Endlager Konrad eingelagert werden. Demgegenüber werden Abfälle als **wärmeentwickelnde Abfälle** kategorisiert, wenn sich

das Wirtsgestein von Konrad durch deren Einladung um mehr als drei Grad Kelvin aufheizen würde. Ein Endlager für wärmeentwickelnde Abfälle ist bisher in Deutschland noch nicht gefunden.

2.4 Technologien zum Trennen und zur Dekontamination kerntechnischer Anlagen³²

Der Rückbau kerntechnischer Anlagen unterscheidet sich vom konventionellen Rückbau von Anlagen und Gebäuden. Insbesondere die von kontaminierten und aktivierten Bauteilen ausgehende ionisierende Strahlung führt dazu, dass beim Rückbau kerntechnischer Anlagen besondere technische Vorgehensweisen zum Schutz von Mitarbeitern und der Umwelt angewendet werden müssen (vgl. Kapitel 2.3.2). Hierzu sind Technologien einzusetzen, die den strahlenschutzrechtlichen Anforderungen genügen und die Mitarbeiter einer möglichst geringen Dosis aussetzen. Einerseits werden spezielle Technologien zum Rückbau von Anlagenstrukturen sowie Bauteilen (vgl. Kapitel 2.4.1) und andererseits spezielle Technologien zur Dekontamination (vgl. Kapitel 2.4.2) verwendet.

Beim kerntechnischen Rückbau ist der Einsatz von ferngesteuerten, fernbedienten oder fernhantierten sowie von automatisiert (selbständig) arbeitenden Technologien häufig eine Möglichkeit, das Betriebspersonal möglichst wenig ionisierender Strahlung auszusetzen. Eine genaue Unterscheidung der Begriffe fernhantiert, fernbedient und ferngesteuert findet in der Stilllegungspraxis in der Regel keine Anwendung. Obwohl die drei Arten der Bedienung die Gemeinsamkeit haben, dass sich das Betriebspersonal durch den Einsatz einer entsprechenden Technik nicht im unmittelbaren Strahlenfeld aufhalten muss, bezeichnet jeder der Begriffe einen eigenen Sachverhalt. Unter *fernhantierten* Techniken werden streng

³² Teile dieses Kapitels sind aus Hübner et al. (2017c) entnommen.

genommen reine Verlängerungswerkzeuge zur Vergrößerung des Abstands zwischen Person und zu bearbeitendem Werkstück verstanden. *Fernbediente* Techniken bezeichnen in der Regel Werkzeuge, die über mechanische oder elektronische Schnittstellen bedient werden, wobei der Bedienende in der Regel direkten Sichtkontakt zum Werkzeug hat und daher nur einige Meter von diesem entfernt ist. Bei *ferngesteuerten* Techniken findet zwar ebenfalls eine Bedienung über mechanische oder elektronische Schnittstellen statt, allerdings können Kameras oder andere Sensoren eingesetzt werden, sodass eine Bedienung des Werkzeugs ohne direkten Sichtkontakt auch aus größerer Entfernung möglich ist. Im Folgenden wird verallgemeinernd der Begriff *fernhandliert* für Technologien verwendet, die nicht in unmittelbarer Nähe von Betriebspersonal bedient werden müssen, sofern nicht eine spezielle Technologie zum fernhandlierten, fernbedienten oder ferngesteuerten Einsatz beschrieben wird. (Kaulard et al., 2010)

Prinzipiell existieren unterschiedliche Technologien, die jeweils für den fernhandlierten oder automatisierten Einsatz zur radiologischen und physikalischen Charakterisierung als auch für Trenn-, Zerlege³³- und Dekontaminationsarbeiten eingesetzt werden können. Aufgrund der meist individuellen Bedingungen in einer kerntechnischen Anlage, werden vollautomatisierte Technologien bisher nur selten eingesetzt. Häufiger ist die Verwendung von fernhandlierten Systemen, beispielsweise sogenannter Master-Slave-Manipulatoren oder ferngesteuerter Industrieroboter, sinnvoll. (Michal, 2012)

Im Folgenden werden existierende Technologien zur Dekontamination und zum Trennen vorgestellt, die insbesondere beim Rückbau kerntechnischer Anlagen eingesetzt werden.

³³ Im Folgenden wird der Begriff der Trennung verwendet und schließt Zerlegevorgänge mit ein, da das Zerlegen durch das Trennen ausgeführt werden kann.

Die verschiedenen einsetzbaren Technologien (automatisiert, fernhantiert oder manuell bedienbar) nehmen direkten und indirekten Einfluss auf die Projektplanung. Beispielsweise können bestimmte Dekontaminations- und Rückbauvorgänge mit alternativen Technologien ausgeführt werden, sodass das gleiche Dekontaminations- bzw. Rückbauergebnis erreicht wird. Allerdings besitzen die unterschiedlichen Technologien größtenteils unterschiedliche Anschaffungs- und Betriebskosten, benötigen unterschiedliches Personal zur Handhabung (sowohl unterschiedlicher Ausbildungsstand als auch eine unterschiedliche Anzahl) und erzeugen unterschiedlich viel Abfall je Abfallkategorie (vgl. Kapitel 2.3.3) und damit auch unterschiedlich hohe Entsorgungskosten. Alle diese Einflüsse sind von den gewählten Technologien abhängig. Da die Wahl der Technologien Teil der Projektplanung ist, werden im Folgenden die grundlegenden Funktionsweisen und deren Einfluss auf die Rückbauplanung unterschiedlicher Trenn- und Dekontaminationstechnologien aufgeführt. Hierbei wird der aktuelle Stand der Technik aufgezeigt. Da der Fokus dieser Arbeit nicht auf der Entwicklung und Untersuchung dieser Technologien, sondern auf deren Anwendung und Einsatz im Rahmen der Rückbauplanung liegt, wird dem Leser lediglich ein Überblick über angewendete Dekontaminations- und Trenntechnologien gegeben und es wird auf detaillierte Ausführungen verwiesen. Viele der aufgeführten Techniken können auch für den fernhantierten Einsatz umgerüstet werden. Aus diesem Grund wird je Technik ein Hinweis darauf gegeben, wenn diese auch fernhantiert einsetzbar ist. Da wie bereits beschrieben wurde, für die Ausführung eines Vorgangs alternative Technologien eingesetzt werden können, wird im Kapitel 2.4.3 der Auswahlprozess von Techniken im Rahmen der Projektplanung beschrieben.

2.4.1 Technologien zum Trennen von Bauteilen in kerntechnischen Anlagen

Für den Rückbau kerntechnischer Anlagen werden einerseits Technologien des konventionellen Rückbaus und andererseits spezielle Technologien für den Rückbau kerntechnischer Anlagen eingesetzt. Einige Technologien des konventionellen Rückbaus müssen allerdings angepasst werden, damit diese im Umfeld ionisierender Strahlung einsetzbar sind. Einige der speziell für den Rückbau kerntechnischer Anlagen entwickelten Technologien werden fernhantiert, um Mensch und Umwelt vor der ionisierenden Strahlung zu schützen. (Noynaert, 2012)

Im Folgenden werden Technologien des konventionellen Rückbaus lediglich detaillierter beschrieben, wenn an diesen Anpassungen für den Einsatz in kerntechnischen Anlagen vorgenommen werden müssen. Ausführliche Ausführungen zu Technologien des konventionellen Rückbaus sind unter anderem in Schröder und Pocha (2015) oder in Deutscher Abbruchverband e.V. (2014, 2007) zu finden. Darüber hinaus liegt der Fokus der Analyse auf Technologien zum Trennen, die speziell für den kerntechnischen Rückbau einsetzbar sind. Die Eigenschaften von einsetzbaren Trenntechnologien werden des Weiteren im Anhang A.1 tabellarisch zusammengetragen. Ausführlichere Informationen zu den vorgestellten Technologien sowie Ausführungen über weitere Verfahren sind unter anderem in Gentes et al. (2015), Kaulard et al. (2010), Europäische Kommission (2009), IAEA (1999) sowie in NEA (1999) zu finden.

Technologien zum Trennen werden in thermische und mechanische Trennverfahren unterschieden.

2.4.1.1 Thermische Trennverfahren

Thermische Trennverfahren erzeugen mit Hilfe von Wärme Kerben in dem zu trennenden Bauteil. Durch den gezielten Einsatz von Wärme wird das

Material an der bearbeitenden Stelle geschmolzen oder sublimiert und mit Hilfe der Schwerkraft oder mit Hilfe eines Mediums (z. B. Wasser oder Gas) aus der Kerbe entfernt. Mit diesem Verfahren können die Kerben so tief ausgedehnt werden, dass Bauteile in Einzelteile zertrennt werden. Da dieses Verfahren berührungsfrei funktioniert, können Rückstellkräfte vermieden werden, sodass entsprechende Konstruktionen zum Auffangen dieser Kräfte nicht benötigt werden. (Europäische Kommission, 2009)

Insbesondere zum Trennen metallischer Komponenten werden thermische Trennverfahren eingesetzt. Zum Trennen von mineralischen Baustoffen sind nicht alle thermischen Trennverfahren geeignet. Die meisten Verfahren eignen sich auch für den Unterwassereinsatz. Da beim Unterwassereinsatz darauf zu achten ist, dass die Kameras stets freie Sicht haben, sollte der bei thermischen Trennverfahren entstehende Ruß möglichst minimiert oder abgesaugt werden. Als weiterer Nachteil dieser Verfahren ist die Bildung von Brenngasen, Aerosolen und Schmelzresten zu nennen, die in Filteranlagen aufgefangen werden müssen. Vorteile von thermischen Trennverfahren sind die hohen Schnittgeschwindigkeiten und ihr im Vergleich zu anderen Techniken geringer Platzbedarf. (Noynaert, 2012; Thierfeldt und Schartmann, 2009, S. 138)

Die Technologien der thermischen Trennverfahren können nach ihrer Energiequelle unterschieden werden, sodass sich drei Gruppen ergeben (Europäische Kommission, 2009):

- 1. Chemische Energiequelle:** Als Standardverfahren mit chemischer Energiequelle sind das *autogene Brennschneiden* und die *Sauerstofflanze* zu nennen. Beim autogenen Brennschneiden wird ein Brenngas-Sauerstoffgemisch entzündet, welches eine Flamme bildet. Gleichzeitig sorgt das austretende Gasgemisch für den Ausstoß der Schmelze. Das autogene Brennschneiden wird vor allem zum Trennen unlegierter und niedriglegierter Stähle, aber auch zum Trennen von Molybdän und Titan eingesetzt. Aus

diesem Grund wird dieses Verfahren vor allem bei der Zerlegung austenitisch-plattierter und ferritischer Werkstoffe verwendet (Thierfeldt und Schartmann, 2009 S.130). Um mit Hilfe des autogenen Brennschneidens auch Betonstrukturen zerlegen zu können, ist eine höhere Brenntemperatur notwendig. Zum Erhöhen der Brenntemperatur werden dem Brenngas-Sauerstoffgemisch Eisen- oder Magnesiumpartikel (sogenanntes *Pulverbrennschneiden*) zugemischt. Für den Abfluss der Schlacke ist vor dem Beginn des Schneidens ein durchgehendes Loch zu bohren. Des Weiteren muss für den Einsatz des autogenen Brennschneidens hinter der Schnittfläche ein freier Raum vorhanden sein.

Mit über 2.500°C ist die Sauerstofflanze als zweites Standardverfahren das Werkzeug mit der höchsten Brenntemperatur. Bei diesem Verfahren findet der Brennprozess zwischen Drähten statt, die in einem Metallrohr liegen. Um den Brennprozess zu befeuern, wird durch das innenliegende Rohr Sauerstoff geleitet. Eine weitere Erhöhung der Brenntemperatur kann durch die Zugabe von Metallpulver erreicht werden (Noynaert, 2012).

- 2. Elektrische Energiequelle:** Es können thermische Verfahren mit elektrischer Energiequelle eingesetzt werden, die mit oder ohne ein zusätzliches Arbeitsgas arbeiten. Eine verbreitete und ausgereifte Schneidtechnologie mit einem Arbeitsgas ist das sogenannte *Plasma(schmelz)schneiden*. Bei diesem Verfahren wird mit Hilfe eines Plasmagases ein Lichtbogen zwischen der Elektrode und dem zu bearbeitenden, metallischen Werkstück erzeugt. Dadurch entsteht ein bis zu 30.000°C heißes Plasma, das eine Fuge in dem Werkstück erzeugt. Gleichzeitig wird das geschmolzene Material durch den Gasdruck aus der Schnittfuge getrieben. Aufgrund der kompakten Bauweise und des relativ niedrigen Gewichts des Handstücks ist das Plasma(schmelz)schneiden sehr

gut für den manuellen Einsatz geeignet. Darüber hinaus ist ein fernhantierter Unterwassereinsatz durchführbar. (Gentes et al., 2015, S. 64ff.)

Zudem weist das Plasmaschneiden eine hohe Schnittgeschwindigkeit und einen geringen Verschleiß auf, weshalb dieses Verfahren beim Rückbau kerntechnischer Anlagen die meist benutzte Technik ist.

Sofern kein Arbeitsgas zur Ionisation und zur Erzeugung eines Plasmas genutzt wird, können Werkstoffe mit Hilfe von *Lichtbogenverfahren* getrennt werden. Vergleichbar mit dem Plasma(schmelz)schneiden wird zwischen einer Elektrode und dem Werkstück ein Lichtbogen erzeugt. Das klassische Lichtbogenverfahren mit dauerhaftem Lichtbogen zwischen der Elektrode und dem Werkstück ist aufgrund schwieriger geometrischer Verhältnisse mancher zu trennender Werkstücke nicht immer möglich. Daher hat sich der Einsatz der *Funkenerosion* bewährt, welche die Grundtechnologie der CAMX-Verfahren darstellt. Bei der Funkenerosion wird durch den Vorschub einer Elektrode wiederholt Kontakt mit dem Werkstück hergestellt, sodass jeweils ein impulsartiger Lichtbogen (Funken) entsteht, der das Material des zu bearbeitenden Werkstücks schmilzt und entfernt. Da dieses Verfahren nur eine geringe Schnittgeschwindigkeit aufweist, wird es insbesondere beim Bohren von Löchern eingesetzt (Kaulard et al., 2010, S. 33). Prinzipiell wird zwischen sechs verschiedenen Lichtbogenschneidverfahren unterschieden (Kaulard, et al., 2010, S. 32ff.):

- Kontakt-Lichtbogen-Metall-Schneiden/-Bohren: CAMC (Contact Arc Metal Cutting) und CAMD (Contact Arc Metal Drilling)
- Kontakt-Lichtbogen-Metall-Trennschleifen: CAMG (Contact Arc Metal Grinding)

- Lichtbogen-Wasserstrahlschneiden
- Lichtbogen-Luftschneiden
- Lichtbogen-Sauerstoffschneiden

Eine detailliertere Beschreibung der Eigenschaften der Lichtbogenschneidverfahren ist in Anhang A.1 aufgeführt.

3. Laserschneidverfahren: Unter den Laserschneidverfahren werden drei Prozessarten unterschieden. Bei allen drei Verfahren wird der Werkstoff mit Hilfe eines Laserstrahls geschmolzen. (Europäische Kommission, 2009, S. 44ff.; Kaulard et al., 2010, S. 31)

- Laserstrahlschmelzschnitten: Bei diesem Verfahren wird der geschmolzene Werkstoff mittels Inertgas aus der Kerbe geblasen. Zusätzlich verhindert das Inertgas ein Oxidieren der Oberfläche.
- Laserstrahlbrennschnitten: Hierbei wird Sauerstoff als Schneidgas verwendet. Der Sauerstoff reagiert mit dem Werkstück exotherm, sodass eine erhöhte Schneidtemperatur erzeugt wird. Diese ermöglicht eine im Vergleich zum Laserstrahlschmelzschnitten höhere Schnittgeschwindigkeit.
- Laserstrahlsublimationsschnitten: Bei diesem Verfahren sublimiert der Laser das Material möglichst schmelzarm. Durch die Expansion des Dampfes entsteht ein Druck, der die Schmelze aus der Kerbe ausschleudert. Da für das Sublimieren von Werkstoffen teilweise sehr hohe Temperaturen notwendig sind (vor allem für metallische Werkstoffe), eignet sich dieses Verfahren vor allem für Kunststoffe und organische Materialien.

Neben ihrer Präzision und der Möglichkeit, dass nahezu jedes Material geschnitten werden kann, bietet das Laserschneidverfahren den Vorteil der Mobilität, sodass der

Laserschneidkopf für den fernhantierten Einsatz besonders gut geeignet ist. In der Industrie sind Laserschneidverfahren zwar aufgrund ihrer hohen Präzision und Schnittgeschwindigkeit sehr gefragt, im Rückbau sind sie zurzeit allerdings nicht weit verbreitet. Nachteil des Laserschneidens ist insbesondere die Bildung von Aerosolen, die mit speziellen Absaug- und Filtereinrichtungen aufgefangen werden müssen. Insbesondere der hohe technische Aufwand steht einer weiten Anwendung entgegen (Kaulard et al., 2010, S. 31; Thierfeldt und Schartmann, 2012).

2.4.1.2 Mechanische Trennverfahren

Im Gegensatz zu thermischen Trennverfahren, die berührungsfrei arbeiten, erzeugen mechanische Trennverfahren eine Schnittfuge durch den direkten Kontakt mit dem zu bearbeitenden Werkstück. Dadurch entstehen einerseits beim Trennen unterschiedlich große Partikel, die aufgefangen werden müssen, und andererseits entstehen beim Trennen hohe Rückstellkräfte, sodass eine stabile und robuste Konstruktion notwendig ist. Der Vorteil des Einsatzes mechanischer Trennverfahren ist, dass diese bei allen Materialien eingesetzt werden können und dass ihre Funktionsweise sehr robust und ausgereift ist. Aufgrund des meist hohen Platzbedarfs stoßen mechanische Verfahren allerdings bei komplizierten Geometrien an ihre Grenzen. (Thierfeldt und Schartmann, 2012)

Mechanischen Trennverfahren können in drei Gruppen unterteilt werden (Noynaert, 2012):

1. **Verfahren mit definiertem Schneidwinkel:** Werkzeuge mit definierten Schneidwinkeln sind vor allem Sägen wie *Bandsägen*, *Stichsägen* und *Bügelsägen*, deren Sägeblatt weißelartige Zähne mit einem definierten Schneidwinkel besitzen. Da die beim Sägen anfallenden Späne und Partikel ausreichend groß sind, können diese durch einfache Filter aufgefangen werden. Ein Vorteil dieser

Techniken ist ihre hohe Zuverlässigkeit. (Kaulard et al., 2010, S. 34) Sägeverfahren werden nicht nur bei kerntechnischen Rückbauprojekten eingesetzt, sondern werden in fast allen konventionellen Rückbauprojekten verwendet. Ein Nachteil vieler Sägen ist ihr hoher Platzbedarf. Einerseits werden daher viele Komponenten vor allem größere Komponenten, wie die Dampferzeuger, demontiert und an speziellen Zerlegeplätzen beispielsweise mit Bandsägen zerlegt. Andererseits können in beengten Bereichen nur bestimmte Sägen, wie beispielsweise spezielle Stichsägen verwendet werden. (Thierfeldt und Schartmann, 2012) Da durch die Reibung beim Sägen hohe Temperaturen entstehen, benötigt die Bandsäge für hohe Schnittgeschwindigkeiten ein Kühlmedium. Da dieses mit aktiviertem oder kontaminiertem Material in Berührung kommt, muss das Kühlmittel aufgefangen und als radioaktiv kontaminierter Abfall entsorgt werden.

Neben Bandsägen werden häufig auch *Scheibenfräsen* oder *Kreissägen* eingesetzt. Beide Verfahren verwenden eine mit Klingen bestückte Scheibe, die mit Hilfe von Dreh- und Vorschubbewegungen eine Schnittfuge erzeugt. Insbesondere bei Band- und Kreissägen entstehen große Rückstellkräfte, die durch eine entsprechende Konstruktion aufgefangen werden müssen. (Kaulard, et al., 2010, S. 34)

Neben Sägen sind im Rückbau ebenfalls *Trennscheren* weit verbreitet. Diese trennen das zu bearbeitende Material mit Hilfe von hohen Schneidkräften. Der Vorteil von Trennscheren ist, dass keine Späne entstehen und dass keine Kühlung benötigt wird. Trennscheren können vor allem Rohre und Bleche gut zertrennen und sie eignen sich für den Einsatz unter Wasser. (Thierfeldt und Schartmann, 2012)

- 2. Verfahren ohne definierten Schneidwinkel:** Im Gegensatz zu Verfahren mit definiertem Schneidwinkel entsteht bei Verfahren ohne definierten Schneidwinkel eine Fuge nicht durch einen Schneideffekt, sondern durch das ständige Schleifen des zu trennenden Werkstücks. Es ist anzumerken, dass bei Verfahren mit unbestimmtem Schneidwinkel nicht nur der Winkel, sondern auch die Lage, die Anzahl und die Geometrie der Schneiden unbestimmt sind. Zu diesen Technologien gehören beispielsweise die *Diamantbandsägen*, *Diamantseilsägen* oder *Trennschleifer*. Damit durch das Schleifen eine Fuge entsteht und eine hohe Trenngeschwindigkeit besteht, muss die Umlaufgeschwindigkeit der Schnittwerkzeuge besonders hoch sein. Aufgrund der hohen Umlaufgeschwindigkeiten muss das Sägeseil ständig gekühlt werden, um ein Überhitzen zu vermeiden. Wird als Kühlmittel ein Kühlgas, z. B. Druckluft, eingesetzt, entsteht eine große Menge an feinen Aerosolen und Stäuben, die mit Hilfe spezieller Filteranlagen aufgefangen werden müssen (Steiner, 2012). Bei der Verwendung von Kühlflüssigkeiten müssen diese aufgefangen und als Sekundärabfall entsorgt werden.

Für den Einsatz von Seilsägen gibt es fast keine Größenbegrenzung. Beispielsweise eignen sich Seilsägen zum Zerlegen von großen Stahl-Beton-Komponenten oder zum Zerlegen der Dampferzeuger. Es müssen lediglich zu Beginn des Sägevorgangs Löcher gebohrt werden, durch die das Stahlseil geführt wird. (Kaulard et al., 2010, S. 34f.)

- 3. Abrasivverfahren:** Bei den Abrasivverfahren werden mineralische Partikel, ein sogenanntes Abrasivmittel, mit Wasser und teilweise mit Luft vermischt. Die entstehende Suspension wird mit sehr hohem Druck und konzentriert auf das zu trennende Werkstück projiziert, sodass dieses entweder direkt durchschlagen wird oder kleine Teilchen aus dem Werkstück herausgelöst werden und eine

Fuge entsteht. Das beschriebene Verfahren wird als *Wasser-abrasiv-Strahlschneiden* bezeichnet und eignet sich für jede Art von Material. Vorteile dieses Verfahrens sind einerseits, dass keine Rückstellkräfte auftreten, sodass der fernhantierte Einsatz erleichtert wird. (Kaulard, et al., 2010, S. 36) Andererseits kann mit diesem Verfahren die Fugenbreite sehr gering gehalten werden, sodass die Primärabfallmenge reduziert wird. Als Nachteil des Verfahrens ist die hohe Sekundärabfallmenge zu nennen, die lediglich durch das Recyceln des Abrasivmittels verringert werden kann. (Thierfeldt und Schartmann, 2012)

Beim Rückbau kerntechnischer Anlagen werden vor allem zwei Verfahrensvarianten eingesetzt: Das *Wasserabrasiv-Injektorstrahlschneiden* (WAIS) und das *Wasserabrasiv-Suspensionsstrahlschneiden* (WASS).

Beim *Wasserabrasiv-Injektorstrahlschneiden* wird Wasser unter einen hohen Druck gesetzt und durch eine Düse entspannt, indem der Wasserstrahl mit sehr hoher Geschwindigkeit die Düse verlässt und in einen Mischkopf geleitet wird. In dem Mischkopf wird dem Wasserstrahl das Abrasivmittel beigemischt. Dies erfolgt, indem das Abrasivmittel durch die Schwerkraft je nach Dosierung selbständig in den Mischkopf rutscht. Damit das Abrasivmittel nicht verklumpt, wird dieses durch Luft getrocknet. Um die Effizienz des WAIS zu steigern, kann auf die Luft im Wasser-Abrasiv-Gemisch verzichtet werden. Dabei wird das Abrasivmittel nicht dem reinen Wasserstrahl nach dessen Entspannung zugemischt, sondern in einem Druckbehälter als hochkonzentrierte Suspension aufbewahrt. Über ein Leitungssystem wird die Suspension in einem Mischstück mit dem Wasserhauptstrom ohne die Anwesenheit von Luft verdünnt und die Wasser-Abrasiv-Suspension wird anschließend zur Düse geleitet. Aufgrund der Abwesenheit von Luft wird eine verbesserte Beschleunigung der Abrasivpartikel erreicht, sodass

ein schnelleres Trennergebnis erzielt wird. (Europäische Kommission, 2009, S. 50ff.) Nachteilig am WASS im Gegensatz zum WAIS ist, dass der Vorratsbehälter des Abrasivmittels nicht während des Betriebs durch Nachschütten aufgefüllt werden kann. Stattdessen muss der Betrieb eingestellt werden, um die hochkonzentrierte Suspension des Abrasivmittels in den Druckbehälter zu füllen.

2.4.2 Technologien zur Dekontamination kerntechnischer Anlagen

Ein wesentliches Ziel beim Rückbau kerntechnischer Anlagen ist es, dass so viele Stoffe wie möglich in den Stoffkreislauf rückgeführt und so wenig Stoffe wie möglich in ein Endlager für radioaktive Stoffe überführt werden müssen. Grundsätzlich geht beim Rückbau kerntechnischer Anlagen, neben Gefahrenstoffen wie Asbest, von radioaktiven oder radioaktiv belasteten Stoffen die größte Gefahr für Mensch und Umwelt aus (vgl. Kapitel 2.3.1). Unterschieden werden hochradioaktive Stoffe (wie beispielsweise die Brennstäbe), aktivierte und kontaminierte Stoffe. Während in hochradioaktiven sowie aktivierten Stoffen radioaktive Zerfallsprozesse stattfinden, die mit bisherigen Verfahren nicht „neutralisiert“ werden können, besteht bei kontaminierten Stoffen die Möglichkeit, durch eine Behandlung eine Gesundheitsgefährdung durch von diesem Stoff ausgehende ionisierende Strahlung zu beseitigen³⁴. Die Behandlung von kontaminierten Stoffen wird als Dekontamination bezeichnet. Abhängig von der Art der Kontamination sowie der Art der kontaminierten Stoffe können verschiedene Dekontaminationsmaßnahmen angewendet werden (Europäische Kommission, 2009; Gentes et al., 2015). Mögliche Arten von Kontamination sind (Gentes et al, 2015):

³⁴ Zur Definition der Begriffe von Aktivierung und Kontamination siehe Kapitel 2.2.1.

- Oberflächenkontamination: Hierbei handelt es sich um einfache Ablagerungen auf der Oberfläche eines Bauteils, die durch Wischen oder Spülen entfernt werden können.
- Kontamination in Oberflächenschichten: Kontaminierte Lack-, Farb- und Korrosionsschichten, die vor oder während des Betriebs aufgetragen bzw. gebildet wurden.
- Kontamination im Bauteil: Kontamination, die beispielsweise durch mechanische Einwirkung in das Bauteilinnere eingedrungen ist.

Dekontaminationsmaßnahmen entfernen i.d.R. auf kontaminierten Stoffen bzw. Bauteilen abgelagerte radioaktive Partikel, teilweise auch durch den Abtrag der oberen Schichten eines Bauteils. Die durch Neutronenaktivierung aktivierten oberen Schichten eines Werkstoffs können ebenfalls durch die Entfernung oberflächlicher radioaktiver Stoffe dekontaminiert werden (Gentes et al., 2015). Kontaminationen im Bauteil können nur sehr schwer oder teilweise gar nicht entfernt werden.

Mit Hilfe von Dekontaminationsmaßnahmen kann einerseits die Gesundheitsgefährdung für das Betriebspersonal gesenkt werden, indem gesundheitsgefährdende Stoffe auf der Oberfläche von Anlagen- oder Bauteilen entfernt werden. Andererseits kann durch Dekontaminationsmaßnahmen die radiologische Belastung bestimmter Bauteile und Stoffe beseitigt oder zumindest so weit reduziert werden, dass diese Stoffe rechtlich freigemessen³⁵, in den Stoffkreislauf rückgeführt und die Abfallmengen reduziert werden können. (NEA, 1999)

Idealerweise wird bereits bei der Konstruktionsplanung und dem Bau einer kerntechnischen Anlage darauf geachtet, dass Kontaminationen während des Betriebs der Anlage weitestgehend minimiert werden (vgl. beispielsweise Severa und Bár, 1991). Allerdings wurden viele dieser

³⁵ Zur rechtlichen Definition des Begriffs *Freiemessung* vgl. Kapitel 2.5.3.

Erkenntnisse zur Vermeidung von Kontaminationen erst nach dem Bau einiger Anlagen bekannt oder wurden bzw. konnten nicht vollständig berücksichtigt (werden). Des Weiteren lässt sich eine Kontamination nicht vollständig vermeiden, sodass meist Dekontaminationsmaßnahmen beim Rückbau einer kerntechnischen Anlage erforderlich sind.

Zur Dekontamination existieren verschiedene Technologien, die kontinuierlich weiterentwickelt werden. Grundsätzlich werden die Dekontaminationsverfahren in chemische, thermische, mechanische und sonstige Verfahren unterteilt. Abhängig von der Art der Kontamination, der Art des kontaminierten Materials sowie von den radioaktiven Stoffen, die zu einer Kontamination führen, können unterschiedliche Dekontaminationsverfahren angewendet werden. Um die passenden Dekontaminationsverfahren auswählen zu können (zur Auswahl von Dekontaminationsverfahren vgl. Kapitel 2.4.3), muss zunächst eine Kontamination erkannt und lokalisiert werden. Zur Lokalisierung und Identifikation der Art der Radioaktivität existieren verschiedene Technologien. Zur Identifikation von α - und β -Strahlung können beispielsweise tragbare Messgeräte über Oberflächen geführt werden. Um γ -Strahlung zu identifizieren, werden häufig spezielle Gamma-Strahler-Kameras eingesetzt. Diese Gamma-Strahler-Kameras können genauso wie beispielsweise mit einem hoch reinen Germanium Detektor (High Purity Germanium Detector) in einer Fernfeldmessung eingesetzt werden. Diese Fernfeldmessung ermöglicht es, dass die Messgeräte nicht über einzelne Flächen geführt werden müssen, sondern dass eine Messung von Gegenständen aus wenigen Metern Entfernung möglich ist. Beispielsweise können auf diese Weise radioaktive Abfallbehälter untersucht werden. Da die Fernfeldmessung automatisiert werden kann, liefert diese nach Expertenmeinung meist konsistentere Messergebnisse als eine Handmessung. (Mason, 2015)

Sofern Kontamination erkannt und lokalisiert wurde, können passende Dekontaminationsverfahren ausgewählt und eingesetzt werden. Im

Folgenden werden die am weitest verbreiteten Dekontaminationsverfahren beschrieben. Eigenschaften von einsetzbaren Dekontaminations-technologien sind des Weiteren im Anhang A.2 tabellarisch zusammengestellt. Ausführlichere Informationen zu den vorgestellten Verfahren sowie Ausführungen über weitere Verfahren sind unter anderem in Gentes et al. (2015), Kaulard et al. (2010), Europäische Kommission (2009), IAEA (1999) sowie in NEA (1999) zu finden.

2.4.2.1 Chemische Dekontaminationsverfahren

Chemische Dekontaminationsverfahren nutzen konzentrierte oder verdünnte chemische Lösungen, um damit vor allem glatte, metallische Oberflächen abzutragen. Der Einsatz chemischer Dekontaminationsverfahren bei porösen Materialien ist aufgrund der geringen Abtragtiefe dieser Verfahren ineffizient. Bereits während des Leistungsbetriebs werden verdünnte Lösungen zur Dekontamination kerntechnischer Anlagen genutzt. Hierbei werden allerdings lediglich die oberen Metallschichten abgelöst, ohne das eigentliche Material zu beschädigen. Bei Rückbaumaßnahmen werden aggressivere Mittel eingesetzt, die nicht nur die oberen Oxidschichten lösen, sondern auch das Metall selbst. (NEA, 1999; Steiner, 2012).

Da bei chemischen Dekontaminationsverfahren in der Regel flüssige Lösungen verwendet werden, können insbesondere größere Komponenten mit einer komplizierten Geometrie sowie innenliegende und schlecht zu erreichende Flächen, wie beispielsweise Innenflächen von Rohrleitungen, dekontaminiert werden. Beispielsweise wird der Primärkreislauf vor Beginn der Demontage in der Regel chemisch dekontaminiert. Dadurch können bereits viele Strahlenquellen entfernt werden, sodass die Dosisleistung des Betriebspersonals stark reduziert werden kann und dadurch der Einsatz manueller Trenntechnologien möglich wird. (NEA, 1999)

Als Nachteil beim Einsatz von chemischen Dekontaminationsverfahren ist zu nennen, dass die Chemikalien nicht oder nur mit sehr großem Aufwand von den gelösten radioaktiven Stoffen getrennt werden können und somit eine große Mengen an sekundärem Abfällen anfällt (NEA, 1999, S. 16).

Grundsätzlich ist die Effizienz chemischer Dekontaminationsverfahren stark von der Konzentration, der Anwendungsdauer und der Prozesstemperatur abhängig. Die Anwendungsdauer kann die Effizienz sowohl positiv als auch negativ beeinflussen. Einerseits kann eine verlängerte Anwendungsdauer dazu führen, dass mehr radioaktive Stoffe vom kontaminierten Bauteil gelöst werden. Andererseits kann eine zu lange Behandlung zur Sättigung der chemischen Lösung führen, sodass die Dekontaminationswirkung nachlässt (Noynaert, 2012).

Die chemischen Dekontaminationsverfahren können in drei Wirkmechanismen unterschieden werden, für die in Anhang A.2 jeweils detaillierte Ausführungen zu finden sind:

- 1. Flüssig-chemische Verfahren**, bei denen das Lösungsmittel zirkuliert oder bei denen kontaminierte Komponenten in ein chemisches Bad getaucht werden. Hierbei wird wie oben beschrieben eine flüssige chemische Lösung durch Kreisläufe in Rohrleitungen oder innerhalb eines Bauteils zirkuliert, sodass selbst an schwer zu erreichenden Stellen ein Abtrag der Oberfläche möglich ist. Kleinere demontierte Bauteile können auch in ein chemisches Bad getaucht werden, um diese zu dekontaminieren.

In Abhängigkeit der Art der Kontamination können unterschiedliche chemische Lösungen eingesetzt werden. Die beim Zirkulieren als auch beim Eintauchen anfallende Schlacke ist stark radioaktiv und muss daher als radioaktiver Abfall entsorgt werden. Die Aktivität kann durch mehrmaliges Wiederholen um mehr als 70 % reduziert werden (Thierfeldt und Schartmann, 2012, S. 128).

Es wird zwischen Verfahren unterschieden, die mehrere Verfahrensschritte beinhalten (multi-step) und solchen, die nur aus einem Verfahrensschritt bestehen (single step). Weiterhin wird bezüglich der Konzentration des Reaktanzstoffes zwischen harten und weichen Prozessen unterschieden. Beispiele für weiche multi-step Verfahren sind *CORD (Chemical Oxidation Reducing Decontamination)*, *LOMI (Low Oxidation State Metal Ion)* und *CANDEREM (Canadian Decontamination and Remediation Process)*. Als Beispiele für harte single-step Verfahren sind *REDOX (Reducing Oxidation)*, *MEDOC (Metal Decontamination by Oxidation with Cerium)* und das HNO_3/HF Verfahren zu nennen. (Europäische Kommission, 2009, S. 15-20)

2. **Elektrochemische Verfahren** werden eingesetzt, um die Effizienz gegenüber den flüssig-chemischen Verfahren zu steigern. Bei diesen Verfahren wird eine elektrische Spannung angelegt, wobei das zu dekontaminierende Teil als Anode und eine Kupfer- oder Edelstahlelektrode oder der Elektrolyttank selbst als Kathode dient. Dadurch werden die Oberfläche und somit auch die Kontamination der Anode abgetragen. Um die Effizienz dieses Verfahrens aufrecht zu erhalten, sind eine Zirkulation sowie das Herausfiltern der gelösten Partikel notwendig. Eingesetzt werden z. B. Phosphorsäure und Salpetersäure (Noynaert, 2012, S. 329ff.). Aufgrund der für dieses Verfahren notwendigen Spannung sind elektrochemische Verfahren nur bei elektrisch leitenden Materialien anwendbar. (NEA, 1999)
3. **Weitere chemische Verfahren:** Hierzu gehören unter anderem Verfahren, die mit chemischen *Pasten*, *Schäumen*, *Gelen* und *Nebel* arbeiten. Der Vorteil dieser chemischen Verfahren liegt in der im Vergleich zu den flüssig-chemischen Verfahren höheren Viskosität der chemischen Lösungen. Dadurch ist eine bessere Haftung an Wänden und Decken und somit deren einfachere

Dekontamination möglich. Des Weiteren fallen weniger Sekundärabfälle an, da zur Dekontamination weniger Chemikalien benötigt werden. Allerdings sind mehrfache Wiederholungen dieser Verfahren notwendig, um gute Dekontaminationsergebnisse zu erzielen. (Europäische Kommission, 2009)

2.4.2.2 Mechanische Dekontaminationsverfahren

Mechanische Dekontaminationsverfahren nutzen zum Abtragen oberflächennaher Kontaminationen mechanische Verfahren mit Hilfe von Werkzeugen oder Maschinen. Die dabei teilweise entstehenden Rückstellkräfte sollten bei der Auswahl der einzusetzenden Technologie berücksichtigt werden. Die mechanischen Verfahren können entweder nur auf einer Oberfläche anhaftende Kontamination beseitigen (z. B. durch Wischen oder Schrubben) oder tiefer sitzende Kontamination durch das Abtragen der Oberfläche entfernen (z. B. durch Fräsen oder Abrasivstrahlen). Im Vergleich zu chemischen Verfahren greifen mechanische Verfahren das zu dekontaminierende Material nicht an, sodass lediglich oberflächliche Abtragungen durchgeführt werden. Als Nachteile mechanischer Dekontaminationsverfahren sind u. a. zu nennen, dass die Flächen für die Dekontamination zugänglich sein müssen und dass große Mengen an kontaminierten Stäuben entstehen können. Um die Ausbreitung kontaminierter Stäube zu verhindern und um das Betriebspersonal vor den gesundheitsgefährdenden Stäuben zu schützen, sind Vorkehrungen zu treffen, wie beispielsweise die Errichtung einer Einhausung um das zu dekontaminierende Bauteil, Schutzkleidung der Mitarbeiter oder der Bau spezieller Dekontaminationseinrichtungen mit Lüftungs- und Filteranlagen. (NEA, 1999)

Grundsätzlich können mechanische Dekontaminationsverfahren in drei Gruppen unterteilt werden:

- 1. Mechanische Verfahren ohne definiertem Schneidwinkel:** Diese Verfahren besitzen keinen einheitlichen Schneidwinkel, eine unbestimmte Lage, Anzahl und Geometrie der verwendeten Schneiden, da sie beispielsweise Körner oder Metallborsten zum Oberflächenabtrag verwenden. Zum Entfernen lokaler Kontaminationen auf metallischen Oberflächen sind vor allem Verfahren wie das *Schleifen*, das *Polieren* und das *Bürsten* von Oberflächen geeignet. Nachteil dieser Verfahren ist, dass bei deren Anwendung feine Staubpartikel entstehen. Um eine Ausbreitung der Staubpartikel zu verhindern, sollten diese Verfahren nur im luftundurchlässigen Einschluss mit zusätzlichen Lüftungs- und Filteranlagen und mit spezieller Schutzbekleidung verwendet werden. Da diese Verfahren auch unabhängig vom Rückbau kerntechnischer Anlagen weit verbreitet sind, gibt es zahlreiche Anbieter mit unterschiedlichen Modellen auf dem Markt, die für den Einsatz zum kerntechnischen Rückbau in der Regel nicht angepasst werden müssen. (Noynaert, 2012, S. 336)

- 2. Mechanische Verfahren mit definiertem Schneidwinkel:** Für die Dekontamination von Betonoberflächen werden in der Regel grobe Technologien, wie beispielsweise *Betonfräsen*, *Betonmeißel* oder *Pressluftschlämmer* benötigt. Mit Hilfe dieser Technologien können zentimetertiefe Betonschichten abgetragen werden (Noynaert, 2012). Sofern feinere Verfahren angewendet werden sollen, bieten sich Technologien wie das *Nadeln* oder das *Stocken* an. Um den starken Rückstellkräften dieser Technologien entgegenzuwirken, benötigen diese Technologien ein hohes Eigengewicht. Damit diese Technologien trotz des hohen Eigengewichts handhabbar sind, vor allem zur Dekontamination von Wänden und Decken, werden Manipulatoren oder andere Vorrichtungen eingesetzt.

Ein häufig eingesetztes mechanisches Verfahren mit definiertem

Schneidwinkel ist die *Fräse*. Diese besteht aus einem mit Fräslamellen oder Fräsmeißeln bestückten Fräskopf.

Um die Leistung dieser Technik zu erhöhen, können diese mit Diamanten beschichtet sein. Durch die Rotation des Werkzeugs kann ein Oberflächenabtrag von bis zu einem Zentimeter erreicht werden (Noynaert, 2012). Vorteile des Einsatzes einer Fräse sind, dass diese sowohl Schrauben als auch Metallbolzen im Beton durchtrennen kann und sich aufgrund der hohen Arbeitsgeschwindigkeit für den großflächigen Einsatz eignet.

Manipulatoren, Fräsen und Techniken zum Nadeln oder Stocken können auch für den fernhantierten Einsatz umgerüstet werden. (Gentes et al., 2015, S. 53f)

- 3. Mechanische Verfahren mit Aufprallwirkung:** Beim Einsatz von Strahltechnologien werden durch dessen Aufprallenergie Oberflächenkontaminationen abgetragen. Bei diesen Technologien wird ein Strahlmedium stark beschleunigt und über eine Düse auf die Oberfläche gelenkt. Der Einsatz von Strahlverfahren eignet sich besonders zur Dekontamination von metallischen Oberflächen. Allerdings benötigen die Verfahren aufgrund der starken Aerosolbildung eine Einhausung. Die verschiedenen Verfahren unterscheiden sich hauptsächlich anhand ihrer Strahlmittel.

Das *Hochdruckwasserstrahlen* ist die einfachste Form des Strahlens, bei dem Wasser mit hohem Druck von bis zu 15 MPa auf die zu dekontaminierenden Stellen gestrahlt wird. Dieses Verfahren wird hauptsächlich für Vordekontaminationsarbeiten stark kontaminierter Teile genutzt (z. B. die Beckenwand des Brennelementlagerbeckens).

Zur Effizienzsteigerung dieser Verfahren können dem Wasser Additive zugemischt oder es kann Heißwasser verwendet werden. Als Additive werden für das Strahlungsverfahren sogenannte Abrasivmittel verwendet. Zwei beim kerntechnischen Rückbau

verbreitete Technologien sind das *Abrasive-Sandstrahlen* (trocken) und das *Abrasive-Hochdruckwasserstrahlen* (nass). Hierbei wird beispielsweise Sand als Abrasivmittel genutzt, welcher durch den Aufprall auf der zu dekontaminierenden Stelle zu einem Abtrag der Oberfläche führt. Neben Sand werden als Abrasivmittel auch Edelstahlgranulat, Glasperlen, Keramikugeln oder Mineralien eingesetzt. Die Wahl des Abrasivmittels hat einen großen Einfluss auf die Effizienz des Verfahrens, geht allerdings auch mit unterschiedlichen Kosten einher. (Noynaert, 2012) Ein wesentlicher Nachteil dieser Verfahren ist, dass sehr hohe Mengen an kontaminiertem Abrasivmitteln und Abwasser anfallen. Während des Strahlens entstehen außerdem kontaminierte Stäube oder tropfenförmige Aerosole, die aufgefangen werden müssen (Noynaert, 2012). Um der Entstehung von Stäuben und Aerosolen entgegenzuwirken, werden alternative Abrasivmittel entwickelt. Beispielsweise werden die Abrasivmittel in einem porösen, schwammartigen Partikel zu einem Verbund integriert. Eine Möglichkeit ist es, kleine, mit Abrasivmittel imprägnierte, Urethan-Schwämme zu verwenden. Beim Aufprall auf der zu dekontaminierenden Stelle entsteht durch das Expandieren und das Kontrahieren der Schwämmchen ein Scheuereffekt, der es erlaubt, Schutzbeschichtungen und Farbschichten effektiv zu entfernen. Der Vorteil dieses Verbunds besteht darin, dass im Gegensatz zu den gewöhnlichen Abrasivmitteln eine erheblich verminderte Staubentwicklung besteht und durch eine Reinigung der Verbundmittel sowie das Recyceln des Abrasivmittels eine mehrfache Verwendung möglich ist und das Abfallaufkommen somit reduziert wird. (IAEA, 1999; Kaulard, et al., 2010, S. 45 ; Needham, 2015).

Bei diesem Verfahren sollte darauf geachtet werden, dass es zu keiner Rekontamination des Werkstücks durch kontaminiertes Strahlmittel kommt oder dass Kontaminationen durch den Aufprall tiefer in das Material getrieben werden.

2.4.2.3 Thermische Dekontaminationsverfahren

Unter den thermischen Verfahren existieren die zwei Wirkprinzipien der rein thermischen Dekontamination und hybride Verfahren, die eine Dekontamination durch die Kombination thermischer und meist mechanischer Verfahren nutzen.

Die rein thermischen Verfahren lassen sich sehr gut automatisieren (Anthofer et al., 2013, S. 2ff.). Hierzu zählen verschiedene *Laserdekontaminationsverfahren*, bei denen ein Laserstrahl frei von Rückstellkräften gleichmäßig auf eine Betonoberfläche projiziert wird und die obere Betonschicht aufschmilzt. Die entstehende Schmelze wird mit Hilfe von Druckluftdüsen über ein Absaugsystem entfernt. Die Schmelze erstarrt im Luftstrom in verglaster Form, sodass die Radioaktivität in der verfestigten Schmelze eingeschlossen wird. Da auf diese Weise keine Sekundärabfälle anfallen, müssen lediglich die abgetragenen und verfestigten Schmelzreste entsorgt werden. Eine weitere Lasertechnologie ist die sogenannte *Laser-Ablation*, die ebenfalls zur Entfernung von Betonoberflächen eingesetzt werden kann, insbesondere wenn auf dieser unterschiedliche Beschichtungen aufgetragen sind. Die Oberfläche wird dabei stark erhitzt, allerdings nicht so stark, dass die Betonschicht schmilzt. Bei der Laser-Ablation werden die unterschiedlichen Wärmeausdehnungskoeffizienten der Beschichtung und des Grundmaterials dazu genutzt, um ein Auf- bzw. Abplatzen der Oberfläche zu bewirken. (NEA, 2011).

Unter den hybriden Dekontaminationsverfahren ist das *Trockeneisstrahlen* verbreitet, welches bei oberflächlicher Kontamination eingesetzt wird. Bei diesem Verfahren werden kleine Trockeneispellets stark beschleunigt, sodass sie mit hohem Druck auf die zu dekontaminierende Oberfläche geschossen werden. Das Trockeneis sublimiert beim Aufprall schlagartig zu CO₂, und dehnt sich dabei auf das 540-fache des Volumens aus. Durch den Sublimationsschock und in geringem Maße auch aufgrund der kinetischen Energie des Aufpralls platzen Oberflächenkontaminationen ab

(Europäische Kommission, 2009, S. 26). Da der Effekt nicht abrasiv wirkt, wird die Oberfläche dabei nicht beschädigt und es bleiben keine Strahlmitelrückstände zurück. Neben dem Trockeneisstrahlen ist das *Eisstrahlen* mit gewöhnlichem Wassereis ein weiteres hybrides thermisches Dekontaminationsverfahren. Dieses Verfahren funktioniert in ähnlicher Weise wie das CO₂-Strahlen. Nachteile gegenüber dem Trockeneisstrahlen sind allerdings der geringere Sublimationsabtrag und das Anfallen von Sekundärabfall in Form von Schmelzwasser (Europäische Kommission, 2009, S. 26). Um den thermischen Effekt des Trockeneisstrahlens zu vergrößern, wird die Anlage um einen Laser erweitert. Der Laser erhitzt die Oberfläche auf über 300°C, wodurch die Thermospannung verstärkt und somit der Materialabtrag erhöht wird.

2.4.2.4 Sonstige Dekontaminationsverfahren

Neben den chemischen, mechanischen und thermischen Dekontaminationsverfahren können weitere Wirkprinzipien zur Dekontamination genutzt werden. Das *Ultraschallbad* ist beispielsweise ein häufig eingesetztes Verfahren, welches die durch eine hochfrequente Energie innerhalb einer Flüssigkeit erzeugte Vibration nutzt. Die Vibration erzeugt kleinste Dampfblasen, sogenannte Kavitationen, die durch ihren Scheuereffekt Kontamination von Oberflächen ablösen können. Die Effizienz dieses Verfahrens kann durch das Zumischen chemischer Stoffe und durch eine Erhöhung der Temperatur gesteigert werden. Der Einsatz dieses Verfahrens eignet sich aufgrund des beschränkten Tankvolumens meist nur für schwach kontaminierte Kleinteile. (IAEA, 1999, S. 56)

Ein weiteres Dekontaminationsverfahren stellt das radiologisch kontrollierte *Einschmelzen* metallischer Überreste dar, welches durch die Verringerung des Volumens auch den Lagerplatzbedarf minimiert. Durch das Einschmelzen metallischer Reststoffe verteilt sich die Oberflächenkontamination gleichmäßig in der Schmelze, sodass sich die örtliche Kontamination insgesamt verringert (NEA, 1999, S. 26). Des Weiteren

sammeln sich α -strahlende Radionuklide in der Schlacke an und werden durch das Entfernen der Schlacke beseitigt. Zusätzlich entweichen Elemente mit niedrigem Siedepunkt, wie Cäsium-137, über die Abgase und können durch spezielle Filteranlagen eingefangen werden. All diese Dekontaminationseffekte führen dazu, dass die eingeschmolzenen Reststoffe in der Regel freigegeben werden können. Da verschiedene Metalle eingeschmolzen werden können, bietet dieses Verfahren eine wichtige Alternative zur (unmittelbaren) Freigabe³⁶ und zur Entsorgung als radioaktive Abfälle (Thierfeldt und Schartmann, 2012, S. 89f.). Nach dem Einschmelzen weisen viele Metallbarren vor allem das Radionuklid Cobalt-60 auf. Aufgrund der geringen Halbwertszeit dieses Radionuklids (Halbwertszeit: 5,3 Jahre) können die Metallbarren nach einer entsprechenden Lagerzeit ohne Vorbehalt recycelt werden (Noynaert, 2012). Das Einschmelzen kann bei großen und geometrisch komplexen Komponenten, wie dem Wärmetauscher oder dem Dampferzeuger, in der Regel nicht angewendet werden. Lediglich große Schmelzanlagen können diese Komponenten einschmelzen.

2.4.3 Auswahl von Technologien zum Trennen und zur Dekontamination kerntechnischer Anlagen

Die Vielzahl verfügbarer Verfahren und Technologien zur Dekontamination und zum Trennen von Anlagen- und Bauteilen kerntechnischer Anlagen ist nicht universal einsetzbar. Daher ist eine Auswahl dieser Technologien sowohl aus technischen als auch aus ökonomischen Gesichtspunkten durchzuführen. Idealerweise wird bereits bei der Errichtung einer kerntechnischen Anlage ein sogenanntes Stilllegungskonzept erstellt, in dem einzusetzende Techniken in abstrakter Form beschrieben werden. Eine konkrete Evaluation und Auswahl der einzusetzenden Techniken wird allerdings erst nach der Einstellung des Betriebs einer kerntechnischen

³⁶ Der Begriff der *Freigabe* wird in Kapitel 2.5.3 definiert und von der *Herausgabe* abgegrenzt.

Anlage in der Stilllegungsplanung durchgeführt (zu den Begriffen des Stilllegungskonzepts und der Stilllegungsplanung vgl. Kapitel 2.6.1). (BMUB, 2010; ESK, 2015) Dabei werden in einem mehrstufigen Prozess einsetzbare Techniken jeweils für Dekontaminations- und Trennarbeiten ausgewählt.

Im ersten Schritt werden alle verfügbaren Techniken aufgelistet. Unter der Berücksichtigung der Abbaustrategie, welche Grundanforderungen und Grundsatzentscheidungen enthält, können in einem zweiten Schritt aus allen verfügbaren Techniken die potentiell einsetzbaren Techniken identifiziert werden. In einem dritten Schritt werden aus der Liste potentieller Techniken anhand von Kriterien und Randbedingungen die einzusetzenden Techniken ausgewählt.

Die für die Vorauswahl als auch für die endgültige Wahl einer einzusetzenden Technik spezifischen Kriterien und Randbedingungen sind insbesondere von dem auszuführenden Vorgang abhängig. Einige der folgenden Kriterien können sowohl für die Wahl einer Dekontaminations- als auch einer Trenntechnik angewendet werden (Kaulard et al., 2010):

- Technische Eignung: Kann mit der Technik ein spezifischer Vorgang, z. B. das Zertrennen einer Rohrleitung, ausgeführt werden? Hierbei spielen auch die Eigenschaften des zu bearbeitenden Bauteils eine Rolle, d. h. ob mit der Technik ein Bauteil einer bestimmten Geometrie, eines bestimmten Materials und an einer bestimmten Stelle in der kerntechnischen Anlage bearbeitet werden kann.
- Die erzeugte Abfallart und -menge: Welche Art (z. B. Flüssigkeiten, Späne, Aerosole) und wie viel Primär- und Sekundärabfall³⁷ entsteht beim Einsatz der Technik? Des Weiteren spielen die Abfallkategorie (vgl. Kapitel 2.3.3) und die damit verbundenen Entsorgungskosten eine Rolle.

³⁷ Die Begriffe Primär- und Sekundärabfall werden in Kapitel 2.2.3 definiert.

- Eignung zum fernhantierten Einsatz: Kann eine Technik für den fernhantierten Einsatz verwendet werden, um das Betriebspersonal vor einer hohen Strahlenexposition zu schützen?
- Eignung zum Unterwassereinsatz: Ist ein Einsatz und eine Bedienung der Technik unter Wasser (als Abschirmung vor ionisierender Strahlung) möglich?
- Bewährung: Liegen aussagekräftige Erfahrungen mit dem Einsatz der Technik vor, die zeigen, dass diese Technik für den Einsatz geeignet ist.
- Universalität: Kann die Technik für verschiedene Einsatzbereiche, z. B. in mehreren Gewerken eines Rückbauprojekts, eingesetzt werden?
- Rüst- und Wartungsaufwand: Wie lange und wie kompliziert ist die Rüstung und Wartung der Technik?
- Weitere Merkmale: Dies können spezielle Anforderungen im Einzelfall darstellen, wie beispielsweise, ob ein fernhantierter Einsatz unter Inertgasatmosphäre möglich ist.

Zusätzlich können aufgrund von strategischen Erwägungen bestimmte Grundsatzentscheidungen getroffen werden, wie beispielsweise dass grundsätzlich keine thermischen Verfahren eingesetzt werden sollen.

Weitere Kriterien und Randbedingungen unterscheiden sich darin, ob es sich um einen Dekontaminations- oder einen Trennvorgang handelt oder können davon abhängig detaillierter betrachtet werden. Eine Unterscheidung der Kriterien und Randbedingungen werden jeweils für Dekontaminations- und Trennvorgänge im Folgenden beschrieben.

Kriterien und Randbedingungen zur Wahl einer Dekontaminationstechnik

Bei Dekontaminationsvorgängen ist es das Ziel einen möglichst hohen Grad an Dekontamination zu erreichen, d. h. das zu dekontaminierende Bauteil oder den zu dekontaminierenden Stoff so zu bearbeiten, sodass von

diesem keine ionisierende Strahlung mehr ausgeht. Um einen möglichst hohen Grad an Dekontamination zu erreichen, sollten einige spezifische Kriterien berücksichtigt werden:

- Das Dekontaminationsprinzip: Hierbei wird das Wirkprinzip zur Dekontamination unterschieden, d. h. physikalisch-oberflächliche (z. B. Spülen oder Abwischen), chemische oder mechanische Verfahren (Kaulard et al., 2010).
- Die Lage der Kontamination: Hierbei ist zu prüfen, welche Dekontaminationstechniken aufgrund von Platz-, Transport-, Bedien- und Einsatzbedingungen an der kontaminierten Stelle einsetzbar sind. Beispielsweise ist die Dekontamination von Rohrleitungen des Primärkreislaufs mit Hilfe von mechanischen Verfahren meist nur umständlich auszuführen, sodass chemische Verfahren geeigneter sind. (NEA, 1999)
- Das Material: Die Eigenschaften des Materials, wie beispielsweise der Aggregatzustand oder die Härte des Materials müssen berücksichtigt werden (NEA, 1999).
- Die Oberflächenbeschaffenheit: Je nach Oberflächenbeschaffenheit ist zu berücksichtigen, wie tief die Kontamination in das Material eingedrungen sein kann oder während der Dekontamination (abhängig vom Dekontaminationsverfahren) eindringen könnte. Beispielsweise sollten bei porösen Materialien nasse Dekontaminationsverfahren vermieden werden, da Kontamination dadurch tiefer in das Material eingebracht werden könnte. (NEA, 1999)
- Art der Kontamination: Je nach Art der Kontamination müssen unterschiedliche Verfahren angewendet werden. Beispielsweise kann lose Kontamination auf einer glatten Oberfläche recht einfach entfernt werden, wobei in poröse Oberflächen eingedrungene Kontamination durch einen Oberflächenabtrag entfernt werden muss. (NEA, 1999)

Kriterien und Randbedingungen zur Wahl einer Technik zum Trennen

Beim Trennen und Zerlegen von Anlagen- oder Bauteilen besteht einerseits die Herausforderung, dass Techniken eingesetzt werden, die in Abhängigkeit der unterschiedlichen Materialien und deren radioaktiven Belastung eine Trennung/Zerlegung durchführen können. Aufgrund der teilweise stark aktivierten Bauteile ist der Einsatz von fernhantierten Techniken häufig unausweichlich. Andererseits ist insbesondere die Verschleppung und Ausbreitung von Kontamination beim Trennen und Zerlegen zu vermeiden. Aus diesem Grund sind die folgenden Kriterien bei der Wahl einer Trenn- bzw. Zerlegetechnik besonders zu berücksichtigen:

- Trennprinzip: Überprüfung welche technischen Verfahren zur Trennung von vorliegenden Bauteilen und zum Zerlegen dieser verwendet werden können. (Kaulard et al., 2010).
- Trenngeschwindigkeit: Die Trenngeschwindigkeit ist nicht nur für die schnellere oder langsamere Ausführung eines Vorgangs relevant, sondern auch dafür, wie lange das Betriebspersonal der ionisierenden Strahlung ausgesetzt ist. (Europäische Kommission, 2009)
- Wartung: Technologien, die in schwer zugänglichen Bereichen, unter Wasser oder in Bereichen mit hoher ionisierender Strahlung eingesetzt werden, sollten einen geringen Wartungsaufwand und eine hohe Zuverlässigkeit besitzen. (Europäische Kommission, 2009)
- Zu zerlegende Komponente: Abhängig von den Eigenschaften der zu zerlegenden Komponente (Dimension, Material, Struktur etc.) sind unterschiedliche Techniken einsetzbar. (Bienia, 2015)
- Umgebungsbedingungen: Überprüfung ob eine Zerlegung unter Wasser oder an der Luft durchzuführen ist (Bienia, 2015).

Aufgrund der teils sehr hohen Strahlenbelastung der zu zerlegenden Bauteile ist meist eine fernhantierte Zerlegung erforderlich. Allerdings lassen

sich einige Trennverfahren nicht fernhantiert durchführen. Aus diesem Grund spielt dieses Kriterium eine wichtige Rolle im Auswahlprozess. Ein weiteres wichtiges Kriterium ist ebenfalls aus Strahlenschutzgründen die Möglichkeit der Zerlegung unter Wasser, wobei besonders darauf geachtet werden muss, dass die Sicht während des Trennvorgangs nicht zu sehr beeinträchtigt wird. Beispielsweise werden der Reaktordruckbehälter und seine Komponenten unter Wasser zerlegt. Die meisten Technologien sind in der Industrie, im Baugewerbe und in der Metallverarbeitung weit verbreitet, sodass bereits viele Erfahrungen bei deren Handhabung existieren (Thierfeldt und Schartmann, 2012, S. 129)

Eine Gegenüberstellung zur Bewertung und Auswahl von thermischen und mechanischen Trennverfahren ist unter anderem detaillierter in Bienia (2015) aufgeführt.

Auswirkung auf die Projektplanung

Eine quantitative Gegenüberstellung mehrerer technischer Optionen wird in der Regel nicht vorgenommen. Im Gegensatz dazu werden bei der endgültigen Auswahl einzusetzender Techniken qualitative und quantitative Vergleiche der potentiell einsetzbaren Techniken vorgenommen. Die Vergleiche der Techniken werden anhand der oben beschriebenen Kriterien und Randbedingungen durchgeführt. (Kaulard et al., 2010) Der letztendliche Vergleich der potentiell einsetzbaren Techniken zur Wahl einsetzbarer Techniken ist selten schnell und unkompliziert durchführbar. In den meisten Fällen existieren Ausführungsalternativen eines Vorgangs, die aufgrund der vielfachen Abhängigkeiten mit anderen Kriterien und Randbedingungen aufwändig berechnet werden müssen. Insbesondere sind der benötigte Zeitbedarf, die anfallenden Kosten sowie Wechselwirkungen mit anderen Verfahren oder Anforderungen an die Logistik zu berücksichtigen (Thierfeldt und Schartmann, 2012). Da sich diese und weitere Bedingungen gegenseitig beeinflussen, ist die Wahl einer Technik für jedes Stilllegungsprojekt und jeden einzelnen

auszuführenden Vorgang individuell zu prüfen (Kaulard et al., 2010) und im Rahmen der Projektplanung zu entscheiden.

Da sich diese Wahl häufig sehr schwierig gestaltet, ist der Entscheider auf eine Entscheidungsunterstützung angewiesen. Diese Entscheidungsunterstützung zur Wahl einer geeigneten Technik unter verschiedenen potentiell verwendbaren Techniken für die Ausführung eines konkreten Vorgangs ist mit Hilfe des in dieser Arbeit entwickelten Modells möglich (vgl. Kapitel 4). Hierbei werden insbesondere die Einflüsse unterschiedlicher Technologien auf die Dauer und die Kosten des Rückbauprojekts unter der Einhaltung der Sicherheitsvorschriften sowie technischer Machbarkeit berücksichtigt.

2.5 Vorgaben und Rechtsgrundlagen für den Rückbau kerntechnischer Anlagen

Der Rückbau von kerntechnischen Anlagen ist ebenso wie der Betrieb in vielen verschiedenen Regelwerken geregelt. Wie im Folgenden aufgezeigt wird, sind zur Durchführung von Rückbauarbeiten viele rechtliche Vorgaben zu beachten, die häufig großen Einfluss auf die zeitliche und auf die technische Ausführung von Rückbauarbeiten und somit auch auf die Kosten eines kerntechnischen Rückbauprojektes nehmen. Aufgrund dieses Einflusses der rechtlichen Rahmenbedingungen auf die Ausführungsdauer sowie die Ausführungskosten kerntechnischer Rückbauprojekte, werden die relevanten Gesetze, Verordnungen und sonstige rechtliche Vorgaben näher untersucht. Insbesondere die einzuhaltenden Grenzwerte ionisierender Strahlung sowie die Genehmigungsverfahren nehmen wesentlichen Einfluss auf die Rückbauplanung.

Zunächst werden international geltende Regelungen beschrieben, die auch national bindend sind (Kapitel 2.5.1). Da diese nur indirekte Vorgaben für den Rückbau kerntechnischer Anlagen bereitstellen, wird im Folgenden lediglich auf die wesentlichen internationalen Regelungen eingegangen.

Die internationalen Vorgaben werden in verschiedenen Staaten in eigenen nationalen Gesetzen umgesetzt. Da in verschiedenen Staaten unterschiedliche nationale Gesetze gelten, wird in dieser Arbeit die nationale Gesetzgebung der Bundesrepublik Deutschland in Bezug auf den Rückbau kerntechnischer Anlagen näher beschrieben (Kapitel 2.5.2). Die Analyse der deutschen Gesetzgebung im Bereich des Rückbaus kerntechnischer Anlagen bietet sich an, weil die Gesetzgebung bzgl. des Rückbaus kerntechnischer Anlagen in Deutschland im internationalen Vergleich sehr weit fortgeschritten ist.

Die Verwertung und Entsorgung von Reststoffen haben einen wesentlichen Einfluss auf den Rückbau sowie dessen Planung und sind darüber hinaus wesentliche Kostenfaktoren des gesamten Rückbaus. Aus diesen Gründen werden die rechtlichen Rahmenbedingungen der Verwertung und Entsorgung von Reststoffen in Kapitel 2.5.3 näher beschrieben.

2.5.1 Internationale Verträge, Übereinkommen und Standards

International existieren verschiedene Übereinkommen und Verträge zwischen unterschiedlichen Staaten, die insbesondere den Fortschritt der friedlichen Verwendung der Kernenergie fördern möchten, einheitliche Sicherheitsnormen für den Gesundheitsschutz der Bevölkerung festlegen oder Haftungsfragen bei nuklearen Zwischenfällen klären. Im Folgenden werden die wichtigsten internationalen Regelungen vorgestellt.

2.5.1.1 Die Europäische Atomgemeinschaft EURATOM

Im Rahmen der Römischen Verträge aus dem Jahr 1957 wurde auf europäischer Ebene der EAG-Vertrag³⁸ (EAGV) oder Euratom-Vertrag zur

³⁸ Vertrag zur Gründung der Europäischen Atomgemeinschaft (EURATOM) vom 25. März 1957, BGBl. 1957 II S. 1014.

Gründung der **Europäischen Atomgemeinschaft EURATOM** geschlossen. In Artikel 1 EAGV wird die Aufgabe der EURATOM beschrieben: „Aufgabe der Atomgemeinschaft ist es, durch die Schaffung der für die schnelle Bildung und Entwicklung von Kernindustrien erforderlichen Voraussetzungen zur Hebung der Lebenshaltung in den Mitgliedstaaten und zur Entwicklung der Beziehungen mit den anderen Ländern beizutragen.“ (Art. 1 EAGV) Der Euratom-Vertrag setzt es sich somit zum Ziel, dass alle Mitgliedsstaaten von der Kernenergie profitieren und so die Bildung und Entwicklung von Kernindustrien in Europa mit einem hohen Maß an technischer Sicherheit vorangetrieben werden kann. Zudem soll eine Versorgungssicherheit geschaffen und eine Abzweigung von zivil genutztem Kernmaterial für andere, insbesondere militärische Zwecke, verhindert werden.

Der EAGV stellt gleichermaßen eine wichtige Grundlage für das zwei Jahre später in Deutschland veröffentlichte deutsche Atomrecht dar. (Hoppenbrock, 2009, S. 38) Die EURATOM fungiert nach Artikel 184 EAGV als eigenständige juristische Person. Ihre Organe, über die sie gemäß Artikel 3 EAGV verfügt, wurden vollständig in die Europäische Union eingegliedert. Somit verfügt die Europäische Kommission gemäß dem „Vertrag zur Gründung der Europäischen Atomgemeinschaft“ (EAGV) in der Fassung des Vertrags von Lissabon Art. 38 Abs. 2 und 3 neben der Möglichkeit zum Erlass von Empfehlungen auch Weisungsrecht gegenüber seinen Mitgliedsstaaten.

Die in Artikel 2 EAGV aufgeführten Aufgaben der EURATOM haben sich bis heute nicht geändert. Neben der gegenseitigen Unterstützung zur friedlichen Nutzung der Kernenergie obliegt es der Atomgemeinschaft ebenfalls u. a. „einheitliche Sicherheitsnormen für den Gesundheitsschutz der Bevölkerung und der Arbeitskräfte aufzustellen und für ihre Anwendung zu sorgen“ (Art. 2 b) EAGV). Diese Sicherheitsnormen sind auch für alle Arbeiten während des Rückbaus einer kerntechnischen Anlage anzusetzen. Beispielsweise ist gemäß Art. 37 des EAG-Vertrags eine Information

der Europäischen Kommission über die Ableitung radioaktiver Stoffe notwendig.

2.5.1.2 Das Pariser und das Brüsseler Übereinkommen

Die Frage der Haftung und der Entschädigung im Falle eines nuklearen Zwischenfalls wird auf internationaler Ebene erstmals im **Pariser Übereinkommen**³⁹ geklärt. Die genaue Ausgestaltung dieses Übereinkommens liegt bei den einzelnen Ländern. Das Pariser Übereinkommen definiert hierzu untere Grenzwerte einer Mindesthaftungssumme. Die Regelungen des Pariser Übereinkommens sind so formuliert, dass nationales Recht direkt auf sie Bezug nehmen kann und sie so leicht umgesetzt werden können. Dies geschieht im Atomgesetz (vgl. Kapitel 2.5.2.1) im vierten Abschnitt „Haftungsvorschriften“ in den §§ 25 ff. AtG. Des Weiteren ist die Deckungsvorsorge in der Atomrechtlichen Deckungsvorsorge-Verordnung (AtDeckV)⁴⁰ geregelt. Die Mindesthaftung für den „Inhaber einer Kernanlage“ (vgl. Art. 1 a) vi) Pariser Übereinkommen) beläuft sich dabei, in der Fassung des Abkommens vom 12. Februar 2004 auf 700 Millionen Euro (Art. 7 a) Pariser Übereinkommen). In Artikel 7 b) werden Bedingungen genannt, unter denen die Mindesthaftung reduziert werden darf, wobei je nach Bedingung eine Untergrenze von minimal 70 Millionen Euro gilt.

Aufbauend auf dem Pariser Übereinkommen wurden im **Brüsseler Zusatzübereinkommen**⁴¹ die Haftungssummen angehoben. Im Brüsseler Zusatzübereinkommen verpflichteten sich die Vertragsparteien für den Fall eines nuklearen Zwischenfalls eine Summe von 1,5 Milliarden Euro bereitzuhalten (Art. 3 a) Brüsseler Zusatzübereinkommen). Abhängig von der

³⁹ Übereinkommen vom 29. Juli 1960 über die Haftung gegenüber Dritten auf dem Gebiet der Kernenergie.

⁴⁰ Verordnung über die Deckungsvorsorge nach dem Atomgesetz (Atomrechtliche Deckungsvorsorge-Verordnung – AtDeckV) vom 1. April 2015, BGBl. I 2015, S. 434.

⁴¹ Zusatzübereinkommen vom 31. Januar 1963 zum Pariser Übereinkommen.

tatsächlichen Schadenshöhe muss diese gemäß Artikel 3 b) des Brüsseler Zusatzübereinkommens in unterschiedlichen Anteilen von unterschiedlichen Beteiligten (den haftenden Inhaber der Anlage, die Vertragspartei in deren Hoheitsgebiet die kerntechnische Anlage liegt, Versicherungen oder sonstige finanzielle Sicherheiten) getragen werden.

Im Sinne beider Übereinkommen ist ein „nukleares Ereignis“ definiert als „[...] jedes einen nuklearen Schaden verursachende Geschehnis oder jede Reihe solcher aufeinanderfolgender Geschehnisse desselben Ursprungs.“ (Art. 1 a) i) Pariser Übereinkommen). Die Haftung für einen nuklearen Zwischenfall erstreckt sich damit auch auf Zwischenfälle, die während oder aufgrund des Rückbaus einer kerntechnischen Anlage entstehen.

2.5.1.3 Das Wiener Übereinkommen und das Gemeinsame Protokoll

Da dem Pariser Übereinkommen vor allem westeuropäische Staaten beitraten, wurde am 21. Mai 1963 mit dem **Wiener Übereinkommen**⁴² ein international gültiges Übereinkommen über die zivilrechtliche Haftung für Nuklearschäden im Rahmen der UNO⁴³ geschlossen.

Sowohl das Pariser Übereinkommen (inklusive dem Brüsseler Zusatzübereinkommen), als auch das Wiener Übereinkommen, regeln im Kern den gleichen Inhalt jedoch mit unterschiedlichen Vertragspartnern. Um ein möglichst großes Netz an Vertragsstaaten zu erreichen und rechtliche Barrieren über die Anwendungen der jeweiligen Abkommen bei länderübergreifenden Zwischenfällen zu beseitigen, wurde am 21. September 1988 das „**Gemeinsame Protokoll** über die Anwendung des Wiener Übereinkommens und des Pariser Übereinkommens“⁴⁴ in Wien

⁴² Wiener Übereinkommen über die zivilrechtliche Haftung für nukleare Schäden vom 21. Mai 1963.

⁴³ UNO: United Nations Organization.

⁴⁴ Gemeinsames Protokoll über die Anwendung des Wiener Übereinkommens und des Pariser Übereinkommens vom 21. September 1988.

verabschiedet. In Artikel 3 Absatz 2 des Gemeinsamen Protokolls heißt es: „Tritt in einer Kernanlage ein nukleares Ereignis ein, so ist das Übereinkommen anwendbar, dessen Vertragspartei der Staat ist, in dessen Hoheitsgebiet die betreffende Anlage gelegen ist.“ (Art. 3 Abs. 2 Gemeinsames Protokoll) Um eine Doppelhaftungssituation zu vermeiden, kommt nach Artikel 3 Absatz 1 des Gemeinsamen Protokolls nur jeweils das in Artikel 3 Absatz 2 und Absatz 3 des Gemeinsamen Protokolls genannte Übereinkommen zur Geltung, unter Ausschluss des jeweils anderen.

2.5.1.4 IAEA-Sicherheitsstandards

Gemäß dem „Leitfaden zur Stilllegung, zum sicheren Einschluss und zum Abbau von Anlagen oder Anlagenteilen nach § 7 des Atomgesetzes“ (BMUB, 2009) erkennt die Bundesrepublik Deutschland die international anerkannten Sicherheitsprinzipien, wie beispielsweise die sogenannten „Safety Fundamentals“ der IAEA, an und setzt diese soweit erforderlich in nationales Recht um. Welche Sicherheitsstandards für die Stilllegung kerntechnischer Anlagen relevant sind, wird im oben genannten Leitfaden aufgeführt (BMUB, 2009, S. 5). Solche Sicherheitsstandards unterliegen einer dreistufigen Hierarchie. Hierbei sind sog. „Safety Fundamentals“ bedeutender als die „Safety Requirements“, welche wiederum über den „Safety Guides“ rangieren (Feige, o.J., S. 33). Sämtliche dieser Vorschriften sind zwar nicht rechtsbindend, werden aber vom deutschen Atomrecht umgesetzt (Odendahl, 2013, S. 27f).

2.5.2 Das deutsche Atomrecht

Die internationalen Vorgaben müssen in nationales Recht umgesetzt werden. Beispielsweise sind in Deutschland alle Regelungen des Pariser sowie des Brüsseler Übereinkommens in das nationale Gesetz zu den

Pariser und Brüsseler Atomhaftungs-Übereinkommen (AtHaftÜbkG)⁴⁵ eingeflossen. Weitere Regelungen der Haftung sind auch im vierten Abschnitt des Atomgesetzes geregelt (§§ 25 bis 40 AtG). Im Folgenden werden Gesetze und Verordnungen sowie verschiedene Leitlinien, Empfehlungen und Regeln in Deutschland, die insbesondere für den Rückbau kerntechnischer Anlagen relevant sind, näher beschrieben. Die Verflechtung der relevanten Regelwerke wird zunächst durch eine hierarchische Darstellung und Beschreibung beleuchtet (vgl. Abbildung 2.4).

Im Allgemeinen ist das Grundgesetz⁴⁶ (GG) die rechtliche Grundlage für die Regelung des Rückbaus kerntechnischer Anlagen. Als ranghöchste Gesetzesschrift steht das Grundgesetz über allen anderen Rechtsnormen. In Bezug auf die Kernenergie regelt Art. 73 Abs. 1 Nr. 14 GG die ausschließliche Gesetzgebung⁴⁷ des Bundes über die Errichtung und den Betrieb zur friedlichen Erzeugung und Nutzung von Kernenergie, die Beseitigung radioaktiver Stoffe sowie den Schutz gegen die Gefahren durch freiwerdende Kernenergie. In diesem Zusammenhang regelt Art. 87c GG, dass alle Gesetze, die in Bezug auf Art. 73 Abs. 1 Nr. 14 GG erlassen werden, mit Zustimmung des Bundesrates von Ländern im Auftrag des Bundes umgesetzt werden können. Dies hat zur Folge, dass dem Bund die Ausgestaltung der für die Stilllegung geltenden rechtlichen Rahmenbedingungen obliegt, die Wahrnehmungskompetenz allerdings bei den Ländern liegt (BMUB,

⁴⁵ Gesetz zu dem Übereinkommen vom 29. Juli 1960 über die Haftung gegenüber Dritten auf dem Gebiet der Kernenergie nebst Zusatzvereinbarungen, zu dem Übereinkommen vom 25. Mai 1962 über die Haftung der Inhaber von Reaktorschiffen nebst Zusatzprotokoll und zu dem Übereinkommen vom 17. Dezember 1971 über die zivilrechtliche Haftung bei der Beförderung von Kernmaterial auf See (Gesetz zu den Pariser und Brüsseler Atomhaftungs-Übereinkommen), kurz AtHaftÜbkG vom 09.09.2001, BGBl. I 2001, S. 2331.

⁴⁶ Grundgesetz für die Bundesrepublik Deutschland vom 23.12.2014, BGBl. I 2014, S. 2438.

⁴⁷ Mit ausschließlicher Gesetzgebung ist das Exklusivrecht des Bundes gemeint, Gesetze zu verfassen und die Länder nur einzubinden, wenn dies im Rahmen des jeweiligen Bundesgesetzes ausdrücklich vorgesehen ist (Art. 71 GG).

2014). Beispielsweise sind daher für die Genehmigung aller Aktivitäten nach § 7 AtG⁴⁸ (Stilllegung und Rückbau einer kerntechnischen Anlage) je nach Anlagenstandort die jeweiligen, obersten Landesbehörden zuständig (§24 Abs. 2 AtG). Die Vorschriften zur Durchführung von Stilllegungs-genehmigungsverfahren werden wiederum in der Atomrechtlichen Verfahrensverordnung⁴⁹ (AtVfV) geregelt (vgl. Kapitel 2.5.2.5).

Darüber hinaus wird im Grundgesetz kein besonderer Fokus auf atomrechtliche Fragen gelegt, aber dennoch werden einige Grundsätze des gesellschaftlichen Zusammenlebens formuliert, die direkt für den Umgang mit kerntechnischen Anlagen und deren Rückbau relevant sind. Beispielsweise sind die Artikel 2 Abs. 2 GG (Grundrecht auf Leben und körperliche Unversehrtheit) und Artikel 20a GG (Schutz der natürlichen Lebensgrundlage und Schutz von Tieren) dafür verantwortlich, dass alle kerntechnischen Aktivitäten in höchstem Maße kontrolliert und geprüft werden müssen. Aufgrund der potentiellen Strahlengefahr für Mensch, Tier und Umwelt auch während des Rückbaus kerntechnischer Anlagen, hat der Staat Sorge dafür zu tragen, dass die Bevölkerung vor diesen Gefahren geschützt wird.

⁴⁸ Gesetz über die friedliche Verwendung der Kernenergie und den Schutz gegen ihre Gefahren (Atomgesetz), kurz AtG, vom 20.07.2017, BGBl. I 2017, S. 2808.

⁴⁹ Verordnung über das Verfahren bei der Genehmigung von Anlagen nach §7 des Atomgesetzes (Atomrechtliche Verfahrensverordnung – AtVfV) vom 9. Dezember 2006, BGBl. I 2006, S. 2819.

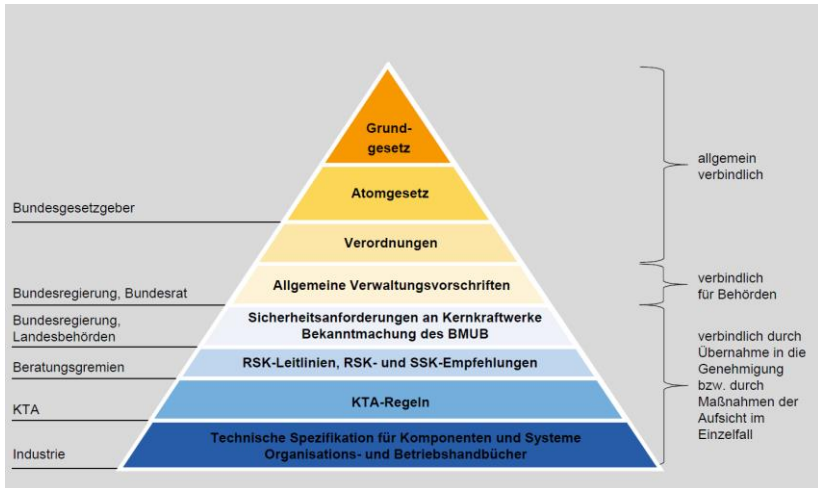


Abbildung 2.4: Das deutsche Atomrecht⁵⁰ (Quelle: Wasmuth, 2015)

Das AtG spezifiziert die gesetzlichen Regelungen, die im Speziellen für kerntechnische Anlagen gelten. Sowohl das Grundgesetz als auch das Atomgesetz sind auf Bundesebene vom Gesetzgeber erlassen und gelten in der gesamten Bundesrepublik Deutschland. Verschiedene Verordnungen sind zusätzlich zum Grundgesetz und Atomgesetz allgemein verbindlich für alle Akteure, die im kerntechnischen Rückbau beschäftigt sind. Allgemeine Verwaltungsvorschriften sind insbesondere für Behörden verbindlich und berücksichtigen dabei zu jeder Zeit die geltenden Gesetze und Verordnungen. Weitere Sicherheitsanforderungen, Leitlinien, Empfehlungen, Regeln und technische Spezifikationen sind insbesondere für die Genehmigungen und die kerntechnische Aufsichtsbehörde relevant.

⁵⁰ Die in Bezug auf den Rückbau kerntechnischer Anlagen bestehenden Aufgaben der Reaktorsicherheitskommission (RSK) sowie der Strahlenschutzkommission (SSK) werden in Kapitel 2.5.2.5 und die Aufgaben des Kerntechnischen Ausschusses (KTA) werden in Kapitel 2.5.2.7 beschrieben.

Die Gesetzgebung, die speziell für den Umgang in sowie mit kerntechnischen Anlagen und damit auch für den Rückbau kerntechnischer Anlagen erlassen wird, ist im Quadrat um das Atomgesetz in Abbildung 2.5 dargestellt. Darüber hinaus sind für den Rückbau kerntechnischer Anlagen weitere Gesetze und internationale Übereinkommen zu berücksichtigen, die in Abbildung 2.5 außerhalb des Quadrates aufgezeigt werden.

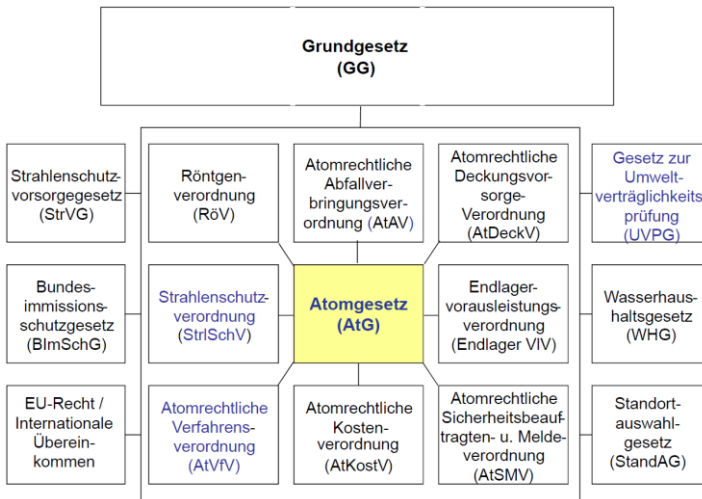


Abbildung 2.5: Gesetzlicher Rahmen für den Rückbau kerntechnischer Anlagen (Quelle: Fieber, 2015)

Eine umfassendere Darstellung des in Abbildung 2.5 aufgezeigten gesetzlichen Rahmens für den Rückbau kerntechnischer Anlagen wird in den folgenden Kapiteln aufgeführt.

2.5.2.1 Atomgesetz

Das „Gesetz über die friedliche Verwendung der Kernenergie und den Schutz gegen ihre Gefahren (Atomgesetz)“ oder AtG hat im Hinblick auf

den Rückbau kerntechnischer Anlagen in seiner aktuellen Fassung insbesondere den Zweck, „die Nutzung der Kernenergie zur gewerblichen Erzeugung von Elektrizität geordnet zu beenden und bis zum Zeitpunkt der Beendigung den geordneten Betrieb sicherzustellen“ (§ 1 AtG). Der Zweck des AtG hat sich mit seiner Novellierung im Jahr 2002 grundlegend verändert. Während vor dem Jahr 2002 der Zweck des AtG noch in der Förderung der Kernenergie lag, wurde mit dessen Novellierung im Jahr 2002 die geordnete Beendigung als neuer Zweck des AtG eingeführt. Das Atomgesetz in seiner aktuellen Fassung regelt darüber hinaus, dass Leben, Gesundheit und Sachgüter vor den Gefahren der Kernenergie geschützt werden, die innere und äußere Sicherheit der Bundesrepublik Deutschland durch die Kernenergie nicht gefährdet und internationale Verpflichtungen im Bereich der Kernenergie gewährleistet werden (§ 1 AtG).

Gemäß § 7 Abs. 1a AtG werden für alle deutschen Kernkraftwerke die verbleibenden Berechtigungszeiträume für den Leistungsbetrieb festgelegt. Somit wird im Atomgesetz der Ausstieg aus der gewerblichen Erzeugung von Elektrizität durch Kernenergie geregelt.

Prinzipiell spricht das AtG bzgl. der Stilllegung von zwei möglichen Strategien: dem direkten Rückbau und dem sicheren Einschluss (verzögerter Rückbau)⁵¹. Der Rückbau und die Endlagerung kerntechnischer Anlagen werden in § 9a, Abs. 1 AtG näher geregelt. Es wird festgelegt, dass die Betreiber für den Rückbau ihrer Anlagen verantwortlich sind: „Wer Anlagen, in denen mit Kernbrennstoffen umgegangen wird, errichtet, betreibt, sonst innehat, wesentlich verändert, stilllegt oder beseitigt, [...] hat dafür zu sorgen, daß anfallende radioaktive Reststoffe sowie ausgebaute oder abgebaute radioaktive Anlagenteile [...] schadlos verwertet werden oder als radioaktive Abfälle geordnet beseitigt werden (direkte Endlagerung).“ (§ 9a Abs. 1 AtG). Die Wahrnehmung der Zwischenlagerung kann gemäß

⁵¹ Zur Definition dieser Begriffe vgl. Kapitel 2.1.2.

§ 9a Abs. 1 auch an einen vom Bund beauftragten Dritten übergehen (vgl. § 2 Abs. 1 Satz 1 Entsorgungsübergangsgesetz – Kapitel 2.5.2.6). Diese Verantwortlichkeit der Betreiber für den Rückbau, die auch als Verursacherprinzip bezeichnet wird, bezieht direkt die Kostenübernahme der Betreiber für die Rückbauaktivitäten und indirekt über die Einzahlung in einen Fonds für die Beseitigung mit ein (vgl. Kapitel 2.5.2.6 sowie Kapitel 2.6.4), wobei die Kostenübernahme zur Beseitigung radioaktiver Abfälle im „Gesetz zur Neuordnung der Verantwortung in der kerntechnischen Entsorgung“⁵² (vgl. Kapitel 2.5.2.6) geregelt ist. Im Gegensatz dazu ist gemäß dem Atomgesetz für das Finden eines Endlagers der Bund zuständig: „[...] der Bund hat Anlagen zur Sicherstellung und zur Endlagerung radioaktiver Abfälle einzurichten.“ (§ 9a Abs. 3 AtG) Bis ein Endlager gefunden ist, gilt: „Der Betreiber einer Anlage zur Spaltung von Kernbrennstoffen zur gewerblichen Erzeugung von Elektrizität hat dafür zu sorgen, dass ein Zwischenlager [...] innerhalb des abgeschlossenen Geländes der Anlage oder [...] in der Nähe der Anlage errichtet wird (standortnahes Zwischenlager) und die anfallenden bestrahlten Kernbrennstoffe bis zu deren Ablieferung an eine Anlage zur Endlagerung radioaktiver Abfälle dort aufbewahrt werden.“ (§ 9a Abs. 2 S. 3 AtG) Gemäß § 6 Abs. 5 S. 1 AtG ist die Aufbewahrung von Kernbrennstoffen in kerntechnischen Anlagen auf 40 Jahre ab Beginn der ersten Einlagerung eines Behälters begrenzt. Aus unabweisbaren Gründen kann der Deutsche Bundestag die Genehmigung zur Lagerung gemäß § 6 Abs. 1 AtG verlängern (§ 6 Abs. 5 S. 2). Ein unabweisbarer Grund liegt beispielsweise vor, wenn nach Ablauf der Frist kein Endlager zur Verfügung steht (§ 9a Abs. 2 S. 3 AtG). Bei der Verlängerung der Genehmigung eines Zwischenlagers handelt es sich um eine Neugenehmigung, d. h. dass die aktuell geltenden Zulassungsvoraussetzungen gemäß § 6 Abs. 2 S. 1-4 AtG, wie beispielsweise der Stand der Technik, gelten müssen.

⁵² Gesetz zur Neuordnung der Verantwortung in der kerntechnischen Entsorgung vom 27. Januar 2017, BGBl. 2017 Teil I, Nr. 5, S. 114.

Sofern der Betreiber einer kerntechnischen Anlage diese stilllegen, abbauen oder in den sicheren Einschluss überführen möchte, muss dieser nach § 7 Abs. 3 AtG seine Handlungsabsichten genehmigen lassen. Die Genehmigungsvoraussetzungen werden in § 7 Abs. 2 AtG beschrieben. Die Anforderungen an die Antragsunterlagen werden in der Atomrechtlichen Verfahrensverordnung (AtVfV) geregelt (vgl. Kapitel 2.5.2.5).

Die bereits genannten und die weiteren wichtigen Verwaltungsbehörden, die für die Ausübung des Atomrechts und insbesondere auch für den Rückbau kerntechnischer Anlagen relevant sind, werden im dritten Abschnitt des AtG aufgeführt. In § 23 AtG werden die Aufgaben des Bundesamts für Strahlenschutz (BfS) festgelegt. Darunter fallen insbesondere Aufgaben im Zusammenhang mit Genehmigungsverfahren zum Rückbau kerntechnischer Anlagen (§ 23 Abs. 1 Nr. 9) und der Zwischenlagerung radioaktiver Stoffe (§ 23 Abs. 1 Nr. 10). Das BfS ist gemäß § 1 Abs. 1 BAStlSchG⁵³ im Geschäftsbereich des Bundesministeriums für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit als selbständige Bundesoberbehörde tätig. Neben dem BfS ist das Bundesamt für kerntechnische Entsorgung (BfE) gemäß § 23d für die Genehmigung von Zwischenlagern zuständig. Das BfE untersteht gemäß § 3 BfKEG⁵⁴ ebenfalls der Aufsicht des Bundesministeriums für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit. Für die Genehmigungen grenzüberschreitender Verbringungen radioaktiver Stoffe ist das Bundesamt für Wirtschaft und Ausfuhrkontrolle (BAFA) zuständig (§ 22 Abs. 1 AtG). Trotz der Genehmigung des BAFA besitzt das Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit (BMUB) dennoch die Weisungsbefugnis über solche Transporte (§ 22 Abs. 3 AtG). Die tatsächliche Kontrolle über die Ausfuhr nimmt das Bundesministerium der Finanzen bzw. nehmen die ihr unterstellten

⁵³ Gesetz über die Errichtung eines Bundesamtes für Strahlenschutz, kurz BAStlSchG, vom 31. August 2015, BGBl. I 2015, S. 1474.

⁵⁴ Gesetz über die Errichtung eines Bundesamtes für kerntechnische Entsorgung, kurz BfKEG, vom 31. August 2015, BGBl. I 2015, S. 1474.

Zollbehörden wahr (§ 22 Abs. 2 AtG). Für den Rückbau kerntechnischer Anlagen relevante Verwaltungsbehörden sind gemäß § 24 AtG die Landesbehörden, die insbesondere beim Genehmigungsverfahren im Auftrag des Bundes handeln (vgl. Kapitel 2.5.2.5), gemäß § 23c die Bundesnetzagentur (Entscheidungen u. a. über die Rückbaugenehmigung von kerntechnischen Anlagen zur Verhinderung von Gefahren oder Störungen der Sicherheit oder Zuverlässigkeit des Elektrizitätsversorgungssystems) und gemäß § 23a AtG das Bundesverwaltungsamt (Entscheidungen der Enteignung bei der Endlagersuche).

2.5.2.2 Strahlenschutzvorsorgegesetz – StrVG

In Bezug auf den Strahlenschutz stellt das Strahlenschutzvorsorgegesetz (StrVG)⁵⁵ ein Gesetz zum Schutz der natürlichen Lebensgrundlage und der Tiere dar.

Zweck des Gesetzes ist es, „Zum Schutz der Bevölkerung [...] die Radioaktivität in der Umwelt zu überwachen“ (§ 1 Nr. 1 StrVG) und „die Strahlenexposition der Menschen und die radioaktive Kontamination der Umwelt im Falle von Ereignissen mit möglichen nicht unerheblichen radiologischen Auswirkungen [...] so gering wie möglich zu halten.“ (§ 1 Nr. 2 StrVG). Hierzu sammelt und misst der Bund insbesondere die Werte der Radioaktivität in der Luft, im Niederschlag, im Wasser und auf dem Boden (§ 2 Abs. 1 StrVG), während die Länder die Radioaktivität in Nahrungs- und Futtermitteln, im Trinkwasser, in Abwässern, im Boden und in der Flora messen (§ 3 Abs. 1 StrVG). Die hierbei gesammelten Daten werden vom BMUB bewertet (§ 5 Abs. 1 StrVG) und einmal im Jahr an den Bundestag weitergeleitet (§ 5 Abs. 2 StrVG). Anschließend legt das BMUB Dosis- und Kontaminationswerte fest (§ 6 Abs. 1 StrVG), welche die nationale und grenzüberschreitende Grundlage für Verbote und Beschränkungen bei

⁵⁵ Strahlenschutzvorsorgegesetz, kurz StrVG vom 31. August 2015, BGBl. I 2015, S. 1474.

Lebensmitteln, Futtermitteln, Arzneimitteln und sonstigen Stoffen bilden (§ 7 StrVG).

2.5.2.3 Strahlenschutzverordnung – StrlSchV

Die „Verordnung über den Schutz vor Schäden durch ionisierende Strahlen“⁵⁶ baut auf dem Strahlenschutzvorsorgegesetz auf. Die Strahlenschutzverordnung (StrlSchV) regelt insbesondere den Umgang mit ionisierender Strahlung zum Schutz von Mensch und Umwelt vor deren schädlichen Einwirkungen (§ 1 StrlSchV). Dazu wird die Vermeidung unnötiger Strahlenexposition und die Reduktion der Dosis (§ 6 StrlSchV), Genehmigungen, Zulassungen und Freigaben sowie Grenzwerte festgelegt. Da während der Stilllegung, des sicheren Einschlusses und des Rückbaus einer kerntechnischen Anlage die beteiligten Mitarbeiter mit ionisierender Strahlung umgehen müssen, stellt die Strahlenschutzverordnung gemäß § 2 Abs. 1 Nr. 1 c StrlSchV eines der zentralen Regelwerke für den kerntechnischen Rückbau dar.

Zum Schutz von Mensch und Umwelt schreibt § 6 StrlSchV vor, dass jede unnötige Strahlenexposition oder Kontamination von Mensch und Umwelt zu vermeiden ist (§ 6 Abs. 1 StrlSchV). Dabei soll immer der Stand der Technik berücksichtigt werden, sodass bei allen Tätigkeiten die Strahlenexposition auch unterhalb der vorgegebenen Grenzwerte so gering wie möglich ausfällt (§ 6 Abs. 2 StrlSchV). Diese Vorgabe wird auch als „Minimierungsgebot“ oder international als ALARA-Prinzip (As Low As Reasonably Achievable) bezeichnet und stellt für den Rückbau einer kerntechnischen Anlage unter anderem die Anforderung, dass alle Tätigkeiten nur mit solchen Maschinen durchzuführen sind, die eine minimale Strahlenexposition und eine minimale Kontamination von Mensch und Umwelt zur Folge haben (vgl. auch Kapitel 2.4). Die Einhaltung dieses

⁵⁶ Verordnung über den Schutz vor Schäden durch ionisierende Strahlen (Strahlenschutzverordnung – StrlSchV) vom 11. Dezember 2014, BGBl. I 2014, S. 2010.

Minimierungsgebots wird einerseits bereits bei der Beantragung des Rückbaus und andererseits auch während des Rückbaus durch die ständig anwesenden Strahlenschutzbeauftragten (sog. Strahlenschützer) überprüft und überwacht (§ 33 StrlSchV).

Zusätzlich zum Minimierungsgebot werden obere Schranken für die Strahlenexposition und Strahlenbelastung (sog. Dosisbegrenzung) zum Schutz von Mensch und Umwelt in der StrlSchV vorgegeben, die gemäß § 5 StrlSchV auch während des Rückbaus eingehalten werden müssen:

- Begrenzung der Strahlenexposition der Bevölkerung auf 1 mSv effektiver Dosis im Kalenderjahr (Direktstrahlung und Ableitungen) (§ 46 StrlSchV).
- Begrenzung der Ableitung radioaktiver Stoffe auf 0,3 mSv effektiver Dosis im Kalenderjahr (§ 47 StrlSchV).
- Schutz der Mitarbeiter bei beruflicher Strahlenexposition durch eine maximale effektive Dosis von regulär 20 mSv im Kalenderjahr. Einzelfallregelungen sind hierbei möglich (§ 55 und § 58 StrlSchV).
- Begrenzung der Freisetzung radioaktiver Stoffe als Folge von Störfällen auf 50 mSv effektiver Dosis (§ 49 StrlSchV).

Zum weiteren Schutz vor Strahlendosis werden unter anderem die Auslegung bzw. Organisation der Strahlenschutzbereiche (§§ 36 ff. StrlSchV) und die Überwachung der sich in der Anlage befindlichen Personen (§§ 40 ff. StrlSchV) geregelt. Als Strahlenschutzbereiche werden gemäß § 36 StrlSchV je nach Höhe der Strahlenexposition *Überwachungsbereiche*, *Kontrollbereiche* und *Sperrbereiche* definiert. Ausgehend von einer Aufenthaltsdauer der Mitarbeiter von 40 Stunden je Woche und 50 Wochen im Kalenderjahr werden die Bereiche wie folgt definiert:

1. In *Überwachungsbereichen*, die nicht zum Kontrollbereich gehören, dürfen Personen im Kalenderjahr einer effektiven Dosis von mehr als 1 mSv ausgesetzt werden,
2. Im *Kontrollbereich* dürfen Personen im Kalenderjahr einer effektiven Dosis von mehr als 6 mSv ausgesetzt werden,
3. In *Sperrbereichen*, die Teile des Kontrollbereichs sind, dürfen Personen einer Ortsdosisleistung höher als 3 mSv je Stunde ausgesetzt sein.

Zum Schutz der Mitarbeiter werden darüber hinaus Vorkehrungen bei verschiedenen Szenarien, wie beispielsweise zur Brandbekämpfung (§ 52 StrlSchV), vorgegeben. Auch bauliche und technische Schutzmaßnahmen zur Reduzierung von Strahlenexposition sind gemäß § 50 Abs. 1 und 2 StrlSchV zu treffen.

Für den Rückbau ist des Weiteren relevant, dass Anlagenteile aus der atomrechtlichen und strahlenschutzrechtlichen Überwachung freigegeben werden können (§ 29 StrlSchV). Aufgrund der besonderen Relevanz für den Rückbau kerntechnischer Anlagen wird die Freigabe in Kapitel 2.5.3 ausführlicher beschrieben.

Anlagenteile, die wie in Kapitel 2.5.3 beschrieben nicht freigegeben werden dürfen, sind gemäß § 78 StrlSchV bis zur Inbetriebnahme von Anlagen des Bundes zur Sicherstellung und zur Endlagerung radioaktiver Abfälle (vgl. § 76 Abs. 1 StrlSchV) als radioaktive Abfälle vom Ablieferungspflichtigen zwischenzulagern. Die Zwischenlagerung radioaktiver Abfälle, beispielsweise in einem Zwischenlager auf dem Gelände der rückzubauenden kerntechnischen Anlage, ist somit in der Planung und Durchführung des Rückbaus zu berücksichtigen.

Gemäß § 73 StrlSchV sind alle radioaktiven Abfälle zu erfassen und zu dokumentieren⁵⁷. Darüber hinaus wird in § 74 StrlSchV geregelt, wie radioaktive Abfälle in der operativen Durchführung behandelt und verpackt werden müssen.

2.5.2.4 Umweltverträglichkeitsprüfung - UVP

Bestimmte öffentliche und private Vorhaben unterliegen dem Gesetz über die Umweltverträglichkeitsprüfung (UVPG)⁵⁸. Diese Vorhaben sollen hinsichtlich ihrer Auswirkungen auf die Umwelt frühzeitig und umfassend ermittelt, beschrieben und bewertet werden. Die Ergebnisse dieser Prüfungen sollen des Weiteren in die behördlichen Entscheidungen über die Zulässigkeit dieser Vorhaben mit einfließen. (§ 1 UVPG)

Bereits in der Zweckbestimmung des AtG wird in § 1 Abs. 2 AtG festgelegt, dass „Leben, Gesundheit und Sachgüter vor den Gefahren der Kernenergie und der schädlichen Wirkung ionisierender Strahlen zu schützen [...]“ sind. In diesem Zusammenhang besteht gemäß § 2a Abs. 1 AtG für einige Vorhaben in kerntechnischen Anlagen die Verpflichtung zur Durchführung einer Umweltverträglichkeitsprüfung. Welche Vorhaben davon betroffen sind, wird in Anlage 1, Nr. 11.1 UVPG ausgeführt. Demnach unterliegen (nach Anlage 1, Nr. 11.1 UVPG) geplante Maßnahmen zur Stilllegung, zum sicheren Einschluss oder zum Abbau der Anlage oder Anlagenteilen den UVP-pflichtigen Vorhaben, sodass eine Umweltverträglichkeitsprüfung (UVP) nach § 2a Abs. 1 AtG Teil der Antragsunterlagen sein muss. Die Inhalte sowie das Vorgehen der UVP werden im UVPG näher beschrieben: Für eine UVP wird der Antragsteller von der zuständigen Behörde über den Umfang und den Inhalt der benötigten Unterlagen unterrichtet (§ 5 Abs. 1, S. 1 UVPG), welche er in einer fachspezifischen Art und Weise (§ 6 Abs. 2

⁵⁷ Wie in Kapitel 2.6.2 beschrieben und begründet ist, werden Stoffströme in dieser Arbeit nicht berücksichtigt.

⁵⁸ Gesetz über die Umweltverträglichkeitsprüfung (UVPG) vom 31. August 2015, BGBl. I 2015, S. 1474.

S. 1 UVPG) und allgemein verständlichen Ausfertigung einzureichen hat (§ 6 Abs. 3 S. 2 UVPG). Diese Unterlagen müssen insbesondere folgende Beschreibungen enthalten:

- Eine nach § 6 Abs. 3 Nr. 1-5 UVPG vorgeschriebene Beschreibung der Anlage, der Umwelt und ihrer Bestandteile im Einwirkungsbereich des Vorhabens, der nachteiligen Umweltauswirkungen und der Maßnahmen zur Vermeidung von nachteiligen Umweltauswirkungen.
- Gemäß § 6 Abs. 4 Nr. 1 sind die wichtigsten Merkmale der verwendeten technischen Verfahren zu beschreiben.
- Die „[...]Art und Umfang der zu erwartenden Emissionen, der Abfälle, des Anfalls von Abwasser, der Nutzung und Gestaltung von Wasser, Boden, Natur und Landschaft sowie Angaben zu sonstigen Folgen des Vorhabens, die zu erheblichen nachteiligen Umweltauswirkungen führen können“ (§ 6 Abs. 4 Nr. 2) sind zu beschreiben.

Diese Beschreibungen basieren auf dem Rückbauplan, der zur Ausarbeitung der UVP zuvor in einer ausreichenden Detaillierungstiefe erstellt werden muss. Diese Anforderungen an die Rückbauplanung werden in Kapitel 2.5.2.5 nochmals aufgegriffen und in Kapitel 4 bei der Erstellung des Planungswerkzeugs zur Rückbauplanung berücksichtigt.

In den Genehmigungsprozess einer Umweltverträglichkeitsprüfung sind andere nationale Behörden eingebunden, wenn „deren umweltbezogener Aufgabenbereich durch das Vorhaben berührt wird“ (§ 7 S. 1 UVPG). Des Weiteren hat die zuständige Behörde die Öffentlichkeit gemäß § 9 Abs. 1 S. 1 UVPG an dem Genehmigungsprozess zu beteiligen. Dazu werden die in § 9 Abs. 1a UVPG genannten Informationen der Öffentlichkeit bekannt gemacht, ihr zur Einsicht ausgelegt (§ 9 Abs. 1b UVPG) und ihr Gelegenheit zur Äußerung gegeben (§ 9 Abs. 3 UVPG). Abschließend wird der

Öffentlichkeit die Entscheidung mit Begründung und Information über mögliche Rechtsbehelfe mitgeteilt (§ 9 Abs. 3 Nr.4 UVPG).

2.5.2.5 Genehmigungsverfahren und Atomrechtliche Verfahrensverordnung – AtVfV

Die operativen Stilllegungs- und Abbauaktivitäten beginnen erst nachdem die Genehmigung erteilt worden ist⁵⁹. Gemäß § 7 Abs. 3 AtG müssen die Stilllegung, der Abbau sowie der sichere Einschluss bei der zuständigen atomrechtlichen Landesbehörde beantragt werden. „Die Bundesländer handeln dabei im Auftrag des Bundes ("Bundesauftragsverwaltung"). Sie unterliegen der Aufsicht des Bundesministeriums für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit (BMUB). Das Ministerium wird hierbei von der Entsorgungskommission (ESK), der Reaktorsicherheitskommission (RSK) sowie der Strahlenschutzkommission (SSK) beraten.“ (Bundesregierung, 2015) Die Bundesauftragsverwaltung zur Genehmigung des Rückbaus kerntechnischer Anlagen ist auch in § 24 AtG geregelt (vgl. Kapitel 2.5.2.1).

Im Genehmigungsverfahren sind gemäß § 7 Abs. 4 AtG „[...] alle Behörden des Bundes, der Länder, der Gemeinden und der sonstigen Gebietskörperschaften zu beteiligen, deren Zuständigkeitsbereich berührt wird.“ Somit sind neben den für die Genehmigung zuständigen Landesbehörden oder Gemeinden auch Behörden auf Bundesebene in das Genehmigungsverfahren einzubeziehen (vgl. Abbildung 2.6). Beispielsweise sind die Genehmigungsverfahren nach den Grundsätzen der §§ 8, 10 Abs. 1 bis 4, 6

⁵⁹ Da die zum Rückbau benötigte Genehmigung eine wesentliche Herausforderung für die Rückbauplanung darstellt, sei an dieser Stelle angemerkt, dass nicht nur in Deutschland, sondern in allen von Hübner et al. (2017b) untersuchten Ländern für den Rückbau eine behördliche Genehmigung benötigt wird. Dies wird auch von Huger und Woodcock (2016) bestätigt.

bis 8, 10 Satz 2 und des § 18 des Bundes-Immissionsschutzgesetzes⁶⁰ geregelt. Des Weiteren werden in § 7 Abs. 2 AtG die Genehmigungsvoraussetzungen beschrieben. Hierzu sind die Behörden angehalten, u. a. „Bedenken gegen die Zuverlässigkeit des Antragsstellers“, die Kenntnisse des tätigen Personals, die „Vorsorge gegen Schäden“, „die erforderliche Vorsorge für die Erfüllung gesetzlicher Schadensersatzverpflichtungen“, den erforderlichen „Schutz gegen Störmaßnahmen oder sonstige Einwirkungen Dritter“ bis hin zu öffentlichen Interessen, „insbesondere im Hinblick auf die Umweltauswirkungen“ zu überprüfen (§ 7 Abs. 2 AtG).

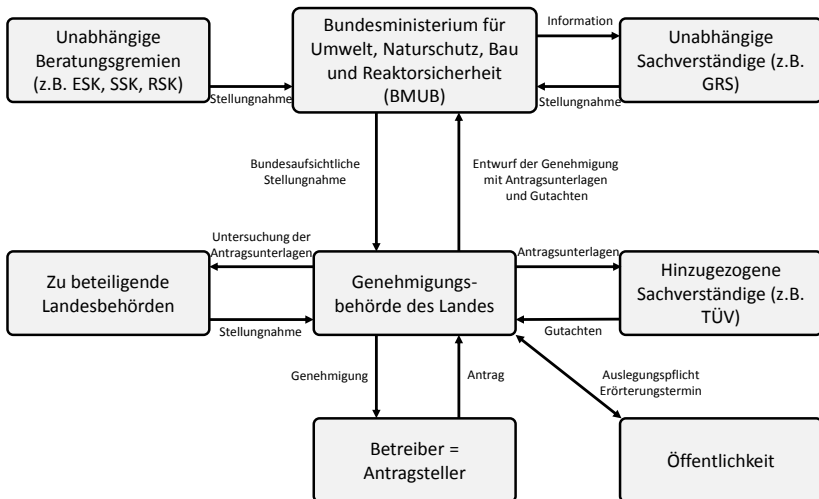


Abbildung 2.6: Beteiligte Akteure beim Genehmigungsverfahren zum Rückbau einer kerntechnischen Anlage

⁶⁰ Gesetz zum Schutz vor schädlichen Umwelteinwirkungen durch Luftverunreinigungen, Geräusche, Erschütterungen und ähnliche Vorgänge (Bundes-Immissionsschutzgesetz – BImSchG) vom 31. August 2015, BGBl. I 2015, S. 1474.

Die Atomrechtliche Verfahrensverordnung (AtVfV) beinhaltet die zentralen Vorschriften zur Durchführung von Genehmigungsverfahren und somit auch zur Durchführung von Stilllegungsgenehmigungsverfahren. Insbesondere enthält die AtVfV stilllegungsspezifische Regelungen für die Beteiligung Dritter und beschreibt gemäß § 1a AtVfV die Notwendigkeit für die Durchführung einer UVP (vgl. Kapitel 2.5.2.4). Darüber hinaus trifft sie Aussagen über die Tiefe und den Umfang zu den vorzulegenden Unterlagen und Hinweisen an die Behörde zur Prüfung der das Vorhaben betreffenden öffentlich-rechtlichen Vorschriften.

Diesbezüglich regelt die AtVfV Form und Inhalt der Antragsunterlagen (§§ 2 und 3 AtVfV). Neben dem Stilllegungsleitfaden (BMUB, 2009) wird in der AtVfV beschrieben, welche Arten und welchen Umfang die Antragsunterlagen für die Stilllegung einer kerntechnischen Anlage beinhalten müssen (§ 3 AtVfV). Hierbei sind u. a. das Stilllegungskonzept und eine Beschreibung der hierbei durchzuführenden Arbeiten der gewählten Rückbaustrategie anzuführen. Die Mindestanforderungen an das Rückbaukonzept sind in der RSK-Stellungnahme „Vorschlag für Anforderungen an die Stilllegung im kerntechnischen Regelwerk“ enthalten (RSK, 2005). Des Weiteren müssen gemäß § 19b Abs. 1 S. 1 AtVfV die „[...] insgesamt geplanten Maßnahmen zur Stilllegung, zum sicheren Einschluss oder zum Abbau der Anlage oder von Anlagenteilen enthalten [...]“ (§ 19b Abs. 1 S. 1 AtVfV) sein.

Wichtig ist, dass die Antragsunterlagen gemäß dem „Leitfaden zur Stilllegung, zum sicheren Einschluss und zum Abbau von Anlagen oder Anlagenteilen nach §7 des Atomgesetzes“ eine „Beschreibung der beantragten Stilllegungsmaßnahmen und des insgesamt vorgesehenen Stilllegungsverfahrens sowie [einen] Nachweis, dass durch die beantragten Maßnahmen der spätere Abbau nicht erschwert wird“ (BMUB, 2009, S. 6 f.) enthalten. Zweck dieser Beurteilung ist die Feststellung „[...] ob die beantragten Maßnahmen weitere Maßnahmen nicht erschweren oder verhindern und ob eine sinnvolle Reihenfolge der Abbaumaßnahmen vorgesehen ist“ (§ 19b

Abs. 1 S. 1 AtVfV). Diese Beurteilung ist einerseits von den gewählten Techniken sowie Verfahren und andererseits von der zu genehmigten Rückbauplanung abhängig. In diesem Zusammenhang wird die Bedeutung der Rückbauplanung auch aus rechtlicher Sicht deutlich.

Das BMUB empfiehlt in seiner Leitlinie, dass das gesamte Rückbauprojekt in mehrere, technisch abgrenzbare Schritte unterteilt wird (BMUB, 2009, S. 9). Der große Vorteil bei diesen getrennt voneinander zu genehmigenden Tatbeständen liegt neben der Übersichtlichkeit bei großen, zum Rückbau bestimmten Anlagen auch darin, dass ein bereits genehmigter Schritt im Rückbauprozess durchgeführt wird, während sich zeitgleich der nächste Rückbauschnitt im Beantragungsprozess befindet. Für kleine kerntechnische Anlagen, wie z. B. Forschungsreaktoren, kann es jedoch auch sinnvoller sein, einen Gesamtantrag für die Rückbaugenehmigung dieser Anlagen zu stellen (BMUB, 2009, S. 9). Die Beantragung des Rückbaus in mehreren Phasen hat einen Einfluss auf die Ausführung des Rückbaus. Einerseits besteht bei mehreren Rückbauphasen eine erhöhte Flexibilität, um auf Unsicherheiten während des Rückbaus reagieren zu können, da nicht für das gesamte Rückbauprojekt eine aktualisierte Genehmigung beantragt werden muss. Andererseits sind Optimierungspotentiale, die sich auf das gesamte Rückbauprojekt bezogen ergeben können, nicht realisierbar. Insgesamt hat somit die strategische Wahl der Anzahl der Rückbauphasen einen Einfluss auf die Rückbauplanung. Andersherum können auch von der Rückbauplanung ausgehend verschiedene Rückbauphasen abgeleitet werden. Das in Kapitel 4 vorgestellte Planungswerkzeug kann sowohl zur Planung des gesamten Rückbaus als auch zur Planung von Rückbauphasen eingesetzt werden.

In einem ersten Schritt besteht die Möglichkeit gemäß § 1b AtVfV ein Vorgespräch mit der Genehmigungsbehörde wahrzunehmen. In diesem Gespräch wird der Antragsteller über „[...] voraussichtlich beizubringende Unterlagen“ unterrichtet (§ 1b AtVfV). Dabei werden die Art und der Umfang der Unterlagen besprochen.

Im Anschluss ist es Aufgabe des Antragstellers ggf. unter Verwendung der Informationen aus der Unterrichtung einen schriftlichen Antrag auf (Teil-)Genehmigung bei der zuständigen Genehmigungsbehörde zu stellen. Dieser muss eine bestimmte Form und einen bestimmten Inhalt besitzen, die in § 2 AtVfV näher beschrieben sind. Zusätzlich sind dem Antrag gemäß § 3 AtVfV eine Vielzahl an Unterlagen beizulegen. Diese umfassen u. a. einen Sicherheitsbericht zur Beurteilung, ob Dritte durch die beim Rückbau entstehenden Auswirkungen in ihren Rechten verletzt werden können (§ 3 Abs. 1 Nr. 1 AtVfV). Darüber hinaus sind dem Antrag ergänzende Pläne, Zeichnungen und Beschreibungen (§ 3 Abs. 1 Nr. 2 AtVfV), Angaben über Maßnahmen zum Schutz gegen Störmaßnahmen und sonstige Einwirkungen Dritter (§ 3 Abs. 1 Nr. 3 AtVfV), Nachweise über die Kompetenzen und die Zuverlässigkeit des Betriebs- und Aufsichtspersonals (§ 3 Abs. 1 Nr. 4 und 5 AtVfV), Maßnahmen bei Stör- und Schadensfällen (§ 3 Abs. 1 Nr. 6 AtVfV) sowie ein Rahmenplan für Anlageprüfungen, Informationen zur Vorsorge gegen Schadensersatzverpflichtungen (§ 3 Abs. 1 Nr. 7 AtVfV), die Beschreibung der anfallenden radioaktiven Reststoffe (§ 3 Abs. 1 Nr. 8 AtVfV) und Angaben über sonstige Umweltauswirkungen (§ 3 Abs. 1 Nr. 9 AtVfV) beizulegen. Als UVP-pflichtiges Vorhaben sind für den Antrag zum Rückbau einer kerntechnischer Anlage gemäß § 3 Abs. 2 des Weiteren „eine Übersicht über die wichtigsten, vom Antragsteller geprüften technischen Verfahrensalternativen, einschließlich der Angabe der wesentlichen Auswahlgründe [...]“ (§ 3 Abs. 2 Nr. 1 AtVfV) und „Hinweise auf Schwierigkeiten, die bei der Zusammenstellung der Angaben für die [...] [UVP]“ (§ 3 Abs. 2 Nr. 2 AtVfV) aufgetreten sind, einzureichen. Unterlagen, die Geschäfts- oder Betriebsgeheimnisse enthalten, müssen gemäß § 3 Abs. 3 AtVfV unter Kennzeichnung ebenfalls vorgelegt werden. Sofern die eingereichten Unterlagen für die Prüfung nicht ausreichen, muss der Antragsteller diese innerhalb einer angemessenen Frist ergänzen (§ 3 Abs. 5 AtVfV).

In § 19b AtVfV wird für die Genehmigung des Rückbaus oder des sicheren Einschlusses einer kerntechnischen Anlage spezifiziert, welche Unterlagen einzureichen sind. Hierbei müssen die geplanten Arbeiten des Rückbaus oder zur Herstellung und Aufrechterhaltung des sicheren Einschlusses beschrieben werden.

Nachdem die Antragsunterlagen bei der zuständigen Genehmigungsbehörde (oberste Landesbehörde), die gemäß § 24 Abs. 2 AtG für Genehmigungen von kerntechnischen Anlagen zuständig ist, eingereicht wurden, besteht nach § 6 AtVfV eine zweimonatige Auslegungspflicht für die Öffentlichkeit in der Nähe des Standorts des Vorhabens. Diese Auslegung ist nach §§ 4 und 5 AtVfV im amtlichen Veröffentlichungsblatt der Genehmigungsbehörde und außerdem in örtlichen Tageszeitungen im Bereich des Standortes der rückzubauenden Anlage öffentlich bekannt zu machen. Einwendungen der Öffentlichkeit sind nach den Regelungen in § 7 AtVfV zu behandeln. Darüber hinaus sehen §§ 8-13 AtVfV einen Erörterungstermin zur Erläuterung der Einwendungen gegen die Antragsunterlagen vor. Dieser Erörterungstermin ist nicht öffentlich, sodass außer dem Antragsteller und denjenigen, die rechtzeitig Einwendungen erhoben haben, nur auf Entscheidung des den Erörterungstermin leitende Vertreter der Genehmigungsbehörde (Verhandlungsleiter) geladene Gäste anwesend sein dürfen (§ 12 Abs. 1 AtVfV).

Anschließend werden die Antragsunterlagen einer Sachprüfung der Genehmigungsvoraussetzungen nach § 14 AtVfV unterzogen. Dazu werden gemäß § 20 AtG Sachverständige hinzugezogen. Die prüfende Behörde muss eine zusammenfassende Darstellung für die UVP nach § 14a AtVfV aufführen. Teilweise müssen für die Untersuchung der Antragsunterlagen weitere Landesbehörden, wie beispielsweise das Landesbauamt, einbezogen werden. Die Entscheidung über den Antrag wird gemäß § 15 AtVfV und unter Berücksichtigung von § 7 Abs. 2 AtG gefällt. Hierzu wird i.d.R. der vom BMUB veröffentlichte „Leitfaden zur Stilllegung, zum sicheren Einschluss und zum Abbau von Anlagen oder Anlagenteilen nach § 7 des

Atomgesetzes“ herangezogen, da dieser „[...] die bei Genehmigung und Aufsicht relevanten Aspekte [...]“ zusammenstellt (BMUB, 2009). Bei positiver Prüfung ist der Genehmigungsbescheid gemäß § 17 AtVfV öffentlich bekannt zu geben. Der Genehmigungsbescheid wird gegebenenfalls einer bundesaufsichtlichen Prüfung (Gesetz- und Zweckmäßigkeit) unterzogen. Diese Prüfung erfolgt unter der Beratung der BMUB-Beratungsgremien: Reaktor-Sicherheitskommission (RSK), Strahlenschutzkommission (SSK) und der Entsorgungskommission (ESK). Darüber hinaus erfolgt die Prüfung mit der Unterstützung weiterer Organisationen, wie der Gesellschaft für Reaktorsicherheit (GRS) sowie dem Bundesamt für Strahlenschutz (BfS).

Der Genehmigungsbescheid wird gemäß § 16 AtVfV mit Nebenbestimmungen, Begründungen, der Behandlung der Einwendungen und einer Rechtsbehelfsbelehrung erstellt.

Die Vielzahl und der Detaillierungsgrad der Antragsunterlagen zeigen, dass vor der Antragsstellung der Rückbau möglichst detailliert geplant werden muss. Je weniger Unterlagen nachgereicht werden müssen, desto schneller kann das Genehmigungsverfahren abgeschlossen werden. Da des Weiteren Genehmigungen zurückgenommen oder widerrufen werden können, wenn eine ihrer Voraussetzungen später weggefallen ist und nicht in angemessener Zeit Abhilfe geschaffen wird (§ 17 Abs. 2 AtG), sollte sich der Rückbau an den in der Rückbaugenehmigung genehmigten Abbautätigkeiten orientieren. Eine spätere Umplanung ist nur mit einer erneuten Genehmigung möglich. Um das Antrags- und Genehmigungsverfahren aufgrund von Abweichungen im Rückbau nicht erneut durchlaufen zu müssen, sollte die Planung des Weiteren möglichst plangetreu durchführbar sein⁶¹. Durch

⁶¹ Da die beim Rückbau strikte Einhaltung der genehmigten Rückbauarbeiten eine wesentliche Einschränkung und Herausforderung bei der Planung darstellt, wird an dieser Stelle darauf hingewiesen, dass auch in anderen Ländern der Rückbau nur möglich ist, wenn die Genehmigung strikt eingehalten wird. Ausdrücklich wird dies beispielsweise in Schmittem (2016, S. 12) bzgl. des Rückbaus kerntechnischer Anlagen in Japan beschrieben.

eine Vermeidung eines erneuten Genehmigungsverfahrens, welches zwischen vier und fünf Jahren dauert (DATf, 2013, S. 6ff.), können zeitliche Verzögerungen und Kostensteigerungen vermieden werden. Zusammenfassend ist somit die detaillierte Planung unter Unsicherheit eine wesentliche Voraussetzung, um Zeit und Kosten im Genehmigungsprozess einzusparen. Dies wird daher in dieser Arbeit näher betrachtet.

2.5.2.6 Finanzierung des Rückbaus und der Entsorgung

Die Frage der Finanzierung des Rückbaus von Anlagen zur Spaltung von Kernbrennstoffen zur gewerblichen Erzeugung von Elektrizität sowie der Entsorgung der beim Rückbau dieser Anlagen anfallenden Abfälle ist im „Gesetz zur Neuordnung der Verantwortung in der kerntechnischen Entsorgung⁶²“ geregelt. Hochrechnungen der anfallenden Kosten sind in Kapitel 2.6.4 aufgeführt. Strenggenommen stellt das genannte Gesetz ein Gesetzespaket dar, welches neben der Änderung bestehender Gesetze, wie beispielsweise dem Atomgesetz, aus vier Gesetzen besteht:

1. Gesetz zur Errichtung eines Fonds zur Finanzierung der kerntechnischen Entsorgung (Entsorgungsfondsgesetz – EntsorgFondsG)
2. Gesetz zur Regelung des Übergangs der Finanzierungs- und Handlungspflichten für die Entsorgung radioaktiver Abfälle der Betreiber von Kernkraftwerken (Entsorgungsübergangsgesetz)
3. Gesetz zur Transparenz über die Kosten der Stilllegung und des Rückbaus der Kernkraftwerke sowie der Verpackung radioaktiver Abfälle (Transparenzgesetz)
4. Gesetz zur Nachhaftung für Abbau- und Entsorgungskosten im Kernenergiebereich (Nachhaftungsgesetz)

⁶² Gesetz zur Neuordnung der Verantwortung in der kerntechnischen Entsorgung vom 27. Januar 2017, BGBl. 2017 Teil I, Nr. 5, S. 114.

In Artikel 1 ist das sogenannte Entsorgungsfondsgesetz (EntsorgFondsG)⁶³ implementiert. Dieses Gesetz setzt in § 1 fest, dass eine rechtsfähige Stiftung des öffentlichen Rechts in Form eines Fonds errichtet wird, welche die „[...] Finanzierung der Kosten für die sichere Entsorgung der entstandenen und zukünftig noch entstehenden radioaktiven Abfälle aus der gewerblichen Nutzung der Kernenergie zur Erzeugung von Elektrizität in Deutschland [...]“ (§ 1 Abs. 2 EntsorgFondsG) sichern soll. Gemäß § 2 Abs. 2 EntsorgFondsG beinhalten diese Kosten alle „[...] Kosten der Zwischenlagerung und der Endlagerung radioaktiver Abfälle sowie der damit zusammenhängenden Maßnahmen, die nach den Bestimmungen des Entsorgungsübergangsgesetzes, des Standortauswahlgesetzes, des Atomgesetzes und der aufgrund des Atomgesetzes erlassenen Rechtsverordnungen vom Fonds zu erstatten sind.“ (§ 2 Abs. 2 EntsorgFondsG) Einzahlende in den Fonds sind die Betreiber der jeweiligen Anlagen zur Spaltung von Kernbrennstoffen zur gewerblichen Erzeugung von Elektrizität (§ 2 Abs. 1 EntsorgFondsG). In Anhang 2 des EntsorgFondsG wird für die jeweiligen Anlagen der Einzahlungsbetrag aufgeführt. Hierbei muss je Anlage ein Grundbetrag in Barmitteln in den Fonds eingezahlt werden, der den abgezinsten zukünftigen Entsorgungskosten entspricht (§ 7 Abs. 2 Satz 1 EntsorgFondsG). Der einzuzahlende Betrag „[...] ist ab dem 1. Januar 2017 mit 4,58 Prozent pro Jahr zu verzinsen“ (§ 7 Abs. 2 Satz 2 EntsorgFondsG). Insgesamt müssen somit für die deutschen Anlagen 17,389 Milliarden Euro in den Fonds eingezahlt werden (Anhang 2 EntsorgFondsG). Sofern die Betreiber zusätzlich bis zum 31.12.2022 einen „[...] Risikoaufschlag nebst Zinsen in Höhe von 4,58 Prozent pro Jahr [...]“ (§ 7 Abs. 3 Satz 1 EntsorgFondsG) in Barmitteln in den Fonds einzahlen, „[...] endet die Verpflichtung des Einzahlenden zur Leistung von etwaigen Nachschüssen in den Fonds gemäß § 8 Absatz 2.“ (§ 7 Abs. 3 Satz 2

⁶³ Gesetz zur Errichtung eines Fonds zur Finanzierung der kerntechnischen Entsorgung (Entsorgungsfondsgesetz – EntsorgFondsG), Artikel 1 des Gesetzes zur Neuordnung der Verantwortung in der kerntechnischen Entsorgung.

EntsorgFondsG) Somit geht für diese Betreiber das Risiko für eventuelle Mehrkosten der Zwischen- und Endlagerung auf den Bund über (Bundesrat, 2016). Der Risikoaufschlag beträgt 35,47 % des Grundbetrags und beläuft sich für alle Anlagen auf 6,167 Milliarden Euro (Anhang 2 EntsorgFondsG).

Bis ein Endlager für radioaktive Abfälle errichtet ist, müssen diese Abfälle in einem Zwischenlager gelagert werden. Die Zwischenlager befinden sich in der Regel auf dem Gelände der rückzubauenden kerntechnischen Anlage und sind bisher von den Betreibern selbst gebaut und finanziert worden. Wie bereits beschrieben wurde, geht die Verantwortung sowie die Zuständigkeit zur Finanzierung der Zwischenlager gemäß § 2 Abs. 2 EntsorgFondsG in den Verantwortungsbereich des Bundes über. Diesbezüglich enthält Artikel 2 des Gesetzes zur Neuordnung der Verantwortung in der kerntechnischen Entsorgung das „Gesetz zur Regelung des Übergangs der Finanzierungs- und Handlungspflichten für die Entsorgung radioaktiver Abfälle der Betreiber von Kernkraftwerken“ (Entsorgungsübergangsgesetz)⁶⁴, welches wiederum in § 2 Abs. 1 die Zwischenlagerung regelt. Demzufolge kann die Wahrnehmung der Zwischenlagerung an einen Dritten weitergegeben werden, der in privatrechtlicher Rechtsform organisiert ist und dessen alleiniger Gesellschafter der Bund ist (§ 2 Abs. 1 Entsorgungsübergangsgesetz). In diesem Fall werden die Zwischenlager unentgeltlich vom Betreiber auf den Dritten übertragen (§ 3 Abs. 1 und Abs. 2 Entsorgungsübergangsgesetz).

Mit der fristgerechten Überweisung des Grundbetrages und des jeweiligen Risikoaufschlages zum 1. Juli 2017 haben alle Betreiber von Anlagen zur Spaltung von Kernbrennstoffen zur gewerblichen Erzeugung von

⁶⁴ Gesetz zur Regelung des Übergangs der Finanzierungs- und Handlungspflichten für die Entsorgung radioaktiver Abfälle der Betreiber von Kernkraftwerken (Entsorgungsübergangsgesetz), Artikel 2 des Gesetzes zur Neuordnung der Verantwortung in der kerntechnischen Entsorgung.

Elektrizität die finanzielle Verantwortung für die Zwischen- und Endlagerung radioaktiver Abfälle an den Bund übertragen. Somit müssen die Betreiber lediglich für die Kosten für die Stilllegung ihrer Anlagen sowie zum Verpacken radioaktiver Abfälle aufkommen. Um dies sicher zu stellen, wurden das sogenannte Transparenzgesetz⁶⁵ sowie das sogenannte Nachhaftungsgesetz⁶⁶ beschlossen.

Gemäß Artikel 7 des Gesetzes zur Neuordnung der Verantwortung in der kerntechnischen Entsorgung regelt das Transparenzgesetz, dass die Betreiber einer im Inland gelegenen Anlage zur Spaltung von Kernbrennstoffen zur gewerblichen Erzeugung von Elektrizität (Betreiber) dazu verpflichtet sind, dem Bundesamt für Wirtschaft und Ausfuhrkontrolle einmal jährlich eine detaillierte Aufstellung der in der Bilanz gebildeten Rückstellungen für die Stilllegung und den Abbau ihrer Anlagen sowie für die vorgesehene Verpackung radioaktiver Abfälle (Rückbauverpflichtungen) vorzunehmen. Das Nachhaftungsgesetz regelt darüber hinaus, dass die Finanzierung zum Verpacken radioaktiver Abfälle sowie für die Stilllegung der Anlagen auch bei einem Verkauf der Anlagen oder bei der Insolvenz der Betreiber sichergestellt ist. In solchen Fällen müssen jeweils die herrschenden Unternehmen haften.

Neben den Kosten für den Rückbau und die Zwischen- und Endlagerung fallen auch Kosten für die Genehmigungen an. Gemäß § 2 Punkt 2 AtKostV⁶⁷ betragen die Gebühren für eine Rückbaugenehmigung 500 bis eine Million Euro. Sofern mehrere Rückbauphasen oder Änderungen der

⁶⁵ Gesetz zur Transparenz über die Kosten der Stilllegung und des Rückbaus der Kernkraftwerke sowie der Verpackung radioaktiver Abfälle (Transparenzgesetz), Artikel 7 des Gesetzes zur Neuordnung der Verantwortung in der kerntechnischen Entsorgung.

⁶⁶ Gesetz zur Nachhaftung für Abbau- und Entsorgungskosten im Kernenergiebereich (Nachhaftungsgesetz), Artikel 8 des Gesetzes zur Neuordnung der Verantwortung in der kerntechnischen Entsorgung.

⁶⁷ Kostenverordnung zum Atomgesetz, kurz AtKostV, vom 26. Juli 2016, BGBl. I 2015, S. 1843.

Genehmigungen notwendig sind, erhöhen sich die Kosten für die Genehmigung.

Die Kosten für den Rückbau und die Entsorgung von Forschungsreaktoren sind mit Ausnahme des Versuchsatomkraftwerks Kahl (VAK) sowie des Mehrzweckforschungsreaktors Karlsruhe (MZFR) (die Kosten für VAK sind von der RWE AG und die Kosten für MZFR sind von der EnBW AG zu tragen) vom Bund zu tragen (§ 2 Abs. 1 Satz 2 EntsorgungsfondsG).

2.5.2.7 Weitere Regelungen

Wie in Abbildung 2.5 dargestellt ist, sind für den Rückbau weitere Regelungen von Bedeutung.

Als Vorsorge für die Erfüllung gesetzlicher Schadensersatzverpflichtungen schreibt das AtG vor, welche Deckungsvorsorge Betreiber kerntechnischer Anlagen vorhalten müssen. In der AtDeckV⁶⁸ werden die Deckungsvorsorgen zusätzlich zum AtG detaillierter festgelegt. § 12 AtDeckV ist eine stilllegungsspezifische Vorschrift, die besagt, dass sich die Regeldeckungssumme einer stillgelegten Anlage nach der in der Anlage noch vorhandenen Aktivität bestimmt. Die entsprechenden Regeldeckungssummen finden sich in Anlage 2 AtDeckV.

Personen, die im Umgang mit radioaktiven Stoffen oder bei der Beförderung von radioaktiven Stoffen tätig sind, müssen nach § 12b Abs. 1 Nr. 3 AtG auf ihre Zuverlässigkeit hin geprüft werden. Das allgemeine Vorgehen dieser Zuverlässigkeitsprüfung wird in §12 b AtG geregelt und in der Atomrechtlichen Zuverlässigkeitsüberprüfungs-Verordnung (AtZüV)⁶⁹

⁶⁸ Verordnung über die Deckungsvorsorge nach dem Atomgesetz (Atomrechtliche Deckungsvorsorge-Verordnung – AtDeckV) vom 1. April 2015, BGBl. I 2015, S. 434.

⁶⁹ Verordnung für die Überprüfung der Zuverlässigkeit zum Schutz gegen Entwendung oder Freisetzung radioaktiver Stoffe nach dem Atomgesetz (Atomrechtliche Zuverlässigkeitsüberprüfungs-Verordnung – AtZüV) vom 22.06.2010, BGBl. I 2010, S. 825.

konkretisiert. Da auch beim Rückbau einer kerntechnischen Anlage mit radioaktiven Stoffen umgegangen wird, gelten diese rechtlichen Regelungen ebenso für den Rückbau.

Gemäß § 9b Abs. 1 AtG bedarf die Errichtung, der Betrieb und die Stilllegung einer in § 9a Abs. 3 genannten Anlage sowie die wesentliche Veränderung solcher Anlagen einer Planfeststellung. In diesem Zusammenhang wird auf das Verwaltungsverfahrensgesetz⁷⁰ (VwVfG) verwiesen. Der Rückbau einer kerntechnischen Anlage ist ein Vorhaben, das „[...] nicht nur unwesentliche Auswirkungen auf die Belange einer größeren Zahl von Dritten haben [kann] [...]“ und daher nach § 25 Abs. 3 VwVfG einer frühen Öffentlichkeitsbeteiligung bedarf. Die Öffentlichkeitsbeteiligung sollte bereits vor der Stellung eines Antrags erfolgen, sodass die Öffentlichkeit die Möglichkeit hat, sich zu den geplanten Vorhaben zu äußern und ihre Bedenken zu erläutern (§ 25 Abs. 3 VwVfG). In diesem Zusammenhang räumt § 3 Umweltinformationsgesetz⁷¹ (UIG) jeder Person Zugang zu Umweltinformationen (vgl. § 2 UIG) beim Rückbau kerntechnischer Anlagen ein.

Der Geltungsbereich des BImSchG erstreckt sich zwar gemäß § 2 BImSchG nur auf die „Errichtung und den Betrieb von Anlagen“ und umfasst somit nicht den Rückbau. Auch § 8 Abs. 1. AtG stellt fest, dass die Vorschriften des BImSchG keine Anwendung finden, „soweit es sich um den Schutz vor den Gefahren der Kernenergie und der schädlichen Wirkung ionisierender Strahlung handelt.“ Trotzdem ist, wie bereits in Kapitel 2.5.2.5 beschrieben wurde, das Genehmigungsverfahren gemäß § 8 Abs. 2 AtG nach den Grundsätzen der §§ 8, 10 Abs. 1 bis 4, 6 bis 8, 10 Satz 2 und des § 18 BImSchG auszulegen. Dies ist vor allem im Hinblick auf Umweltauswirkungen, wie Luftverunreinigungen oder Geräusche relevant, die aufgrund konventioneller Arbeiten entstehen. Des Weiteren findet das BImSchG

⁷⁰ Verwaltungsverfahrensgesetz (VwVfG) vom 25. Juli 2013, BGBl. I 2013, S. 2749.

⁷¹ Umweltinformationsgesetz (UIG) vom 27. Oktober 2014, BGBl. I 2014, S. 1643.

beispielsweise bei der Genehmigung von Zwischenlagern auf dem Gelände der Anlage Anwendung.

Für viele Anwendungsbereiche auf dem Gebiet der Kerntechnik werden die Regeln des Kerntechnischen Ausschusses (KTA) berücksichtigt (sog. KTA-Regeln). Diese Regeln sind zwar nicht rechtlich bindend (BMUB, 2013), werden aber trotzdem in vielen Bereichen der Kerntechnik als verbindlich vorausgesetzt. Genauso verhält es sich mit dem bereits mehrfach zitierten „Leitfaden zur Stilllegung, zum sicheren Einschluss und zum Abbau von Anlagen oder Anlagenteilen nach § 7 des Atomgesetzes“, welcher ebenfalls nicht rechtsverbindlich ist, allerdings als Hilfestellung bei der Anwendung des gesetzlichen und untergesetzlichen Regelwerks für die Planung und Vorbereitung der Stilllegung sowie für Genehmigungen und Behörden dient.

Für die Genehmigung ist darüber hinaus unter Umständen eine wasserrechtliche Erlaubnis erforderlich.

Teilweise werden beim Rückbau neben den Zuständigkeitsbereichen des Bundes und der Länder auch Zuständigkeitsbereiche der Gemeinden und sonstiger Gebietskörperschaften berührt. Beispielsweise sind nach § 7 Abs. 4 AtG Behörden für Verkehr, Gewerbeaufsicht, Abfallwirtschaft, Sicherung (Polizei), Raumordnung, Verteidigung oder Berufsgenossenschaften zu beteiligen. Ebenso ist zum Bau eines Zwischenlagers am Standort einer rückzubauenden Anlage neben einem gesonderten Bescheid nach § 7 StrlSchV oder in den atomrechtlichen Genehmigungsbescheiden nach § 7 AtG zusätzlich eine Baugenehmigung notwendig.

Wie bereits erläutert wurde, ist der Bund gemäß § 9a Abs. 3 AtG für das Errichten eines Endlagers für radioaktive Abfälle zuständig. Die Standort-suche und das Errichten eines Endlagers werden im Standortauswahlgesetz

(StandAG)⁷² konkretisiert. Um die Kosten der Einlagerung an die Verursacher des radioaktiven Abfalls weiterzureichen, darf der Bund gemäß § 21 Abs. 1 Nr. 3 AtG Gebühren „für die staatliche Verwahrung von Kernbrennstoffen“ in Landessammelstellen und in Endlagerstätten erheben (§ 5 Abs. 1, Nr. 4 AtG). Im Einklang mit § 54 Abs. 1 S. 1 AtG erließ die Bundesregierung speziell hierzu 1982 die sogenannte Endlagervorausleistungsverordnung (EndlagerVIV)⁷³.

2.5.3 Verwertung und Entsorgung von Reststoffen

Beim Rückbau einer kerntechnischen Anlage ist es ein wesentliches Ziel, dass möglichst viele Stoffe in den Stoffkreislauf rückgeführt werden. Einige Stoffe können nach einer Messung direkt oder nach einer Behandlung in den Stoffkreislauf rückgeführt werden (vgl. u. a. Kapitel 2.4.2). Andere Stoffe können auch nach einer Behandlung nicht in den Stoffkreislauf rückgeführt werden. Im Folgenden werden die rechtlichen Bestimmungen zum Umgang mit Stoffen, die beim Rückbau einer kerntechnischen Anlage anfallen, beschrieben.

Im Umgang mit Stoffen, Anlagen- und Gebäudeteilen einer kerntechnischen Anlage wird zwischen der *Herausgabe* von Stoffen der Kategorie 1 (Stoffe, die nicht kontaminiert oder aktiviert wurden und nicht aus dem Kontrollbereich stammen) (BMUB, 2009, S. 14) und der *Freigabe* von Stoffen der Kategorie 2 (BMUB, 2009, S. 13) im Geltungsbereich des Atomrechts unterschieden. Unberührt von den Regelungen zur Heraus- oder der Freigabe sind verstrahlte Stoffe, die lediglich in eine andere kerntechnische

⁷² Gesetz zur Suche und Auswahl eines Standortes für ein Endlager für Wärme entwickelnde radioaktive Abfälle (Standortauswahlgesetz – StandAG) vom 31. August 2015, BGBl. I 2015, S. 1474.

⁷³ Verordnung über Vorausleistungen für die Einrichtung von Anlagen des Bundes zur Sicherstellung und zur Endlagerung radioaktiver Abfälle (Endlagervorausleistungsverordnung – EndlagerVIV) vom 6. Juli 2004, BGBl. I 2004, S. 1476.

Anlage überführt werden und dort alternativ als Brennstoffe oder Ersatzteile weiterhin ihrem Zweck dienen. Bei einer solchen schadlosen Verwertung (§ 9a Ab. 1 AtG) sind lediglich die für den Transport von Kernbrennstoffen notwendigen Vorgaben § 4 AtG sowie die für die Beförderung sonstiger radioaktiver Stoffe zuständigen Regelungen der §§ 16-18 StrlSchV zu beachten. Bei einer Stilllegung könnte dies für den Transport abgebauter Reaktorteile von abgeschalteten zu aktiven Kernkraftwerken der Fall sein, damit sie dort verbaut werden und ihrem ursprünglichen Zweck weiter dienen können. Somit verbleiben diese Teile im Geltungsbereich des Atomgesetzes und der strahlenschutztechnischen Überwachung.

Im Gegensatz zur Freigabe bezieht sich das Recht der Herausgabe auf die „[...] Entlassung von nicht kontaminierten und nicht aktivierten Stoffen sowie beweglichen Gegenständen, Gebäuden, Anlagen oder Anlagenteilen (in diesem Kapitel kurz „Stoffe“ genannt) aus der atomrechtlichen Überwachung [...], sofern die Stoffe nicht aus dem Kontrollbereich stammen.“ (BMUB, 2009, S. 14) Da der § 29 StrlSchV ausdrücklich nur aktivierte und kontaminierte Objekte als Reststoffe regelt (BMUB, 2009, S. 14), ist die Herausgabe von Reststoffen der Kategorie 1 ohne Umwege über den § 29 StrlSchV möglich und wird in der Praxis auch so gehandhabt. Im Rahmen der Genehmigungsunterlagen wird in der Regel gleichzeitig aufgezeigt, wie das Vorgehen bei der Herausgabe der Reststoffe ist (BMUB, 2009, S. 14). Einzig relevanter Punkt hierbei ist, dass der Antragsteller auf Grundlage der Anlagenhistorie, gepaart mit wiederholten Messungen, nachweisen kann, dass eine Kontamination oder Aktivierung des herauszugebenden Stoffes oder Objektes ausgeschlossen ist (BMUB, 2009, S. 14).

Des Weiteren können Stoffe, die nicht radioaktiv sind und aus dem genehmigungspflichtigen Umgang oder aus Bereichen stammen, in denen eine Kontamination oder Aktivierung auf Grund der Betriebshistorie nicht zu unterstellen ist, durch Kontrollmessungen aus dem Geltungsbereich des Atomgesetzes im Bereich der kerntechnischen Anlage herausgegeben werden. Hierbei dient die Kontrollmessung als Beweissicherung, „[...] dass die

herausgegebenen Stoffe nicht unter die Bestimmungen des § 29 StrlSchV fallen.“ (BMUB, 2010, S. 4096f.)

Alle Stoffe, die aus dem Kontroll- oder Überwachungsbereich⁷⁴ einer kerntechnischen Anlage stammen, werden als potentiell radioaktiv eingestuft. Aus diesem Grund dürfen diese Stoffe nicht ohne weitere Überprüfung den Kontroll- oder Überwachungsbereich verlassen. (Wittkamp, 2012, S. 84ff.) Der Inhaber einer Anlage darf „radioaktive Stoffe sowie bewegliche Gegenstände, Gebäude, Bodenflächen, Anlagen oder Anlagenteile, die aktiviert oder kontaminiert sind [...] als nicht radioaktive Stoffe nur verwenden, verwerten, beseitigen, innehaben oder an einen Dritten weitergeben, wenn die zuständige Behörde die Freigabe nach Absatz 2 erteilt hat“ (§ 29 Abs. 1 S. 1 StrlSchV). Gemäß § 29 StrlSchV ist es möglich, Anlagestrukturen, die nur in geringem Maße aktiviert oder kontaminiert sind, nach vorheriger Prüfung (und eventueller Dekontamination) freizugeben. Um die beim Rückbau anfallenden aktivierten oder kontaminierten Stoffe⁷⁵ aus der atom- oder strahlenschutzrechtlichen Überwachung entlassen zu können, ist nach § 29 StrlSchV eine Freigabe in Form eines Verwaltungsaktes notwendig.

Die Freigabe unterteilt sich in eine uneingeschränkte und eine eingeschränkte Freigabe (§ 29 Abs. 2 S. 2 Nr. 1 StrlSchV). Für beide Freigabeararten gilt, dass für einen Dritten eine effektive Jahresdosis von 10 µSv nicht überschritten werden darf (§ 29 Abs. 2 S. 1 StrlSchV). Darüber hinaus ist im Anhang der StrlSchV für verschiedene Stoffe, Bauschutt, Gebäude, etc. aufgeführt, welche Radionuklide in welchem Umfang für eine (uneingeschränkte) Freigabe enthalten sein dürfen. Wesentlich ist, dass die Voraussetzungen zum Erreichen der Freigabe „[...] nicht zielgerichtet durch

⁷⁴ Die Begriffe *Überwachungsbereich*, *Kontrollbereich* und *Sperrbereich* werden in Kapitel 2.5.2.3 definiert.

⁷⁵ Die Begriffe *Aktivierung* und *Kontamination* werden in Kapitel 2.2.1 näher erläutert.

Vermischen oder Verdünnen herbeigeführt, veranlasst oder ermöglicht werden“ dürfen (§ 29 Abs. 2 StrlSchV).

Bei der Erteilung einer *uneingeschränkten Freigabe*, darf der Antragsteller mit den der Freigabe unterliegenden Stoffen unbegrenzt im Sinne § 29 Abs. 1, S. 1 StrlSchV verfahren (Anlage 4 Teil B S. 1 StrlSchV). Bei der uneingeschränkten Freigabe handelt es sich um eine sogenannte juristische Fiktion. Auf diese Weise ist es möglich, dass „freigegebene Stoffe bzw. Gegenstände etc. trotz ihrer tatsächlich vorhandenen Radioaktivität nicht mehr als radioaktive Stoffe gelten bzw. nicht mehr radioaktiv kontaminiert sind“ (Schattke, 2002, S. 30).

Im Gegensatz zur uneingeschränkten Freigabe ermöglicht es die *beschränkte (oder eingeschränkte) Freigabe*, Reststoffe schneller, d. h. mit geringeren Anforderungen an die Freigabegrenze, freizugeben, wenn mit diesen speziell verfahren wird (Fachverband für Strahlenschutz, 2005, S. 11). Dazu müssen feste Stoffe entweder auf einer Deponie beseitigt oder verbrannt werden. Gebäude müssen abgerissen und Metallschrott muss recycelt werden. Zusätzlich zu den Freigabewerten darf kein Zweifel an der Zuverlässigkeit der Entsorgung, des Transportes, als auch an der Beseitigungsart und des -ortes existieren. Des Weiteren muss „[...] eine Erklärung des Antragstellers über den Verbleib des künftigen Abfalls und eine Annahmeerklärung des Betreibers der Verwertungs- und Beseitigungsanlage oder eine anderweitige Vereinbarung zwischen dem Antragsteller und dem Betreiber der Verwertungs- und Beseitigungsanlage [...]“ vorliegen. (§ 29 Abs. 5, S. 2 StrlSchV) Da nach der Freigabe die Vorschriften des Abfallrechts greifen, muss eine Kopie der Annahmeerklärung auch an die nach dem Kreislaufwirtschaftsgesetz zuständige Behörde versandt werden.

Wenn eine Entlassung aus der atomrechtlichen Überwachung nicht durch eine eingeschränkte oder uneingeschränkte Freigabe möglich ist, dann sind die radioaktiven Abfälle gemäß § 76 StrlSchV „[...] an eine Anlage des Bundes zur Sicherstellung und zur Endlagerung radioaktiver Abfälle

abzuliefern [...]“ (§ 76 Abs. 1 StrlSchV). Die Klassifikation und der Umgang mit diesen Abfällen ist in Kapitel 2.3.3 detailliert beschrieben.

Wie beschrieben wurde, ist für alle Anlagenteile oder Stoffe eine *Freigabe* gemäß § 29 StrlSchV nur möglich, wenn die Unterschreitung des zulässigen Grenzwertes (effektive Jahresdosis von 10 μ Sv) durch eine Messung bestätigt wird. Dieser Vorgang wird auch als *freimessen* bezeichnet. Zur Freimesung werden im „Leitfaden zur Stilllegung, zum sicheren Einschluss und zum Abbau von Anlagen oder Anlagenteile nach § 7 des Atomgesetzes“ drei Verfahren vorgeschlagen (BMUB, 2009):

1. Gamma-Spektrometrie
2. Beta-Oberflächenmessung
3. Gesamt-Gamma-Messung

Bei der Durchführung dieser Verfahren ist gemäß der DIN-Norm 25457 Teil 1-2 sowie 4-7 vorzugehen. Grundsätzlich verläuft die *Freigabe* bei kerntechnischen Anlagen in mehreren Schritten (Fachverband für Strahlenschutz, 2005):

1. Voruntersuchung auf Aktivität im freizugebenden Material:
Hierbei wird mit Hilfe von Messungen, Probenahmen und der Betriebshistorie insbesondere die Art und Höhe der Aktivität bestimmt. Auf Basis dieser Informationen wird der benötigte Vorbehandlungsaufwand bestimmt sowie der Entsorgungsweg festgelegt.
2. Vorbehandlung: Es werden verschiedene Dekontaminationsmaßnahmen durchgeführt (vgl. Kapitel 2.4.2), um die Aktivität unter den zulässigen Grenzwert zu senken.

3. Orientierungsmessung: Die Orientierungsmessung soll in Verbindung mit der Entscheidungsmessung den Nachweis ermöglichen, dass die Randbedingungen für die Unterschreitung der vorgegebenen Freigabewerte mit hinreichender Sicherheit nachgewiesen werden können.
4. Entscheidungsmessung: Für die Freigabe ist die Einhaltung der vorgegebenen massen- und oberflächenspezifischen Freigabewerte der StrlSchV mittels geeigneter Messverfahren⁷⁶ nachzuweisen.
5. Kontrollmessung: Im Rahmen der Qualitätssicherung des Antragstellers werden Kontrollmessungen in der Regel durch externe Sachverständige im Auftrag der Aufsichtsbehörde durchgeführt.
6. Zusammenstellung der Dokumentation: Die Ergebnisse werden zusammengefasst.
7. Freigabe: Die Freigabe wird von der zuständigen Behörde erteilt, wenn die Unterschreitung der Freigabewerte nachgewiesen ist.

Sofern bei einer der Messungen festgestellt wird, dass der vorgeschriebene Grenzwert von 10 μSv effektiver Jahresdosis noch nicht unterschritten ist, sind erneute Dekontaminationsmaßnahmen notwendig, wenn das Ziel der Freigabe weiterhin verfolgt wird. Nach diesem Vorgehen ist es möglich, dass die Dekontaminationsmaßnahmen mehrfach auszuführen sind.

Sofern die Freimessung erfolgreich durchgeführt worden ist, können die freigemessenen Anlagenteile oder Stoffe aus der atomrechtlichen Überwachung gemäß § 7 Abs. 1 AtG *entlassen* werden. Dazu ist ein

⁷⁶ Geeignete Messverfahren zur Freigabe sind u.a. in Ministerium für Umwelt, Klima und Energiewirtschaft Baden-Württemberg (2007) zu finden.

Freigabeverfahren durchzuführen, welches in § 29 StrISchV detailliert beschrieben ist.

Das Vorgehen der Freimessung und Freigabe sowie der Entlassung und Herausgabe ist von den Aktivitäten der radiologischen Charakterisierung zu unterscheiden. Während bei den erstgenannten und oben beschriebenen Vorgehensweisen eine Entlassung aus der atomrechtlichen Überwachung angestrebt wird, wird bei der radiologischen Charakterisierung lediglich der Zustand „[...] einer Anlage insgesamt oder von Anlagenteilen hinsichtlich Kontamination, Aktivierung und Dosisleistung verstanden.“ (BMUB, 2010)

Da die herausgegebenen und freigegebenen Stoffe nicht mehr der atomrechtlichen Überwachung unterliegen, gehen diese in den Geltungsbereich des Kreislaufwirtschaftsgesetzes⁷⁷ (KrWG) über. Der „Zweck des Gesetzes ist es, die Kreislaufwirtschaft zur Schonung der natürlichen Ressourcen zu fördern und den Schutz von Mensch und Umwelt bei der Erzeugung und Bewirtschaftung von Abfällen sicherzustellen.“ (§ 1 KrWG) Zur Vermeidung und Abfallbewirtschaftung gibt § 6 Abs. 1 KrWG folgende Abfallhierarchie vor:

1. Vermeidung,
2. Vorbereitung zur Wiederverwendung,
3. Recycling,
4. sonstige Verwertung, insbesondere energetische Verwertung und Verfüllung,
5. Beseitigung.

⁷⁷ Gesetz zur Förderung der Kreislaufwirtschaft und Sicherung der umweltverträglichen Bewirtschaftung von Abfällen (Kreislaufwirtschaftsgesetz – KrWG), vom 24. Februar 2012, BGBl. I, S. 212.

Nach der Freigabe von Stoffen und dem Übergang in den Geltungsbereich des Kreislaufwirtschaftsgesetzes ist eine Vermeidung (Stufe 1) nicht möglich. Sofern Abfälle anfallen, soll zunächst versucht werden, diese für denselben Zweck wiederzuverwenden, für den sie ursprünglich bestimmt waren (Stufe 2). Wenn eine Wiederverwertung nicht möglich ist, sollen Abfälle im Rahmen des Recyclings so verwertet werden, dass diese zu Erzeugnissen, Materialien oder Stoffen entweder für den ursprünglichen Zweck oder für andere Zwecke aufbereitet werden (Stufe 3). Ist auch ein Recycling der Abfälle nicht möglich, können diese entweder energetisch verwertet oder zur Verfüllung verwendet werden (Stufe 4). Beim Rückbau kerntechnischer Anlagen wird beispielsweise Bauschutt der Anlagenhülle (Betonstrukturen) zerkleinert und zur Erzeugung von Asphalt verwendet. Die Beseitigung stellt die letzte Möglichkeit des Umgangs mit Abfällen dar (Stufe 5) und wird in Abschnitt 3 KrWG genauer geregelt.

2.6 Der Rückbau kerntechnischer Anlagen als Projekt

In der DIN-Norm 69901-5:2009 wird ein Projekt definiert als ein „Vorhaben, das im Wesentlichen durch Einmaligkeit der Bedingungen in ihrer Gesamtheit gekennzeichnet ist, z. B. Zielvorgabe, zeitliche, finanzielle, personelle oder andere Begrenzungen, projektspezifische Organisation.“ (DIN 69901-5:2009, S. 11) Auch die internationale Norm ISO 21500:2012 stellt die Einmaligkeit von Prozessen, die aus koordinierten und kontrollierten Vorgängen bestehen, zur Erreichung eines Projektziels heraus (ISO 21500:2012, 2012, S. 3). Einige Autoren charakterisieren Projekte darüber hinaus als Sonderaufgaben, die insbesondere aufgrund ihres breiten Kompetenzbedarfs aus der Primärorganisation ausgelagert werden müssen, um individuell bearbeitet zu werden (Mayer et al., 2008, S. 1f.; Reiß, 1995, S. 449). Neben dem breiten Kompetenzbedarf werden in der Literatur weitere Projektmerkmale aufgeführt, wie die zeitliche Befristung,

die Komplexität sowie die relative Neuartigkeit, Einzigartigkeit und der individuelle Charakter der Projektaufgaben, die durch den Einsatz von Verbrauchsgütern, Nutzungsgütern und Arbeitskräften eine bestimmte Zielsetzung verfolgen (Drexl et al., 1997; Frese et al., 2012, S. 489; Ó Conchúir, 2012, S. 4; Salas-Morera et al., 2013; Saynisch et al., 1979, S. 33, 198; Schwarze, 2006). Ó Conchúir (2012) spezifiziert die in einem Projekt verfolgte Zielsetzung dadurch, dass ein Projekt ein in der Regel einzigartiges Ergebnis liefert, wie beispielsweise ein Produkt oder einen Service, welches auch als *Project Product* bezeichnet wird (Ó Conchúir, 2012, S. 4; PMI, 2014, S. 3). Projekte sind aufgrund ihrer Einzigartigkeit nicht oder nur selten wiederholbar, sodass jedes Projekt individuell geplant und durchgeführt werden muss (Ó Conchúir, 2012, S. 20; Schwarze, 2006).

Der Bau sowie der Rückbau von Gebäuden und Anlagen weisen die Merkmale eines Projekts auf und werden daher als solches organisiert. Im Gegensatz zu industriellen Herstellungsprozessen von Massenprodukten sind Gebäude und Anlagen durch ihre Immobilität, Heterogenität und Einzigartigkeit charakterisiert. Der Bau und Rückbau von Gebäuden und Anlagen wird in einer beschränkten Zeit, an unterschiedlichen Orten, mit unterschiedlichen Stakeholdern, mit unterschiedlichen Einschränkungen und unterschiedlichen Ressourcen, wie beispielsweise Maschinen, ausgeführt (Frese et al., 2012; ISO 21500:2012; Saynisch et al., 1979, S. 42f.). National und international unterscheiden sich die existierenden und in Zukunft rückzubauenden kerntechnischen Anlagen hinsichtlich ihres Typs, ihres Baujahrs und ihrer Leistung (IAEA, 2018a). Diese Faktoren sind wesentliche Unterscheidungsmerkmale, die einen großen Einfluss auf die Rückbauarbeiten nehmen. Insbesondere der sehr lange Zeitraum des Rückbaus kerntechnischer Anlagen, mit sehr vielen Projektbeteiligten, hohen Sicherheitsanforderungen und hohen Kosten machen solche Großprojekte sehr komplex.

Das Ziel beim Rückbau kerntechnischer Anlagen besteht darin, dass die Anlage nach ihrer (teilweisen) Beseitigung entfernt ist, somit nicht mehr

überwacht werden muss und die Fläche wieder zur Verfügung steht. Um ein Projekt mit einem möglichst großen Nutzen abschließen zu können, muss das Projekt professionell durch seine Lebenszyklusphasen geführt und an die aktuellen Gegebenheiten kontinuierlich angepasst werden. Der Lenkprozess eines Projektes durch seine Lebensphasen und die notwendigen Maßnahmen, um ein Projekt zu steuern, werden als managen oder auch als Projektmanagement bezeichnet (Drexel et al., 1997; ISO 21500:2012, S. 4; Munns und Bjeirmi, 1996). Das Management von Projekten wird in DIN 69901-5:2009 als die „Gesamtheit von Führungsaufgaben, -organisation, -techniken und -mitteln für die Initiierung, Definition, Planung, Steuerung und den Abschluss von Projekten“ definiert (DIN 69901-5:2009, S. 14). Roth und Dineiro (2008) weisen darauf hin, dass zwischen dem Projektmanagementenerfolg und dem Projekterfolg zu unterscheiden sei. Während der Projektmanagementenerfolg in der Regel die Erreichung von inhaltlichen und terminlichen Zielen sowie von Budget- und Qualitätszielen umfasst, sind für den Projekterfolg darüber hinaus die Akzeptanz, die Wirtschaftlichkeit und der Nutzen eines Projekts von Bedeutung, sofern diese nicht Inhalt und Aufgabe des Projektmanagements sind (Roth und Dineiro, 2008, S. 17f.). Diese Definition des Projektmanagementenerfolgs ähnelt somit sehr der oben aufgeführten Definition des Projekterfolgs der ISO 21500:2012.

Um das Projekt- und das Projektmanagementziel zu erreichen, sind gemäß der DIN 69901-5:2009 die Phasen Initiierung, Definition, Planung, Steuerung und Projektabschluss zu durchlaufen. In ähnlicher Weise definiert die ISO 21500:2012 die Phasen (dort als Projektmanagementgruppen bezeichnet) Initiierung, Planung, Umsetzung, Controlling und Abschluss. Da die Phasen aufeinander aufbauen, sollten diese jeweils gewissenhaft bearbeitet werden, um ein Projekt erfolgreich durchzuführen. Aufgrund der notwendigen Genehmigungen beim kerntechnischen Rückbau (vgl. Kapitel 2.5.2.5) ist die Planung eine besonders herausfordernde Aufgabe, die in dieser Arbeit detaillierter untersucht und methodisch erweitert wird.

Erläuterungen zu allen Projektphasen sind u. a. in der ISO 21500:2012 sowie in Schwindt und Zimmermann (2015a) zu finden. Im Folgenden wird der Fokus dieser Arbeit im Rahmen der Projektplanung (Kapitel 2.6.1), auf operativer Planungsebene (Kapitel 2.6.2) und in Bezug auf die Berücksichtigung von Unsicherheiten (Kapitel 2.6.5) dargelegt. Wie in Kapitel 2.6.3 beschrieben ist, ist es das Ziel bei der Identifikation eines Rückbauplans auf operativer Ebene diesen mit minimalen Kosten auszuführen. Die Kosten sowie die Finanzierung des kerntechnischen Rückbaus werden in Kapitel 2.6.4 beschrieben. Unter den Kriterien der Planung und der Zielsetzung der Minimierung der Kosten während des Rückbaus wird existierende Software auf ihre Eignung für den Anwendungsfall dieser Arbeit in Kapitel 2.6.6 untersucht.

2.6.1 Fokus der Projektplanung dieser Arbeit

Die Planung kann verschiedene Themenbereiche (auch Themengebiete genannt) umfassen (ISO 21500:2012, S. 5). Nach der Festlegung des Leistungsumfanges sind für ein Projekt neben der Planung der Kommunikation insbesondere die Ablauf- und Termin-, die Kosten-, die Ressourcen- und die Beschaffungsplanung von zentraler Bedeutung. Die Planung des Risikomanagements spielt ebenfalls eine wichtige Rolle, da dieses Einfluss auf die genannten Themengebiete nimmt. Die Planung der genannten Themengebiete kann nicht unabhängig voneinander durchgeführt werden. Aufgrund des gegenseitigen Einflusses muss vielmehr eine integrierte Planung erfolgen. Beispielsweise beeinflusst die Anzahl eingesetzter Ressourcen die Dauer und die Kosten eines Projekts. Je mehr Ressourcen eingesetzt werden, desto schneller können Arbeiten ausgeführt werden. Andererseits steigen die Kosten mit der Anzahl an genutzten Ressourcen. Im Folgenden stehen die Termin- und Ablauf-, Ressourcen- und Kostenplanung sowie die Planung des Risikomanagements im Fokus dieser Arbeit und werden integriert berücksichtigt (vgl. Abbildung 2.7). Im Rahmen dieser Arbeit wird der Scope als gegeben angenommen, indem der

Endzustand und die im Rahmen des Rückbaus zu berücksichtigenden Vorgänge vorgegeben sind. Insbesondere die auszuführenden Vorgänge sind Inputparameter für das in dieser Arbeit entwickelte Planungswerkzeug. Während der Planung werden die Qualitätsvorgaben (hierbei insbesondere die Sicherheitsvorgaben) als Nebenbedingungen stets berücksichtigt. Aus der in dieser Arbeit durchgeführten Termin- und Ablauf-, Ressourcen- und Kostenplanung sowie der Planung des Risikomanagements können die Beschaffungs- sowie die Kommunikationsplanung abgeleitet werden.

Ein Projekt kann auf unterschiedlichen Detaillierungsebenen geplant werden. Grundsätzlich werden auf der Ebene der langfristigen (strategischen) Planung Konzepte und strategische Ziele für das Gesamtprojekt festgelegt. Des Weiteren wird eine grobe Planung des Gesamtprojekts vorgenommen. In der mittelfristigen (taktischen) Planung wird versucht, die Vorgaben der strategischen Planung einzuhalten, um beispielsweise eine gleichmäßige Auslastung (Nivellierung) aggregierter Betriebsmittel, wie Mitarbeiter- oder Maschinenpools, zu erhalten. Dabei wird die strategische Planung detaillierter geplant. In der kurzfristigen (operativen) Planung sollen die Vorgaben der taktischen Planung möglichst genau eingehalten werden, sodass beispielsweise möglichst keine Termin- oder Kostenüberschreitungen entstehen. Die operative Planung beinhaltet eine detaillierte Planung einzelner Vorgänge, die zur Ausführung benötigten Ressourcen und die dabei anfallenden Kosten. Ziel der operativen Planung ist es, einen Ablaufplan zu erstellen, in dem genau aufgelistet ist, welcher Vorgang zu welchem Zeitpunkt startet und welche Ressourcen der jeweilige Vorgang benötigt, wobei gleichzeitig das vorgegebene Zielkriterium, wie beispielsweise die Minimierung der Projektdauer oder der Projektkosten, optimiert wird. In diesem Zusammenhang ist insbesondere die Einhaltung der zur Verfügung stehenden Ressourcenkapazität zu beachten. (Steven, 2008, S. 279ff.; Zimmermann et al., 2006, S. 37; Zimmermann, 2001, S. 2)

Die Planung jeder Detaillierungsebene bietet verschiedene Vor- und Nachteile. Allgemein ist die Planung, Steuerung und Kontrolle eines Projekts auf einer aggregierten (strategischen) Ebene weniger aufwändig. Es sollte aber auch darauf geachtet werden, dass die Planung nicht zu grob ist, da sonst wichtige Aspekte der Planung nicht abgebildet werden können. Um sowohl einen Gesamtüberblick über ein zu planendes Projekt zu erhalten und gleichzeitig eine detaillierte Planung mit allen wichtigen Aspekten zu erhalten, wird häufig eine sogenannte rollierende Planung ausgeführt. Hierbei wird zunächst das Gesamtprojekt aggregiert auf strategischer Ebene geplant und für jedes Teilprojekt oder jedes Arbeitspaket wird jeweils zeitnah vor dessen Ausführung eine Detailplanung auf operativer Ebene durchgeführt. (Zimmermann et al., 2006)

Da der Rückbau einer kerntechnischen Anlage ein großes und komplexes Projekt darstellt, wird für diesen Anwendungsfall ebenfalls eine Planung auf verschiedenen Detaillierungsebenen und unterschiedlichen betrachteten Zeithorizonten durchgeführt. Theoretisch würde sich eine rollierende Planung anbieten, allerdings ist aufgrund der genehmigungsrechtlichen Vorgaben (vgl. Kapitel 2.5.2.5) eine hinreichend detaillierte Planung des gesamten Rückbaus bzw. gesamter Rückbauphasen notwendig. Daher kommt es zu einer Vermischung der strategischen und operativen Planung, da eine operative Planung für das Gesamtprojekt oder Teilprojekte (Rückbauphasen) durchgeführt wird. Der Fokus dieser Arbeit liegt somit auf der operativen Termin- und Ablauf-, Ressourcen- und Kostenplanung sowie der Planung des Risikomanagements (vgl. Abbildung 2.7). Auf die operative Planung in Rückbauprojekten wird in Kapitel 2.6.2 detailliert eingegangen.

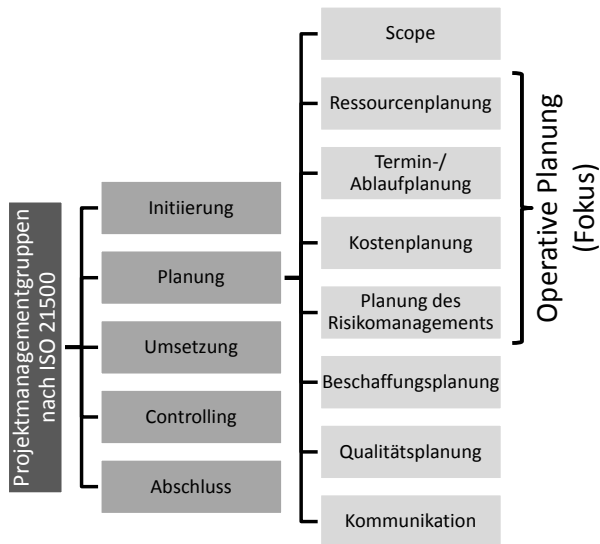


Abbildung 2.7: Fokus der Arbeit

Im Folgenden wird näher auf die Verflechtung der strategischen und operativen Planung beim Rückbau kerntechnischer Anlagen eingegangen. Wie in Abbildung 2.8 ersichtlich ist, muss zunächst die strategische Entscheidung des Stilllegungskonzepts getroffen werden. Hierbei werden „[...] wesentliche Maßnahmen zur Stilllegung, insbesondere auch zum Abbau einer Anlage und zur Entsorgung der Abfälle [...]“ (BMUB, 2010) festgelegt. Dies umfasst beispielsweise die Entscheidung, ob eine Anlage direkt rückgebaut oder in den sicheren Einschuss überführt wird. Des Weiteren wird eine grobe Reihenfolge des Rückbaus bestimmt. Unter Berücksichtigung dieser strategischen Vorgaben wird im Anschluss die Stilllegungsplanung angeschlossen, welche die im Stilllegungskonzept beschriebenen Maßnahmen soweit konkretisiert, „[...] wie dies zur Durchführung von Stilllegung und Abbau erforderlich ist.“ (BMUB, 2010) Somit umfasst die Stilllegungsplanung eine detaillierte Planung auf operativer

Ebene, welche den Abbau sowie die Entsorgung umfasst, welche wiederum zunächst strategisch (Abbau- bzw- Entsorgungskonzept) und anschließend detailliert und operativ geplant werden (Abbau- bzw. Entsorgungsplanung) (BMUB, 2010).

Im Rahmen dieser Arbeit wird ein Planungswerkzeug zur Erstellung einer Durchführungsplanung auf operativer Ebene erstellt. Aus diesem Grund wird das Stilllegungskonzept als gegeben angenommen und entsprechende Annahmen werden im Planungswerkzeug getroffen. Der Fokus dieser Arbeit liegt auf der Abbauplanung, welche als Ablaufplan der einzelnen Vorgänge dargestellt wird. Stoffströme werden, wie in Kapitel 2.6.2 detaillierter erläutert wird, in dieser Arbeit nicht direkt berücksichtigt und können lediglich aus dem Ergebnis der Abbauplanung abgeleitet werden. Die Entsorgungsplanung wird in dieser Arbeit nicht untersucht.

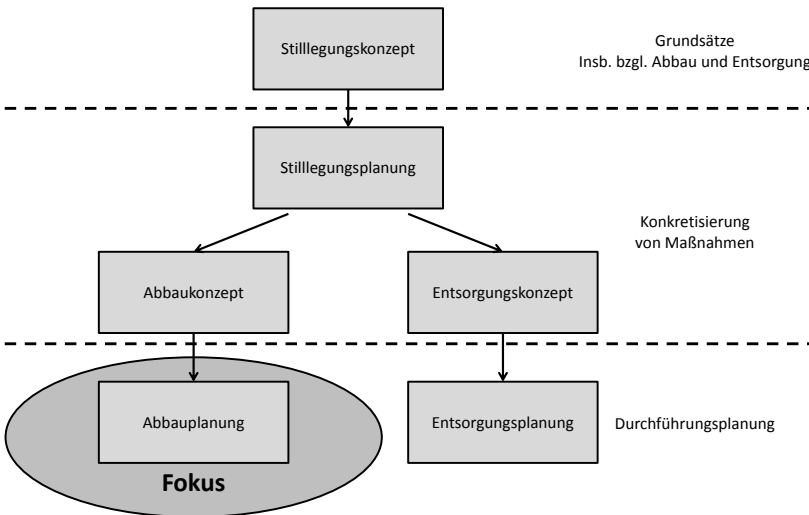


Abbildung 2.8: Planungsaufgaben beim Rückbau kerntechnischer Anlagen (Quelle: BMUB, 2010)

Zur Durchführung der Abbauplanung mit einer integrierten Termin- und Ablauf-, Ressourcen- und Kostenplanung sowie der Planung des Risikomanagements auf operativer Ebene ist die Angabe durchzuführender Vorgänge notwendig. Nach DIN 69901-5:2009 ist ein Vorgang ein Element, welches ein bestimmtes Geschehen mit festgelegtem Anfang und Ende beschreibt und somit eine bestimmte Ausführungsdauer besitzt. Bei Vorgängen handelt es sich in den meisten Fällen um Arbeitsgänge wie Transporte, Beschaffungsvorgänge oder Fertigungsschritte. Für die Projektplanung sind insbesondere Angaben zu den Vorgangsbeziehungen (auch als Zeitbeziehungen bezeichnet) zwischen den Vorgängen notwendig. Hierbei sollten lediglich zwingend erforderliche Reihenfolgebeziehungen angegeben werden, die unter anderem aufgrund logischer oder technischer Bedingungen bestehen. Die letztendliche Anordnung der Vorgänge zur Ausführung wird erst durch die detaillierte Planung festgelegt. Um eine Projektplanung ausführen zu können, sind weitere Informationen über die einzelnen Vorgänge notwendig. Von besonderer Bedeutung sind die Dauern der einzelnen Vorgänge, die benötigten Ressourcen und anfallende Kosten. Mit Hilfe der genannten Informationen kann unter der Berücksichtigung der Vorgangsbeziehungen und unter der Berücksichtigung von weiteren relevanten Bedingungen, die je Projekt unterschiedlich sein können, z. B. gesetzliche Vorgaben, im Rahmen der Termin- und Ablaufplanung eine zulässige Reihenfolge der Projektausführung identifiziert werden. (Altrogge, 1996; Badiru, 2012; Brandenberger und Ruosch, 1993; Corsten et al, 2008; Drews et al., 2014; DIN 69901:2009; Gido und Clements, 2014; ISO 21500:2012; Kerzner, 2013; PMI, 2013; Schwarze, 2006; Zimmermann et al., 2006)

Das Ergebnis der Ablaufplanung kann grafisch als Digraph, beispielsweise in einem sogenannten Ereignisknotennetzplan, dargestellt werden. Die grafische Darstellung beruht auf der sogenannten Netzplantechnik, auf die in Kapitel 3.5 näher eingegangen wird. Bei dieser Technik gehören neben Vorgängen auch Ereignisse und Anordnungsbeziehungen zur Grundstruktur

jedes Projekts (Schwarze, 2006; Zimmermann et al., 2006). Als Ereignisse werden Zeitpunkte beschrieben, an denen mindestens ein Vorgang endet und mindestens ein Vorgang beginnt (Nicolai, 1979; Zimmermann et al., 2006). Somit stellen Ereignisse das Eintreten eines definierten Projektzustands dar (Schwarze, 2006; Zimmermann et al., 2006). Der Ablauf eines Projekts ergibt sich schließlich aus der Reihenfolge der Vorgänge und Ereignisse.

Wie oben beschrieben wurde, sollte neben der Termin- und Ablaufplanung gleichzeitig die Kostenplanung durchgeführt werden (Saynisch et al., 1979, S. 79). Diese enthält die Kosten, die unter anderem durch die in der Ablaufplanung geplanten Vorgänge verursacht werden. In der Kostenplanung werden Kosten für Forschung und Entwicklung, für neue Ressourcen, Investitionen und Kosten für die Durchführung einzelner Vorgänge berücksichtigt. (Saynisch et al., 1979, S. 186f.; Zimmermann et al., 2006).

Die Termin- und Ablauf- sowie die Kostenplanung werden jeweils von der Ressourcenplanung und der Planung des Risikomanagements beeinflusst. Aus diesem Grund werden insbesondere die Abhängigkeiten der Termin- und Ablauf- sowie der Kostenplanung von der Ressourcenplanung in Kapitel 2.6.3 und der Umgang mit Risiken in der Planung in Kapitel 2.6.5 detailliert beschrieben.

2.6.2 Operative Planung in Rückbauprojekten

Die Rückbauplanung erfolgt in der Regel in mehreren Schritten. Den ersten Schritt in der Planung eines Rückbauprojekts bildet die Auditierung und Massenbilanzierung des betreffenden Bauwerks⁷⁸ (Schultmann und Rentz, 2002) mit dem Ziel, die darin verwendeten Materialien zu identifizieren

⁷⁸ Die zitierten Autoren beziehen ihre Beschreibungen der Rückbauplanung auf Bauwerke, wie (Nicht-)Wohngebäude. Dieses Vorgehen kann allerdings auch auf den Rückbau kerntechnischer Anlagen übertragen werden.

und eine detaillierte Beschreibung des Gebäudes zu erhalten (Schultmann und Rentz, 2000). Im Rahmen dieser Planungsphase wird eine Inventarliste sämtlicher Bauteile im eingebauten Zustand erstellt (Schultmann, 1998), um die Unwägbarkeiten bei der späteren Demontage zu reduzieren und mögliche Verunreinigungsquellen und Kontaminationen frühzeitig zu erkennen (Schultmann und Rentz, 2000). Hierfür eignen sich Gebäudepläne sowie Beschreibungen des Bauwerks und seiner Geschichte (Schultmann und Rentz 2002) oder eine Begehung sowie Expertenwissen über das Bauwerk. Beim Rückbau kerntechnischer Anlagen wird hierzu zusätzlich eine radiologische Charakterisierung durchgeführt, um den Zustand der Anlage insgesamt oder von Anlagenteilen hinsichtlich Kontamination, Aktivierung und Dosisleistung zu bestimmen (BMUB, 2010).

Das Ergebnis der Auditierung und Massenbilanzierung ist die sogenannte Gebäudestückliste, aus der sich die Bauelemente mit ihren Eigenschaften, wie beispielsweise Maße und Massen, ablesen lassen (Rentz et al., 1994).

An die Ermittlung der Bausubstanz schließt sich in einem zweiten Schritt die Demontageplanung an, in der die durchzuführenden Rückbaumaßnahmen, die Reihenfolge ihrer Ausführung, ihre Ausführungszeitpunkte, die dazu notwendigen Ressourcen und die dabei entstehenden Kosten festgelegt bzw. ermittelt werden. Wichtige Bestandteile der Demontageplanung sind neben der Zeit- und Ressourcen- sowie der Kostenplanung vor allem die Planung der Demontagestruktur und der Demontagereihenfolge (Schultmann, 1998).

In manchen Rückbauprojekten werden im Rahmen der Demontagestrukturplanung mehrere Positionen der Gebäudestückliste zu Demontagegruppen zusammengefasst (Schultmann, 1998). Rentz et al. (1994) definieren eine Demontagegruppe als eine „Gruppierung bestimmter, im Zuge von Demontearbeiten logisch zusammengehörender Bauteile bzw. Bauelemente zu einer für die Planung und Analyse der Demontage sinnvollen Einheit“. Art und Anzahl der Demontagegruppen sind abhängig

vom Gebäudetyp, der Demontagestrategie, dem gewünschten Ergebnis der Demontage (z. B. hinsichtlich der Recyclingquote) sowie den verfügbaren Demontage-techniken (Schultmann, 1998). Für jede dieser Demontagegruppen lässt sich in den anschließenden Schritten der Personal-, Arbeitsgerä- und Zeitbedarf ermitteln und planen (Rentz et al., 1994).

Auf die Demontagestrukturplanung folgt die Planung der Demontage-reihenfolge, in der über die Anordnungsbeziehungen der Demontage-gruppen untereinander entschieden wird. Hierbei spielen logische und technologische Aspekte eine große Rolle. Beim Rückbau eines Gebäudes sind beispielsweise das Dach, die Decken und Wände zu demontieren, bevor mit der Demontage des Fundaments begonnen werden kann. Das Ergebnis der Demontagereihenfolgeplanung kann schließlich in einem Demontagenetzplan festgehalten werden. (Schultmann, 1998)

Im Zuge der darauffolgenden Demontagezeit- und Ressourcenplanung wird die Zeitstruktur für die Demontagevorgänge festgelegt und deren Start- und Endtermine bestimmt. Nach Schultmann (1998) existieren allerdings selten gesicherten Informationen, die eine Abschätzung der Demontage-dauer ermöglichen, sodass häufig Expertenschätzungen für die Planung zugrunde gelegt werden. Bei der Berechnung der Termine müssen des Weiteren die für die Demontage benötigten Ressourcen sowie deren Kapazität berücksichtigt werden. (Schultmann, 1998)

Ebenso wie in der Demontagezeitplanung fehlt es auch in der Demontage-kostenplanung in der Regel an Erfahrungswerten (BBR, 1998). Insbesondere für den Rückbau kerntechnischer Anlagen existieren unter anderem aufgrund der wenigen abgeschlossenen Rückbauprojekte wenige entsprechende Erfahrungswerte. Eine Abschätzung der anfallenden Kosten wird zusätzlich durch die Tatsache erschwert, dass diese von einer Reihe gebäudespezifischer Faktoren abhängen. Dazu zählen beispielsweise die Größe des Bauwerks, die Zusammensetzung der Bausubstanz sowie eventuelle Belastungen durch Schadstoffe. (Schultmann, 1998) Auch die

gewünschte Demontagetiefe sowie die eingesetzten Demontagetechniken spielen hierbei eine Rolle, da sich Bauteile oftmals auf verschiedene Weise demontieren lassen (sogenannte Modi). (Schultmann, 2003a). Die Demontagetiefe eines Rückbauprojekts beschreibt dabei den Anteil an Bauelementen, welche durch Demontage ausgebaut wurden, bezogen auf den Gesamtanteil der Materialien (Rentz et al., 1994).

An die Demontageplanung schließt sich im letzten Schritt die Planung der Verwertung an. Sie ordnet den anfallenden Bauteilen und Baustoffen geeignete Verwertungsoptionen zu. Darüber hinaus werden in dieser Phase Entscheidungen über die für eine sortenreine Materialtrennung notwendigen Behältersysteme sowie Entscheidungen bezüglich der logistischen Vorkehrungen (z. B. der Containereinsatzplanung) getroffen (Schultmann, 1998).

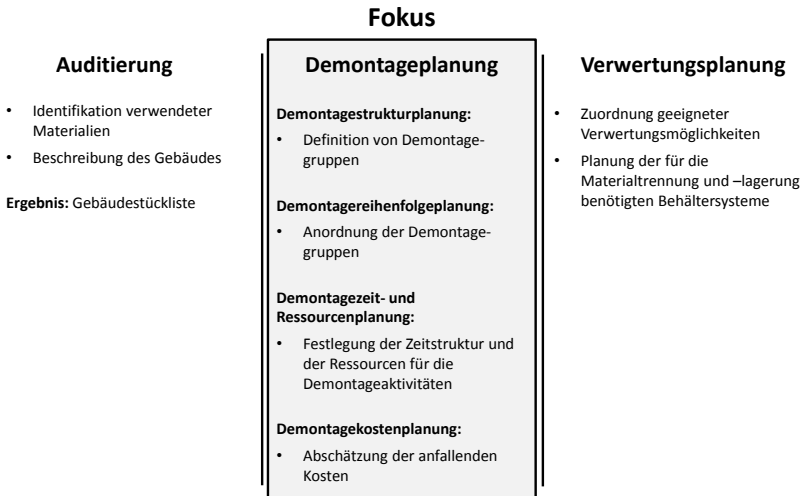


Abbildung 2.9: Rückbauplanung mit den Projektphasen Auditierung, Demontageplanung und Verwertungsplanung (Quellen: Schultmann, 2003a; Schultmann und Rentz, 2002; Schultmann und Rentz, 2000; Schultmann, 1998; Rentz et al., 1994)

Alle drei Planungsschritte bauen aufeinander auf und nehmen gegenseitigen Einfluss aufeinander. Aus diesem Grund sollte eine integrierte Betrachtung insbesondere der Vorgänge innerhalb der Demontageplanung durchgeführt werden.

Für den Rückbau kerntechnischer Anlagen existiert bisher kein Planungswerkzeug, welches eine automatisierte und optimierende Planung unter der Zuhilfenahme dieser drei Planungsschritte ausführt (vgl. Kapitel 3.4.1). Da in dieser Arbeit erstmals ein Planungswerkzeug für den Rückbau kerntechnischer Anlagen entwickelt und getestet wird, liegt der Fokus dieser Arbeit auf der Demontageplanung. Hierbei werden sowohl die Demontagestrukturplanung, die Demontagereihenfolgeplanung, die Demontagezeit- und Ressourcenplanung als auch die Demontagekostenplanung berücksichtigt. Darüber hinaus werden für diese Arbeit die Auditierung sowie die Gebäudestückliste als gegeben angenommen. Da in dieser Arbeit der Rückbau komponentenweise berücksichtigt wird, ergeben sich aus der Gebäudestückliste die durchzuführenden Rückbauvorgänge.

Die Verwertungsplanung folgt beim kerntechnischen Rückbau den gesetzlichen Anforderungen und der Bedingung, möglichst wenig radioaktive Abfälle zu verursachen. Aus diesem Grund wird im Rahmen dieser Arbeit angenommen, dass lediglich zwischen Verfahren und Techniken gewählt werden kann, die diesen Anforderungen und Bedingungen genügen. Die sich ergebenden Stoffströme können somit direkt aus dem ermittelten Plan abgeleitet werden. Verwertungsmöglichkeiten und die Endlagerung radioaktiver Abfälle sind nicht Bestandteil dieser Arbeit. Das Planungswerkzeug zur Demontageplanung, welches in dieser Arbeit entwickelt wird, kann als Basis für Erweiterungen um die Verwertungsplanung und Stoffströme in zukünftigen Arbeiten genutzt werden.

2.6.3 Zielkriterien der Planung und Zielkonflikte

Zur Planung eines Projekts sind die Ziele Zeit, Kosten und Qualität zu unterscheiden. Grundsätzlich wäre es wünschenswert, einen Projektplan zu finden, der es ermöglicht, ein Projekt mit minimalen Kosten, minimaler Dauer und maximaler Qualität auszuführen. Allerdings ist es sehr unwahrscheinlich, dass ein solcher Plan existiert, da sich die Ziele Zeit, Kosten und Qualität gegenseitig beeinflussen und häufig gegenläufig sind. Beispielsweise können zur Projektausführung unterschiedliche Ressourcen, wie beispielsweise Maschinen und Personal, eingesetzt werden. Soll beispielsweise die Projektqualität maximiert werden, dann können der Einsatz präziser Maschinen und die Beschäftigung von gut ausgebildetem Personal sinnvoll sein. Allerdings kann es sein, dass die notwendigen Maschinen und das gut ausgebildete Personal höhere Kosten verursachen als unpräzise Maschinen und weniger gut ausgebildetes Personal. Somit ist es nicht möglich, gleichzeitig die Projektqualität zu maximieren und die Projektkosten zu minimieren. Genauso können die Ziele der Dauerminimierung und der Kostenminimierung sowie der Dauerminimierung und Qualitätsmaximierung gegensätzlich sein. (Badiru, 2012; Gido und Clements, 2014; Kerzner, 2013)

Im Folgenden wird zur Identifikation eines Rückbauplans im Rahmen dieser Arbeit ein Qualitätsniveau festgelegt, welches nicht unterschritten werden darf. Dies sind insbesondere gesetzliche Sicherheitsvorkehrungen wie der Strahlenschutz. Die Einhaltung des Qualitätsniveaus ist somit im Folgenden eine einzuhaltende Nebenbedingung und kein zu maximierendes Zielkriterium. Die beiden Zielkriterien „Minimierung der Projektdauer“ und „Minimierung der Projektkosten“ werden im Folgenden detaillierter beschrieben und diskutiert.

Minimierung der Projektdauer

Das Ziel der Projektplanung bzgl. des Zielkriteriums der Projektdauer ist es, die Gesamtprojektdauer unter den erforderlichen Nebenbedingungen zu minimieren. Um dies zu erreichen, können verschiedene Maßnahmen ergriffen werden, beispielsweise können die Stillstandzeiten beim Rückbau vermieden bzw. verkürzt werden.

Bei der Planung eines Projektes mit dem Zielkriterium der Minimierung der Dauer wird hierbei eine zulässige Reihenfolge der Vorgänge gesucht, die insgesamt mit dem geringsten Zeitaufwand der Projektausführung verbunden ist. Nach der Identifikation eines solchen Plans wird davon eine Ressourcen- und Kostenplanung abgeleitet. Der Ressourcenplan beinhaltet die Menge aller benötigten Ressourcen, wie beispielsweise Maschinen oder Mitarbeiter. Je Vorgang werden des Weiteren die anfallenden Kosten ermittelt und in der Kostenplanung festgehalten. (Zimmermann et al., 2006)

Minimierung der Projektkosten

Bei der Wahl dieses Zielkriteriums werden die Kosten des Projekts minimiert. Wie bereits in der Zeitplanung beschrieben wurde, ist auch bei der Kostenplanung ein Plan hinsichtlich des Zielkriteriums und unter Berücksichtigung der Nebenbedingungen zu identifizieren.

In der Kostenrechnung werden prinzipiell Auszahlungen und Einzahlungen, Ausgaben und Einnahmen, Aufwendungen und Erträge sowie Kosten und Erträge unterschieden. Auf die Definition der einzelnen Begrifflichkeiten wird an dieser Stelle nicht näher eingegangen. Nähere Informationen sind u. a. in Steven (2008) und Wöhe et al. (2016) zu finden. In dieser Arbeit werden Kosten untersucht, die bei der Projektausführung des Rückbaus kerntechnischer Anlagen anfallen und es werden keine weiteren Bestandteile der Kostenrechnung, wie beispielsweise Finanzierungen oder

Abschreibungen, betrachtet. Der Kauf einer Maschine könnte beispielsweise als liquiditätswirksame Ausgabe, z. B. durch eine Barzahlung oder Eigen- bzw. Fremdfinanzierung, oder als eine Investition (als Aktivtausch oder eine Bilanzverlängerung, die in den Folgejahren Abschreibungen zur Folge haben) betrachtet werden. Hierauf wird in dieser Arbeit verzichtet, da dies insbesondere bei einer gesamtunternehmerischen Betrachtung sinnvoll ist und im Rahmen dieser Arbeit ein Rückbauprojekt unabhängig von der finanziellen Situation der beteiligten Unternehmen betrachtet wird.

In einem Projekt werden grundsätzlich zwei Arten an Kosten unterschieden: Fixkosten (Gemeinkosten) und variable Kosten (Einzelkosten). *Fixkosten* fallen unabhängig vom Projektfortschritt und unabhängig von Projektstätigkeiten an, wie beispielsweise die Beschaffung von Maschinen, Gehälter, Versicherungen oder Pacht. Im kerntechnischen Rückbau fallen beispielsweise Kosten für die Sicherheit (Zugangskontrollen, Werksfeuerwehr etc.), sogenannte *Restbetriebskosten*, an, die unabhängig von den Rückbauvorgängen gezahlt werden müssen. Aus diesem Grund ist es häufig schwer, die Fixkosten einem konkreten Vorgang zuzuordnen. Fixkosten können lediglich dem Gesamtprojekt zugeordnet werden und werden daher häufig mit Hilfe von Schlüsseln auf die Vorgänge umgelegt. Unter Fixkosten können auch sogenannte *Sprungfixe Kosten* verstanden werden, die nur beim Eintreten bestimmter Bedingungen entstehen. Beispielsweise kann in bestimmten Situationen die Anschaffung einer weiteren Maschine notwendig sein, die zusätzliche Fixkosten verursacht. Im Gegensatz zu den Fixkosten stehen die *variablen Kosten* in direktem Zusammenhang mit der Durchführung eines Vorgangs, d. h. die anfallenden variablen Kosten können bestimmten Vorgängen eindeutig zugeordnet werden. Des Weiteren entstehen die variablen Kosten nur, wenn ein Vorgang ausgeführt wird. Wird beispielsweise eine Maschine zur Ausführung eines Vorgangs verwendet, verbraucht diese nur während ihrer Nutzungszeit Strom. Die bei der Ausführung des Vorgangs anfallenden Stromkosten können dem

Vorgang eindeutig zugeordnet werden. (Corsten et al., 2008, S. 186f.; Steven, 2008; Wöhe et al., 2016; Zimmermann, 2001, S. 20f.)

Auswahl eines Zielkriteriums und Einflüsse auf dieses Zielkriterium

Gemäß dem Verursacherprinzip (vgl. Kapitel 2.5.2.1) sind die Betreiber kerntechnischer Anlagen dafür verantwortlich, die Kosten des Rückbaus zu tragen. Aus diesem Grund ist es das Ziel der Betreiber, den Rückbau mit minimalen Kosten durchzuführen. Somit gilt als Zielkriterium für die Planung die Minimierung der Projektkosten. Da die Kosten bei der Planung minimiert werden sollen, werden diese in Kapitel 2.6.4 detaillierter untersucht.

Wie bereits in Bezug auf das Zieldreieck der Projektplanung aus Dauer, Kosten und Qualität beschrieben wurde, nehmen unter anderem die Qualität und die Dauer Einfluss auf die Kosten. Die Qualität wird wie bereits beschrieben als einzuhaltende Bedingung und somit als fixe Vorgabe angenommen. Die Abhängigkeiten der Zielkriterien Dauer und Kosten werden auch als *Time-Cost-Tradeoff* bezeichnet (Corsten et al., 2008; Zimmermann et al., 2006). Thierfeldt und Schartmann (2012) behaupten beispielsweise, dass durch eine Reduktion der Dauer des Rückbaus gleichzeitig die Kosten für das Personal, die 40 bis 60 % der Gesamtkosten ausmachten, reduziert werden können. Des Weiteren sind insbesondere die Restbetriebskosten einer der wesentlichen Kostentreiber bei kerntechnischen Rückbauprojekten (vgl. Abbildung 2.11 in Kapitel 2.6.4). Je länger ein Projekt dauert, desto länger fallen Restbetriebskosten an bzw. durch eine Verkürzung der Projektdauer können die Kosten reduziert werden. Bei den genannten Beispielen würde eine Minimierung der Dauer auch zu einer Reduzierung der Kosten führen. Allerdings können die Zielkriterien der Dauer und der Kosten auch gegenläufig sein. Beispielsweise können für einen Vorgang entweder eine teure Maschine eingesetzt werden, die sehr schnell arbeitet oder es kann eine günstigere Maschine eingesetzt werden, deren Ausführungszeiten länger dauern. Der Einfluss

der eingesetzten Ressource auf die Dauer wird als *Time-Resource-Tradeoff* und der Einfluss der eingesetzten Ressource auf die Kosten wird als *Resource-Cost-Tradeoff* bezeichnet⁷⁹. Hierbei werden die Dauer und die Kosten durch den Einsatz alternativer Ressourcen beeinflusst. Gleichzeitig kann dadurch indirekt der Time-Cost-Tradeoff berücksichtigt werden.

2.6.4 Kosten und Finanzierung des kerntechnischen Rückbaus

Die für den Rückbau einer kerntechnischen Anlage anfallenden Kosten werden durch mehrere Faktoren beeinflusst. In einer Studie für die Nuclear Energy Agency (NEA) der Organisation for Economic Co-operation and Development (OECD) hat Lund (2003) insbesondere folgende Aspekte identifiziert, die einen wesentlichen Einfluss auf die Stilllegungskosten nehmen:

- Der angestrebte Endzustand der Anlage nach dem Rückbau (also die angestrebte Stilllegungsstrategie),
- Die nationale Politik,
- Die Berücksichtigung der Entsorgungs-, Zwischen- und Endlagerkosten in die Kostenberechnung,
- Die Art der Klassifizierung des beim Rückbau anfallenden Abfalls (vgl. hierzu auch Kapitel 2.3.3),
- Die nationalen Lohnkosten,
- Soziale und politische Faktoren, z. B. die Geschwindigkeit, mit der die Anlage rückgebaut werden soll,
- Die Unsicherheiten bei der Schätzung der anfallenden Kosten.

⁷⁹ Nähere Informationen zum Time-Resource-Tradeoff sowie zum Resource-Cost-Tradeoff sind in Kapitel 3.1 aufgeführt.

Darüber hinaus sind folgende, anlagentypische Einflussfaktoren für die beim Rückbau anfallenden Kosten (Lund, 2003) zu nennen:

- Der Typ und die Größe des rückzubauenden Reaktors,
- Die Anzahl an Einheiten (d. h. Anzahl Reaktoren) auf dem Gelände,
- Die Betriebsgeschichte der Anlage,
- Die erwartete Abfallmenge.

Ähnliche Einflussfaktoren werden auch im World Energy Outlook 2014 der IEA aufgeführt (IEA, 2014, S. 365). Die Kosten für den Rückbau einer kerntechnischen Anlage hängen somit von vielen Einflussfaktoren ab. Thierfeldt und Schartmann (2012, S. 40) schätzen die Kosten des Rückbaus einer kerntechnischen Anlage auf ca. 500 Millionen Euro und die Europäische Kommission rechnet für den Rückbau eines Leistungsreaktors mit Kosten zwischen 300 Millionen und 1,1 Milliarden Euro (Europäische Kommission, 2016b, S. 33).

Nach Aussage der Bundesregierung trägt grundsätzlich der Betreiber einer kerntechnischen Anlage die Kosten für den Rückbau. Diese sollen durch während der Betriebszeit gebildete Rückstellungen finanziert werden. (Bundesregierung, 2015) Die Beratungsfirma Warth & Klein Grant Thornton hat im Auftrag der Bundesregierung die Rückstellungen der deutschen Energieversorgungsunternehmen (EVU) untersucht. In diesem Zusammenhang errechnete die Beratungsfirma die durchschnittlichen Rückbaukosten eines deutschen Kernkraftwerks auf 857 Millionen Euro. Die Kosten für den Rückbau, die Zwischenlagerung und Transport sowie für die Endlagerung in Deutschland schätzt Warth & Klein Grant Thornton anhand der zum 31.12.2014 bestehenden Verpflichtungen der EVU auf 47,5 Milliarden Euro auf dem Preisniveau des Jahres 2014 (vgl. Abbildung 2.10). Allein für den Rückbau der deutschen Kernkraftwerke schätzt die Beratungsfirma Kosten in Höhe von 19,7 Milliarden Euro. (Warth & Klein Grant Thornton, 2015)

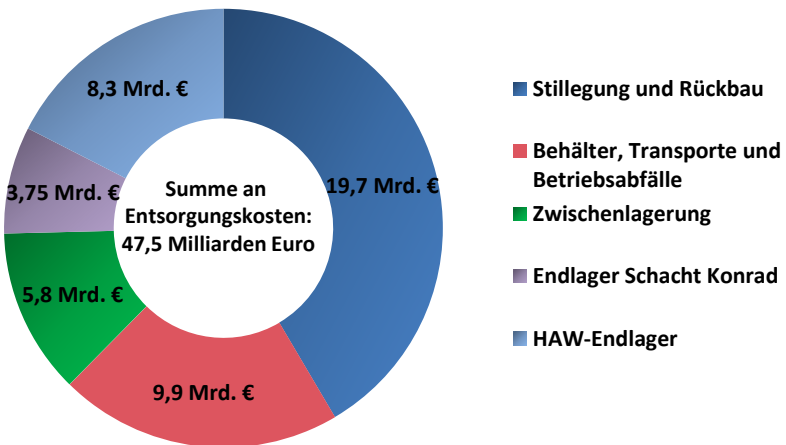


Abbildung 2.10: Kostenschätzung Rückbau, Zwischenlagerung und Transport sowie Endlagerung in Deutschland (Quelle: in Anlehnung an Warth & Klein Grant Thornton, 2015)

Wie bereits in Kapitel 2.5.2.1 beschrieben wurde, besteht in Deutschland das sogenannte Verursacherprinzip, welches vorsieht, dass die Betreiber einer kerntechnischen Anlage für die Finanzierung der Stilllegung inkl. des Rückbaus aufkommen müssen. Die rechtlichen Grundlagen zur Finanzierung der Kosten für die Zwischen- und Endlagerung in Deutschland wurden in Kapitel 2.5.2.6 beschrieben. Zur Deckung dieser anfallenden Kosten haben die EVU in Deutschland Rückstellungen gebildet.

Die einzelnen in den Rückstellungen berücksichtigten Verpflichtungen betreffen:

- a) Die Stilllegung und den Rückbau von Kernkraftwerken (soweit dazu eine Verpflichtung besteht);
- b) Die Konditionierung (Verpackung) von radioaktiven Abfällen, Behälter, Transporte, Betriebsabfälle sowie die Rückführung von wiederaufbereiteten Abfällen;
- c) Die Zwischenlagerung von radioaktiven Abfällen;
- d) Die Endlagerung von radioaktiven Abfällen mit vernachlässigbarer Wärmeentwicklung im Schacht Konrad;
- e) Die Endlagerung von hochradioaktiven, Wärme entwickelnden Abfällen (HAW) in einem HAW-Endlager einschließlich der Kosten der Suche und Auswahl eines Standortes für das HAW-Endlager. (vgl. Warth & Klein Grant Thornton, 2015)

Es ist anzumerken, dass, wie bereits in Kapitel 2.5.2.6 beschrieben wurde, die Betreiber durch die Einzahlung eines Grundbetrages und eines Risikoaufschlags in den Entsorgungsfonds die finanzielle Verantwortung für die Zwischen- und Endlagerung radioaktiver Abfälle an den Bund übertragen haben. Nichtsdestotrotz gibt die folgende Aufstellung der Rückstellungen einen Einblick in die Finanzierung.

Zum 31.12.2014 haben die betroffenen EVUs in Deutschland insgesamt 38,3 Milliarden Euro als Kernenergie Rückstellungen bilanziert (vgl. Tabelle 2.3). (Warth & Klein Grant Thornton, 2015)

Tabelle 2.3: Kernenergierückstellungen zum 31.12.2014 (Quelle: in Anlehnung an Warth & Klein Grant Thornton, 2015)

Kernenergierückstellungen (Deutschland)	31.12.2014 Mio. EUR
E.ON ¹⁾	16.567
RWE ¹⁾	10.367
EnBW ¹⁾	8.071
Vattenfall D ²⁾	3.014
SWM ³⁾	564
davon Auslandsverpflichtungen	-295
Summe	38.288
Quellen: 1) IFRS-Geschäftsbericht 2) IFRS-Geschäftsbericht in SEK; 9,3930 SEK = 1 EUR HGB-Geschäftsbericht	

Warth & Klein Grant Thornton betonen, dass alle Prognosen mit Schätzunsicherheiten verbunden sind. Aus diesem Grund kann es zu einer Über- aber auch zu einer Unterschätzung der anfallenden Kosten kommen. (Warth & Klein Grant Thornton, 2015) Des Weiteren beziehen sich alle vorangegangenen Zahlen nur auf die Beseitigung der kommerziellen Anlagen und berücksichtigen nicht die Beseitigungskosten von Forschungsreaktoren.

Warth & Klein Grant Thornton rechnen in ihrer Untersuchung damit, dass es beim Rückbau und der Entsorgung kerntechnischer Anlagen zukünftig zu Kostensteigerungen kommen wird und sich daher die bisherigen Verpflichtungen von 47,5 Milliarden Euro (Preisniveau 2014) erheblich verteuern

werden. In dieser Preissteigerung sind einerseits inflatorische als auch nuklearspezifische Kostensteigerungen inbegriffen.

Unter der Berücksichtigung einer allgemeinen jährlichen (inflatorischen) Kostensteigerungsrate von 1,6 % ergeben sich geschätzte Rückbau- und Entsorgungskosten von rund 75,7 Milliarden Euro (vgl. Tabelle 2.4) (Warth & Klein Grant Thornton, 2015).

Tabelle 2.4: Geschätzte Entsorgungskosten aus dem kerntechnischen Rückbau vereinheitlicht und inflationiert (Quelle: Warth & Klein Grant Thornton, 2015)

Entsorgungskosten vereinheitlicht inflationiert (Deutschland)	Σ 2015-2099 Mio. EUR
Stilllegung und Rückbau	23.701
Behälter, Transporte, Betriebsabfälle	18.927
Zwischenlagerung	10.705
Endlager Schacht Konrad	5.338
HAW-Endlager	17.040
Summe	75.711

Unsicherheiten und Risiken, die nicht antizipiert werden (können), werden nach Schätzungen von Warth & Klein Grant Thornton (2015) über die allgemeine Inflationserwartung hinausgehende zusätzliche nuklearspezifische reale Kostensteigerungsrate in Höhe von durchschnittlich 1,97 % jährlich abgedeckt. Zusätzlich hat Warth & Klein Grant Thornton eine spezifisch differenzierende Bewertung durchgeführt, in der für alle

Entsorgungsschritte eigene Kostensteigerungen angesetzt werden⁸⁰. Werden diese nuklearspezifischen jährlichen Kostensteigerungsraten der einzelnen Entsorgungsschritte somit neben der allgemeinen jährlichen (inflationistischen) Kostensteigerungsrate zusätzlich berücksichtigt, erhöhen sich die Rückbau- und Entsorgungskosten auf rund 169,8 Milliarden Euro (vgl. Tabelle 2.5). (Warth & Klein Grant Thornton, 2015)

Tabelle 2.5: Entsorgungskosten vereinheitlicht inflationiert inkl. nuklearspezifischer Kostensteigerung (Quelle: Warth & Klein Grant Thornton, 2015)

Entsorgungskosten vereinheitlicht inflationiert & nuklearspezifische Kostensteigerung (Deutschland)	Σ 2015-2099 Mio. EUR
Stilllegung und Rückbau	30.214
Behälter, Transporte, Betriebsabfälle	52.840
Zwischenlagerung	26.770
Endlager Schacht Konrad	9.016
HAW-Endlager	50.966
Summe	169.808

Nicht nur national sondern auch international stellt sich die Frage der Finanzierung der Kosten für die Stilllegung und den Rückbau kerntechnischer Anlagen. In den meisten Ländern ist der Betreiber oder der Besitzer einer kerntechnischen Anlage wie in Deutschland gemäß dem

⁸⁰ Für Stilllegung und Rückbau (Entsorgungsschritt a): Absinken der Kostensteigerungsrate aufgrund von Lernkurven von 1,97 % bis 2030 auf 0 %; für Behälter, Transporte und Betriebsabfälle (Entsorgungsschritt b) sowie Zwischenlagerung (Entsorgungsschritt c): einheitliche nuklearspezifische Kostensteigerung von 1 %; für das Endlager Schacht Konrad (Entsorgungsschritt d) sowie für das HAW-Endlager (Entsorgungsschritt e): durchschnittliche nuklearspezifische Kostensteigerung von ca. 1 %.

Verursacherprinzip verantwortlich für den Rückbau und dessen Finanzierung (Thierfeldt und Schartmann, 2012, S. 5; WNA, 2018). Nach Angaben der Europäischen Kommission werden für die Stilllegung und den Rückbau sowie für die Entsorgung radioaktiver Stoffe in Europa 253 Milliarden Euro bis zum Jahr 2050 benötigt. Hiervon werden 123 Milliarden Euro der Stilllegung und dem Rückbau und 130 Milliarden Euro der Entsorgung und Lagerung radioaktiver Abfälle zugeordnet. Zur Finanzierung dieser anstehenden Kosten wurden in den europäischen Mitgliedsstaaten bisher allerdings nur 133 Milliarden Euro rückgestellt. (Europäische Kommission, 2016a) Somit fehlen nach diesen Schätzungen für die Stilllegung und den Rückbau sowie für die Entsorgung radioaktiver Stoffe aus kommerziellen Reaktoren in Europa rund 120 Milliarden Euro.

Die Ausführungen zeigen, dass die Finanzierung eine zentrale Frage bei der Stilllegung und dem Rückbau kerntechnischer Anlagen darstellt. Insbesondere vor dem Hintergrund der fehlenden finanziellen Mittel sollen die Kosten für den Rückbau möglichst minimiert werden. Dabei spielt die robuste Planung des Rückbaus eine wesentliche Rolle. Ziel dieser Arbeit ist es daher, einen möglichst kostenminimalen und robusten Rückbauplan zu erstellen, der bestehende Unsicherheiten berücksichtigt.

Ein Großteil der Kosten des gesamten Rückbaus entsteht durch die Kosten des Restbetriebs. Klasen und Seizer (2015) schätzen die Kosten des Restbetriebs auf drei bis fünf Millionen Euro pro Monat, wobei sich diese im Projektverlauf ändern (vgl. Abbildung 2.11). Für die Planung hat dies zur Folge, dass Investitionen in eine Verkürzung der Projektlaufzeit rentabel sein können. Durch die Verkürzung der Projektlaufzeit könnten Restbetriebskosten eingespart werden, die evtl. höher als die zusätzlichen Ausgaben für eine Projektbeschleunigung ausfallen. Allgemein sind wie in Kapitel 2.6.3 beschrieben immer der Time-Resource- sowie der Resource-Cost-Tradeoff zu berücksichtigen.

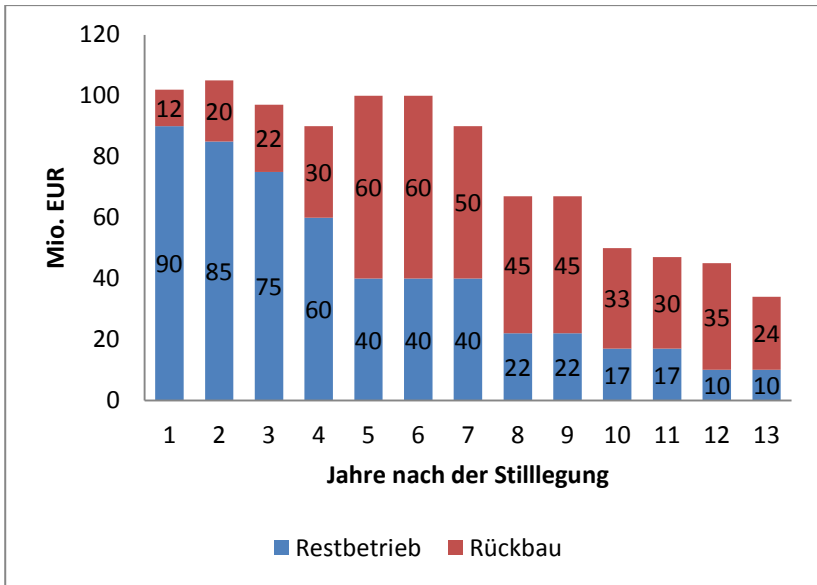


Abbildung 2.11: Schematische Darstellung der jährlichen Rückbaukosten (Quelle: Klasen und Seizer, 2015)

Die Kosten des Rückbaus beinhalten zu einem Großteil Personalkosten (Thierfeldt und Schartmann, 2012). Kosten für Techniken und Maschinen sind dagegen laut Expertenaussagen marginal (Loeb, 2015).

2.6.5 Unsicherheit beim Rückbau kerntechnischer Anlagen

Der Fokus dieser Arbeit liegt auf der Termin- und Ablauf-, Ressourcen- und Kostenplanung sowie der Planung des Risikomanagements (vgl. Kapitel 2.6.1). Insbesondere die Risiken haben einen großen Einfluss auf die Termin- und Ablauf-, Ressourcen-, Kostenplanung. Aus diesem Grund werden mögliche Risiken im Rahmen dieser Arbeit berücksichtigt. Im Folgenden wird daher das Risikomanagement allgemein beschrieben, der

Begriff wird für die eindeutige Verwendung in dieser Arbeit definiert (Kapitel 2.6.5.1) und es werden typische Risiken kerntechnischer Rückbauprojekte aufgezeigt (Kapitel 2.6.5.2).

Grundsätzlich ist das Risikomanagement als eigenständige Managementaufgabe im Rahmen des Projektmanagements anzusehen. Allerdings können Unsicherheiten, Ungewissheiten und Risiken⁸¹ die Planausführung eines Projekts fundamental beeinflussen. Insbesondere kann es zu nicht geplanten Veränderungen im Projektablauf und zu Veränderungen im Projektumfeld kommen. Sofern es sich dabei insbesondere um grundlegende Änderungen innerhalb eines Projekts handelt, wird der anglo-amerikanische Begriff *Change* verwendet (Ulrich, 1994). Der Steuerungsprozess der Veränderungen wird als *Change Management* bezeichnet und beinhaltet alle Maßnahmen, die zum Umgang mit Änderungen während der Projektausführung notwendig sind. Für die Genehmigung des Rückbaus einer kerntechnischen Anlage soll ein möglichst planmäßig ausführbarer Plan gefunden werden, um Änderungen während der Projektausführung zu vermeiden, da diese aufgrund einer neuen Genehmigung zu Verzögerungen und Kostensteigerungen führen. Im Rahmen dieser Arbeit werden daher Unsicherheiten, Ungewissheiten und Risiken bereits soweit möglich in die Planfindung integriert. Somit liegt der Fokus dieser Arbeit nicht auf dem Change Management, sondern in der *proaktiven Planung*⁸². Ausführungen zum Change-Management sind unter anderem in Gareis (2008), Kostka und Mönch (2009), Roth und Dineiro (2008) sowie Wild (2008) zu finden.

Im Folgenden werden zunächst die Begriffe *Risiko*, *Unsicherheit* und *Ungewissheit* definiert, um damit einhergehend aufzuzeigen, welche Herausforderungen bei der Planung des Rückbaus kerntechnischer Anlagen

⁸¹ Die Begriffe *Unsicherheit*, *Ungewissheit* und *Risiko* werden im folgenden Kapitel 2.6.5.1 definiert und voneinander abgegrenzt.

⁸² Eine Beschreibung der proaktiven Planung ist in Kapitel 3.6 zu finden.

bestehen. Im Anschluss werden jeweils Risiken bzw. Ungewissheiten aufgezeigt, die einen Einfluss auf die Planung des Rückbaus nehmen.

2.6.5.1 Begriffsbestimmungen bzgl. der Planung mit unterschiedlichem Informationsstand

In der Literatur findet häufig keine eindeutige Abgrenzung insbesondere der Begriffe *Unsicherheit*, *Ungewissheit* und *Risiko* statt, sodass diese teilweise synonym verwendet werden (Mildner und Boeckelmann, 2011, S. 2). Als erste Annäherung zur Abgrenzung der Begriffe definiert die ISO 31000:2009 den Begriff *Risiko* als den Effekt von Unsicherheit auf zu erreichende Ziele. Da diese Definition sehr allgemein gehalten ist, werden die Begriffe *Unsicherheit*, *Ungewissheit* und *Risiko* im Folgenden genauer definiert und voneinander abgegrenzt.

Zur Planung und auch während der Ausführung von Projekten sind Entscheidungen zum Vorgehen zu treffen. Daher werden gemäß der Entscheidungstheorie die Entscheidungssituationen entsprechend der vorhandenen Informationen eingeteilt. Sofern die eintretende Situation bekannt ist und der Eintritt gewisser Umweltzustände mit Sicherheit vorhergesagt werden kann, wird von einer *Entscheidung unter Sicherheit* gesprochen (Domschke und Scholl, 2008, S. 49; Laux et al., 2014, S. 33, Zimmermann und Gutsche, 1991, S. 4). Diese Entscheidungssituation wird auch als deterministisches Entscheidungsmodell bezeichnet. Ist allerdings die eintretende Situation unbekannt bzw. kann der Eintritt gewisser Umweltzustände nicht mit Sicherheit vorhergesagt werden, dann wird von einer *Entscheidung unter Unsicherheit* gesprochen (Domschke und Scholl, 2008, S. 49; Laux et al., 2014, S. 33; Saynisch et al., 1979, S. 40, Zimmermann und Gutsche, 1991, S. 4). Wenn bei einer Entscheidung unter Unsicherheit der Eintritt gewisser Umweltzustände nur mit (objektiv messbaren) Wahrscheinlichkeiten vorhersehbar ist, wird dies als *Entscheidung unter Risiko* bezeichnet (Domschke und Scholl, 2008, S. 49; Laux et al., 2014, S. 33, Zimmermann und Gutsche, 1991, S. 4). Sind die möglichen

Umweltzustände sowie für diese die Eintrittswahrscheinlichkeiten bekannt, handelt es sich um ein stochastisches Entscheidungsmodell, welches mathematisch gelöst werden kann (Domschke und Scholl, 2008, S. 49). Die Quantifizierung eines möglichen Risikos erfolgt durch die Multiplikation des beim Eintritt eines Umweltzustandes eintretenden Schadens mit der Eintrittswahrscheinlichkeit des Eintritts dieses Umweltzustandes (Jung, 2003, S. 545; Koelzer, 2015, S. 175f.). Im Projektmanagement wird dieser Ansatz häufig verwendet (Meyer und Reher, 2016, S. 150). Bei Entscheidungen unter Risiko müssen sowohl die möglichen Umweltzustände als auch die (objektiv messbaren) Eintrittswahrscheinlichkeiten bekannt sein. Allerdings sind in vielen Projekten die Eintrittswahrscheinlichkeiten möglicher Umweltzustände nicht bekannt (Jung, 2003, S. 542; Keynes, 1936, S. 113; Knight, 1921, S. 230f.). Entscheidungen ohne die (genaue) Kenntnis (beispielsweise durch ungenaue Schätzungen) über deren Eintrittswahrscheinlichkeit werden als *Entscheidungen unter Ungewissheit* (oder Unsicherheit im engeren Sinne) bezeichnet (Domschke und Scholl, 2008, S. 49; Keynes, 1936, S. 113; Knight, 1921, S. 230f; Laux et al., 2014, S. 33). Insgesamt ergibt sich die Einteilung möglicher Entscheidungssituationen wie in Abbildung 2.12 dargestellt.

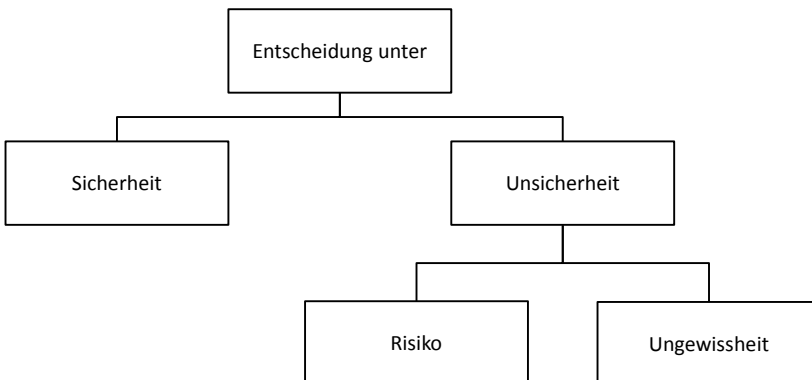


Abbildung 2.12: Unsicherheitskonzept nach Knight (1921)

Dieser Darstellungsform bzw. Einteilung von Entscheidungen unter Unsicherheit folgen viele Autoren in der Literatur, wie beispielsweise Gottwald (1990, S. 17), Mousavi und Gigerenzer (2014, S. 1672) sowie Huth und Romeike (2016, S. 53).

An diesem Konzept wird kritisiert, dass alle möglichen Situationen bekannt sein müssen (selbst wenn die Eintrittswahrscheinlichkeit unbekannt ist). Mögliche unbekannt Zustände werden nach dem Unsicherheitskonzept von Knight (1921) nicht berücksichtigt. Diese Zustände werden beispielsweise als *unknown unknowns* bezeichnet (Daase und Kessler, 2007, S. 413; Krahmman, 2011, S. 354ff.).

In der Literatur existieren Ansätze, um ein Modell während der Planung oder nach der Projektdurchführung bezüglich *unknown unknowns* zu verbessern. In der Planungsphase ist beispielsweise eine autonome Simulation möglich, um *unknown unknowns* zu identifizieren (Okashah und Goldwater, 1994). Nach der Projektausführung sind Verbesserungsansätze wie „beat the machine“ (Attenberg et al., 2011) oder Lernalgorithmen (Talbot, 2006) möglich. Eine Simulation wird in dieser Arbeit angewendet, setzt allerdings die Kenntnis möglicher Zustände voraus. Da im Rahmen dieser Arbeit bereits mögliche Zustände während der Planung berücksichtigt werden sollen (um eine Plananpassung zu vermeiden), sind Verbesserungsansätze nach der Projektausführung für die Planung in dieser Arbeit nicht anwendbar.

Es bestünde die Möglichkeit, unbekannt Zustände (*unknown unknowns*) durch die Einführung von zusätzlichen Puffern in den Plan abzufangen. Da allerdings weder die Anzahl und das Ausmaß noch die Wahrscheinlichkeit des Eintritts solcher unbekannt Zustände bekannt sind, wird in dieser Arbeit auf deren Berücksichtigung in der Planung verzichtet. Es sei angemerkt, dass eventuell notwendige Maßnahmen im Umgang mit *unknown unknowns* im weiteren Verlauf dieser Arbeit implizit durch die Einführung von Puffern berücksichtigt werden (vgl. Kapitel 4.5.3.2). Mögliche

Maßnahmen zum Umgang mit *unknown unknowns* in kerntechnischen Rückbauprojekten und eine Sammlung aufgetretener *unknown unknowns* während des Rückbaus kerntechnischer Anlagen sind beispielsweise in IAEA (2016) zu finden.

Im Rahmen dieser Arbeit ist das Unsicherheitskonzept nach Knight (1921) ausreichend, da lediglich zu erwartende Zustände berücksichtigt werden. Somit kann von einer Planung unter Unsicherheit gesprochen werden, wobei die Ausführung bestimmter Vorgänge mit einer Wahrscheinlichkeit und die Dauern der Vorgänge mit Wahrscheinlichkeitsverteilungen angegeben werden können. Sofern die Wahrscheinlichkeiten bzw. Wahrscheinlichkeitsverteilungen objektiv bestimmt werden können, handelt es sich nach der Definition von Knight (1921) um eine Entscheidung unter Risiko. Da diese Wahrscheinlichkeiten bzw. Wahrscheinlichkeitsverteilungen aufgrund der wenigen Erfahrungswerte kerntechnischer Rückbauprojekte (Europäische Kommission, 2016a; OECD, 2016) derzeit noch nicht objektiv bestimmt werden können, werden diese von Experten geschätzt, sodass nach Knight (1921) eine Entscheidung unter Ungewissheit vorliegt (mit zunehmender Erfahrung im kerntechnischen Rückbau wandelt sich die Planung zu einer Entscheidung unter Risiko). Um mit Risiken bzw. Ungewissheiten während der Projektausführung umgehen zu können ohne das Projektziel zu verfehlen, bietet es sich an, einen Risikoplan zu erstellen. In diesem Risikoplan werden alle denkbaren Risiken bzw. Ungewissheiten dokumentiert, geplante Maßnahmen zur Bewältigung definiert oder deren Akzeptanz aufgeführt (ISO 21500:2012, S. 6). Grundsätzlich bietet die Abbildung und Analyse möglicher Zustände bereits die Möglichkeit, diese in der Planung zu berücksichtigen, beispielsweise durch die Erstellung verschiedener Szenarien zur Planfindung.

2.6.5.2 Unsicherheiten beim Rückbau kerntechnischer Anlagen

Gemäß Kapitel 2.6.5.1 handelt es sich sowohl bei *Risiken* als auch bei *Ungewissheiten* um *Unsicherheiten*. Daher wird im Folgenden der Begriff *Unsicherheit* verwendet.

Im Rahmen dieser Arbeit wird davon ausgegangen, dass in jedem Großprojekt ein funktionierendes Risikomanagement etabliert wird, welches während der Projektausführung Unsicherheiten vorbeugen und beim Auftreten von Unsicherheiten während der Projektausführung diesen entgegenwirken kann. Ziel dieser Arbeit ist es, die Auswirkungen von Unsicherheiten auf die Projektausführung bereits in der Projektplanung zu berücksichtigen. Beispielsweise kann die mehrfache Ausführung von Dekontaminationsvorgängen die Startzeitpunkte geplanter, nachfolgender Vorgänge verzögern. In diesem Fall haben diese Unsicherheiten möglicherweise Einfluss auf die Projektdauer, sodass entweder zeitliche Puffer oder eine längere Dauer zur Ausführung bestimmter Vorgänge in der Planung berücksichtigt werden sollten. Im Folgenden wird eine Auswahl an potentiellen Unsicherheiten in Projekten und insbesondere beim Anwendungsbeispiel des Rückbaus kerntechnischer Anlagen aufgezeigt.

Unabhängig vom Projekt können insbesondere bei nicht ausreichenden Erfahrungswerten **fehlerhafte Schätzungen**, beispielsweise bzgl. der Ausführungsdauer eines Vorgangs, vorliegen. Mögliche Gründe können beispielsweise eine andere eingesetzte Ressource als ursprünglich geplant, eine Fehleinschätzung des Zustands eines rückzubauenden Anlagenteils oder mehrfache Ausführungen von Vorgängen sein. Aufgrund fehlender Erfahrungswerte beim Rückbau kerntechnischer Anlagen (Europäische Kommission, 2016a; OECD, 2016) ist bei diesem Anwendungsfall mit fehlerhaften Schätzungen zu rechnen.

Allgemein sind **Großprojekte** aufgrund ihrer langen Bearbeitungszeit, ihrer großen Finanzvolumina und teilweise aufgrund ihrer lokalen bzw.

geografischen Ausdehnung schwerer detailliert zu planen als kleinere Projekte über einen kürzeren Zeitraum, mit geringerem Finanzvolumen und einer geringeren lokalen Ausdehnung (Flyvbjerg et al., 2003, S. 11ff., 46ff.). Die **langen Bearbeitungszeiten** von Großprojekten erschweren eine detaillierte Planung über den gesamten Bearbeitungszeitraum. Insbesondere zeitliche Verzögerungen, Eventualitäten, und Änderungen der Projektspezifikationen sind teilweise schwer über einen langen Zeitraum vorherzusehen (Flyvbjerg et al., 2003, S. 11f., 45). Einzelne Änderungen wirken sich wiederum auf die Einplanung einiger Vorgänge und somit auf die Bearbeitungszeit des Gesamtprojekts aus. Des Weiteren ist es wahrscheinlicher, dass es über einen längeren Zeitraum mit vielen Vorgängen zu mehr zeitlichen Verzögerungen, Eventualitäten und Änderungen der Projektspezifikation kommen kann als es bei Projekten mit kürzerer Bearbeitungszeit und weniger Vorgängen der Fall ist (Flyvbjerg et al., 2003, S. 11f., 45). Das **große Finanzvolumen über lange Zeiträume** ist Grund für die finanzielle Volatilität in Großprojekten (Flyvbjerg et al., 2003, S. 11f., 35). Bei Großprojekten haben Abweichungen zwischen denen in der Planung zugrunde gelegten und den tatsächlichen Finanzzahlen häufig großen Einfluss auf die Finanzierungskosten und die Rentabilität des Projekts. Aufgrund der hohen Beträge wirken sich in vielen Fällen bereits kleine Änderungen des Zinssatzes, Änderungen der Wechselkurse, Preisänderungen, Kosten für die Sicherheit, Kosten aufgrund von Umwelteinflüssen und Kosten der technologischen Innovation auf die Projektkosten aus (Flyvbjerg et al., 2003, S. 11f., 35). Allerdings ist diese Hebelwirkung großer Geldbeträge bei kleinen Änderungen vielen Planern nicht bewusst, sodass die finanzielle Volatilität häufig unterschätzt oder ignoriert wird (Flyvbjerg et al., 2003, S. 11f., 35). Die **lokale bzw. geografische Ausdehnung von Großprojekten** birgt weitere Unsicherheiten, die Großprojekte gegenüber kleineren Projekten besonders machen (Flyvbjerg et al., 2003, S. 11f.). An verschiedenen Orten der Projektausführung müssen insbesondere in großen Bau- und Rückbauprojekten die unterschiedlichen geologischen Bedingungen berücksichtigt werden. Abgeschlossene Großprojekte

zeigen, dass diese häufig in der Planung unterschätzt oder ignoriert wurden, sodass es während der Projektausführung zu Verzögerungen kam, ungeplante Arbeiten ausgeführt oder Arbeiten wiederholt werden mussten (Flyvbjerg et al., 2003, S. 11f.). Ebenso verhält es sich häufig mit möglichen **Umweltauswirkungen** während der Projektausführung. Dabei wird in der Regel vergessen, dass zum Schutz der Umwelt zeitintensive Maßnahmen durchgeführt und ungeplante Umwelteinwirkungen häufig größere Auswirkungen auf die zeitliche Ausführung eines Projekts haben können (Flyvbjerg et al., 2003, S. 49ff., 62f.).

Flyvbjerg et al. (2003) geben zu bedenken, dass die Durchführung von Großprojekten zudem sehr viel häufiger als bei kleineren Projekten durch das Misstrauen, den Widerstand und die Kritik der Öffentlichkeit, der Politik oder von Behörden behindert wird. Dies ist bei vielen Großprojekten einer der Hauptgründe für die Zeit- und Kostenüberschreitung der ursprünglichen Planung (Flyvbjerg et al., 2003, S. 5; IAEA, 2004, S. 51). Alle Personen, Organisationen und Unternehmen, die einen Einfluss auf die Ausführung eines Projekts haben, werden als **Stakeholder** bezeichnet⁸³. Die Erfahrungen aus vielen Großprojekten zeigen, dass insbesondere die Stakeholder-Gruppen Öffentlichkeit, private Investoren, Politik und Medien unzureichend über die Projekte und mögliche Unsicherheiten sowie Gefahren informiert wurden (Flyvbjerg et al., 2003, S. 83ff.). Dies führt insbesondere häufig zu einer Unzufriedenheit der Öffentlichkeit, sodass das Misstrauen und der Widerstand gegen diese Großprojekte steigen (Flyvbjerg et al., 2003, S. 88f.). Aufgrund von Protesten kann es insbesondere zu Verzögerungen während der Projektausführung kommen.

Speziell auf das Großprojekt des Rückbaus kerntechnischer Anlagen bezogen existieren projektabhängige Unsicherheiten. Bereits die **Dauer des Genehmigungsverfahrens** unterliegt vielen Unsicherheiten (vgl.

⁸³ Eine Auflistung potentieller Stakeholder und deren Interessensgebiete bzgl. kerntechnischer Rückbauprojekte ist in IAEA (2004, S. 54) und IAEA (2011b, S. 15) zu finden.

Kapitel 2.5.2.5). Die Erteilung einer Genehmigung kann mehrere Jahre in Anspruch nehmen. Beispielsweise wurde für das Kernkraftwerk Stade im Juli 2001 ein Stilllegungsantrag für den Rückbau Phase I gestellt, der im September 2005 genehmigt wurde (E.ON Kernkraft GmbH, 2008, S. 3). Im Folgenden werden allerdings lediglich Unsicherheiten bzgl. des operativen Rückbaus und keine Unsicherheiten bzgl. der Genehmigungsverfahren berücksichtigt. Die unsichere Dauer der Genehmigungsverfahren ist lediglich der Vollständigkeit halber genannt. Im Gegensatz zur unsicheren Dauer der Genehmigungsverfahren stellt die **radiologische Belastung** von Anlagenteilen durch Aktivierung oder Kontamination eine wesentliche Unsicherheit während des Rückbaus einer kerntechnischen Anlage dar. Es ist zwar bekannt, dass die Strukturen in unmittelbarer Nähe zum Reaktorkern mit Sicherheit aktiviert sind, allerdings nimmt die Gewissheit über das Ausmaß der Aktivierung mit zunehmender Entfernung vom Reaktorkern ab. Des Weiteren ist abhängig vom Reaktortyp die Kontamination bestimmter Anlagenteile, wie beispielsweise Rohrleitungen, sehr wahrscheinlich (vgl. Kapitel 2.2.4). Da viele Bereiche, wie Teile des Reaktors oder Rohrleitungen, nicht frei zugänglich sind, kann eine Charakterisierung zum Teil erst während der Rückbauarbeiten stattfinden (Thierfeldt und Schartmann, 2012, S. 106). Abhängig von der vorherrschenden Aktivität werden unterschiedliche Vorgänge mit unterschiedlichen Ressourcen ausgeführt (vgl. Kapitel 2.4). Dadurch dauern Vorgänge unterschiedlich lange oder müssen (insbesondere bei Dekontaminationsvorgängen) mehrfach wiederholt werden. Die ungeplante Ausführung von Vorgängen kann auch aufgrund nicht dokumentierter Leckagen oder Störfälle während des Leistungsbetriebs und die dadurch hervorgerufene Freisetzung radioaktiver Stoffe notwendig sein. Um das Personal während der Rückbauarbeiten vor der ionisierenden Strahlung zu schützen, werden Sicherheitsmaßnahmen umgesetzt (vgl. Kapitel 2.3.2) und es werden spezielle Maschinen entwickelt und eingesetzt (vgl. Kapitel 2.4). Aufgrund der **geringen Erfahrung im Umgang mit neuartigen und wenig erprobten Technologien** können

ebenfalls Verzögerungen während des Rückbaus auftreten (Cumó, 2010, S. 3008).

Zusammenfassend lässt sich festhalten, dass fast alle Unsicherheiten in der Planung auf Unsicherheiten der **Dauer zur Ausführung von Vorgängen**, der Unsicherheit über die Entscheidung **welche Vorgänge** und **wie oft diese Vorgänge** ausgeführt werden sollen sowie auf **finanzielle Risiken aufgrund des Kapitalmarkts** zurückgeführt werden können. Im Rahmen dieser Arbeit werden finanzielle Risiken des Kapitalmarktes, wie beispielsweise Änderungen von Zinssätzen, Inflationsraten oder Lohnniveaus, nicht berücksichtigt. Der Verzicht der Berücksichtigung finanzieller Risiken im Rahmen der operativen Projektplanung anhand des Fallbeispiels des Rückbaus kerntechnischer Anlagen ist zum einen damit zu begründen, dass die Vorhersage adäquater Zinssätze, Inflationsraten etc. und deren zeitlichen Veränderungen im zeitlichen Verlauf von Großprojekten sehr schwer vorherzusagen sind (Bartels, 2009, S. 43). Diese Vorhersagen und die Berücksichtigung der dadurch möglichen Risiken könnten in auf dieser Arbeit aufbauenden Erweiterungen berücksichtigt werden. Zum anderen ist der Verzicht der Vorhersage finanzieller Risiken im Rahmen dieser Arbeit damit zu begründen, dass aufgrund der vergleichsweise hohen Restbetriebskosten (vgl. Kapitel 2.6.4) der Effekt von Zinssätzen zur Diskontierung kompensiert wird. Die Restbetriebskosten beeinflussen die zeitliche Ausführung der beim Rückbau kerntechnischer Anlagen notwendigen Vorgänge in der Regel mehr als beispielsweise diskontierte Auszahlungen oder sich ändernde Inflationsraten. Eine ausführliche Begründung des Verzichts auf die Diskontierung der Kosten ist in Kapitel 4.4.4 aufgeführt.

Somit werden in dieser Arbeit die folgenden Unsicherheiten in der Planung berücksichtigt:

- Unsicherheit bzgl. der Vorgangsdauern
- Unsicherheit über die Ausführung von Vorgängen (ob und welche Vorgänge ausgeführt werden)
- Unsicherheit über die mehrfache Wiederholung von Vorgängen.

2.6.6 Projektmanagement-Software zur Planung und zur Steuerung von Projekten

Ein wichtiger Bestandteil eines funktionsfähigen Projekt- und Multiprojektmanagements ist die Unterstützung des Managements durch Projektmanagement-Software (PMS). Software für das Projektmanagement kann verschiedene Aufgaben übernehmen. Beispielsweise kann sie als Planungsgrundlage dienen, das Wissen über ein Projekt zusammentragen oder das Projektcontrolling sowie die Kommunikation und Kollaboration der Projektbeteiligten während der Projektausführung unterstützen. Mit Hilfe einer PMS sollte es möglich sein, möglichst alle Projekt-Stakeholder zu adressieren und eine Vielzahl an Projektmanagementprozessen zu unterstützen (Ahlemann et al., 2008, S. 35). Der Austausch zwischen den Projektbeteiligten und weiteren Projekt-Stakeholdern ist ein essentieller Bestandteil für den Projekterfolg. Da im Rahmen dieser Arbeit der Planungsprozess im Vordergrund steht, wird im Folgenden näher auf die Projektmanagement-Software zur Planung und zur Steuerung von Projekten eingegangen. Solche Systeme werden auch als *Projektplanung- und Steuerungssysteme* (PPS-Systeme) bezeichnet. Dabei wird bereits in der Planungsphase ein Projekt umfassend geplant, indem möglichst alle Unsicherheiten und Änderungen antizipiert und berücksichtigt werden. Dazu sind umfangreiche Informationen über ein Projekt und zusätzliches Wissen bzw. Erfahrungen auf dem speziellen Gebiet eines konkreten Projekts erforderlich. Während der Projektausführung dient das

PPS-System dazu, die Umsetzung der Planungen effizient in die Realität zu unterstützen. Die Planung dient dabei als Anhaltspunkt für die umzusetzenden Aktionen und als Kontrolle, um das Projektziel nicht zu verfehlen. Trotz einer möglichst detaillierten Planung sind während der Projektausführung meist Anpassungen der Projektplanung durchzuführen, die in einem PPS-System dokumentiert werden können. (Ahlemann et al., 2008, S. 46ff.)

Projektmanagement-Software zur Projektplanung und –steuerung unterteilt sich in Single-PMS, Multi-PMS und Enterprise-PMS. Während Single-PMS die Planung und Steuerung von Einzelprojekten ermöglicht, sind Multi-PMS zur Verwaltung von Projektportfolios einsetzbar. Die Planung und Steuerung mehrerer Projekte in einem Multi-PMS richtet sich an Projektmanager, Projektcontroller, das Project Office und an Projektgremien. Um zusätzlich dazu die PM-Beteiligten aller internen Führungsebenen anzusprechen, werden Enterprise-PMS eingesetzt. Diese bieten ein breites Spektrum an Funktionalitäten von der operativen bis zur strategischen Entscheidungsebene. Durch die hierarchische Betrachtung eines Projekts bzw. eines Projektportfolios ist es sowohl Entscheidungsträgern auf strategischer Ebene als auch Managern auf operativer Ebene möglich, Weisungen zu erteilen. Die Planung kann dadurch unter strategischen Vorgaben operativ durchgeführt und für strategische Ebenen aggregiert dargestellt werden. (Ahlemann et al., 2008, S. 41ff.)

Im Rahmen dieser Arbeit steht die Planung für Einzelprojekte und somit Single-PMS im Vordergrund. Im Folgenden wird die durch eine Literatur- und Internetrecherche identifizierte Single-PMS-Planungssoftware genauer untersucht. Um verschiedene Software-Produkte zur Projektplanung bewerten zu können, werden diese den an sie gestellten Anforderungen der operativen und integrierten Termin- und Ablauf-, Ressourcen- und Kostenplanung sowie der Planung des Risikomanagements (vgl. Kapitel 2.6.1) mit dem Ziel der Kostenminimierung und der Berücksichtigung von Unsicherheiten gegenüber gestellt.

Zur Planung von Projekten werden häufig Standardprogramme zur Büroverwaltung, wie Microsoft Word oder Microsoft Excel eingesetzt (Hübner et al., 2018a). Darüber hinaus werden auch Softwareprogramme eingesetzt, die speziell zur Planung von Projekten entwickelt wurden und im Folgenden näher untersucht werden. Eine Literaturrecherche zu in der Planung von Großprojekten eingesetzten Optimierungsmethoden lieferte keine Ergebnisse. Der einzige Hinweis auf die Verwendung von Optimierungsmethoden zur Rückbauplanung ist im Endbericht des Co-ordination Network on Decommissioning of Nuclear Installations (CND) des Research and Technological Development (RTD) der Europäischen Kommission zu finden. Hierbei wird die Verwendung von Methoden, wie beispielsweise die des kritischen Pfads (vgl. Kapitel 3.5.2), angesprochen aber nicht näher ausgeführt (Europäische Kommission, 2008, S. 74). Detaillierte Ausführungen zu Planungsmethoden in Rückbauprojekten sind in Kapitel 3.4 aufgeführt.

Zur Überprüfung einsetzbarer Software und eingesetzter Methoden zur Planung von Großprojekten werden im Folgenden verschiedene einsetzbare Software-Produkte vorgestellt⁸⁴.

Microsoft Project

Microsoft Project ist eine von Microsoft entwickelte allgemeine Projektmanagement-Software. Es können Termin- und Ablaufpläne erstellt werden, die mit den dazu benötigten Ressourcen verknüpft sind. Kosten sind mit Microsoft Project nicht vollständig abbildbar. Der Vorteil von Microsoft Project liegt insbesondere in den guten Schnittstellen zu anderen Microsoft Office-Programmen. Allerdings hat sich gezeigt, dass diese Software zur integrierten Planung des Rückbaus kerntechnischer Anlagen nur eingeschränkt geeignet ist, da Microsoft Project lediglich

⁸⁴ Teile der folgenden Ausführungen wurden Hübner et al. (2018a) entnommen.

einen zuvor erdachten Plan visualisieren kann. Die Optimierung eines Plans ist nicht möglich.

Primavera P6

Dieses Software-System wurde von der Firma Oracle entwickelt und ist speziell für den Einsatz des Multiprojektmanagements geeignet. Von seinen Funktionalitäten ähnelt es sehr dem Programm Microsoft Project. Auch mit Primavera P6 kann lediglich eine erdachte Planung visualisiert werden. Ein optimierter Plan wird nicht berechnet.

CORA CALCOM

CORA CALCOM ist ein von Siempelkamp (NIS Ingenieurgesellschaft mbH) entwickeltes Software-System, welches entweder auf Basis einer Microsoft Access oder auf Basis einer ORACLE Datenbank nutzbar ist. CORA steht für Component Registration and Analysis und ist ein Modul zur kerntechnischen Entsorgungsplanung. Durch die Erfassung des abzubauenen Inventars können in der Entsorgungsplanung u. a. Massen, Aktivitätsniveaus, Verpackung oder Entsorgungswege geplant und dokumentiert werden. Auf Basis von CORA ermöglicht das Modul CALCOM (Calculation and Cost Management) die Planung und Kalkulation auf Basis der Inventardaten aus CORA. Dazu wird eine hierarchische Strukturierung des Stilllegungsprojektes, eine Aufstellung der Projekt- und Kostenstrukturen, die Ablauf- und Terminplanerstellung sowie die Ressourcenplanung über Schnittstellen an Microsoft Project oder Primavera ermöglicht.

CORA CALCOM ist somit insgesamt eine Software zur Datenaufnahme, um die Entsorgungsplanung in der Software selbst und eine detaillierte, robustere Termin- und Ablaufplanung sowie Ressourcenplanung in konventioneller Projektmanagement-Software wie Microsoft Project oder Primavera zu ermöglichen. Allerdings ist auch mit CORA CALCOM keine Optimierung

der Planung mit optimierenden Algorithmen möglich, da lediglich eine erdachte Planung visualisiert werden kann.

OpenRMS

OpenRMS ist ein ganzheitliches Managementsystem für die Stilllegung und den Rückbau von kerntechnischen Anlagen, wobei das derzeit verfügbare System als Basislösung verstanden wird, das den individuellen Anforderungen jedes Projekts angepasst werden muss. Insgesamt werden folgende Komponenten des Projektmanagements abgebildet:

- Genehmigungs- und Aufsichtsverfahren: Abwicklung der Genehmigungsprozesse mit den Behörden
- Rückbaudurchführung/Arbeitsscheine: Arbeitserlaubnis
- Reststoffmanagement: Verfolgung des Wegs des Reststoffs vom Rückbau bis zur Entlassung aus der Anlage
- Strahlenschutz: Dosisleistungsatlas, Kontaminationsatlas, Abgaben radioaktiver Stoffe, Umgebungsüberwachung, tätigkeitsbezogene Dosiserfassung
- Freimessungen der Gebäudestrukturen: Dokumentation des Freigabeverfahrens
- Dokumentation

Die Basistechnologie von OpenRMS ist OpenJET (JET = java based engineering tool). Dieses bietet folgende Vorteile:

- Zugrunde gelegte Standard-Technologien: Java, CORBA und XML,
- Unabhängigkeit von spezifischen Betriebssystemen, Hardwareplattformen und Datenbank-Management-Systemen
- Netzwerkfähigkeit im firmeneigenen Intranet
- Verbindung zu Komponenten von Fremdanwendungen, z. B. MS Office

OpenRMS ist lauffähig auf Servern mit den Betriebssystem UNIX oder Windows 2000/NT/XP. Zur Laufzeit wird eine Java Virtual Machine vorausgesetzt. Als Datenbank wird eine relationale Datenbank wie Oracle oder SQL Server empfohlen.

Prinzipiell ist nach Aussage des Herstellers eine individuelle Anpassung von OpenRMS an jedes Projekt möglich. Insgesamt bietet auch diese Software keine Möglichkeit der automatisierten Optimierung der Planung.

CERREX

Die IAEA hat für die Berechnung der Kosten des Rückbaus von Forschungsreaktoren nach eigenen Angaben eine Software namens CERREX (Cost Estimate for Research Reactor in Excel) entwickelt (IAEA, 2013). Wie der Name der Software bereits beschreibt, handelt es sich um ein Kalkulationswerkzeug, welches in Excel implementiert ist.

Mit Hilfe von CERREX können nach Angaben der IAEA die Gesamtkosten eines Rückbauprojekts bestimmt werden (IAEA, 2013). Das gesamte Rückbauprojekt wird entsprechend der sogenannten International Structure for Decommissioning Costing (ISDC) (OECD, 2012) in zahlreiche Teilschritte untergliedert. Für jeden dieser Teilschritte muss der Benutzer Inputdaten eingeben, mit denen die Gesamtkosten schließlich berechnet werden können.

Das Tool benötigt als Input verschiedene Kosten (fixed investment costs, periodic specific investment costs, fixed expenses, periodic specific expenses), die Dauer des Teilschritts und den jeweiligen Bedarf an unterschiedlichen Arbeitskräften (auxiliary worker, skilled worker, technician, administrative worker, engineer, manager, average worker). Zu den Arbeitskräften muss der Benutzer außerdem die Kosten pro Stunde und Arbeiter angeben. Zusätzlich wird noch ein prozentualer Zuschlagssatz (overheads) benötigt, um Fixkosten für den Rückbauprozess begleitende

Aufwände zu berücksichtigen. Aus diesen Daten werden die Gesamtkosten für einen bestimmten Rückbauschritt durch das Tool berechnet. Dies wird ausschließlich über Multiplikation und Addition der einzelnen Kostenarten bewerkstelligt. Aus den Kosten der einzelnen Rückbauschritte, die der Anwender im Tool ausgewählt hat, werden schließlich die Gesamtkosten für das Rückbauprojekt durch die Addition aller Einzelkosten ermittelt. Interdependenzen zwischen einzelnen Vorgängen spielen bei der Berechnung keine Rolle. Ebenso wird dem Benutzer die Entscheidung, in welcher zeitlichen Reihenfolge die einzelnen Rückbauschritte durchgeführt werden, überlassen. Kosteneinsparungen (besonders bei dem Zuschlagssatz) durch denkbare parallele Ausführung muss der Benutzer selbst ermitteln und z. B. durch einen geringeren prozentualen Zuschlag dem Tool mitteilen. Restbetriebskosten werden nicht berücksichtigt.

CERREX bietet zudem eine Übersicht über die anfallenden Massen der Abfälle. Dabei werden 30 verschiedene Arten von Anlagenteilen als potentielle Abfälle vorgeschlagen. Zusätzlich hat der Anwender die Möglichkeit, weitere Anlagenteile einzutragen. Diese Übersicht trägt jedoch nicht zur Kostenberechnung bei, sondern dient der Darstellung der vom Benutzer eingetragenen Werte bzgl. der Abfallmengen.

Insgesamt dient CERREX zur übersichtlichen Darstellung der Kosten und des Arbeitsaufwands einzelner Schritte des Rückbaus. Eine Minimierung der Kosten und insbesondere eine Optimierung hinsichtlich der zeitlichen Abfolge der einzelnen Rückbauschritte sind nicht möglich.

Schlussfolgerung der untersuchten Projektmanagement-Software

Ziel dieser Arbeit ist es, ein Projektplanungs- und -steuerungs-Instrument zu entwickeln, das bereits in der Planungsphase Unsicherheiten berücksichtigt und einen kostenoptimierten Rückbauplan berechnet. Die Planung sollte dabei die Arbeiten auf operativer Ebene berücksichtigen.

Insgesamt zeigt sich, dass es bereits einige Software-Produkte auf dem Markt gibt, die auch für die Planung des Rückbaus kerntechnischer Anlagen eingesetzt werden. Die Untersuchung der Software-Produkte Microsoft Project, Primavera P6, CORA CALCOM, OpenRMS sowie CERREX zeigt, dass diese Produkte verschiedene Eigenschaften sowie verschiedene Vor- und Nachteile besitzen. Die Anforderungen für die Planung kerntechnischer Rückbauprojekte wurden von keinem der untersuchten Software-Produkte erfüllt. Eine integrierte und operative Termin- und Ablauf-, Ressourcen- und Kostenplanung sowie eine Planung des Risikomanagements sind mit diesen Software-Produkten nicht möglich. Alle der untersuchten Produkte ermöglichen es lediglich, einen erdachten Plan zu visualisieren. Keines der untersuchten Software-Produkte bietet die Möglichkeit einer automatisierten Optimierung der Planung hinsichtlich der Projektkosten.

Die sich hieraus ergebene Forschungslücke wird mit Hilfe des in dieser Arbeit entwickelten Planungswerkzeugs zur integrierten und operativen Termin- und Ablauf-, Ressourcen- und Kostenplanung sowie zur Planung des Risikomanagements mit Hilfe optimierender Methoden geschlossen (vgl. Kapitel 4).

2.7 Schlussfolgerungen und sich ergebene Anforderungen an die Planung kerntechnischer Rückbauprojekte

Eine kerntechnische Anlage ist eine komplexe Anlage mit vielen Bauteilen und Komponenten (vgl. Kapitel 2.2). Je nach Funktionsweise und Reaktortyp, kann die Anlage unterschiedlich aufgebaut sein, was einen Einfluss auf den Rückbau hat. Insbesondere sind abhängig vom Anlagentyp unterschiedliche Bauteile vorhanden, die mit unterschiedlichen Verfahren rückgebaut und behandelt werden müssen. Des Weiteren sind abhängig vom Reaktortyp verschiedene Bereiche der Anlage unterschiedlich stark radioaktiv belastet.

Die in kerntechnischen Anlagen vorherrschende Radioaktivität einiger Bau- und Gebäudeteile stellt eine Besonderheit dar, die bereits in der Rückbauplanung und während des Rückbaus berücksichtigt werden muss. Wie in Kapitel 2.3 beschrieben wurde, hat die von radioaktiven Stoffen ausgehende ionisierende Strahlung gesundheitsgefährdende Auswirkungen auf den Menschen und die Umwelt. Aus diesem Grund sind alle Rückbautätigkeiten in einer kerntechnischen Anlage mit besonderer Vorsicht auszuführen.

Dies hat unter anderem Einfluss auf die verwendeten Technologien und Vorgehensweisen (vgl. Kapitel 2.4). Viele Materialien müssen vor ihrer Weiterbehandlung dekontaminiert werden. Bestimmte Vorgänge können auf unterschiedliche Weise, beispielsweise mit alternativ einsetzbaren Maschinen, ausgeführt werden. Der Einsatz unterschiedlicher Maschinen für die Ausführung eines Vorgangs führt zwar zum gleichen Ergebnis, deren Einsatz nimmt aber unter Umständen eine unterschiedliche Dauer in Anspruch und verursacht unterschiedliche Kosten.

Aufgrund der von radioaktiven Stoffen ausgehenden gesundheitlichen Gefährdung müssen die strengen gesetzlichen Vorgaben beim Rückbau

einer kerntechnischen Anlage berücksichtigt werden (vgl. Kapitel 2.5). Um das Betriebspersonal zu schützen, gilt das sogenannte Minimierungsgebot und um darüber hinaus einen sicheren Rückbau zu gewährleisten, müssen zuvor alle Rückbauaktivitäten hinreichend detailliert geplant und genehmigt werden. Aufgrund der Projektgröße, des Detaillierungsgrads der Planungsunterlagen und der radiologischen Anforderungen kann ein Genehmigungsverfahren mehrere Jahre dauern. Der Rückbau darf im Anschluss nur gemäß dem genehmigten Rückbauplan durchgeführt werden. Um den Rückbau nicht zu verzögern und um die durch eine Verzögerung entstehenden Kosten zu vermeiden, sollte die genehmigte Planung möglichst planmäßig ausführbar sein.

Da der Rückbau einer kerntechnischen Anlage ein Projekt darstellt, sollte dieser als solches geplant werden (vgl. Kapitel 2.6). Hierbei liegt der Fokus dieser Arbeit auf der integrierten und operativen Termin- und Ablauf-, Ressourcen- und Kostenplanung sowie der Planung des Risikomanagements. Insbesondere um eine Neuplanung und ein erneutes Genehmigungsverfahren zu vermeiden, sollte diese Planung hinsichtlich auftretender Unsicherheiten robust sein. Aufgrund der bisher für den Rückbau kerntechnischer Anlagen wenigen Erfahrungswerte existieren viele in der Planung zu berücksichtigende Unsicherheiten.

Da gemäß § 9a Abs. 1 AtG die Betreiber für die Kosten des Rückbaus der kerntechnischen Anlagen aufkommen müssen (Verursacherprinzip), ist es deren Ziel, die Kosten für den Rückbau zu minimieren. Dabei spielen zum einen Kosteneinsparungen bei Technologien sowohl für die Beschaffung als auch für die davon abhängigen Kosten, wie beispielsweise variable Ausführungskosten, eine Rolle. Zum anderen sollten die Restbetriebskosten bei der Planfindung und der Minimierung der Projektgesamtkosten berücksichtigt werden. Einflüsse auf die Projektdauer und die Projektkosten werden maßgeblich durch die eingesetzten Ressourcen verursacht und sollten durch den Time-Resource- sowie den Resource-Cost-Tradeoff ebenfalls in der Planung berücksichtigt werden.

Bisher in der Praxis eingesetzte Software zur Planung des Rückbaus kerntechnischer Anlagen kann diese Anforderungen nicht erfüllen. Aus diesem Grund wird in dieser Arbeit ein Planungswerkzeug entwickelt, welches unter der Berücksichtigung von Nebenbedingungen des Anwendungsfalls des Rückbaus kerntechnischer Anlagen und unter der Berücksichtigung von Unsicherheiten einen integrierten und operativen Termin- und Ablauf-, Ressourcen- und Kostenplan berechnet, der mit minimalen Kosten ausgeführt werden kann.

3 Projektplanungsmethoden zum Rückbau kerntechnischer Anlagen

Basierend auf den in Kapitel 2 beschriebenen Rahmenbedingungen für den Rückbau kerntechnischer Anlagen wird in diesem Kapitel in der Literatur eine Planungsmethode gesucht, welche die Anforderungen für die Rückbauplanung kerntechnischer Anlagen erfüllt.

Das Ziel der Rückbauplanung ist es, einen integrierten und operativen Termin- und Ablauf-, Ressourcen- und Kostenplan zu generieren, der den Rückbau mit minimalen Kosten realisieren kann und der unter der Berücksichtigung von Unsicherheiten während der Projektausführung möglichst planmäßig ausführbar ist. Das Ergebnis einer solchen Planung kann als *Schedule* beschrieben werden. Ein *Schedule* $S := (S_0, S_1, \dots, S_n, S_{n+1})$ ist ein Vektor von Startzeitpunkten $S_i \in \mathbb{R}_{\geq 0}$ für alle zu berücksichtigenden Vorgänge $i \in [0; n + 1]$, wobei $S_0 = 0$ gilt. (Bartels, 2009, S. 7) Im Folgenden werden die Begriffe *Plan* und *Schedule* synonym verwendet, wobei jeweils die von Bartels (2009, S. 7) aufgeführte Definition des Begriffs *Schedule* darunter verstanden wird.

Zur Bestimmung eines planmäßig ausführbaren und gleichzeitig kostenminimalen Schedules für den Rückbau kerntechnischer Anlagen werden computergestützte Programme und Rechenverfahren (sog. Methoden oder Algorithmen) benötigt. Um ein geeignetes Programm bzw. eine geeignete Methode zu finden, werden zunächst in Kapitel 3.1 die Ziele und Anforderungen an diese(s) im Kontext des Rückbaus kerntechnischer Anlagen erläutert. In einem weiteren Schritt werden in Kapitel 3.2 Begriffe und Hintergrundinformationen zum Verständnis der anschließend vorgestellten Planungsansätze beschrieben. Darauf aufbauend werden in Kapitel 3.3 allgemeine in der Literatur beschriebenen Projektplanungsmethoden

vorgestellt. Dies dient zum besseren Verständnis der in einer ausführlichen Literaturrecherche zu Planungsmethoden im Projektmanagement identifizierten, bisher verwendeten Planungsmethoden für Rückbauprojekte in Kapitel 3.4. Alle in der Literatur identifizierten und untersuchten Planungsmethoden werden mit den in Kapitel 3.1 aufgestellten Zielen und Anforderungen abgeglichen, um eine für den Anwendungsfall der Planung des Rückbaus kerntechnischer Anlagen passende Methode zu identifizieren oder gegebenenfalls Entwicklungsbedarf aufzuzeigen. Hierbei wird deutlich, dass die meisten der bisher für die Rückbauplanung verwendeten Planungsmethoden eine vollständige Information voraussetzen und eine deterministische Planung durchführen, in der keine Unsicherheiten berücksichtigt werden. Da dies nicht der Realität entspricht und vollständige Informationen im Anwendungsfall dieser Arbeit nicht vorliegen, werden zunächst in Kapitel 3.5 Planungsmethoden der Netzplantechnik vorgestellt, die eine Planung unter Unsicherheit ermöglichen und zur Modellierung von Vorgängen und deren Interaktionen einsetzbar sind. Darüber hinaus werden in Kapitel 3.6 Vorgehensweisen zur Planung und Projektausführung unter Unsicherheit vorgestellt. Abschließend werden in Kapitel 3.7 die zuvor aufgeführten Erkenntnisse zu Planungsmethoden für die Rückbauplanung kerntechnischer Anlagen zusammengefasst und es wird ein Ausblick auf die nötigen Anpassungen zur Entwicklung eines Planungswerkzeugs in Kapitel 4 vorgestellt.

3.1 Ziele und Anforderungen an eine Planungsmethode

Wie bereits beschrieben wurde, ist es das Ziel der Rückbauplanung für kerntechnische Anlagen, einen integrierten und operativen Termin- und Ablauf-, Ressourcen- und Kostenplan zu generieren, der den Rückbau mit minimalen Kosten realisieren kann und der unter der Berücksichtigung von Unsicherheiten während der Projektausführung möglichst planmäßig

ausführbar ist. Zur Identifikation einer für das Anwendungsproblem passenden Methode werden zunächst die Ziele detaillierter beschrieben, um daraus Anforderungen an eine zu identifizierende Planungsmethode zu formulieren. Durch einen Abgleich der Ziele und Anforderungen mit potentiell einsetzbaren Planungsmethoden können passende Methoden identifiziert werden.

Mit Hilfe einer Planungsmethode für den Anwendungsfall des Rückbaus kerntechnischer Anlagen soll bestimmt werden:

- welche Arbeitsvorgänge wann auszuführen sind,
- welche Techniken (z. B. Maschinen) und welches Personal aus ökonomischen Gesichtspunkten eingesetzt werden sollten,
- wann die ausgewählten Techniken einzusetzen sind,
- welche Kosten beim Rückbau insgesamt anfallen und
- mit welcher Projekt- bzw. Rückbaudauer zu rechnen ist.

Um Informationen für die aufgeführten Punkte liefern zu können, sind je Planungsmethode Anforderungen in folgenden Bereichen zu untersuchen:

- Planungsziel und Einflüsse auf dieses Ziel,
- Berücksichtigung von Unsicherheiten,
- Spezifische Rückbauvorgehen,
- Zeitliche Abhängigkeiten der Arbeitsschritte,
- Alternative Ausführungen und Technologien,
- Notwendige Ressourcen und Kapazitäten sowie
- Lagerung und Platzbedarf.

Gemäß dem Verursacherprinzip sind sowohl in Deutschland (vgl. Kapitel 2.5.2.1) als auch in den meisten Ländern weltweit (vgl. Kapitel 2.6.4) die Betreiber für den Rückbau ihrer kerntechnischen Anlagen und für die Finanzierung verantwortlich. Da die Betreiber wirtschaftlich handelnde

Unternehmen sind, steht die **Minimierung der Rückbaukosten** im Vordergrund der Planung (vgl. Kapitel 2.6.3).

Bis zum Projektabschluss des Rückbaus sind viele verschiedene Vorgänge auszuführen. Diese Vorgänge können in die Kategorien *Abbau- und Zerlegearbeiten* (vgl. Kapitel 2.4.1), *Dekontaminationsarbeiten* (vgl. Kapitel 2.4.2) sowie *Transport und Handhabung* eingeteilt werden (Bach et al., 2005). Ähnliche Einteilungen sind in Bartels (2009) oder Yanagihara et al. (2001) zu finden. Zwischen den Vorgängen bestehen **zeitliche Beziehungen bzw. Abhängigkeiten**. Beispielsweise dürfen viele Dekontaminationsarbeiten (Sandstrahlen, WASS etc. (vgl. Kapitel 2.4.2)) erst ausgeführt werden, wenn zuvor eine Einhausung errichtet wurde. Zeitliche Abhängigkeiten spielen beim Rückbau kerntechnischer Anlagen des Weiteren insbesondere aufgrund der zu vermeidenden Strahlenbelastung von Mitarbeitern eine wichtige Rolle (vgl. Kapitel 2.3.2). Da Mitarbeiter strahlenden Bauteilen so kurz wie möglich ausgesetzt sein sollen, um die Dosis zu reduzieren, soll die Bearbeitung solcher Bauteile möglichst zügig und **unterbrechungsfrei**, d. h. direkt (ohne Pausen) hintereinander, aber mit einer zeitlichen Begrenzung durchgeführt werden. Neben der Berücksichtigung der Reihenfolge aufgrund technischer oder organisatorischer Bedingungen soll daher allgemein von **unterbrechungsfreien Vorgängen** ausgegangen werden. Es wird des Weiteren die **Normalfolge** angenommen, d. h. dass ein Vorgang erst beginnen kann, sobald alle seine Vorgänger abgeschlossen sind.

Zur Ausführung der Vorgänge werden sogenannte **Ressourcen** (z. B. Maschinen oder Personal) benötigt. Einige der benötigten Ressourcen, z. B. spezielle Maschinen für Rückbau- und Dekontaminationsarbeiten (vgl. Kapitel 2.4), müssen speziell für das Rückbauprojekt beschafft werden. Somit liegt für diese Ressourcen **keine Beschränkung** vor. Allerdings müssen im Rahmen der Projektplanung unter der Berücksichtigung der Zielvorgabe der Minimierung der Projektkosten die Beschaffungskosten dieser Ressourcen berücksichtigt werden. Neben diesen nicht

beschränkten Ressourcen liegen auch Ressourcen vor, deren **Anzahl beschränkt** ist. Hierbei handelt es sich beispielsweise um den Reaktorkran oder das Eigenpersonal. Neben verschiedenen Qualifikationen kann zwischen dem Eigenpersonal und dem Fremdpersonal, d. h. dem Personal von Fremdfirmen, unterschieden werden. Der Betreiber einer kerntechnischen Anlage ist in der Regel bestrebt, das vorhandene Eigenpersonal auch in der Nachbetriebs- und Rückbauphase weiter zu beschäftigen bis dieses altersbedingt schrittweise in den Ruhestand entlassen wird (E.ON Kernkraft GmbH, 2008). Als weitere Art einer Ressource kann der zur Puffer- und Zwischenlagerung benötigte Lagerraum betrachtet werden. Beispielsweise sind Pufferspeicher vor einer Reststoffbehandlungsanlage notwendig, sodass während des gesamten Rückbaus ausreichend Material zur Bearbeitung verfügbar ist, ohne die Lagerkapazität zu überschreiten.

Einige Vorgänge können auf verschiedene Arten ausgeführt werden. Die verschiedenen Ausführungsalternativen werden auch als sogenannte **Modi** bezeichnet (Schultmann, 1998; Schwindt und Zimmermann, 2015a,b; Węglarz et al., 2011). Beispielsweise kann zur Ausführung eines Vorgangs entweder Eigen- oder Fremdpersonal eingesetzt werden. Aber auch verschiedene Technologien und Maschinen können zur Ausführung eines Vorgangs eingesetzt werden, wobei jeweils das gleiche Ergebnis erzielt wird (vgl. beispielsweise die verschiedenen Dekontaminations- oder Zerlegetechnologien in Kapitel 2.4). Je Modus können sowohl die Vorgangsdauer als auch die zur Ausführung des Vorgangs anfallenden Kosten variieren (vgl. Kapitel 2.6.3). Somit müssen folgende Tradeoffs berücksichtigt werden:

- **Time-Resource-Tradeoff:** Die Vorgangsdauern und die daraus resultierenden Startzeitpunkte der Vorgänge hängen von den eingesetzten Ressourcen ab (Bartels, 2009, S. 30; De Reyck et al., 1998; Demeulemeester et al., 2000).

- **Resource-Cost-Tradeoff:** Die je Modus verwendeten Ressourcen verursachen unterschiedliche Kosten (Bartels, 2009, S. 30).

Durch die Ausführung in unterschiedlichen Modi und die dadurch unterschiedlichen Dauern und Kosten der Vorgänge kann es vorkommen, dass Ausführungsdauern verkürzt werden können, sofern höhere Vorgangskosten in Kauf genommen werden. Dies wird auch als Time-Cost-Tradeoff bezeichnet (Bartels, 2009, S. 30). Da dieser allerdings nur aufgrund des Time-Resource- bzw. Resource-Cost-Tradeoffs auftreten kann (und nicht muss), wird der Time-Cost-Tradeoff nicht explizit in dieser Arbeit berücksichtigt. Ein Resource-Resource-Tradeoff kann im vorliegenden Planungsproblem ebenfalls auftreten. Hierbei werden lediglich alternative Ressourcen eingesetzt, wobei sich weder die Ausführungsdauer noch die Ausführungskosten eines Vorgangs unterscheiden (Bartels, 2009, S. 4, 29). Aus diesem Grund wird der Resource-Resource-Tradeoff im Folgenden durch den Mehr-Modus-Fall abgedeckt und nicht näher betrachtet.

Um das Zielkriterium der Minimierung der Kosten zu erreichen, sind alle **Faktoren, die Einfluss auf die Kosten nehmen**, in der Planung zu berücksichtigen. Je Ausführungsalternative eines Vorgangs können unterschiedliche Ausführungsdauern und unterschiedliche Kosten für den Einsatz von Ressourcen entstehen. Des Weiteren sind bei kerntechnischen Rückbauprojekten die sogenannten Restbetriebskosten als wesentlicher Kostenfaktor zu berücksichtigen (vgl. Kapitel 2.6.4).

Die Planung unterliegt insbesondere aufgrund fehlender Erfahrungswerte (Europäische Kommission, 2016a; OECD, 2016) vielen Unsicherheiten. Die Unsicherheiten resultieren insbesondere in ex-ante unbekanntem oder sich ändernden Vorgangsdauern und variierender Anzahl und Abfolge von Rückbauarbeiten (vgl. Kapitel 2.6.5.2). In diesem Zusammenhang sind auch Zyklen, beispielsweise die mehrfache Ausführung von Dekontaminationsvorgängen, als Form der Unsicherheit zu nennen. Insgesamt sollen daher in der Planung insbesondere die **Unsicherheiten hinsichtlich der Dauer der**

Vorgänge sowie der Wahrscheinlichkeit der Ausführung von Vorgängen (dies beinhaltet auch die mehrfache Ausführung eines Vorgangs und alternative Abfolgen) berücksichtigt werden. Ziel der Planung unter Unsicherheit ist es, einen hinsichtlich des Zielkriteriums und unter Berücksichtigung der Unsicherheiten planmäßig ausführbaren, d. h. **robusten**⁸⁵, **Plan** zu erstellen. Die planmäßige Ausführung des identifizierten Plans ist insbesondere deshalb wichtig, da Änderungen im Plan erneut genehmigt werden müssen (vgl. Kapitel 2.5.2.5). Da ein Genehmigungsverfahren vier bis fünf Jahre dauern kann (DATF, 2013, S. 6ff.), würde dies mit einer erheblichen Projektverzögerung und einer erheblichen Kostensteigerung (insbesondere aufgrund der zwischenzeitlich anfallenden Restbetriebskosten) einhergehen.

Um die in der Planung zu berücksichtigenden Unsicherheiten zu reduzieren und somit einen robusten Plan zu identifizieren, können **Erfahrungswerte in die Planung integriert werden**. Je mehr Erfahrungswerte in die Planung mit einfließen, desto weniger Unsicherheiten bestehen in der Planung. Bei der Berücksichtigung bestehender Erfahrungswerte in der Planung ist zu beachten, dass die Planung mit Hilfe einer Planungsmethode auch ohne die Existenz von Erfahrungswerten anwendbar ist (insbesondere wenn noch keine Erfahrungswerte existieren).

Zusammengefasst werden folgende Anforderungen an eine Methode zur Planung des Rückbaus kerntechnischer Anlagen gestellt:

⁸⁵ Zur Definition der Robustheit vgl. Kapitel 4.5.1.

Tabelle 3.1: Anforderungen an die Projektplanungsmethode

Übergeordnete Anforderungen	Untergeordnete Anforderungen
Minimierung der Projektkosten	Variable vorgangsbezogene Kosten
	Fixe (Beschaffungs-)Kosten
	Restbetriebskosten
Berücksichtigung von Vorgangsbeziehungen	Normalfolge als zeitliche Beziehungen
	Unterbrechungsfreie Abfolge von Vorgängen bei der Handhabung hochradioaktiver Stoffe
Berücksichtigung von Ressourcen	Teilweise unbeschränkte Ressourcen (Entscheidung über die Anzahl der Beschaffung, z. B. Sägen)
	Teilweise beschränkte Ressourcen (z. B. Eigenpersonal, Reaktorkran)
	Pufferlager
Mehr-Modus-Fall	Time-Resource-Tradeoff
	Resource-Cost-Tradeoff
Unsicherheiten	Unsichere Vorgangsdauern
	Wahrscheinlichkeit der Ausführung von Vorgängen (inkl. der mehrfachen Ausführung eines Vorgangs = Zyklen)
	Identifikation eines robusten Plans
	Integration von Erfahrungswerten in die Planung

Eine weitere relevante Anforderung an eine Methode zur Planung des Rückbaus kerntechnischer Anlagen ist, dass diese für Großprojekte, d. h.

für Projekte mit vielen Vorgängen, Abhängigkeiten und einsetzbaren Ressourcen, in vertretbarer Rechendauer einen Schedule berechnen kann.

3.2 Begriffe und Hintergründe

Um die in Kapitel 3 untersuchten Planungsmethoden beschreiben, verstehen und vergleichen zu können, werden im Folgenden zum Verständnis notwendige Begriffe und Hintergründe beschrieben. Zur Definition und Unterscheidung verschiedener Planungsprobleme wird zunächst ein Klassifizierungsschema aus der Literatur vorgestellt (Kapitel 3.2.1). Zur Beschreibung eines Planungsproblems wird des Weiteren häufig die sogenannte Regularität der Zielfunktion verwendet, welche in Kapitel 3.2.2 beschrieben wird. In den untersuchten Planungsproblemen werden verschiedene Arten von Ressourcen verwendet, auf die in Kapitel 3.2.3 näher eingegangen wird.

3.2.1 Klassifizierungsschema

Damit die vielen verschiedenen Projektplanungsmethoden mit unterschiedlichen Eigenschaften einfacher definiert und verglichen werden können, führten Brucker et al. (1999) ein Klassifikationsschema ein, welches von anderen Autoren übernommen wurde, z. B. Neumann et al. (2002) oder Schwindt und Zimmermann (2015a). Unter anderem sind in Schwindt und Zimmermann (2015a, S. xxi ff.) ausführlichere Informationen zum Klassifizierungsschema zu finden.

Die Beschreibungsform des Klassifikationsschemas basiert auf dem sogenannten Machine-Scheduling, d. h. der Belegungs- und Auslastungsplanung von Maschinen hinsichtlich eines bestimmten Zielkriteriums. Die Bezeichnung erfolgt mit Hilfe der drei Attribute $\alpha|\beta|\gamma$, der sogenannten

Drei-Feld-Notation⁸⁶ (Brucker et al., 1999, S. 5; Neumann, 1998, S. 7). Die im Folgenden beschriebenen Abkürzungen und deren Erklärungen der jeweiligen Attribute entsprechen der Notation von Brucker et al. (1999) sowie Schwindt und Zimmermann (2015a).

Das **Attribut α** wird zur Beschreibung der verwendeten Ressourcen⁸⁷ in einem Scheduling-problem verwendet. Insbesondere gibt dieses Attribut Auskunft über die Beschränktheit der verwendeten Ressourcen. Mögliche Werte und Bedeutungen von α sind u. a.:

PS	Scheduling Problem mit begrenzten erneuerbaren Ressourcen ⁸⁸
PSt	Scheduling Problem mit begrenzten, zeitlich veränderbaren, erneuerbaren Ressourcen
PS ∞	Scheduling Problem mit unbeschränkten erneuerbaren Ressourcen
PSc	Scheduling Problem mit zusätzlich begrenzten kumulativen Ressourcen ⁸⁹
MPS	Multi-mode Scheduling Problem mit begrenzten erneuerbaren und nicht-erneuerbaren Ressourcen ⁹⁰

Zusätzlich können diesem Attribut weitere Werte zur Kennzeichnung für die Anzahl und die Schranken der Ressourcen angehängt werden (Brucker

⁸⁶ Hierbei sind α , β und γ nicht mit der in Kapitel 2.2.1 beschriebenen α -, β - und γ -Strahlung zu verwechseln.

⁸⁷ Eine Definition des Begriffs Ressource und verschiedene Ressourcenarten werden in Kapitel 3.2.3 aufgeführt.

⁸⁸ Eine Definition des Begriffs Erneuerbare Ressource und entsprechende Beispiele werden in Kapitel 3.2.3 aufgeführt.

⁸⁹ Eine Definition des Begriffs Kumulative Ressource und entsprechende Beispiele werden in Kapitel 3.2.3 aufgeführt.

⁹⁰ Eine Definition des Begriffs Nicht-Erneuerbare Ressource und entsprechende Beispiele werden in Kapitel 3.2.3 aufgeführt.

et al., 1999). Da dies allerdings für die Vorstellung allgemeiner Scheduling Probleme im Folgenden nicht relevant ist, wird in dieser Arbeit darauf verzichtet.

Zur Beschreibung der Abhängigkeitstypen der Vorgänge sowie der Vorgangseigenschaften wird das **Attribut β** verwendet. β kann sich aus den folgenden β_1, \dots, β_n zusammensetzen, wobei von jedem β_1, \dots, β_n jeweils maximal ein Wert ausgewählt werden kann:

β_1	<i>temp</i>	Zeitbasierte Vorgangsbeziehungen, z. B. mit Wartezeit zwischen Vorgängen (sog. „generalized precedence constraints“)
	<i>prec</i>	Vorgangsbeziehungen zwischen Vorgängen, die lediglich deren Abfolge/Reihenfolge regeln
β_2	s_{ij}	Spezifische Warte- oder Umrüstzeit bei einem Wechsel von Vorgang i auf Vorgang j
	o	Keine spezifische Warte- oder Umrüstzeit bei einem Wechsel von Vorgang i auf Vorgang j
β_3	\bar{d}	Es existiert eine festgelegte Maximaldauer bis zum Projektabschluss (sog. Deadline)
	o	Es existiert keine festgelegte Maximaldauer bis zum Projektabschluss
β_4	<i>pmtn</i>	Unterbrechungen der Vorgänge sind zu jeder Zeit möglich (sog. „preemptive problem“)
	o	Unterbrechungen der Vorgänge sind zu keiner Zeit möglich (sog. „non-preemptive problem“)

Die Eigenschaften der Zielfunktion eines Scheduling Problems werden durch das **Attribut γ** beschrieben. Hierbei kann mit Hilfe des Attributs

entweder das Optimierungskriterium direkt oder es können geforderte Eigenschaften der Zielfunktion ohne eine spezifische Funktion beschrieben werden. Die im Folgenden aufgeführten Eigenschaften der Zielfunktionen beziehen sich jeweils auf ein Minimierungsproblem:

f	Allgemeine Zielfunktion, d. h. sowohl reguläre als auch nicht-reguläre Zielfunktion möglich ⁹¹
reg	Reguläre Zielfunktion
C_{max}	Dauer des gesamten Projekts
$-\sum c_i^F \beta^{C_i}$	Negativer Kapitalwert des Projekts, wobei β^{92} dem Diskontierungsfaktor, c_i^F dem Cashflow aus Vorgang i und C_i dem Endzeitpunkt von Vorgang i entspricht (Neumann et al., 2002)
$\sum c_k * \max r_{kt}$	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 ⁹³ Ressourcenverbrauchs je Zeiteinheit r_{kt}

⁹¹ Die Regularität von Zielfunktionen wird in Kapitel 3.2.2 beschrieben.

⁹² β ist nicht mit β_1, \dots, β_n sowie mit der β -Strahlung zu verwechseln. Auf eine alternative Bezeichnung wird an dieser Stelle verzichtet, damit die gleichen Bezeichnungen wie in Brucker et al. (1999) sowie in Schwindt und Zimmermann (2015a) aufgeführt und somit Verwechslungen vermieden werden.

⁹³ Mit Hilfe der Quadrierung des Ressourcenbedarfs je Zeiteinheit werden einzelne Verbrauchsspitzen besonders bestraft (vgl. Kapitel 3.3.5).

3.2.2 Regularität der Zielfunktion

Die Regularität der Zielfunktion beschreibt den grundsätzlichen Zusammenhang zwischen den Entscheidungsvariablen und dem Zielfunktionswert eines Scheduling Problems. Mit Hilfe dieser Beschreibung kann die Verwendbarkeit von Lösungsverfahren für das Planungsproblem bestimmt werden. Beispiele solcher Lösungsverfahren sind in u. a. Schultmann (1998, Kapitel 4.7) aufgeführt. Die Regularitätseigenschaft im Kontext von Scheduling Problemen wird im Folgenden erläutert.

Eine Funktion f , welche die Endzeitpunkte e der zu planenden Vorgänge i bestimmt, wird als reguläre Zielfunktion bezeichnet, wenn sie monoton wachsend für ein Minimierungsproblem oder monoton fallend für ein Maximierungsproblem ist. Somit wird eine reguläre Funktion f definiert als (Schultmann, 1998, S. 127; Vanhoucke, 2013, S. 111ff.; Zimmermann, 2001, S. 45):

Für die Schedules $S = \{e_1, \dots, e_n\}$ und $S' = \{e'_1, \dots, e'_n\}$ mit den Endzeitpunkten $e_i \leq e'_i$ für alle Vorgänge $i = 1, \dots, n$ gilt:

Für ein Minimierungsproblem: $f(S) \leq f(S')$

Für ein Maximierungsproblem: $f(S) \geq f(S')$

Diese Definition sagt aus, dass wenn bei einem Minimierungsproblem zwei mögliche Schedules generiert werden, wobei die Vorgänge in Schedule 1 jeweils früher oder gleichzeitig mit denselben Vorgängen in Schedule 2 beendet werden, der Zielfunktionswert von Schedule 1 immer höchstens so groß ist, wie der Zielfunktionswert von Schedule 2. Sofern die Kosten minimiert werden sollen und die Kosten durch eine reguläre Zielfunktion beschrieben werden, führt eine Verlängerung der Projektdauer gemäß der oben aufgeführten Definition keinesfalls zu einer Reduktion der Kosten (Bartusch, 1983). Dies bedeutet, dass bei einer regulären Zielfunktion,

welche die Projektkosten minimieren soll, generierte Schedules mit späteren Vorgangsendzeitpunkten mindestens so hohe Kosten aufweisen, wie ein Schedule mit früheren Vorgangsendzeitpunkten.

Da zeitbasierte Optimierungskriterien oftmals die Regularität enthalten, sind reguläre Zielfunktionen bei Scheduling Problemen häufig vertreten. Beispielsweise ist die Minimierung der Projektdauer eines der am meisten in der Literatur behandelte Zielkriterium (Bartels, 2009, S. 22; Vanhoucke, 2013, S. 112).

Sofern eine Zielfunktion die Bedingungen der Gleichungen $f(S) \leq f(S')$ (für ein Minimierungsproblem) oder $f(S) \geq f(S')$ (für ein Maximierungsproblem) erfüllt, wobei $e_i \geq e'_i$ gilt, wird diese Zielfunktion als anti-regulär bezeichnet (Zimmermann, 2001, S. 45). Da anti-reguläre Zielfunktionen für Scheduling Probleme nur von untergeordneter Bedeutung sind, wird im Folgenden nicht näher auf diese eingegangen. In Zimmermann (2001) sind nähere Informationen zu anti-regulären Zielfunktionen aufgeführt.

Eine Zielfunktion, die weder regulär noch anti-regulär ist, wird als nicht regulär bezeichnet. Beispielsweise sind Zielfunktionen, die mehrere Optimierungskriterien enthalten wodurch Zielkonflikte auftreten können (beispielsweise die gleichzeitige Minimierung der Kosten und Maximierung der Qualität), nicht reguläre Zielfunktionen. (Vanhoucke, 2013, S. 111ff.)

3.2.3 Ressourcenarten

Die Ausführung eines Vorgangs wird unter Zuhilfenahme von Ressourcen, wie beispielsweise Maschinen oder Mitarbeitern, ausgeführt. Allgemein wird zwischen *erneuerbaren*, *nicht-erneuerbaren*, *partiell-erneuerbaren*, *doppelt beschränkten* und *kumulativen Ressourcen* unterschieden:

- **Erneuerbare Ressourcen** besitzen eine beschränkte Verfügbarkeit je Periode/Zeitintervall und stehen in jeder neuen Periode/jedem neuen Zeitintervall, unabhängig von ihrer Verwendung im vergangenen Projektverlauf, erneut in gleicher Anzahl zur Verfügung. Die Verwendung einer erneuerbaren Ressource kann somit als Gebrauch, aber nicht als Verbrauch beschrieben werden. Als Beispiele sind hierbei Maschinen oder Personal zu nennen, deren Kapazität je Zeitschritt vergeben werden kann und deren Kapazität in jeder neuen Periode wieder uneingeschränkt zur Verfügung steht. (Smith-Daniels und Smith-Daniels, 1987; Schwindt, 1998; Neumann und Schwindt, 1999; Schirmer, 1999; Herroelen et al., 1999; Vanhoucke, 2013)
Als Sonderform dieses Ressourcentyps können auch erneuerbare Ressourcen mit zeitlich-veränderbaren Kapazitäten modelliert werden (Hartmann, 2015, S. 164 ff.).
- **Nicht-erneuerbare Ressourcen** besitzen eine beschränkte Verfügbarkeit für das gesamte Projekt. Dies bedeutet, dass ihre Kapazität während des gesamten Projekthorizonts einmalig zur Verfügung steht und nicht je Periode erneuert wird. Die Verwendung einer nicht-erneuerbaren Ressource kann somit als Verbrauch beschrieben werden. Es handelt sich hierbei beispielsweise um Material, Rohstoffmengen oder eine insgesamt für ein Projekt verfügbare Geldsumme. Da eine zeitliche Verschiebung von Vorgängen keinen Einfluss auf den Verbrauch hat (ohne die Berücksichtigung von Zinsen, Inflationen etc.), ist dieser Ressourcentyp in vielen Scheduling Problemen nicht entscheidungsrelevant. (Böttcher et al., 1999; Heilmann, 2000; Smith-Daniels und Smith-Daniels, 1987; Schwindt, 1998; Neumann und Schwindt, 1999; Schirmer, 1999; Herroelen et al., 1999; Vanhoucke, 2013)

- **Partiell-erneuerbare Ressourcen** stehen lediglich in bestimmten Perioden beschränkt zur Verfügung. Sie stellen eine Verallgemeinerung von erneuerbaren und nicht-erneuerbaren Ressourcen dar, da sie nur verwendet werden, wenn ein Vorgang in definierten Zeitschritten/Perioden ausgeführt wird. Die Kapazität ist somit an festgelegte Zeitschritte gebunden. Sofern die Kapazität einer Ressource für genau einen Zeitschritt festgelegt wird, kann eine erneuerbare Ressource modelliert werden. Wird die Menge von Zeitperioden auf alle möglichen Zeitschritte erweitert, kann dies als nicht-erneuerbare Ressource modelliert werden. Mitarbeiter mit flexiblen Arbeitszeitmodellen oder Arbeitszeitbegrenzungen über bestimmte Zeitfenster sind hierbei als Beispiele zu nennen. (Alvarez-Valdes et al., 2015; Böttcher et al., 1999; Heilmann, 2000; Smith-Daniels und Smith-Daniels, 1987; Schwindt, 1998; Neumann und Schwindt, 1999; Schirmer, 1999; Herroelen et al., 1999)
- **Doppelt beschränkte Ressourcen** sind sowohl in jeder Periode als auch über die gesamte Projektdauer hinweg beschränkt. Somit stellt diese Ressourcenart eine Mischform aus erneuerbaren und nicht-erneuerbaren Ressourcen dar. Beispielsweise können Grenzwerte für Emissionen sowohl je Zeitschritt als auch für das gesamte Projekt vorliegen. (Schultmann, 1998; Vanhoucke, 2013, S. 108) Da doppelt beschränkte Ressourcen formal auch als eine erneuerbare und eine nicht-erneuerbare Ressource darstellbar sind (Mika et al., 2005, S. 640; Kolisch, 1995; Talbot, 1982), werden diese im Folgenden nicht weiter berücksichtigt.
- **Kumulative Ressourcen** verändern ihre Verfügbarkeit im Zeitverlauf abhängig von der Beanspruchung während verschiedener Vorgänge. Ihre Verfügbarkeit kann je Periode sowohl erhöht als auch vermindert werden. Die Kapazität einer kumulativen Ressource kann sich zwar in jeder Periode erneuern, allerdings

hängt die neue Kapazität vom Gebrauch in vorangegangenen Perioden ab. Nicht verbrauchte Einheiten werden in zukünftige Zeitperioden transferiert. Beispielsweise kann ein Lager als kumulative Ressource modelliert werden. Für die Lagerhaltung können Ober- und Untergrenzen festgelegt werden, wobei die minimale Untergrenze nicht-negativ sein sollte. (Carlier und Moukrim, 2015; Chaleshtari und Shadrokh, 2013; Neumann et al., 2002; Schwindt, 2005)

Neben den aufgeführten Ressourcenarten gibt es weitere Arten von Ressourcen, die allerdings für diese Arbeit nicht relevant sind und daher nicht aufgeführt werden⁹⁴.

Da beim Rückbau kerntechnischer Anlagen insbesondere Maschinen und Mitarbeiter als Ressourcen eingesetzt werden, spielen im Folgenden erneuerbare Ressourcen eine wichtige Rolle. Aufgrund des Einsatzes von Mitarbeitern im Rahmen von Schicht- bzw. Einsatzplänen, müssen tariflich vereinbarte Erholungszeiten eingehalten werden. Des Weiteren dürfen Mitarbeiter nur einer gewissen Strahlendosis ausgesetzt werden. Beides spricht für eine Modellierung der Mitarbeiter als partiell erneuerbare Ressource. Da die Mitarbeiter im Falle einer hohen Strahlendosis allerdings auch an anderen Stellen der Baustelle einsetzbar sind, an denen keine oder nur eine geringe Strahlenbelastung besteht, wird auf die Modellierung von partiell erneuerbaren Ressourcen im Folgenden verzichtet. Neben den erneuerbaren Ressourcen sind in dieser Arbeit zudem (Zwischen-)Lager

⁹⁴ Beispielsweise unterscheidet Zimmermann (2001) bei der Mehrprojektplanung zwischen drei Typen von erneuerbaren Ressourcen: Schlüsselressourcen, Metaressourcen und Hilfsressourcen (Betriebsmittel). Darüber hinaus werden weitere Ressourcenarten, wie beispielsweise kontinuierliche Ressourcen zur Modellierung von Stoffströmen ohne diskrete Zahlenwerte, in Schwindt und Zimmermann (2015a) und Schirmer (1999) vorgestellt.

(modelliert als kumulative Ressourcen) und Kosten (modelliert als nicht-erneuerbare Ressourcen) relevant.

Die am häufigsten verwendeten und für diese Arbeit relevanten Scheduling Probleme werden im folgenden Kapitel 3.3 näher beschrieben.

3.3 Analyse allgemeiner deterministischer Projektplanungsmethoden⁹⁵

Methoden zur Berechnung von Schedules werden als Scheduling Probleme bezeichnet. Im Folgenden werden zunächst allgemeine Scheduling Probleme identifiziert und auf ihre Eignung hinsichtlich der in Kapitel 3.1 erarbeiteten Anforderungen analysiert. Der Fokus der untersuchten Scheduling Probleme liegt zunächst auf deterministischen Planungsaufgaben. Die Planung unter Unsicherheit wird in Kapitel 3.6 näher untersucht. Des Weiteren werden in der folgenden Analyse Methoden untersucht, die lediglich ein Projekt planen. Ansätze für Multi-Projekt Scheduling Probleme werden im Folgenden nicht betrachtet. Durch die Einführung von Dummy-Vorgängen⁹⁶ für den Projektstart und das Projektende können verschiedene Subprojekte in ein übergreifendes Gesamtprojekt überführt werden, sodass der Multi-Projektfall ausgeschlossen werden kann (Gonçalves et al., 2015). Zur Erklärung des Ziels und der Funktionsweise der verschiedenen Arten von Scheduling Problemen werden zunächst lediglich erneuerbare Ressourcen betrachtet. Eine Erweiterung mit anderen Ressourcenarten ist je Scheduling Problem möglich.

⁹⁵ Teile dieses Kapitels sind aus Hübner et al. (2017e) entnommen. Beispiele zum Verständnis der vorgestellten Projektplanungsmethoden werden in Hübner et al. (2017e) aufgeführt.

⁹⁶ Dummy-Vorgänge sind Scheinvorgänge ohne eine Ressourceninanspruchnahme und einer Dauer von 0.

Im Folgenden werden die in der Literatur am häufigsten verwendeten Scheduling Probleme jeweils zunächst als allgemeines Optimierungsproblem und anschließend als lineares Programm (LP: engl. „linear program“) oder als gemischt-ganzzahliges Programm (MIP: engl. „Mixed integer program“) beschrieben. Diese alternative Formulierung ermöglicht es, dass das jeweilige Scheduling Problem in eine Programmierumgebung transferiert und mit standardisierten Softwarepaketen gelöst werden kann. Die für dieses Kapitel notwendigen Notationen und Abkürzungen werden mit Hilfe des weit verbreiteten Resource-Constrained Project Scheduling Problem in Kapitel 3.3.1 vorgestellt. Eine Erweiterung der Zielfunktion dieses Problems mit diskontierten Kosten wird in Kapitel 3.3.2 beschrieben. In den Kapiteln 3.3.3 und 3.3.4 wird auf die Familie der Resource Investment Probleme eingegangen. Als weiteres Scheduling Problem wird das Resource Leveling Problem in Kapitel 3.3.5 beleuchtet. Zuletzt werden in Kapitel 3.3.6 mögliche Erweiterungen der vorgestellten Scheduling Probleme beschrieben.

3.3.1 Resource-Constrained Project Scheduling Problem

Das sogenannte *Resource-Constrained Project Scheduling Problem* (RCPSp) ist eines der in der Literatur am meisten behandelte Scheduling Problem (Gu et al., 2015, S. 300). Es wird wie jedes Scheduling Problem aus Vorgängen, Vorgangsbeziehungen und dem Ressourcenverbrauch je Vorgang gebildet. Im Gegensatz zu anderen Scheduling Problemen ist beim RCPSp je Ressource eine beschränkte Kapazität gegeben, die zur Bildung eines Schedules nicht überschritten werden darf (Gu et al., 20115, S. 300). Unter der Berücksichtigung dieser Ressourcenbeschränkung ist es das Ziel des RCPSp, einen Schedule zu finden, der eine minimale Projektdauer aufweist (Colak und Azizoglu, 2014, S. 777). Da in dieser Zielfunktion eine Verschiebung der Startzeitpunkte der Vorgänge in die Zukunft zu keiner Verbesserung des Zielfunktionswertes, d. h. eine Verkürzung der Gesamtprojektdauer, führen kann, stellt das RCPSp mit der Minimierung der

Projektdauer ein bekanntes Beispiel für eine reguläre Zielfunktion dar (Kolisch, 2015, S. 6).

Zur Lösung eines solchen Problems (und seiner Erweiterungen) stellten Blazewicz et al. (1983) fest, dass dieses als Verallgemeinerung der NP-schweren Job-Shop Probleme⁹⁷ ebenfalls den NP-schweren Optimierungsproblemen zugeordnet wird. Definitionen bzgl. der Komplexität von Lösungsalgorithmen werden in dieser Arbeit nicht beschrieben und können beispielsweise in Domschke und Drexl (2007, S. 126ff.) nachgelesen werden.

Zur einfacheren Vergleichbarkeit mit anderen Scheduling Problemen kann das RCPSP in das in Kapitel 3.2.1 vorgestellte Klassifizierungssystem eingeordnet werden. Unter der Verwendung von Ende-Start-Vorgangsbeziehungen und erneuerbaren Ressourcen ergibt sich die Klassifizierung $PS | prec | C_{max}$. In allgemeiner Form kann das RCPSP wie folgt formuliert werden (in Anlehnung an Vanhoucke, 2013, S. 114f.):

$$\min s_j \tag{3.1}$$

unter den Nebenbedingungen

$$s_i + d_i \leq s_j \quad \forall (i, j) \in E \tag{3.2}$$

$$\sum_{j \in S(t)} r_{j,k} \leq a_k^{max} \quad \forall k \in R; t = 1, \dots, \bar{T} \tag{3.3}$$

$$s_1 = 0 \tag{3.4}$$

$$s_j \in \mathbb{Z}_0^+ \quad j = 1, \dots, J \tag{3.5}$$

⁹⁷ Job-Shop Probleme charakterisieren die Planung mehrerer Jobs $\mathcal{J} = \{J_1, \dots, J_n\}$, d. h. auszuführender Vorgänge, mit mehreren Maschinen (Ressourcen) $\mathcal{M} = \{M_1, \dots, M_m\}$ in einer nicht vorgegebenen Reihenfolge (Neumann, 1998, S. 22).

i, j	Vorgänge $i, j \in 1, \dots, J$
J	Letzter Vorgang eines Schedules, i.d.R. ein Dummy-Vorgang, der weder eine Dauer noch eine Ressourcenanspruchnahme besitzt
E	Menge, in der alle Vorgänger-Nachfolger-Beziehungen enthalten sind
t	Mögliche Zeitpunkte $t \in 1, \dots, \bar{T}$
\bar{T}	Oberer Schranke für die Projektdauer, beispielsweise $\sum_{\forall j} d_j$
d_i	Dauer von Vorgang i ; es gilt: $d_i \in \mathbb{Z}_0^+$
$S(t)$	Vorgänge, die zum Zeitpunkt t ausgeführt werden
s_j	Startzeitpunkt von Vorgang j
R	Menge aller erneuerbaren Ressourcen
k	Erneuerbare Ressource $k \in R$
$r_{i,k}$	Ressourcenverbrauch/Ressourcenbedarf der Ressource $k \in R$ durch Vorgang i ; es gilt: $r_{i,k} \in \mathbb{Z}_0^+$
a_k^{max}	Maximale Kapazität von Ressource k ; es gilt: $a_k^{max} \in \mathbb{Z}^+$

Um die Problemformulierung zu vereinfachen, werden zwei sogenannte Dummy- oder Scheinvorgänge jeweils für die Quelle und die Senke des Projektplans eingefügt. Diese besitzen weder eine Dauer noch eine Ressourcenanspruchnahme (Zimmermann et al., 2006, S. 74). Im vorliegenden RCPSP wird der Vorgang 1 als Quelle des Projektplanungsproblems

definiert, der Vorgänger aller Vorgänge ist, die ansonsten keinen Vorgänger haben. Als Senke wird der Vorgang J definiert, der Nachfolger aller Vorgänge ist, die ansonsten keinen Nachfolger haben.

In der allgemeinen Form des RCPSp minimiert die Zielfunktion die Gesamtprojektdauer (3.1), indem der Startzeitpunkt des zuletzt ausgeführten Vorgangs J minimiert wird. Durch Nebenbedingung (3.2) wird die Einhaltung der Vorgangsbeziehungen aller Vorgänger-Nachfolger-Beziehungen der Menge E sichergestellt, indem der Startzeitpunkt s_j frühestens nach dem Startzeitpunkt s_i seines Vorgängers i zuzüglich dessen Vorgangsdauer d_i eingeplant werden darf. Die Einhaltung der Ressourcenzapazitäten a_k^{max} der Ressourcen $k \in R$ wird durch Nebenbedingung (3.3) gesichert. Hierzu wird zu jedem Zeitpunkt⁹⁸ $t \in 1, \dots, \bar{T}$ die Ressourceninanspruchnahme $r_{j,k}$ aller zu diesem Zeitpunkt aktiven Vorgänge j und je Ressource k mit dessen Ressourcenzapazität a_k^{max} verglichen. Der Startzeitpunkt des Projekts wird in Nebenbedingung (3.4) auf den Zeitpunkt 0 festgelegt. Die Startzeitpunkte aller Vorgänge müssen gemäß Nebenbedingung (3.5) positive (inkl. des Startzeitpunkts 0) und ganze Zahlen sein.

Das RCPSp kann als sogenanntes gemischt-ganzzahliges lineares Programm (MILP: engl. Mixed Integer Linear Program) dargestellt werden. Bei dieser Darstellung liegen die zu bestimmenden Variablen im ganzzahligen Wertebereich und sowohl die Zielfunktion als auch die Nebenbedingungen sind linear und stetig. Die Darstellung als MILP bietet sich insbesondere

⁹⁸ Im Folgenden wird in dieser Arbeit im Zusammenhang mit Schedulingproblemen und deren Lösungsverfahren von Zeitpunkten und nicht von Zeitintervallen gesprochen. Streng genommen handelt es sich um Zeitintervalle, da es ein stetiges Problem ist. Allerdings sind dann einige Erklärungen, z.B. zu Startzeitpunkten, schwieriger mit den Zeitintervallen zu erläutern. Daher sei an dieser Stelle angemerkt, dass die Zeitpunkte den Beginn des jeweils folgenden Zeitintervalls angeben. In dieser Arbeit werden im weiteren Verlauf Zeitintervalle von Tagen betrachtet, sodass der Startzeitpunkt $t = 1$ eines Vorgangs besagt, dass dieser zu Beginn des ersten Tages beginnt und mindestens für die Dauer dieses Zeitintervalls andauert.

deswegen an, da die zugrundeliegende Theorie ausführlich in der Literatur beschrieben ist und eine weite Verbreitung von Software zur Lösung von gemischt-ganzzahligen linearen Programmen besteht (Artigues et al., 2015, S. 17f.). Hierzu werden sogenannte Puls- bzw. Binärvariablen x_{jt} verwendet, die 1 sind, wenn Vorgang j zum Zeitpunkt t startet. Ansonsten gilt $x_{jt} = 0$ (Artigues et al., 2015, S. 19f.). Das gemischt-ganzzahlige lineare Programm des RCPSP lässt sich somit wie folgt formulieren (in Anlehnung an Schultmann, 1998, S. 114):

$$\min \sum_{t=1}^{\bar{T}} t * x_{j,t} \quad (3.6)$$

unter den Nebenbedingungen

$$\sum_{t=1}^{\bar{T}} x_{j,t} = 1 \quad j = 1, \dots, J \quad (3.7)$$

$$\sum_{t=1}^{\bar{T}} (t + d_i) * x_{i,t} \leq \sum_{t=1}^{\bar{T}} t * x_{j,t} \quad \forall (i, j) \in E \quad (3.8)$$

$$\sum_{j=1}^J r_{j,k} \sum_{\tau=t}^{t+d_j-1} x_{j,\tau} \leq a_k^{max} \quad \forall k \in R; t = 1, \dots, \bar{T} \quad (3.9)$$

$$x_{j,t} \in \{0, 1\} \quad \begin{matrix} j = 1, \dots, J; \\ t = 1, \dots, \bar{T} \end{matrix} \quad (3.10)$$

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

Da die Formulierung des RCPSP als MILP an die allgemeine Darstellung angelehnt ist, sind die Aussagen der Zielfunktion und Nebenbedingungen dieselben: Die Zielfunktion (3.6) minimiert die Gesamtprojektdauer. Hierzu

wird, wie oben beschrieben, zur zeit-indizierten Formulierung auf Basis von Puls-Variablen die Binärvariable $x_{j,t}$ eingeführt, die angibt, ob Vorgang j zum Zeitpunkt t startet oder nicht. Damit sichergestellt ist, dass ein Vorgang im Projektverlauf genau einmal gestartet wird, fordert die Nebenbedingung (3.7), dass die Binärvariable $x_{j,t}$ für jeden Vorgang j und alle Zeitpunkte $t = 1, \dots, \bar{T}$ genau einmal den Wert 1 annehmen darf. Wie in der allgemeinen Formulierung (3.2) bestimmt die Nebenbedingung (3.8) die Einhaltung der Vorgangsbeziehungen und Nebenbedingung (3.9) regelt wie Nebenbedingung (3.3) die Einhaltung der Kapazitätsbeschränkungen der Ressourcen. In Nebenbedingung (3.10) wird der Wertebereich der Entscheidungsvariablen $x_{j,t}$ auf die Werte 0 oder 1 beschränkt (binärer Wertebereich).

Einige MILP Formulierungen des RCPSP in der Literatur, wie beispielsweise Schultmann (1998), iterieren in der Zielfunktion und den Nebenbedingungen nicht über alle möglichen Zeitpunkte $t = 1, \dots, \bar{T}$, sondern lediglich zwischen dem frühesten und spätesten Startzeitpunkt⁹⁹ des jeweiligen Vorgangs. Dazu müssen zwar zuvor die frühesten und spätesten Startzeitpunkte berechnet werden, im Gegenzug wirkt sich die verringerte Anzahl an Iterationen positiv auf die Dauer zur Berechnung des MILP aus. Somit sind sowohl die oben aufgeführte Formulierung des RCPSP als auch die beschriebene Formulierung mit frühesten und spätesten Startzeitpunkten ohne Einschränkungen gültig. Zur einführenden Vorstellung der allgemeinen Scheduling Probleme wird die Komplexität möglichst gering gehalten. Aus diesem Grund wurde auf die zahlreichen möglichen Erweiterungen in der oben aufgeführten Formulierung verzichtet. Eine Erweiterung wird allerdings bei der Betrachtung des Multi-Mode Falls in Kapitel 3.3.6.1 exemplarisch angewendet.

⁹⁹ Ausführungen zu den frühesten und spätesten Startzeitpunkten sind in Kapitel 3.5.1 aufgeführt.

3.3.2 Resource-Constrained Project Scheduling Problem with Discounted Cashflows

Russell (1970) hat mit Projektplanungsproblemen der Kapitalwertmaximierung erstmals Zahlungsflüsse in der Projektberechnung betrachtet. Das RCPSP (vgl. Kapitel 3.3.1) kann auf diese Problemstellungen erweitert werden, indem die Zielfunktion zur Minimierung der Gesamtprojektdauer durch eine Zielfunktion zur Minimierung der Gesamtprojektkosten ersetzt wird. In diesem Fall sind die Vorgänge jeweils mit Ein- und Auszahlungen verknüpft. Diese Erweiterung des RCPSP wird als *Resource-Constrained Project Scheduling Problem with Discounted Cashflows* (RCPSPDC) bezeichnet.

Zur Berücksichtigung der zeitlichen Komponente der Zahlungsströme werden die Barwerte der jeweiligen Zahlungen verwendet, welche die Zahlungsflüsse auf den Projektbeginn diskontieren (Herroelen et al., 1997; Kolisch und Padman, 2001). Die Verwendung der Barwerte führt dazu, dass Auszahlungen, d. h. negative Zahlungsströme, so spät wie möglich und Einzahlungen, d. h. positive Zahlungsströme, so früh wie möglich eingeplant werden (Gu et al., 2015, S. 300). Diese Eigenschaft hat zur Folge, dass eine Zielfunktion zur Maximierung der diskontierten Zahlungsströme im Allgemeinen nicht regulär ist (Brucker et al., 1999, S. 22). Gemäß der Klassifizierung aus Kapitel 3.2.1 ist das RCPSPDC klassifiziert als $PS \mid prec, \bar{d} \mid - \sum c_i^F \beta^{c_i}$ (Brucker et al., 1999) und allgemein formuliert als (in Anlehnung an Vanhoucke, 2013, S. 118):

$$\max \sum_{j=1}^J cf_j * e^{-\alpha * s_j} \quad (3.11)$$

unter den Nebenbedingungen

$$s_i + d_i \leq s_j \quad \forall (i, j) \in E \quad (3.12)$$

$$\sum_{j \in S(t)} r_{j,k} \leq a_k^{max} \quad \forall k \in R; t = 1, \dots, \bar{T} \quad (3.13)$$

$$s_1 = 0 \quad (3.14)$$

$$s_j \leq D \quad (3.15)$$

$$s_j \in \mathbb{Z}_0^+ \quad j = 1, \dots, J \quad (3.16)$$

cf_j Zahlungsstrom, der mit dem jeweiligen Vorgang j einhergeht; $cf_j > 0$ entsprechen Einzahlungen, $cf_j < 0$ entsprechen Auszahlungen

α Verwendeter Diskontierungszinssatz in Prozent

D Zeitpunkt, zu dem das Projekt abgeschlossen sein muss (Deadline)¹⁰⁰

¹⁰⁰ Die Deadline D ist nicht mit der oberen Schranke \bar{T} für die Projektdauer zu verwechseln. Während die obere Schranke eine theoretische Schranke für die maximale Anzahl an Zeitschritten im Optimiermodell angibt, beispielsweise mit Hilfe von $\sum_{\forall j} d_j$, ist die Deadline eine vom Anwender vorgegebene maximal zulässige Dauer des Gesamtprojekts.

Als MIP sieht das RCPSPDC wie folgt aus (Gu et al., 2015, S. 302):

$$\min - \sum_{j=1}^J \sum_{t=1}^{\bar{T}} cf_j * e^{-\alpha * t} * x_{j,t} \quad (3.17)$$

unter den Nebenbedingungen

$$\sum_{t=1}^{\bar{T}} x_{j,t} = 1 \quad j = 1, \dots, J \quad (3.18)$$

$$\sum_{t=1}^{\bar{T}} (t + d_i) * x_{i,t} \leq \sum_{t=1}^{\bar{T}} t * x_{j,t} \quad \forall (i, j) \in E \quad (3.19)$$

$$\sum_{j=1}^J r_{j,k} \sum_{\tau=t}^{t+d_j-1} x_{j,\tau} \leq a_k^{max} \quad \forall k \in R; t = 1, \dots, \bar{T} \quad (3.20)$$

$$\sum_{t=1}^{\bar{T}} t * x_{J,t} \leq D \quad (3.21)$$

$$x_{j,t} \in \{0, 1\} \quad \begin{array}{l} j = 1, \dots, J; \\ t = 1, \dots, \bar{T} \end{array} \quad (3.22)$$

Im Vergleich zum RCPSP unterscheidet sich das RCPSPDC in der Zielfunktion (3.11) bzw. (3.17) sowie der Nebenbedingung (3.15) bzw. (3.21). Die Zielfunktion maximiert die Summe der anfallenden Zahlungsströme aller Vorgänge¹⁰¹, die abhängig von ihrem Startzeitpunkt mit dem Term $e^{-\alpha * t}$ auf den Zeitpunkt des Projektstarts abgezinst werden. Es wird angenommen, dass alle Zahlungen je Vorgang mit dessen Start fällig werden, wobei die Fälligkeit der Zahlungen auch angepasst werden kann.

¹⁰¹ Eine negative Summe, die minimiert wird, entspricht der Maximierung der Summe (vgl. u.a. Domschke und Drexl, 2007, S. 17).

Da jede zeitliche Verschiebung von Auszahlungen in die Zukunft aufgrund der Diskontierung zu einem besseren Zielfunktionswert führen würde, wird für das RCPSPDC eine extern vorgegebene zeitliche Obergrenze D festgelegt, sodass der Lösungsraum geschlossen und das Problem beschränkt ist. Aus diesem Grund wird die Nebenbedingung (3.15) bzw. (3.21) eingeführt (Vanhoucke, 2013, S. 188f.). Es sei angemerkt, dass die Projektdauer auch durch indirekte Kosten pro Zeitschritt oder durch Strafkosten für lange Projekte begrenzt werden kann. Allerdings handelt es sich dabei um eine andere Problemklasse, die in Kapitel 3.3.4 beschrieben wird.

3.3.3 Resource Investment Problem

Wie beim RCPSPDC werden auch beim *Resource Investment Problem* (RIP)¹⁰² die Kosten über den Projektzeitraum minimiert. Allerdings werden beim RIP nicht die direkt mit den Vorgängen verknüpften Zahlungsströme, sondern die Beschaffungs- bzw. Fixkosten über die gesamte Projektdauer optimiert. Da die Beschaffungs- bzw. Fixkosten mit der Anzahl bereitgestellter Ressourcen zusammenhängen, ist die maximale Ressourceninanspruchnahme zu einem Zeitpunkt/in einer Zeitperiode, d. h. die zu beschaffende Anzahl an Ressourcen, für die Optimierung entscheidungsrelevant (Vanhoucke, 2013, S. 153f.). Abzinsungen oder Inflationen werden in der Optimierung nicht berücksichtigt, sodass der Zeitpunkt der Ressourcenbeschaffung für das RIP irrelevant ist. Um eine Vorgangsabfolge sowie die unter monetären Gesichtspunkten optimale Ressourceninanspruchnahme bestimmen zu können, sollte ein gewünschter oder extern vorgegebener Fertigstellungstermin (Deadline) gegeben sein, da andernfalls die Projektdauer so weit gestreckt werden könnte, sodass Vorgänge mit der

¹⁰² Teilweise ist dieses Projektplanungsproblem auch unter dem Namen *Resource Availability Cost Problem* (RACP) bekannt (Demeulemeester, 1995). Allerdings hat sich in den vergangenen Jahren die Bezeichnung *Resource Investment Problem* (RIP) zunehmend durchgesetzt (Colak und Azizoglu, 2014, S. 777).

Verwendung gleicher Ressourcen niemals parallel ausgeführt werden (Möhring, 1984, S. 89f.).

Ebenso wie das RCPSp ist auch das RIP den NP-schweren Problemen zuzuordnen (Möhring, 1984, S. 94). Gemäß dem Klassifizierungsschema kann das RIP als $PS_{\infty} | prec, \bar{d} | \sum c_k * \max r_{kt}$ beschrieben werden (van Peteghem und Vanhoucke, 2015, S. 341). Da wie beim RCPSpDC die Verschiebung eines Vorgangs in die Zukunft zu geringeren Ressourcenbereitstellungskosten und damit zu einem niedrigeren Zielfunktionswert führen kann, ist die Zielfunktion des RIP nicht regulär.

Als allgemeines Projektplanungsproblem kann das RIP wie folgt formuliert werden (in Anlehnung an Ranjbar et al., 2008, S. 880 und Vanhoucke, 2013, S. 154):

$$\min \sum_{k \in R} c_k * a_k \quad (3.23)$$

unter den Nebenbedingungen

$$s_i + d_i \leq s_j \quad \forall (i, j) \in E \quad (3.24)$$

$$\sum_{j \in S(t)} r_{j,k} \leq a_k \quad \forall k \in R; t = 1, \dots, \bar{T} \quad (3.25)$$

$$s_1 = 0 \quad (3.26)$$

$$s_j \leq D \quad (3.27)$$

$$s_j \in \mathbb{Z}_0^+ \quad j = 1, \dots, J \quad (3.28)$$

$$a_k \in \mathbb{Z}_0^+ \quad \forall k \in R \quad (3.29)$$

c_k	Kosten je Einheit der Ressource k über den gesamten Projektzeitraum
a_k	Entscheidungsvariable für die Anzahl benötigter Einheiten der Ressource k (benötigte Kapazität der Ressource k)

Als MIP sieht das RIP wie folgt aus (in Anlehnung an Colak und Azizoglu, 2014, S. 779):

$$\min \sum_{k \in R} c_k * a_k \quad (3.30)$$

unter den Nebenbedingungen

$$\sum_{t=1}^{\bar{T}} x_{j,t} = 1 \quad j = 1, \dots, J \quad (3.31)$$

$$\sum_{t=1}^{\bar{T}} (t + d_i) * x_{i,t} \leq \sum_{t=1}^{\bar{T}} t * x_{j,t} \quad \forall (i, j) \in E \quad (3.32)$$

$$\sum_{j=1}^J r_{j,k} \sum_{\tau=t}^{t+d_j-1} x_{j,\tau} \leq a_k \quad \forall k \in R; t = 1, \dots, \bar{T} \quad (3.33)$$

$$\sum_{t=1}^{\bar{T}} t * x_{J,t} \leq D \quad (3.34)$$

$$x_{j,t} \in \{0, 1\} \quad j = 1, \dots, J; t = 1, \dots, \bar{T} \quad (3.35)$$

$$a_k \in \mathbb{Z}_0^+ \quad \forall k \in R \quad (3.36)$$

Die Zielfunktion (3.23) bzw. (3.30) minimiert die Beschaffungs- bzw. Fixkosten der Ressourcen, wobei die Kosten je Einheit und die benötigte Ressourcenanzahl berücksichtigt werden. Hierbei ist die benötigte Ressourcenanzahl a_k nicht wie beim RCPSP bzw. RCPSPDC extern vorgegeben, sondern ist im RIP eine Entscheidungsvariable, die in der Zielfunktion und in den Nebenbedingungen (3.25) bzw. (3.33) berücksichtigt wird. Da angenommen wird, dass die variablen Kosten für die Verwendung der Ressourcen unabhängig vom Verwendungszeitpunkt und der Anzahl verfügbarer Ressourcen¹⁰³ sind, sind sie für das RIP nicht entscheidungsrelevant und daher nicht im Modell aufgeführt. Lediglich die Vorhaltung einer bestimmten Ressourcenmenge, d. h. unabhängig davon ob die Ressource verwendet wird oder nicht, ist entscheidungsrelevant¹⁰⁴. Somit gilt die zu bestimmende Obergrenze an vorzuhaltenden Ressourcen a_k während der gesamten Projektdauer und ist nicht von einzelnen Zeitschritten abhängig (Vanhoucke, 2013, S. 154). Die weiteren Nebenbedingungen stimmen mit den Nebenbedingungen des RCPSP bzw. des RCPSPDC überein.

3.3.4 Resource Investment Problem with Tardiness Penalty

Eine Weiterentwicklung des RIP stellt das sogenannte *Resource Investment Problem with Tardiness Penalty*¹⁰⁵ (RIPT) dar. Hierbei wird eine Überschreitung der gesetzten Deadline gegen die Zahlung von Strafkosten erlaubt (Shadrokh und Kianfar, 2007, S. 88). Somit werden die Kosten bestehend aus den Beschaffungs- bzw. Fixkosten der Ressourcen aus dem RIP sowie den anfallenden Strafkosten bei der Überschreitung des

¹⁰³ Im RIP werden lediglich die Beschaffungs- und Fixkosten und keine variablen Kosten der Ressourcen berücksichtigt.

¹⁰⁴ Da Abzinsungen und Inflationen nicht berücksichtigt werden, ist der Zeitpunkt der Beschaffung nicht entscheidungsrelevant.

¹⁰⁵ Das Resource Investment Problem with Tardiness Penalty (RIPT) ist auch unter der Bezeichnung Resource Availability Cost Problem with Tardiness Penalty (RACPT) bekannt.

Fertigstellungstermins minimiert (van Peteghem und Vanhoucke, 2015, S. 340). Da das RIPT eine Weiterentwicklung des RIP ist, besitzt das RIPT ebenfalls eine nicht reguläre Zielfunktion und ist ebenfalls den NP-schweren Problemen zuzuordnen (Möhring, 1984). Klassifiziert wird das RIPT als $PS^\infty | prec, \bar{d} | \sum c_k * \max r_{kt} + p * \max \{0; s_j - D\}$. Formal kann dieses Problem formuliert werden als (in Anlehnung an van Peteghem und Vanhoucke, 2015, S. 341):

$$\min \sum_{k \in R} c_k * a_k + p * \max\{0; s_j - D\} \quad (3.37)$$

unter den Nebenbedingungen

$$s_i + d_i \leq s_j \quad \forall (i, j) \in E \quad (3.38)$$

$$\sum_{j \in S(t)} r_{j,k} \leq a_k \quad \forall k \in R; t = 1, \dots, \bar{T} \quad (3.39)$$

$$s_1 = 0 \quad (3.40)$$

$$s_j \in \mathbb{Z}_0^+ \quad j = 1, \dots, J \quad (3.41)$$

$$a_r \in \mathbb{Z}_0^+ \quad \forall k \in R \quad (3.42)$$

p Strafkosten für die Überschreitung von D je Zeiteinheit

Analog wird das lineare Programm wie folgt angepasst (in Anlehnung an Shadrokh und Kianfar, 2007, S. 89):

$$\min \sum_{k \in R} c_k * a_k + \sum_{t=D+1}^{\bar{T}} p * (x_{J,t} * (t - D)) \quad (3.43)$$

unter den Nebenbedingungen

$$\sum_{t=1}^{\bar{T}} x_{j,t} = 1 \quad j = 1, \dots, J \quad (3.44)$$

$$\sum_{t=1}^{\bar{T}} (t + d_i) * x_{i,t} \leq \sum_{t=1}^{\bar{T}} t * x_{j,t} \quad \forall (i, j) \in E \quad (3.45)$$

$$\sum_{j=1}^J r_{j,k} \sum_{\tau=t}^{t+d_j-1} x_{j,\tau} \leq a_k \quad \forall k \in R; \quad t = 1, \dots, \bar{T} \quad (3.46)$$

$$x_{j,t} \in \{0, 1\} \quad j = 1, \dots, J; \quad t = 1, \dots, \bar{T} \quad (3.47)$$

$$a_k \in \mathbb{Z}_0^+ \quad \forall k \in R \quad (3.48)$$

Das RIPT unterscheidet sich vom RIP lediglich in der Erweiterung der Zielfunktion durch die Addition der Strafkosten bei der Überschreitung der Deadline. Ebenso wie die Deadline D muss auch die Höhe der Strafkosten p je überschrittener Zeiteinheit vor der Projektplanung festgelegt werden. Durch hinreichend hoch gewählte Strafkosten im Verhältnis zu den Ressourcenfixkosten entspricht das Ergebnis des RIPT dem Ergebnis des RIP (van Peteghem und Vanhoucke, 2015, S. 340). Da die Deadline nicht strikt eingehalten, sondern gegen die Zahlung von Strafkosten überschritten werden darf, wird die Nebenbedingung (3.27) bzw. (3.34) des RIP nicht mehr benötigt.

3.3.5 Resource Leveling Project Scheduling Problem

Das *Resource Leveling Project Scheduling Problem* (RLPSP)¹⁰⁶ betrachtet wie das RIP den Ressourcenverbrauch unter der Einhaltung eines festgelegten Fertigstellungstermins. Allerdings hat das RLPSP zum Ziel, dass die Ressourcenverwendung über den Projektverlauf möglichst ausgeglichen geplant wird, um Spitzenverbräuche, Leerlauf und Sprünge in der Ressourcenauslastung zu vermeiden (Vanhoucke, 2013, S. 122). Die in den Kapiteln 3.3.1 bis 3.3.4 betrachteten Projektplanungsprobleme berücksichtigen die Verbrauchsmuster der erneuerbaren Ressourcen nicht in der Optimierung, sondern lesen sie lediglich als Ergebnis der Optimierung ab und verwenden sie zur Darstellung des Berechnungsergebnisses. Da das Verbrauchsmuster bei den bisher vorgestellten Projektplanungsproblemen nicht Gegenstand der Optimierung ist, können sehr unregelmäßige Verbrauchsmuster entstehen.

Um einen Schedule mit einem regelmäßigen Verbrauchsmuster zu bestimmen, wird in der Zielfunktion des klassischen RLPSP die Summe des quadrierten Ressourcenverbrauchs je Zeiteinheit über alle Ressourcen minimiert (Demeulemeester, 1995, S. 1591; Rieck und Zimmermann, 2015, S. 362; Rieck et al., 2012, S. 28). Hierbei werden mit Hilfe der Quadrierung des Ressourcenbedarfs je Zeiteinheit einzelne Verbrauchsspitzen besonders bestraft. Neben der klassischen Zielfunktion des quadrierten Ressourcenverbrauchs existieren weitere Messgrößen für einen ausgeglichenen Ressourcenverbrauch, die im Folgenden nicht näher beschrieben werden, aber in Vanhoucke (2013, S. 123) nachgelesen werden können. Im klassischen RLPSP werden keine Ressourcenbeschränkungen berücksichtigt (Demeulemeester, 1995, S. 1591; Vanhoucke, 2013, S. 122f.), allerdings können diese mit geringem Aufwand als jeweilige Nebenbedingung aus den vorangegangenen Scheduling Problemen übernommen werden.

¹⁰⁶ Das RLPSP wird teilweise auch mit RLP abgekürzt.

Gemäß dem in Kapitel 3.2.1 eingeführten Klassifizierungsschema wird das RLPSP als $PS^\infty \mid prec, \bar{d} \mid \sum c_k \sum r_k^2$ beschrieben (Rieck und Zimmermann, 2015, S. 365). Des Weiteren wird das RLPSP der Klasse der NP-schweren Problemen zugeordnet (Rieck und Zimmermann, 2015, S. 362) und die Zielfunktion des RLPSP ist nicht regulär (Brucker et al., 1999, S. 22).

Als allgemeines Projektplanungsproblem kann das RLPSP wie folgt formuliert werden (in Anlehnung an Brucker et al., 1999, S. 22 und Vanhoucke, 2013, S. 122f.):

$$\min \sum_{k \in R} ct_k \sum_{t=1}^D \left(\sum_{j \in S(t)} r_{j,k} \right)^2 \quad (3.49)$$

unter den Nebenbedingungen

$$s_i + d_i \leq s_j \quad \forall (i, j) \in E \quad (3.50)$$

$$s_1 = 0 \quad (3.51)$$

$$s_j \leq D \quad (3.52)$$

$$s_j \in \mathbb{Z}_0^+ \quad j = 1, \dots, J \quad (3.53)$$

$$a_k \in \mathbb{Z}_0^+ \quad \forall k \in R \quad (3.54)$$

ct_k Kosten der erneuerbaren Ressource k je Zeiteinheit

Die klassische Formulierung der Zielfunktion des RLPSP, d. h. das Produkt aus den Ressourcenkosten je Zeitschritt und der Summe der quadrierten Ressourcenverbräuche über alle zu einem Zeitschritt ausgeführten Vorgänge, ist im Rahmen dieser Arbeit zur Darstellung des RLPSP

ausreichend. Weitere Zielfunktionen werden in Rieck et al. (2012), Rieck und Zimmermann (2015, S. 362) sowie Vanhoucke (2013, S. 122) beschrieben und in Hübner et al. (2017e) zusammenfassend gegenübergestellt.

Mit Hilfe der klassischen Zielfunktion lässt sich das gemischt-ganzzahlige Programm wie folgt aufstellen (in Anlehnung an (Rieck et al., 2012, S. 30)):

$$\min \sum_{k \in R} ct_k \sum_{t=1}^D (z_{k,t})^2 \quad (3.55)$$

unter den Nebenbedingungen

$$\sum_{t=1}^{\bar{T}} x_{j,t} = 1 \quad j = 1, \dots, J \quad (3.56)$$

$$\sum_{t=1}^{\bar{T}} (t + d_i) * x_{i,t} \leq \sum_{t=1}^{\bar{T}} t * x_{j,t} \quad \forall (i, j) \in E \quad (3.57)$$

$$\sum_{j=1}^J r_{j,k} \sum_{\tau=t}^{t+d_j-1} x_{j,\tau} \leq z_{k,t} \quad \forall k \in R; t = 1, \dots, \bar{T} \quad (3.58)$$

$$\sum_{t=1}^{\bar{T}} t * x_{j,t} \leq D \quad (3.59)$$

$$x_{j,t} \in \{0, 1\} \quad \begin{matrix} j = 1, \dots, J; \\ t = 1, \dots, \bar{T} \end{matrix} \quad (3.60)$$

$$z_{kt} \in \mathbb{Z}_0^+ \quad \forall k \in R; t = 1, \dots, \bar{T} \quad (3.61)$$

z_{kt} Ressourcenbedarf der erneuerbaren Ressource k zum Zeitpunkt t

Im Vergleich zur allgemeinen Formulierung werden eine zusätzliche Nebenbedingung und eine zusätzliche Entscheidungsvariable eingeführt. Ähnlich wie die Nebenbedingung (3.33) des RIP, bei der die benötigte Ressourcenanzahl a_k einer Ressource k über den gesamten Projektzeitraum festgelegt ist, soll beim RLPSP in Nebenbedingung (3.58) die benötigte Ressourcenanzahl pro Zeiteinheit z_{kt} eingehalten werden (Demeulemeester, 1995, S. 1591). Darüber hinaus sind die anderen Nebenbedingungen bereits aus den Erklärungen der zuvor vorgestellten Scheduling Probleme bekannt.

Da die Zielfunktion (3.55) nicht linear ist, können die MIP-Solver viele effiziente Algorithmen zur Lösung linearer Probleme nicht verwenden (Rieck und Zimmermann, 2015, S. 373ff.; Rieck et al., 2012, S. 31). Dies hat zur Folge, dass die Rechendauern im Gegensatz zu den in den Kapitel 3.3.1 bis 3.3.4 vorgestellten Problemen viel höher ist. Aus diesem Grund werden in der Literatur Umformungen des Problems vorgestellt (vgl. u. a. Rieck und Zimmermann (2015) sowie Rieck et al. (2012)), welche die Rechendauer verkürzen.

3.3.6 Erweiterungen der Scheduling Probleme

Die in den Kapiteln 3.3.1 bis 3.3.5 vorgestellten Scheduling Probleme sind jeweils in ihrer Grundform dargestellt, um die Funktionsweisen und deren Unterschiede zu erläutern. Alle diese Scheduling Probleme können durch spezifische Eigenschaften erweitert werden. Im Folgenden werden die für diese Arbeit relevanten Erweiterungen um verschiedene Ausführungsvarianten sowie um weitere Vorgangsbeziehungen beschrieben. Die Erweiterungen werden im Folgenden exemplarisch am klassischen RCPSP angewendet, da das RCPSP das in der Literatur am häufigsten untersuchte und verwendete Scheduling Problem ist (Gu et al., 2015, S. 300). Alle vorgestellten und für diese Arbeit relevanten Erweiterungen sind auch

auf die anderen in dieser Arbeit vorgestellten Scheduling Probleme übertragbar.

3.3.6.1 Der Multi-Mode Schedulingfall

Bisher wurde angenommen, dass Vorgänge jeweils nur auf eine bestimmte Art ausgeführt werden können. In der Realität besteht allerdings die Möglichkeit, einen Vorgang auf unterschiedliche Art und Weise auszuführen. Beispielsweise können zur Dekontamination von Wänden verschiedene Verfahren eingesetzt werden, die alle zu dem gleichen Ergebnis führen (vgl. Kapitel 2.4.2). Eine Ausführungsvariante wird als *Modus* (oder *Mode*) und die Projektplanung von Vorgängen mit jeweils mehreren möglichen Modi (oder auch *Modes* genannt) als sogenanntes Multi-Mode (oder multi-modales) Scheduling Problem bezeichnet (Schultmann, 1998; Schwindt und Zimmermann, 2015a,b; Węglarz et al., 2011).

Im Folgenden wird die Anwendung des Multi-Mode Scheduling anhand der Erweiterung des RCSP beschrieben. Anwendungen des Multi-Mode Falls auf andere Scheduling Probleme und alternative Zielfunktionen sind u. a. in Mika et al. (2015, S. 478ff.) aufgeführt.

Das RCSP unter der Berücksichtigung des Multi-Mode-Falls wird als *Multi-Mode Resource-Constrained Project Scheduling Problem* (MRCSP) bezeichnet (Mika et al., 2015, S. 445). Die Erweiterung bezieht sich auf die Wahl des auszuführenden Modus je Vorgang und hat dadurch einen wesentlichen Einfluss auf die Entscheidungsrelevanz von nicht-erneuerbaren und doppelt beschränkten Ressourcen. Beim RCSP ohne die Berücksichtigung mehrerer Modi ist die Betrachtung von nicht-erneuerbaren Ressourcen nicht notwendig, da der Verbrauch dieses Ressourcentyps über den gesamten Projektzeitraum festgelegt und somit von der Schedulingentscheidung unabhängig ist. Aufgrund der unterschiedlichen Modi wird der Verbrauch von nicht-erneuerbaren Ressourcen nun entscheidungsrelevant, da in unterschiedlichen Modi unterschiedliche

Verbräuche an nicht-erneuerbaren Ressourcen bestehen können. Da doppelt beschränkte Ressourcen, wie in Kapitel 3.2.3 beschrieben wurde, durch erneuerbare und nicht-erneuerbare Ressourcen ersetzt werden können (Mika et al., 2005, S. 640), werden diese im Folgenden nicht näher betrachtet.

Die Wahl des Modus je Vorgang muss zusätzlich zur Wahl seiner Startzeit getroffen werden. Hierbei stellt der jeweilige Ausführungsmodus eine spezifische Kombination aus Vorgangsdauer und Ressourcenverbrauch je Vorgang dar. Das bedeutet, dass ein Vorgang je Modus eine unterschiedliche Dauer und eine unterschiedliche Ressourceninanspruchnahme besitzen kann (Mika et al., 2015, S. 445f.).

Das MRCPSP wird analog zum RCPSP als $MPS \mid prec \mid C_{max}$ klassifiziert (Mika et al., 2015, S. 445). Als Erweiterung des RCPSP ist auch das MRCPSP den NP-schweren Problemen zuzuordnen (Mika et al., 2005, S. 640). Aufgrund der geringen Unterschiede des MRCPSP zum RCPSP und der Relevanz im anwendungsbezogenen Kontext in dieser Arbeit, wird auf die allgemeine Formulierung des MRCPSP verzichtet und es wird direkt die MIP-Formulierung vorgestellt (in Anlehnung an Coelho und Vanhoucke, 2015, S. 493):

$$\min \sum_{t=ES_j}^{LS_j} t * x_{j,1,t} \quad (3.62)$$

unter den Nebenbedingungen

$$\sum_{m=1}^{M_j} \sum_{t=ES_j}^{LS_j} x_{j,m,t} = 1 \quad j = 1, \dots, J \quad (3.63)$$

$$\begin{aligned} \sum_{m=1}^{M_i} \sum_{t=ES_i}^{LS_i} (t + d_{i,m}) * x_{i,m,t} \\ \leq \sum_{m=1}^{M_j} \sum_{t=ES_j}^{LS_j} t * x_{j,m,t} \end{aligned} \quad \forall (i, j) \in E \quad (3.64)$$

$$\sum_{j=1}^J \sum_{m=1}^{M_j} r_{j,k,m} \sum_{\tau=\max\{t-d_{j,m}; ES_j\}}^{\min\{t-1; LS_j\}} x_{j,m,\tau} \leq a_k^{\max} \quad \forall k \in R; \quad (3.65)$$

$$t = 1, \dots, \bar{T}$$

$$\sum_{j=1}^J \sum_{m=1}^{M_j} q_{j,k,m} \sum_{t=ES_j}^{LS_j} x_{j,m,t} \leq a_k^{\max} \quad \forall k \in R^n \quad (3.66)$$

$$j = 1, \dots, J;$$

$$x_{j,m,t} \in \{0, 1\} \quad m = 1, \dots, M_j; \quad (3.67)$$

$$t = 1, \dots, \bar{T}$$

m Ausführungsvariante (Modus) eines Vorgangs aus der Menge M_j aller möglichen Modi für Vorgang j

M_j Anzahl der verschiedenen möglichen Ausführungsvarianten (Modi) für Vorgang j

ES_j	Frühestmöglicher Startzeitpunkt von Vorgang j
LS_j	Spätestmöglicher Startzeitpunkt von Vorgang j
$x_{j,m,t}$	Binäre Entscheidungsvariable: 1 falls Vorgang j in Modus m zum Zeitpunkt t begonnen wird, 0 sonst
$d_{j,m}$	Vorgangsdauer des Vorgangs j in Modus m
$r_{j,k,m}$	Ressourceninanspruchnahme einer erneuerbaren Ressource $k \in R$ je Zeitpunkt t durch Vorgang j in Modus m
R^n	Menge aller nicht-erneuerbaren Ressourcen
$q_{j,k,m}$	Ressourceninanspruchnahme einer nicht-erneuerbaren Ressource $k \in R^n$ je Zeitpunkt t durch Vorgang j in Modus m

Zur Problemlösung müssen die Zielfunktion sowie die Nebenbedingungen nicht über alle möglichen Zeitpunkte $t = 1, \dots, \bar{T}$ iteriert werden. Sofern zuvor die frühesten und spätesten Startzeitpunkte je Vorgang j berechnet wurden, kann auch zwischen dem frühesten und spätesten Startzeitpunkt des jeweiligen Vorgangs iteriert werden. Die dadurch verringerte Anzahl an Iterationen wirkt sich positiv auf die Dauer zur Berechnung des MILP aus. Auch die in den Kapiteln 3.3.2 bis 3.3.5 vorgestellten Scheduling Probleme können auf diese Weise erweitert werden.

Die Erweiterung jedes Vorgangs auf mehrere Modi erstreckt sich nicht auf die Quelle (Dummy-Vorgang 1) und die Senke (Dummy-Vorgang J), da deren Ressourcenverbrauch und Dauer per Definition 0 ist. Die aufgrund der Einführung der Modi nun entscheidungsrelevanten nicht-erneuerbaren

Ressourcen werden als zusätzliche Nebenbedingung (3.66) eingeführt, um die Einhaltung der Kapazität a_k^{max} der nicht-erneuerbaren Ressourcen $k \in R^n$ sicherzustellen. Da sich nicht-erneuerbare Ressourcen im Gegensatz zu erneuerbaren Ressourcen nicht je Zeiteinheit erneuern, ist die Kapazität über den gesamten Projektzeitraum beschränkt und wird daher im Gegensatz zu Nebenbedingung (3.65) nicht über $1, \dots, \bar{T}$ iteriert.

Insgesamt ist die Einführung des Multi-Mode-Falls eine wichtige Erweiterung, um die in dieser Arbeit vorgestellten alternativen Ausführungsmöglichkeiten je Vorgang abbilden zu können. Gleichzeitig erhöhen sich dadurch die Komplexität und die Rechendauer.

3.3.6.2 Allgemeine Vorgangsbeziehungen

Bei den bisherigen Ausführungen wurde als Vorgangsbeziehung von der Ende-Start-Beziehung zwischen Vorgänger und Nachfolger ausgegangen, wobei keine Verzögerungen zwischen der Ausführung zugelassen werden. Darüber hinaus existieren weitere Vorgangsbeziehungen, die als *Generalized Precedence Relations* (GPR) (dt.: verallgemeinerte Vorgangsbeziehungen) bezeichnet werden (Elmaghraby und Kamburowski, 1992, S. 1245). Beispielsweise sind neben der Ende-Start-Beziehung auch Start-Start-, Ende-Ende- oder Start-Ende-Beziehungen möglich (Vanhoucke, 2013, S. 18ff.). Außerdem können minimale und maximale Verzögerungen (time lags) definiert werden, die beispielsweise bei einer Ende-Start-Beziehung eine minimal oder maximal einzuhaltende Zeitspanne zwischen dem Ende des Vorgängers und dem Start des Nachfolgers definieren.

Gemäß den Anforderungen zur Planung kerntechnischer Rückbauprojekte (vgl. Kapitel 3.1) sind als zeitliche Beziehungen zwischen Vorgängen einerseits die Normalfolge und andererseits eine unterbrechungsfreie Abfolge von Vorgängen bei der Handhabung hochradioaktiver Stoffe relevant. Aus diesem Grund ist die Erweiterung der vorgestellten Scheduling Probleme für den Anwendungsfall um sogenannte

no-wait Vorrangbeziehungen mit einer maximalen Verzögerung von 0 Zeiteinheiten (sogenannter *zero time lag*) notwendig.

Unter der Anwendung von GPR zur Berücksichtigung von *no-wait* Nachfolgerbeziehungen auf das RCPSp entspricht die Klassifizierung der Form $PS | temp | C_{max}$ und das gemischt-ganzzahlige Programm ergibt sich als (in Anlehnung an Neumann et al., 2002, S. 24):

$$\min \sum_{t=1}^{\bar{T}} t * x_{j,t} \tag{3.68}$$

unter den Nebenbedingungen

$$\sum_{t=1}^{\bar{T}} x_{j,t} = 1 \quad j = 1, \dots, J \tag{3.69}$$

$$\sum_{t=1}^{\bar{T}} (t + l_{j,i}) * x_{i,t} \leq \sum_{t=1}^{\bar{T}} t * x_{j,t} \quad \forall (i, j) \in E^{nw} \tag{3.70}$$

$$\sum_{j=1}^J r_{j,k} \sum_{\tau=t}^{t+d_j-1} x_{j,\tau} \leq a_k^{max} \quad \forall k \in R; t = 1, \dots, \bar{T} \tag{3.71}$$

$$x_{j,t} \in \{0, 1\} \quad \begin{matrix} j = 1, \dots, J; \\ t = 1, \dots, \bar{T} \end{matrix} \tag{3.72}$$

E^{nw} Menge, in der alle *no-wait* Vorrangbeziehungen enthalten sind

$l_{i,j}$ Minimale zeitliche Verzögerung zwischen dem Startzeitpunkt von Vorgang i und dem Startzeitpunkt von Vorgang j

Zur Darstellung von GPR schlagen Bartusch et al. (1988) die Darstellung in standardisierter Form vor, indem Verzögerungszeitspannen durch Subtraktion oder Addition ineinander umgewandelt werden (Bartusch et al., 1988, S. 205; Bianco und Caramia, 2015, S. 78). Aus diesem Grund ist in Nebenbedingung (3.70) lediglich eine minimale Verzögerung $l_{j,i}$ zwischen den Startzeitpunkten eines Vorgangs j und seinem Vorgänger i dargestellt, die eine maximal zulässige Verzögerung, welche gleich 0 gesetzt werden kann, ausdrückt. Einerseits kann eine Ende-Start-Beziehung durch die Subtraktion der Vorgangsdauer des Vorgängers in eine Start-Start-Beziehung umgeformt werden. Andererseits können maximale Verzögerungen l_{ij}^{max} zwischen zwei Vorgängen i und j , wobei i der Vorgänger und j der Nachfolger ist, durch negative minimale Verzögerungen ersetzt werden, d. h. $l_{ij}^{max} := -l_{ij}^{min} \geq 0$. Hieraus ergibt sich $S_i - S_j \leq l_{ij}^{max}$. Es ist somit in einer MIP-Formulierung möglich, durch die Negierung der GPR-Nebenbedingung eine minimale in eine maximale Verzögerungsforderung umzuwandeln (Neumann et al., 2002, S. 4). Eine ausführliche Darstellung der Umwandlungen zwischen minimalen und maximalen Verzögerungen sowie die beispielhafte Darstellung eines Vorgangsknotennetzplans unter der Verwendung von GPR ist in Neumann et al. (2002, S. 9) zu finden.

Ebenso wie die Erweiterung des RCPS (oder andere Scheduling Probleme) um den Multi-Mode-Fall führt auch die Erweiterung durch GPR zu einer Steigerung der Komplexität des Scheduling Problems (Elmaghraby und Kamburowski, 1992, S. 1245).

3.4 Analyse bisher verwendeter Planungsansätze für Rückbauprojekte¹⁰⁷

Im Rahmen dieser Arbeit soll eine Planung für kerntechnische Rückbauprojekte auf operativer Ebene stattfinden (vgl. Kapitel 2.6.1). Aus diesem Grund konzentriert sich die Literaturrecherche in diesem Kapitel auf in der Rückbauplanung angewendete operative Planungsmethoden (vgl. Kapitel 3.4.1). Um zu überprüfen, ob auch Ansätze der strategischen Rückbauplanung auf die operative Rückbauplanung kerntechnischer Anlagen übertragen werden können, werden in Kapitel 3.4.2 zusätzlich strategische Planungsansätze für Rückbauprojekte untersucht. Eine detaillierte Untersuchung und Beschreibung der identifizierten Methoden sind in Hübner et al. (2017a) zu finden.

3.4.1 Operative Planungsansätze für Rückbauprojekte

Obwohl bereits viele operative Projektplanungsprobleme in der Theorie ausführlich erforscht und weiterentwickelt wurden (vgl. Kapitel 3.3), existieren nur wenige Arbeiten, die diese Projektplanungsprobleme und entsprechende Lösungsverfahren in der Praxis anwenden (Bartels, 2009, S. 2). Ein Grund dafür ist unter anderem, dass für praxisrelevante Problemstellungen in der Regel nur mit einem individuell zugeschnittenen Lösungsverfahren eine zufriedenstellende Lösung gefunden werden kann (Bartels, 2009, S. 2). Die Erstellung eines solchen Lösungsverfahrens ist in der Regel sehr aufwendig, da hierzu eine aufwendige Analyse der spezifischen Struktureigenschaften des realen Problems sowie die Berücksichtigung spezieller Nebenbedingungen notwendig sind. Daher werden zunächst operative Planungsansätze untersucht, die für die Planung des Rückbaus kerntechnischer Anlagen konzipiert wurden. Die identifizierten

¹⁰⁷ Teile dieses Kapitels sind aus Hübner et al. (2017a) entnommen.

Planungsansätze werden jeweils den in Kapitel 3.1 identifizierten Anforderungen gegenübergestellt.

Bartels (2009) hat für die Rückbauplanung kerntechnischer Anlagen einen Algorithmus entwickelt, der in einem ressourcenbeschränkten Projektplanungsproblem mit multiplen Ausführungsmodi bereits eine Grundlage zur Rückbauplanung bietet. Das entwickelte Projektplanungsproblem ist lediglich für die deterministische Projektplanung ausgelegt und berücksichtigt keine Unsicherheiten während der Projektausführung. Mit der Zielsetzung der Minimierung der Rückbaukosten wird bereits eine wesentliche Anforderung aus Kapitel 3.1 erfüllt. Allerdings basiert die Minimierung der Kosten lediglich auf der Minimierung der diskontierten Auszahlungen beim Einsatz von Eigen- oder Fremdpersonal. Demgegenüber werden variable Kosten weiterer erneuerbarer Ressourcen, Beschaffungskosten sowie die Restbetriebskosten nicht in der Kostenbetrachtung berücksichtigt. Das von Bartels aufgestellte MRCPSPDC berücksichtigt zeitliche Beziehungen als Normalfolge, allerdings keine unterbrechungsfreien Vorgangsabfolgen (Bartels, 2009, S. 57). Ein großer Vorteil des von Bartels aufgestellten Modells ist die Berücksichtigung von kumulativen Ressourcen. Diese werden allerdings vereinfachend so modelliert, dass für jeden Einlagevorgang ein korrespondierender Auslagerungsvorgang existieren muss (Bartels, 2009, S. 52). Dies ist eine Annäherung zur Modellierung von Pufferlagern, allerdings noch keine realistische Darstellung. Denn Bauteile können nach deren Demontage gebündelt ins Pufferlager verbracht, aber auch einzeln aus dem Pufferlager entnommen werden oder umgekehrt. Auch erneuerbare Ressourcen werden berücksichtigt, allerdings sind diese alle beschränkt und es wird im Rahmen der Planung keine Entscheidung über die Anzahl zu beschaffender Ressourcen getroffen. Ein weiterer Nachteil besteht darin, dass für jeden Vorgang lediglich zwei Modi zur Vorgangsausführung verwendet werden, die entweder die Durchführung mit internem Personal oder die Beauftragung eines externen Dienstleisters vorsehen (Bartels, 2009, S. 27f., 54). Hierbei ist die Ausführung mit

internem Personal immer günstiger als die Ausführung mit externem Personal (Bartels, 2009, S. 55). Zusätzlich wird bei diesen beiden Modi lediglich der Resource-Resource-Tradeoff berücksichtigt, d. h. die Modi unterscheiden sich nicht in der Ausführungsdauer (Bartels, 2009, S. 54). Sowohl der Time-Resource- als auch der Resource-Cost-Tradeoff werden von Bartels nicht berücksichtigt. Darüber hinausgehende Modi, beispielsweise die Ausführung von Vorgängen mit verschiedenen Maschinen, Geräten oder Verfahren (vgl. u. a. Kapitel 2.4) werden ebenfalls nicht berücksichtigt. Des Weiteren betrachtet das MRCSPDC zwar den gesamten Rückbau einer kerntechnischen Anlage, wobei allerdings detaillierte Pläne bis auf Vorgangsebene nicht berücksichtigt werden, da das Planungsproblem mit Zeitscheiben von drei Monaten sehr aggregiert modelliert ist (Bartels, 2009, S. 50) und damit fast schon der strategischen Planung zuzuordnen ist. Bartels selbst spricht davon, dass die mittel- und kurzfristige Planung Gegenstand zukünftiger Forschungsarbeiten sind (Bartels, 2009, S. 50). Insgesamt erfüllt das von Bartels entwickelte Projektplanungsmodell nicht alle Anforderungen und kann aufgrund des strukturellen Aufbaus nur mit einer erheblichen Steigerung der Komplexität erweitert werden (z. B. die Berücksichtigung von Unsicherheiten, der allgemeine Multi-Mode-Fall, kleinere Zeitscheiben, Beschaffungskosten etc.). Aus diesem Grund kann dieses Modell im weiteren Verlauf der Arbeit nicht verwendet werden.

Neben Bartels (2009) haben sich auch Yanagihara et al. (2001) und Iguchi et al. (2004) mit der Planung des Rückbaus kerntechnischer Anlagen beschäftigt. Yanagihara et al. (2001) beschreiben ein Datenmodell mit dem Namen COSMARD, mit dessen Hilfe eine Work Breakdown Structure erstellt werden kann. Die Autoren schreiben, dass mit Hilfe der sogenannten *Program Evaluation and Review Technique* (PERT) auf Basis von Erfahrungswerten ein kostenminimaler Rückbauplan erstellt wird. Eine genaue Beschreibung, wie die PERT-Methode angewendet wird und wie der Lösungsalgorithmus funktioniert, wird weder in Yanagihara et al. (2001)

noch in einer anderen Quelle genau beschrieben. Iguchi et al. (2004) bauen auf COSMARD auf und beschreiben das Planungs- und Unterstützungssystem DEXUS, welches speziell für die Behandlung ingenieurwissenschaftlicher Fragestellungen beim Rückbau des Reaktors Fugen in Japan entwickelt wurde. DEXUS ermöglicht vor allem die 3D-Visualisierung sowie die Planung mit Hilfe von virtueller Realität, um insbesondere die beim Rückbau anfallenden radioaktiven Reststoffe zu quantifizieren, den radioaktiven Bestand der Anlage zu visualisieren, die Mitarbeiterauslastung zu evaluieren und um Sicherheitsüberprüfungen durchzuführen (Iguchi et al., 2004, S. 367). In Bezug auf die Rückbauplanung kerntechnischer Anlagen kann DEXUS als ingenieurwissenschaftliches Unterstützungswerkzeug allerdings nicht als kostenoptimierendes Planungsinstrument im Sinne dieser Arbeit verstanden werden. Eine Optimierung der Reihenfolge auszuführender Vorgänge unter der Berücksichtigung von Vorgängerbeziehungen, Beschränkungen der Anzahl einsetzbarer Techniken und Personal sowie hinsichtlich eines Zielkriteriums wird mit DEXUS nicht adressiert. Somit ist weder das Planungsmodell von Yanagihara et al. (2001) noch das Planungsinstrument DEXUS von Iguchi et al. (2004) für die Problemstellung dieser Arbeit anwendbar.

Insgesamt geben die untersuchten operativen Methoden für die Rückbauplanung kerntechnischer Anlagen einen guten Anhaltspunkt zur Lösung der Problemstellung dieser Arbeit, allerdings können diese aufgrund der jeweils genannten Nachteile nicht die in Kapitel 3.1 aufgeführten Anforderungen abdecken. Aus diesem Grund wird die Recherche auf operative Projektplanungsansätze für allgemeine Rückbauprojekte ausgeweitet und ebenfalls den Anforderungen aus Kapitel 3.1 gegenübergestellt.

Die meisten Planungsansätze für Rückbauprojekte fokussieren sich bei der Planung der Startzeitpunkte der Vorgänge auf die Minimierung der Gesamtprojektdauer. Beispielsweise beinhalten die Planungsansätze von Volk (2017), Schultmann (1998) sowie von Schultmann und Rentz (2001, 2002) Methoden des Operations Research, um die Gesamtprojektdauer bei

gegebenen deterministischen Informationen bezüglich der Dauer zu minimieren. In den genannten Ansätzen wird das Scheduling Problem MRCPSP angewendet.

Volk (2017) berücksichtigt Unsicherheiten in der Planung des Rückbaus von Nichtwohngebäuden, indem sie verschiedene Szenarien simuliert, diese mit Hilfe eines MRCPSP löst und zuletzt eine robuste Rückbaustrategie unter den berechneten, alternativen Plänen auswählt (Volk, 2017, S. 160). Das MRCPSP minimiert die Projektdauer, berücksichtigt verschiedene Modi, die Normalfolge als zeitliche Beziehungen zwischen den Vorgängen sowie beschränkte erneuerbare und nicht-erneuerbare Ressourcen (Volk, 2017, S. 206f.). Des Weiteren führt sie in ihrem MRCPSP sowohl eine zeitliche Beschränkung einzelner Vorgangsdauern als auch eine zeitliche Beschränkung für das gesamte Projekt ein. Insgesamt berücksichtigt Volk (2017) zwar Unsicherheiten und mehrere Modi, allerdings werden weitere wichtige Eigenschaften, insbesondere die Minimierung der Projektkosten, nicht beschränkte Ressourcen und allgemeine Vorgangsbeziehungen, nicht berücksichtigt.

Schultmann (1998) beschäftigt sich ebenfalls mit der Rückbauplanung von Nichtwohngebäuden. Sein Planungsansatz beinhaltet ein klassisches MRCPSP (vgl. Kapitel 3.3.6.1), welches die Gesamtprojektdauer minimiert. Die Minimierung der Rückbaukosten, allgemeine Vorgangsbeziehungen, nicht beschränkte Ressourcen und Unsicherheiten werden nicht berücksichtigt. Somit ist dieser Planungsansatz ebenfalls für das Planungsproblem dieser Arbeit nicht geeignet.

Im Folgenden werden auf Schultmann (1998) sowie auf Schultmann und Rentz (2001, 2002) aufbauende Projektplanungsansätze untersucht, um zu prüfen, ob deren Erweiterungen die Anforderungen dieser Arbeit erfüllen. Schultmann und Sunke (2007a) berücksichtigen zusätzlich zu Schultmann (1998) sowie zu Schultmann und Rentz (2001, 2002) die Recyclingoptionen verschiedener Bauteile beim Rückbau. In einem weiteren Ansatz von

Schultmann und Sunke (2007b) wird das RCPS für ein Multi-Projektproblem erweitert, sodass die operative mit der strategischen Planung verbunden wird. Mit Hilfe einer Umformulierung der Zielfunktion passen Schultmann und Sunke (2006) das ursprüngliche Modell so an, dass die Verwertungsquote rückgebauter Bauteile maximiert wird. Sunke (2009) spricht in ihrer Arbeit zwar die Optimierung des Gebäuderückbaus mit Hilfe von Methoden an, führt allerdings keine konkreten Methoden auf. Seemann (2003) beschreibt eine Weiterentwicklung des Modells von Schultmann (1998), indem er diesem Simulationen von Sortiervorgängen, von Schritten zur Wiederaufbereitung und von Recyclingtechnologien hinzufügt. Hierbei findet keine Erweiterung auf die Minimierung der Kosten oder die Berücksichtigung von Unsicherheiten statt. Alle vorgestellten Erweiterungen decken im Vergleich zu den Projektplanungsansätzen von Schultmann (1998) sowie von Schultmann und Rentz (2001, 2002) keine weiteren relevanten Anforderungen aus Kapitel 3.1 ab, sodass diese Ansätze für den Anwendungsfall dieser Arbeit nicht geeignet sind.

Neben der Minimierung der Projektdauer bezieht das von Kühlen (2017) entwickelte Modell zusätzlich lokale Immissionen in Form von Lärm, Staub und Erschütterungen als Zielkriterien in die Entscheidungsfindung mit ein. Allerdings werden in diesem Modell u. a. keine Projektgesamtkosten in der Zielfunktion des Modells minimiert und es werden keine no-wait Vorgangsbeziehungen und Unsicherheiten berücksichtigt.

Spengler (1994, 1998) formuliert ein MILP zur mathematischen Optimierung des Rückbaus komplexer Produkte und Komponenten. Als Fallbeispiel optimiert er den Rückbau einer Mikrowelle mit Hilfe eines Single-Mode Kostenminimierungsproblems. Mit Hilfe eines fuzzy linear program (FLP) berücksichtigt Spengler (1998) Unsicherheiten in seiner Rückbauplanung. Der Multi-Mode-Fall wird hierbei nicht berücksichtigt. Des Weiteren werden Beschaffungs- sowie Restbetriebskosten nicht berücksichtigt und das Projektplanungsproblem ist nur für eine relativ geringe Anzahl an Vorgängen konzipiert.

Ein MILP zur Planung des operativen Rückbaus von Gebäuden verwenden Aidonis et al. (2008), wobei sie sich die Alternativen des Abrisses und des selektiven Rückbaus anschauen und vergleichen. In der Zielfunktion werden die Einnahmen aus dem Verkauf von Rückbauabfällen abzüglich der variablen und fixen Kosten des Rückbaus maximiert. Dies entspricht ebenfalls nicht den in Kapitel 3.1 genannten Anforderungen (beispielsweise der Minimierung der Rückbaukosten oder der Berücksichtigung von Unsicherheiten während des Rückbaus).

Einige Autoren verwenden Simulationsmodelle, um den Rückbau zu planen. Hierbei stützen sich die Massenfluss-Modelle von Akbarnezhad et al. (2014) sowie von Cheng und Ma (2013) auf Informationen sogenannter Building Information Models (BIM), welche detaillierte Informationen über das rückzubauende Gebäude beinhalten. Akbarnezhad et al. (2014) stellen ein Grundmodell zur Evaluierung und zum Vergleich verschiedener alternativer Rückbaustrategien und deren Einfluss auf die Projektkosten, den Energiebedarf und den CO₂-Fußabdruck vor. Hierbei werden szenariobasierte Sensitivitätsanalysen deterministischer Kapitalwerte bzgl. der Kosten für den Rückbau, den Transport der rückgebauten Massen, die Wiederaufbereitung und die Entsorgung durchgeführt. Unsicherheiten werden von Akbarnezhad et al. (2014) allerdings nicht berücksichtigt. Des Weiteren fokussieren sich sowohl Akbarnezhad et al. (2014) als auch Cheng und Ma (2013) in ihren Rückbauplänen auf die Massen- und Kostenkalkulation, indem sie vor allem die benötigte Anzahl an Lastwagen und die Häufigkeit ihres Einsatzes betrachten. Die Anordnung der durchzuführenden Vorgänge und somit ein kostenoptimierter Schedule werden nicht bestimmt.

Die bisher untersuchte Literatur geht, mit Ausnahme von Volk (2017) und Spengler (1998), von einer deterministischen Planung von Rückbauprojekten ohne die Berücksichtigung von Unsicherheiten aus. Schultmann (2003b) bestimmt mit Hilfe des sogenannten fuzzy-scheduling einen Rückbauplan mit minimaler Dauer unter der Berücksichtigung von

Unsicherheiten. Schultmann (2003b) verwendet den Fuzzy-Ansatz aufgrund weniger verfügbarer Informationen. Allerdings wird mit Hilfe dieses Ansatzes weiterhin ein Schedule mit minimaler Projektdauer und nicht mit minimalen Projektkosten bestimmt. Des Weiteren werden weiterhin lediglich die Normalfolge und keine no-wait Vorgangsbeziehungen berücksichtigt.

Keiner der untersuchten Projektplanungsansätze kann die in Kapitel 3.1 beschriebenen Anforderungen erfüllen. Die Ergebnisse der vorgestellten Ansätze sowie die detaillierten Analyseergebnisse der einzelnen Ansätze sind in Tabelle 3.2 dargestellt. Eine detaillierte Beschreibung der Inhalte der in diesem Kapitel genannten Literatur wurde bereits veröffentlicht und ist in Hübner et al. (2017a) zu finden.

Tabelle 3.2: Überblick über operative Planungsansätze für Rückbauprojekte

	Anforderungen für eine operative Rückbauplanung	Akbarnezhad et al. (2012, 2014)	Aidonis et al. (2008)	Bartels (2009)	Cheng & Ma (2013)	Iguchi et al. (2004)	Kühlen (2017)	Schultmann (1998)	Schultmann (2003b)	Schultmann & Rentz (2002, 2001)	Schultmann & Sunke (2006)	Schultmann & Sunke (2007a,b)	Seemann (2003)	Spengler (1994, 1998)	Sunke (2009)	Volk (2017)	Yanagihara et al. (2001)
Dauer	Vogangsdauer	-	-	X	-	X	X	X	U	X	X	X	X	X	X	X	U
	Zeitl. Restriktionen**	-	-	X	-	-	-	-	-	-	X	-	-	-	-	-	-
	Vorgangsbeziehung	-	X	X	-	-	X	X	X	X	X	X	-	-	X	X	X
	time lags, etc.	-	-	X	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Kosten	dir. Vorgangskosten	X	X	X	-	X	X	X	X	X	X	X	X	U	X	X	X
	Indir. Vorgangskosten	X	X	X*	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	dir. Beseitigungskosten/ Einnahmen Recycling	X	X	-	X	-	(X)	(X)	X	X	X	X	X	U	X	(X)	X
Ressourcen	Art***	-	-	X	X	X	X	X	U	X	X	X	-	-	X	X	X
	Verfügbarkeit	-	-	X	-	X	X	X	X	X	X	X	-	-	X	X	-
	Kapazitäten	-	-	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	U	X	X	-
	Fähigkeiten	-	-	X	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	X	-
	Multiprojekt	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	Modi	-	-	X	-	-	X	X	X	X	X	X	X	-	X	X	-
	Verwendung und Leveling	-	-	-	-	-	-	(X)	-	-	-	-	-	-	(X)	-	-
Risiko & Unsicherheit	Risikoidentifikation (intern/ extern)	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	X	-	X	-
	Risikobewertung	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	X	-	-	-
	Risikobehandlung/ Change Management	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-

Qualität	Umweltstandards	(X)	-	-	(X)	X	X	-	-	-	X	(X)	-	-	(X)	-	X
	Sozialstandards	-	-	-	-	(X)	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	(X)
	Produktqualität (Material)	X	X	-	(X)	-	-	X	X	X	-	X	-	X	-	-	-
	Übereinstimmung mit dem Projektziel	-	-	-	-	-	X	(X)	-	-	-	-	-	-	-	X	-
Verwendete Methoden	Massen- und Kostenschätzung																
	RCPS																
	RCPS																
	Massen- und Kostenschätzung																
	Scheduling & Visualisierung																
	MRCPS & lokale Immissionen																
	MRCPS																
	Fuzzy MRCPS																
	MRCPS																
	MRCPS																
	MRCPS																
	Massen- und Kostenschätzung																
	RCPS																
MRCPS																	
MRCPS																	
Scheduling & Visualisierung																	

X: Modell/Methode berücksichtigt diesen Aspekt explizit

U: Modell/Methode berücksichtigt diesen Aspekt zusammen mit Unsicherheiten

(X): Modell/Methode spricht diesen Aspekt an, aber berücksichtigt ihn nicht explizit im Modell

-: Nicht angesprochen/berücksichtigt

*: Kosten für Pufferlager

** : z. B. Deadlines, Stillstandzeiten, Einrichtezeiten, Fälligkeitstermine, Bereitstellungs-
termine

***: erneuerbar, nicht-erneuerbar, kumulativ, benötigter Platzbedarf etc.

3.4.2 Strategische Planungsansätze für Rückbauprojekte

Im Gegensatz zu den operativen Planungsansätzen in Kapitel 3.4.1, welche eine Planung auf Vorgangsebene durchführen, untersuchen strategische Planungsansätze unterschiedliche Strategien und somit allgemeine Vorgehensweisen.

Planungsansätze zur strategischen Planung von Rückbauprojekten sind u. a. in Abdullah (2003), Abdullah et al. (2003), Abdullah und Anumba (2002), Anumba et al. (2008), Anumba et al. (2003), Coelho und de Brito (2013), Kourmpanis et al. (2008a), Kourmpanis et al. (2008b), Liu et al. (2005) und Liu et al. (2003) zu finden. Die einzelnen Planungsansätze werden im Folgenden kurz vorgestellt und den Anforderungen aus Kapitel 3.1 gegenüber gestellt.

Kourmpanis et al. (2008b) sowie Liu et al. (2005) definieren verschiedene Kombinationsmöglichkeiten von Rückbauprozess- und Materialmanagement-Strategien und evaluieren diese qualitativ. Allerdings geben die Autoren keine Entscheidungsunterstützung, welche Strategie unter verschiedenen Gesichtspunkten verwendet werden sollte. Dagegen vergleichen Anumba et al. (2003), Coelho und de Brito (2013) sowie Liu et al. (2003) verschiedene Rückbaustrategien quantitativ mit Hilfe von Fallstudien. Die Autoren fokussieren sich dabei jeweils auf unterschiedliche Faktoren, wie Kosten, Projektdauer, Umwelt- und Sozialstandards oder dem Umgang mit Risiken. Da diese Rückbaustrategien, wie beispielsweise die Gegenüberstellung des selektiven Rückbaus mit dem Abriss eines Gebäudes im Hinblick auf Umweltstandards, nicht Thema dieser Arbeit sind, wird nicht näher auf die genannten Arbeiten eingegangen.

Kourmpanis et al. (2008a) nutzen die sogenannte PROMETHEE-II-Methode als Entscheidungsunterstützung, um unter verschiedenen Kombinationen von Rückbaustrategien und Rückbau-Materialmanagementoptionen zu wählen. In den Arbeiten von Abdullah (2003), Abdullah et al. (2003),

Abdullah und Anumba (2002), Anumba et al. (2008) sowie Anumba et al. (2003) werden in den Entscheidungsprozess zusätzlich jeweils aus strategischer Sicht ökonomische, technische, soziale und Umweltkriterien integriert. Bei ökonomischen Entscheidungskriterien handelt es sich dabei um Kosten und den gesamten zeitlichen Rahmen des Rückbauprojekts. Technische Aspekte umfassen vor allem strukturelle Charakteristika des rückzubauenden Gebäudes, wie beispielsweise die Höhe oder Stabilität des Gebäudes. Darüber hinaus werden Umwelteinflüsse, beispielsweise aufgrund von Gefahrstoffen und ihren Auswirkungen beim Rückbau auf die lokale Umwelt sowie soziale Aspekte, wie unterschiedliche Fähigkeiten des beteiligten Personals, in der strategischen Entscheidungsfindung berücksichtigt. Abdullah (2003), Abdullah et al. (2003), Abdullah und Anumba (2002) sowie Anumba et al. (2008) nutzen hierfür ein zweistufiges Verfahren, welches in einem ersten Schritt mit Hilfe des sogenannten Analytic Hierarchy Process (AHP) eine adäquate Rückbaustrategie hinsichtlich unterschiedlicher qualitativer ökonomischer, technischer, sozialer sowie Umweltkriterien auswählt und in einem zweiten Schritt die alternativen Strategien hinsichtlich ihrer Kosten quantitativ bewertet. Auf diese Weise können die Strategien mit den geringsten Kosten identifiziert werden.

Die genannten strategischen Planungsansätze zielen in der Regel auf strategische Entscheidungen hinsichtlich des gesamten Rückbauprojekts ab. Diese Entscheidungen sind auch für die Rückbauplanung kerntechnischer Anlagen zu treffen. Beispielsweise ist eine Stilllegungsstrategie auszuwählen, die gesetzlichen Bestimmungen geben Umweltstandards vor, z. B. bzgl. der Grenzwerte der Absorption ionisierender Strahlung, und technische Aspekte, wie der Reaktortyp, sind in der Rückbauplanung zu berücksichtigen. Allerdings sind diese strategischen Entscheidungen nicht Gegenstand dieser Arbeit. Vielmehr soll auf Basis bereits gefällter strategischer Entscheidungen und Vorgaben ein operativer Rückbauplan erstellt werden, der den Genehmigungsbehörden vorgelegt werden kann. Im Rahmen dieser Arbeit wird davon ausgegangen, dass bereits über die

strategischen Vorgaben, wie z. B. die Wahl der Stilllegungsstrategie, entschieden wurde und diese als Rahmenbedingungen für die operative Planung als gegeben angenommen werden. Aus diesem Grund wird nicht detaillierter auf die strategischen Planungsansätze eingegangen. Darüber hinaus ist eine Einordnung der beschriebenen strategischen Planungsansätze in das in dieser Arbeit verwendete Klassifikationsschema zur einheitlichen Untersuchung und Gegenüberstellung von operativen Planungsmethoden nicht möglich, da wie oben beschrieben nicht auf die Berechnung eines konkreten Rückbauplans eingegangen wird, in dem einzelne Vorgänge berücksichtigt werden. Nähere Informationen zu den vorgestellten strategischen Planungsmethoden sind in Hübner et al. (2017a) zu finden.

3.4.3 Verwendbarkeit der identifizierten Planungsansätze für die operative Rückbauplanung kerntechnischer Anlagen

In der Planung sollten unterschiedliche Fähigkeiten des Personals und unterschiedliche Maschinen berücksichtigt werden. Dies ist in den operativen Planungsmethoden mit Hilfe der Modi abgedeckt. Des Weiteren untersuchen die strategischen Planungsansätze verschiedene Szenarien, um eine optimale strategische Rückbaustrategie zu finden. Dieses Vorgehen wird auch in einigen operativen Planungsansätzen durch die Simulation verschiedener Szenarien durchgeführt (z. B. in Volk (2017)). Mit Hilfe dieses Vorgehens können vor allem Unsicherheiten bei der Planausführung besser untersucht werden.

Im Gegensatz zu den strategischen Planungsansätzen können einige Ansatzpunkte der operativen Rückbauplanung der untersuchten Literatur für die Beantwortung der Fragestellung dieser Arbeit verwendet werden. Die Ergebnisse der Literaturrecherche zeigen, dass lediglich Bartels (2009) einen methodischen Ansatz beschrieben hat, um Projektkosten zu

minimieren. Die meisten Autoren haben die Minimierung der Projektdauer als Optimierungsziel. Der Multi-Mode-Fall ist allerdings sehr verbreitet, wird aber von Bartels (2009) sehr eingeschränkt verwendet (lediglich zwei Modi, wobei nur zwischen der Ausführung mit Eigen- oder Fremdpersonal unterschieden wird).

Des Weiteren können die in Kapitel 3.4.1 dargestellten operativen Planungsmethoden lediglich Pläne bis zu einem gewissen Detaillierungsgrad berechnen. Insbesondere ein Plan mit einer hohen Anzahl an Vorgängen (mehr als 30 Vorgänge) in Kombination mit vielen Modi kann mit den bestehenden operativen Planungsmethoden für Rückbauprojekte aufgrund langer Rechendauern in akzeptabler Zeit bisher nicht bestimmt werden. Um trotzdem eine Lösung zu berechnen, werden die Probleme vereinfacht, beispielsweise hat Schultmann (1998) eine geringe Anzahl an Vorgängen (Vorgänge werden in 26 Demontagegruppen zusammengefasst) und Bartels (2009) verwendet Zeitscheiben von drei Monaten.

Der Umgang mit Unsicherheiten ist in bisherigen Ansätzen in der Rückbauplanung nur in Volk (2017), Spengler (1998) sowie in Schultmann (2003b) angesprochen worden. Um einen besseren Überblick über die Planung unter Unsicherheit zu erhalten, werden in Kapitel 3.6 weitere Planungsansätze für die Planung unter Unsicherheit untersucht. Beispielsweise können die bereits angesprochenen Simulationen oder ein gegebenes Datenmodell, wie von Yanagihara et al. (2001) vorgeschlagen, genutzt werden, um Unsicherheiten in der Projektplanung zu reduzieren bzw. zu minimieren.

Zusammenfassend kann keiner der identifizierten Planungsansätze die Anforderungen aus Kapitel 3.1 erfüllen bzw. Anpassungen der bestehenden Planungsansätze mit zusätzlichen Eigenschaften gemäß den Anforderungen würden zu einem zu großen Komplexitätszuwachs und zu langen Rechendauern führen. Somit kann keiner der identifizierten

Planungsansätze zur Lösung des in dieser Arbeit zu lösenden Projektplanungsproblems angewendet oder weiterentwickelt werden.

3.5 Netzplantechnik

Zur Unterstützung des Projektmanagements bei der Projektplanung wird in der Literatur an vielen Stellen die Netzplantechnik angeführt (Domschke und Drexler, 2007, S. 97; Saynisch et al., 1979, S. 195f.; Schwarze, 2006). Die Netzplantechnik und dessen Konzepte werden auch in dem in dieser Arbeit entwickelten Planungswerkzeug eingesetzt¹⁰⁸. Aus diesem Grund werden im Folgenden die verschiedenen Ausprägungen und Eigenschaften von Netzplänen, die für das weitere Verständnis dieser Arbeit relevant sind, vorgestellt. Eine ausführliche Beschreibung der graphentheoretischen Grundlagen ist in Ahuja et al. (1993) sowie in Neumann und Morlock (1993) zu finden. In Elmaghraby (1977) und in Moder et al. (1983) werden zudem die Grundlagen der Netzplantechnik ausführlich beschrieben.

Die Netzplantechnik ist eine grafische Methode unter der Anwendung der Graphentheorie, die sich insbesondere für die Projektplanung eignet und die verschiedene Verfahren als Varianten besitzt (Saynisch et al., 1979, S. 195). Laut DIN 69900:2009 wird die Netzplantechnik definiert als „auf Ablaufstrukturen basierende Verfahren zur Analyse, Beschreibung, Planung, Steuerung, Überwachung von Abläufen, wobei Zeit, Kosten, Ressourcen und weitere Größen berücksichtigt werden können.“ (DIN 69900:2009, S. 10) Die Netzplan-Methode beschreibt dabei die „Art und Weise des Vorgehens nach detaillierten Regeln der Darstellung, der Berechnung usw. von Netzplänen, z. B. Program Evaluation and Review

¹⁰⁸ Vgl. u.a. Kapitel 4.3 und Kapitel 4.4.5.

Technique (PERT), Metra Potential Methode (MPM) und Critical Path Method (CPM)”¹⁰⁹ (DIN 69900:2009, S. 9f.)

3.5.1 Graphentheoretische Grundlagen der Netzplantechnik

Jeder Netzplan basiert auf einem sogenannten Graph G . Dieser besteht aus einer Menge von Knoten V , die über eine Menge von Kanten E miteinander verbunden sind. Zeichnerisch werden Knoten meist als Kreise oder Quadrate und Kanten als Verbindungslinie zwischen den Knoten dargestellt (Schwarze, 2006). Sind alle Kanten eines Graphen mit einer Richtung versehen, so wird von einem gerichteten Graphen gesprochen (Schwarze, 2006). In der Netzplantechnik werden gerichtete Kanten auch als Pfeile bezeichnet (Altrogge, 1996). Ist jeder Kante ein Wert zugeordnet, dann wird von gewichteten Kanten und einem bewerteten Graphen gesprochen (Schwarze, 2006). Beispielsweise kann es sich bei den Gewichten um Zeitdauern oder Kosten handeln. Die Länge eines Weges¹¹⁰ in einem gerichteten Graphen ist die Summe der Gewichte der Kanten auf dem Weg (Neumann, 1990, S. 7ff.).

Kann jeder Knoten eines Graphen von jedem anderen Knoten aus über einen oder mehrere Pfeile erreicht werden, wird der Graph als zusammenhängend bezeichnet. Des Weiteren kann ein Graph Zyklen und Schleifen enthalten. Unter einem *Zyklus* wird eine Folge von Pfeilen verstanden, bei dem Anfangs- und Endknoten übereinstimmen (Altrogge, 1996). Dagegen wird über eine *Schleife* ein Knoten mit sich selbst verbunden (Schwarze, 2006). Besitzt ein Knoten keinen Vorgänger, so wird dieser auch als

¹⁰⁹ Da die genannten Verfahren PERT, MPM und CPM teilweise in dieser Arbeit angewendet werden, werden diese in Kapitel 3.5.2 detailliert beschrieben.

¹¹⁰ Ein Weg in einem gerichteten Graphen ist die Verbindung durch gerichtete Kanten von einem Anfangsknoten zu einem Endknoten (Neumann, 1990, S. 3).

Startknoten oder Quelle bezeichnet. Ein Knoten ohne Nachfolger heißt Zielknoten oder auch Senke (Nicolai, 1979; Schwarze, 2006).

Ein gewichteter, gerichteter Graph wird als *Netzwerk* N bezeichnet, wenn:

- a) N mindestens eine Quelle und mindestens eine Senke besitzt
- b) Jeder Knoten von N von mindestens einer Quelle aus erreichbar ist und von jedem Knoten in N mindestens eine Senke erreichbar ist.

Die Bestandteile der Grundstruktur eines Projekts, nämlich Vorgänge und Ereignisse, können mit den Darstellungselementen der Netzplantechnik, das heißt Knoten und Pfeilen, kombiniert werden (Brandenberger und Ruosch, 1993). Daraus ergeben sich drei verschiedene Darstellungsmöglichkeiten: eine Darstellung als Vorgangspfeilnetzplan, als Vorgangsknotennetzplan und als Ereignisknotennetzplan (Schwarze, 2006). Während in Vorgangspfeilnetzplänen Vorgänge als Pfeile und Ereignisse als Knoten dargestellt werden, symbolisieren bei den Vorgangsknotennetzplänen die Knoten Vorgänge und die Pfeile stellen die Ereignisse zwischen den Vorgängen dar. (Saynisch et al., 1979, S. 196f.) In Ereignisknotennetzplänen existieren grundsätzlich zwei Arten von Pfeilen: Pfeile, die Vorgänge darstellen und Pfeile, die allgemeine Mindest- und Höchstabstände zwischen Vorgängen repräsentieren. Da in den für diese Arbeit analysierten sowie im entwickelten Planungswerkzeug angewendeten Methoden Vorgangspfeilnetzpläne verwendet werden, wird diese Art der Netzpläne im Folgenden näher beschrieben. Ausführungen zu Vorgangsknoten- und Ereignisknotennetzen sind u. a. in Schwindt (2005) zu finden. Die Eigenschaften von Vorgangspfeilnetzplänen können außerdem größtenteils analog auf Vorgangsknotennetzpläne übertragen werden. Des Weiteren werden im Folgenden die Begriffe *Vorgang* und *Pfeil* einerseits und die Begriffe *Ereignis* und *Knoten* andererseits synonym verwendet.

Ein Vorgangspfeilnetzplan ist ein gerichteter Graph G , der aus einer Menge E an gerichteten Kanten (oder Pfeilen) und einer nicht-leeren Menge V an Knoten besteht. Unter der Aktivierung¹¹¹ beziehungsweise Realisation eines Pfeils wird die Ausführung des entsprechenden Vorgangs verstanden (Fix, 1978). Während normale Vorgänge mit Hilfe eines durchgezogenen Pfeils dargestellt werden, ist dieser bei *Dummy-Vorgängen* (auch als *Scheinvorgänge* bezeichnet) gestrichelt¹¹².

Ein Pfeil geht von einem Anfangsknoten aus und endet in einem Endknoten. In den im Folgenden betrachteten Netzplänen existieren keine parallelen Pfeile, sodass ein Pfeil durch seinen Anfangs- (k) und Endknoten (l) eindeutig spezifiziert wird. Der Pfeil erhält somit die Notation $\langle k, l \rangle$ und ergibt sich als Paar $(k, l) \in V \times V$. Die Menge E der Pfeile ergibt sich somit als Untermenge $V \times V$. Für einen Pfeil $\langle k, l \rangle$ wird k als Vorgänger (predecessor) von l und l als Nachfolger (successor) von k bezeichnet. Die Menge $Succ(k)$ beinhaltet alle Nachfolger des Knotens k und die Menge $Pred(l)$ beinhaltet alle Vorgänger des Knotens l . In Vorgangspfeilnetzplänen ist das Endereignis eines Vorgangs gleichzeitig das Anfangsereignis des nachfolgenden Vorgangs (Brandenberger und Ruosch, 1993). Aus diesem Grund kann in Vorgangspfeilnetzplänen, mit Ausnahme von GERT-Netzplänen (vgl. Kapitel 3.5.3), nur die Normalfolge von Vorgängen dargestellt werden (Brandenberger und Ruosch, 1993), d. h. ein Vorgang kann erst beginnen, wenn alle seine Vorgänger abgeschlossen sind (Schwarze, 2006). Außerdem besitzt ein Netzplan mindestens eine Quelle, d. h. ein Knoten der als Starterereignis des Projekts dient, und mindestens eine

¹¹¹ Nicht zu verwechseln mit der Aktivierung von Stoffen und Bauteilen in kerntechnischen Anlagen, die in Kapitel 2.2.1 beschrieben wird.

¹¹² In Netzplänen besitzen Dummy-Vorgänge wie in den in Kapitel 3.3 beschriebenen Scheduling Methoden eine Ausführungsdauer von Null und keine Ressourceninanspruchnahme (Zimmermann et al., 2006, S. 74). Dummy-Vorgänge werden in Netzplänen beispielsweise zur Darstellung von Abhängigkeiten verwendet (Corsten et al., 2008).

Senke, welche das End- bzw. Zielereignis des Projekts symbolisiert (Neumann, 1981/1990, S. 1f.).

Im Folgenden wird unter einem Vorgänger der unmittelbare Vorgänger und unter einem Nachfolger der unmittelbare Nachfolger verstanden. Ein unmittelbarer Nachfolger l von k ist über genau einen Zwischenknoten erreichbar (k ist unmittelbarer Vorgänger von l , wenn l von Knoten k aus über genau einen Knoten erreichbar ist). (Neumann, 1998, S. 5) Unmittelbare Vorgangsbeziehungen sind nicht mit der in Kapitel 3.1 geforderten Anforderung der unterbrechungsfreien Abfolge von Vorgängen und der daraus definierten no-wait Nachfolgerbeziehung mit einer maximalen Verzögerung von 0 Zeiteinheiten (Kapitel 3.3.6.2) zu verwechseln.

Für jeden Vorgang kann der frühestmögliche (*FAZ* oder *ES*) und der spätestmögliche (*SAZ* oder *LS*) Anfangs- sowie der frühestmögliche (*FEZ* oder *EF*) und spätestmögliche (*SEZ* oder *LF*) Endzeitpunkt berechnet werden. Dies geschieht mit Hilfe der sogenannten Vorwärts- und Rückwärtsrekursion (vgl. Bohinc, 2010; Altrogge, 1996; Domschke und Drexl, 2007; Schultmann, 1998). Mit Hilfe dieser Zeitpunkte je Vorgang kann unter anderem der längste Weg in einem Netzplan berechnet werden. Dieser wird auch als (zeit-)kritischer Weg (critical path) bezeichnet und die auf diesem Weg enthaltenen Vorgänge werden als (zeit-)kritische Vorgänge (critical activities) bezeichnet. Sofern sich ein kritischer Vorgang verzögert (beispielsweise wenn ein kritischer Vorgang länger dauert als geplant), so erhöht sich die Projektdauer des gesamten Projekts. Für alle kritischen Vorgänge i gilt $FAZ_i = SAZ_i$ bzw. $FEZ_i = SEZ_i$. Nichtkritische Vorgänge können verschoben werden, ohne dass sich die Projektdauer des Gesamtprojekts erhöht. In diesem Fall wird davon gesprochen, dass diese Vorgänge positive Pufferzeiten besitzen. Altrogge (1996) definiert Pufferzeiten als „[...] Zeitspannen, um die der Anfang eines Vorgangs und damit natürlich der ganze Vorgang gegenüber einem definierten Zeitpunkt bzw. einer definierten Lage verschoben werden kann bei bestimmter Beeinflussung der zeitlichen Bewegungsmöglichkeiten umgebender Vorgänge bzw.

bei bestimmter zeitlicher Lage der umgebenden Vorgänge.“ (Altrogge, 1996, S. 67) Die insgesamt vier zu unterscheidenden Arten an Puffern sind im weiteren Verlauf für die Wahl eines robusten Projektplans relevant (vgl. Kapitel 4.5) und werden daher kurz vorgestellt (Altrogge, 1996; Domschke und Drexel, 2007; Zimmermann, 2006):

1. Gesamtpuffer: $GP_i = SAZ_i - FAZ_i$
Dieser Puffer stellt die maximale Zeitspanne dar, um die sich ein Vorgang i verschieben kann bzw. um die sich ein Vorgang i verzögern kann, ohne dass sich die Gesamtprojektdauer erhöht.
2. Freier Puffer: $FP_i = \min\{FAZ_j - a_{ij} | j \in Succ(i)\} - FEZ_i$, mit a_{ij} als zeitlicher Mindestabstand zwischen Vorgang i und Vorgang j
Der freie Puffer gibt den zeitlichen Spielraum an, der für Vorgang i verbleibt, wenn i und alle seine Nachfolger j frühestmöglich beginnen.
3. Freier Rückwärtspuffer: $FRP_i = SAZ_i - \max\{SEZ_h + a_{hi} | h \in Pred(i)\}$, mit a_{hi} als zeitlicher Mindestabstand zwischen Vorgang h und Vorgang i
Der freie Rückwärtspuffer gibt den zeitlichen Spielraum an, der für Vorgang i verbleibt, wenn i und alle seine Vorgänger h spätestmöglich beginnen.
4. Unabhängiger Puffer: $UP_i = \max\{0, \min\{FAZ_j - a_{ij} | j \in Succ(i)\} - \max\{SEZ_h + a_{hi} | h \in Pred(i)\} - d_i\}$, mit a_{ij} als zeitlicher Mindestabstand zwischen Vorgang i und Vorgang j ; a_{hi} als zeitlicher Mindestabstand zwischen Vorgang h und Vorgang i
Der unabhängige Puffer gibt den zeitlichen Spielraum an, der für Vorgang i verbleibt, wenn alle Nachfolger j von i frühestmöglich und alle Vorgänger h von i spätestmöglich beginnen.

Die Netzplantechnik als eine grafische Methode unter der Anwendung der Graphentheorie beinhaltet verschiedene Verfahren als Varianten, die im folgenden Kapitel vorgestellt werden.

3.5.2 Unterscheidung CPM, MPM, PERT und GERT

Mit Hilfe der **CPM** werden Projekte als Vorgangspfeilnetzpläne dargestellt, wobei die Bewertungen der Pfeile i.d.R. die Dauer des zugehörigen Vorgangs repräsentieren (Bohinc, 2010; Zimmermann et al., 2006, S. 73). Mit Hilfe dieser Methode ist es dem Anwender möglich, kritische Vorgänge auf einem kritischen Pfad zu erkennen. (Kelley und Walker, 1959) In CPM-Netzplänen gelten zeitliche Mindestabstände des Typs Ende-Start (Zimmermann et al., 2006, S. 73).

Mit Hilfe der **MPM**-Netzpläne werden Projekte als Vorgangsknotennetze darstellt. Die Pfeile zwischen den Knoten repräsentieren die Zeitbeziehungen zwischen den Knoten, wobei Start-Start-Beziehungen modelliert werden. (Zimmermann et al., 2006, S. 55)

Weitere Informationen zu CPM- und MPM-Netzplänen sind u. a. in Bohinc (2010) und Zimmermann et al. (2006) zu finden. Ein wesentlicher Nachteil der Methoden CPM und MPM ist, dass diese keine Ressourcenbeschränkungen, sondern lediglich die zeitliche Anordnung der Vorgänge berücksichtigen.

Die Methoden CPM und MPM sehen die Berechnung frühestmöglicher und spätestmöglicher Zeitpunkte zur Ausführung von Vorgängen vor (Neumann, 1990, S. 37). Bei CPM- und MPM-Netzplänen wird mit der Einzeitschätzung nur ein Zeitwert für die Ausführungsdauer eines Vorgangs geschätzt und anschließend der zeitliche Ablauf des Projekts so geplant, als ob die geschätzte bzw. festgelegte Dauer tatsächlich eingehalten wird. Die Form der Planung wird als deterministische Planung bezeichnet, wobei die Zeitwerte als bekannt angenommen werden.

Unsicherheiten bezüglich der Ausführungsdauer werden bei diesen Methoden folglich ignoriert (Schwarze, 2006; Zimmermann et al., 2006, S. 73).

Um Unsicherheiten der Vorgangsdauern zu berücksichtigen, existieren stochastische Netzplantechniken, wie z. B. **PERT** (Ramani und Kannan, 2014; Schwarze, 2006; Zimmermann et al., 2006, S. 73). Während im Fall von CPM- oder MPM-Netzplänen die Ausführungsdauern aller Vorgänge konstant sind, wird bei PERT-Netzplänen davon ausgegangen, dass den Ausführungsdauern jedes Vorgangs eine Wahrscheinlichkeitsverteilung zugrunde liegt (Elmaghraby, 1977; Malcolm et al., 1959; Neumann, 1990, S. 37; Zimmermann et al., 2006, S. 73).

Netzpläne wie CPM, MPM und PERT sind im Projektmanagement weit verbreitet (Ramani und Kannan, 2014) und ermöglichen die Darstellung von Projekten, wobei alle Vorgänge und deren Abläufe eindeutig festgelegt sind (Fix, 1978). Insbesondere ist damit festgelegt, dass jeder Vorgang genau einmal ausgeführt wird, jedes Ereignis genau einmal eintritt (Neumann und Steinhardt, 1979) und die Modellierung von Zyklen oder Schleifen nicht zulassen ist (Ramani und Kannan, 2014). Diese Verfahren wurden auf vielfältige Weise weiterentwickelt und durch neue Verfahren ergänzt. (Domschke und Drexler, 2007, S. 97; Saynisch et al., 1979, S. 195)

Als Weiterentwicklung entstand u. a. die sogenannte Graphical Evaluation and Review Technique (**GERT**) (Neumann und Steinhardt, 1979; Neumann, 1998, S. 1; Zimmermann et al., 2006, S. 73). GERT-Netzpläne lassen Zyklen und Mehrfachausführungen von Vorgängen zu. Des Weiteren ist die Reihenfolge der Ausführung einzelner Vorgänge nicht deterministisch vorgegeben, sondern ergibt sich stochastisch während der Ausführung. Aus diesem Grund werden die GERT-Netzpläne auch als *stochastic project networks* bezeichnet. Insgesamt können in GERT-Netzplänen somit bestimmte Vorgänge mit einer gewissen Wahrscheinlichkeit entweder gar nicht oder sogar mehrmals ausgeführt werden. Gleichzeitig müssen auch

die Ausführungsdauern der Vorgänge nicht deterministisch, sondern können wie bei PERT auch stochastisch sein. (Neumann, 1990, S. 11f.; Neumann, 1998, S. 1)

Da die GERT-Netzplantechnik für diese Arbeit wesentlich ist, wird diese in Kapitel 3.5.3 detaillierter vorgestellt.

3.5.3 Besondere Eigenschaften von GERT für den Anwendungsfall Rückbauplanung unter Unsicherheit

Genauso wie CPM- oder PERT-Netzpläne verwenden auch die GERT-Netzpläne Vorgangspfeilnetze, allerdings besitzen die Pfeile in GERT-Netzplänen Ausführungswahrscheinlichkeiten, es existieren verschiedene Knotentypen (siehe weiter unten) und Zyklen sind erlaubt. (Neumann, 1990, S. III; Neumann, 1998, S. 1) Im Folgenden werden lediglich die wesentlichen Eigenschaften der GERT-Netzpläne vorgestellt, welche im weiteren Verlauf der Arbeit für die Anwendung zur Rückbauplanung notwendig sind. Eine ausführliche Einführung zu den GERT-Netzplänen ist in Pritsker und Happ (1966), Schneider (1997), Neumann (1998) und Zimmermann (1998) zu finden.

GERT-Netzpläne besitzen mindestens eine Quelle und mindestens eine Senke. Zum Zeitpunkt $t = 0$ ist mindestens eine Quelle aktiviert. Während der Projektausführung ist höchstens eine der Quellen aktiviert, von der aus dieselben Senken erreichbar sind. (Neumann, 1990, S. 21f.) Innerhalb des GERT-Netzplans können Zyklen existieren, sodass verschiedene Vorgänge mehrmals ausgeführt werden können. Jeder Pfeil $\langle k, l \rangle$ zwischen dem Anfangsknoten k und dem Endknoten l besitzt einen Gewichtungsvektor (p_{kl}, F_{kl}) . $p_{kl} > 0$ stellt die bedingte Ausführungswahrscheinlichkeit des zugehörigen Vorgangs $\langle k, l \rangle$ dar, sofern das Ereignis k eingetreten ist (also: wenn Knoten k aktiviert ist). F_{kl} ist die bedingte Verteilungsfunktion der nichtnegativen Dauer D_{kl} des Vorgangs $\langle k, l \rangle$, die unter der

Bedingung, dass $\langle k, l \rangle$ ausgeführt wird, die Bedingung $E(D_{kl}) < \infty$ erfüllt. p_{kl} und F_{kl} sind unabhängig von der Anzahl der Ausführungen des Vorgangs $\langle k, l \rangle$. (Neumann, 1990, S. 12f.; Neumann, 1998, S. 1f.)

Insgesamt existieren für GERT-Netzpläne sechs verschiedene Knotentypen, die sich aus der Kombination drei verschiedener Eingangs- und zwei verschiedener Ausgangsknoten ergeben. Es handelt sich um einen Knoten mit UND-Eingang (AND), wenn der Knoten nur aktiviert wird, sofern alle eingehenden Vorgänge beendet sind. Der Zeitpunkt der Aktivierung ist somit der Zeitpunkt, zu dem der letzte eingehende Vorgang abgeschlossen ist. Die UND-Eingänge werden auch von CPM oder PERT-Netzwerken verwendet. Wird ein Knoten aktiviert, wenn mindestens ein eingehender Vorgang abgeschlossen ist („entweder ... oder“ oder „alle“), so wird von einem inklusiven ODER-Eingang (IOR) gesprochen. Als letzte Möglichkeit handelt es sich um einen exklusiven ODER-Eingang (EOR), sofern der Knoten aktiviert wird, wenn genau ein eingehender Vorgang abgeschlossen ist („entweder ... oder“). Der Zeitpunkt der Aktivierung ist somit durch die Beendigung eines Vorgangs gegeben. Die Knotenausgänge sind entweder deterministisch oder stochastisch. Von einem deterministischen Knotenausgang (DET) wird gesprochen, wenn alle nachfolgenden Vorgänge eines aktivierten Knotens mit Sicherheit durchgeführt werden. Dieser Knotenausgang wird in CPM und PERT-Netzwerken verwendet. Demgegenüber wird von einem aktivierten Knoten mit stochastischem Knotenausgang (ST) gesprochen, wenn genau einer der nachfolgenden Vorgänge mit einer bestimmten Wahrscheinlichkeit $p_{\langle k, l \rangle} \in]0; 1[$ ausgeführt wird. Sofern ein Knoten aktiviert ist, bestimmt dieser Aktivierungs-Zeitpunkt den frühestmöglichen Beginn der ausgehenden Vorgänge. Aufgrund von Beschränkungen (z. B. Ressourcenbeschränkungen) kann sich der Ausführungszeitpunkt eines ausgehenden Vorgangs allerdings verzögern. (Neumann, 1990, S. 17ff.; Neumann, 1998, S. 3)






Knoten- eingang \ Knoten- ausgang	EOR 	IOR 	AND 
DET 	Der Knoten wird aktiviert, wenn <u>genau ein</u> einmündender Vorgang beendet wurde, sodass <u>alle</u> ausgehenden Vorgänge beginnen können.	Der Knoten wird aktiviert, wenn <u>mindestens ein</u> einmündender Vorgang beendet wurde, sodass <u>alle</u> ausgehenden Vorgänge beginnen können.	Der Knoten wird aktiviert, wenn <u>alle</u> einmündenden Vorgänge beendet wurden, sodass <u>alle</u> ausgehenden Vorgänge beginnen können.
ST 	Der Knoten wird aktiviert, wenn <u>genau ein</u> einmündender Vorgang beendet wurde, sodass <u>ein</u> ausgehender Vorgang <u>mit einer gegebenen Wahrscheinlichkeit</u> beginnen kann.	Der Knoten wird aktiviert, wenn <u>mindestens ein</u> einmündender Vorgang beendet wurde, sodass <u>ein</u> ausgehender Vorgang <u>mit einer gegebenen Wahrscheinlichkeit</u> beginnen kann.	Der Knoten wird aktiviert, wenn <u>alle</u> einmündenden Vorgänge beendet wurden, sodass <u>ein</u> ausgehender Vorgang <u>mit einer gegebenen Wahrscheinlichkeit</u> beginnen kann.

Abbildung 3.1: Mögliche Knoteneingangs- und Knotenausgangskombinationen von GERT-Netzplänen (Quelle: Neumann, 1990, S. 17ff.; Neumann, 1998, S. 3; Corsten et al., 2008, S. 228)

Sofern die verschiedenen Knoteneingänge und –ausgänge miteinander kombiniert werden (siehe Abbildung 3.1) sehen die Knoten wie in Abbildung 3.2 dargestellt aus.

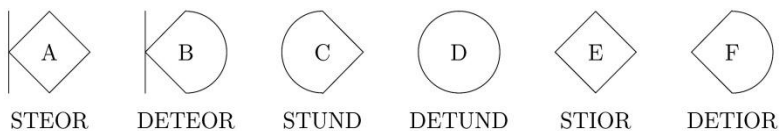


Abbildung 3.2: Grafische Darstellung der Knoten in GERT-Netzwerken (Zimmermann et al., 2006; Pritsker, 1966)

In GERT-Netzplänen werden am häufigsten Knoten verwendet, die einen EOR-Eingang und einen stochastischen Knotenausgang besitzen. Ein solcher Knoten wird als STEOR-Knoten bezeichnet. (Neumann, 1990, S. 20)

Alle von einem Knoten mit deterministischem Knotenausgang ausgehenden Vorgänge (DETEOR, DETUND, DETIOR) werden auf jeden Fall ausgeführt. In diesem Fall wird von einem deterministischen Knoten gesprochen. Die Ausführungswahrscheinlichkeit des von einem deterministischen Knoten k ausgehenden Vorgangs ist $p_{\langle k,l \rangle} = 1$, für alle $l \in Succ(k)$. Besitzt Knoten k dagegen einen stochastischen Ausgang (STEOR, STUND, STIOR), dann wird einer der folgenden Vorgänge mit einer bestimmten Wahrscheinlichkeit $p_{\langle k,l \rangle} \in]0; 1[$ ausgeführt, die in Summe über alle ausgehenden Vorgänge eins ergibt: $\sum_{l \in S(k)} p_{\langle k,l \rangle} = 1$. Ein solcher Knoten wird als stochastischer Knoten bezeichnet. (Neumann, 1990, S. 19f.; Neumann, 1998, S. 5)

Jeder Knoten mit einem stochastischen Knotenausgang kann zu verschiedenen nachfolgenden Vorgängen und somit zu verschiedenen Realisationen (oder Szenarien) führen. In der Menge Ω sind alle möglichen Realisationen $\omega \in \Omega$ möglicher GERT-Netzpläne enthalten. Zu jeder Realisation ω existieren die Gesamtdauer und die Gesamtkosten, um von der Quelle zur Senke zu gelangen. (Neumann, 1998, S. 3) Die Möglichkeit verschiedene Netzpläne mit Hilfe von GERT zu erzeugen, ist beispielsweise einsetzbar, um verschiedene Realisationen bzw. Szenarien aufzuzeigen.

3.6 Planung und Projektausführung unter Unsicherheit

Die Projektplanung ist seit den 1950er Jahren durch eine Vielzahl an qualitativen Modellen und Methoden untersucht und Lösungen sind entwickelt worden (Demeulemeester und Herroelen, 2011, S. 2). Häufig fokussieren sich diese auf die deterministische Planung mit umfänglichen Informationen (Elkhyari et al., 2003, S. 1; Herroelen und Leus, 2005). Allerdings ist dies in realen Projekten selten der Fall, da in der Regel keine umfänglichen Informationen vor Projektbeginn bereitstehen und nicht alle Vorgänge

eines Projekts mit Sicherheit plangetreu ausführbar sind. Somit kommt der Projektplanung unter Unsicherheit¹¹³ eine wichtige Rolle zu. (Elkhyari et al., 2003 S. 1; Hazir et al., 2010 S. 634; Herroelen und Leus, 2005) Wie bereits in Kapitel 2.7 und Kapitel 3.1 aufgezeigt wurde, unterliegt auch der Rückbau kerntechnischer Anlagen vielen Unsicherheiten, die in der Projektplanung berücksichtigt werden sollten. In diesem Kapitel werden daher Methoden zur Projektplanung unter Unsicherheit aus der Literatur identifiziert und näher auf ihre Eignung für die Rückbauplanung kerntechnischer Anlagen unter Unsicherheit untersucht.

Der Plan bzw. Schedule eines Projekts, der auch als *Baseline Schedule* bezeichnet wird, dient als Grundlage, um den einzelnen Vorgängen die benötigten Ressourcen sowie das zu beschaffende Material zuzuordnen¹¹⁴ sowie als Basis für die interne und externe Kommunikation und Koordination des Projekts. Des Weiteren werden auf Grundlage des Baseline Schedules Verträge mit Unterauftragnehmern und Zulieferern geschlossen sowie Meilensteine aufgestellt. (Herroelen und Leus, 2005, S. 289f.; Herroelen und Leus, 2004, S. 1599)

Während der Projektausführung unterliegt der Baseline Schedule verschiedenen Unsicherheiten, die zu Planänderungen führen können. Die Unsicherheiten können aufgrund vielfältiger Ursachen entstehen: Die Vorgänge können länger oder kürzer als ursprünglich geplant andauern, die benötigten Ressourcen sind evtl. nicht verfügbar, Material wird nicht rechtzeitig angeliefert, zusätzliche Arbeiten müssen aufgrund externer Bestimmungen durchgeführt und/ oder bereits eingeplante Arbeiten können nicht ausgeführt werden oder das Wetter führt zu Verzögerungen. Abweichungen vom Baseline Schedule führen in der Regel zu zeitlichen

¹¹³ Zur Definition des Begriffs *Unsicherheit* vgl. Kapitel 2.6.5.1.

¹¹⁴ Sowohl bei einer Ablaufplanung, der im Anschluss die Ressourcen zugeordnet werden, als auch bei der Berücksichtigung der vorhandenen Ressourcen zur integrierten Ablaufplanung, die in dieser Arbeit berücksichtigt wird, ist ein Ressourcenplan aufzustellen.

Verzögerungen und höheren Kosten. (Herroelen und Leus, 2005, S. 290; Herroelen und Leus, 2004, S. 1600; Deblaere et al., 2011, S. 308)

Im Umgang mit Unsicherheiten während der Projektausführung existieren verschiedene Herangehensweisen. Um die verschiedenen Methoden zur Planerstellung einzuordnen, stellen Herroelen und Leus (2005) verschiedene Arten an Baseline Schedules und die daraus möglichen Handlungen während der Projektausführung vor.





Baseline schedule	Handlungen während der Projektausführung
1.) Kein Baseline Schedule	 Dynamische Anpassung an die Veränderungen auf Basis einer zuvor festgelegten Strategie
2.) Baseline Schedule ohne Antizipation von Änderungen aufgrund von Unsicherheiten	 Reactive scheduling
3.) Proactive (robust) scheduling Quality robustness Solution robustness	 Management-Entscheidungen (auf Basis des Baseline Schedules)
Flexibilität	 Sensitivitätsanalyse

Abbildung 3.3: Projektplanung unter Unsicherheit mit und ohne Baseline Schedules sowie resultierende Handlungen während der Projektausführung (Quelle: Herroelen und Leus, 2005, S. 291)

Wenn kein Baseline Schedule erstellt wird, dann kann während der Projektausführung nur auf Grundlage einer vorher definierten Strategie agiert werden. Konkrete vorbereitete oder alternative Pläne und Planänderungen sind nicht vorgesehen, vielmehr wird auf Grundlage der aktuellen Situation über die Ausführung des nächsten Vorgangs entschieden. (Herroelen und Leus, 2004, S. 1602; Herroelen und Leus, 2005, S. 291f.) Eine Strategie, um ohne Baseline Schedule zu agieren, ist nach Herroelen und Leus (2004) das sogenannte **stochastic project scheduling** (oder auch stochastic RCPSp genannt). Hierbei werden die Vorgänge mit unsicheren Dauern mit Hilfe von Wahrscheinlichkeitsverteilungen berücksichtigt und geplant (Chtourou und Haouari, 2008, S. 184). Da

Wahrscheinlichkeitsverteilungen der Vorgangsdauern aufgrund fehlender Erfahrungswerte häufig nicht bekannt sind, schlagen unter anderem Morovatdar et al. (2011) vor, sogenannte fuzzy-Zahlen zur Projektplanung zu verwenden. Unabhängig davon wie die Vorgangsdauern modelliert werden, wird beim stochastic project scheduling ein Projekt als mehrstufiger Entscheidungsprozess gesehen, in dem an stochastischen Entscheidungspunkten dynamische Planungsentscheidungen getroffen werden. Da der Rückbau einer kerntechnischen Anlage genehmigt werden muss, ist ein Rückbauplan (Baseline Schedule) zu erstellen, der möglichst ohne Planänderungen ausgeführt werden kann. Dies bedeutet, dass dynamische Anpassung an die Veränderungen auf Basis einer zuvor festgelegten Strategie ohne die Erstellung eines Baseline Schedules für den in dieser Arbeit untersuchten Anwendungsfall ausgeschlossen ist. Nähere Ausführungen zum stochastic RCPSP sind u. a. in Fernandez et al. (1996) sowie Leus und Herroelen (2004) zu finden. Rostami et al. (2017), Stork (2001) und Möhring et al. (1985) beschreiben außerdem mögliche Strategien zur Lösung des stochastic RCPSP und Heuristiken zur Lösung des Problems sind u. a. in Stork (2001), Golenko-Ginzburg und Gonik (1997), Tsai und Gemmill (1998) sowie Deblaere et al. (2011) zu finden.

Mit der Erstellung eines Baseline Schedules, der keine Änderungen aufgrund von Unsicherheiten vorsieht, ist während der Projektausführung beim Auftreten ungeplanter Ereignisse eine Re-Optimierung des ursprünglichen Plans durchzuführen. Das bedeutet, dass bei der erstmaligen Planung keine Planänderungen antizipiert werden, sondern bei auftretenden Unsicherheiten auf die neuen Gegebenheiten reagiert wird. Da während der Planausführung auf neue Gegebenheiten reagiert wird, wird dieses Vorgehen auch als „Online-Planung“ bezeichnet. (Ghezail et al., 2010; Herroelen und Leus, 2005; Lambrechts et al., 2008; Van de Vonder et al., 2007). Dieses sogenannte reactive scheduling kann entweder durch Anpassungen der ursprünglichen Planung an die neuen Gegebenheiten (schedule repair) oder durch eine vollständige Neuplanung (rescheduling)

erfolgen. (Herroelen und Leus, 2005, S. 290ff.; Herroelen und Leus, 2004, S. 1600; Van de Vonder et al., 2007) Scholl (2001) schlägt vor, dass mit Hilfe der rollierenden bzw. dynamischen Planung und der Anschlussplanung während der Durchführung weitere Planungsschritte ausgeführt werden (Scholl, 2001, S. 33). Vieira et al. (2003) sowie Van de Vonder et al. (2007) untersuchten die Möglichkeit eines sogenannten predictive-reactive schedules, der Möglichkeiten der Projektausführung vorhersagt, wobei die konkrete Projektausführung auf Grundlage der aktuellen Projektsituation definiert wird.

Eine der simpelsten Anpassungen des Baseline Schedules an die neuen Gegebenheiten ist die sogenannte *right shift rule*, die alle Startzeitpunkte der von einer Verzögerung betroffenen zukünftigen Vorgänge um die Verzögerungsdauer in die Zukunft verschiebt. (Sadeh et al., 1993; Smith, 1995)

Im Gegensatz zu diesen schedule repair actions wird bei der vollständigen Neuplanung nicht zwangsläufig darauf geachtet, den ursprünglichen Plan durch Modifikationen beizubehalten. Unter Einbezug der neuen Gegebenheiten und Informationen wird ein vollständig neuer Plan mit den aktuell laufenden sowie den verbleibenden Vorgängen erstellt. Bei der Neuplanung können ebenfalls verschiedene Strategien verfolgt werden. Das sogenannte *Match-up scheduling* versucht sich dabei an der ursprünglichen Planung zu orientieren. (Alagöz und Azizoglu, 2003) Beispielsweise stellen El Sakkout und Wallace (2000) Verfahren vor, die auf Basis der bereits durchgeführten Vorgänge die Summe der gewichteten Unterschiede zwischen dem Startzeitpunkt jedes Vorgangs des ursprünglichen Plans und des angepassten Plans minimieren. Dadurch soll bei der Neuplanung die ursprüngliche Strategie so wenig wie möglich geändert werden. (El Sakkout und Wallace, 2000)

Eine Neuplanung ist auch bei der Einführung eines neuen unvorhergesehenen Vorgangs in einen Baseline Schedule notwendig. Artigues und

Roubellat (2000) untersuchten diesen Fall für ein multi-project, Multi-Mode Problem mit vorgegebenen Fertigstellungsdaten, wobei die Ressourcenzuweisung zu den einzelnen Vorgängen des Baseline Schedules unberührt bleiben soll. Dazu werden mögliche Zeitpunkte identifiziert, zu denen neue Vorgänge in eine ursprüngliche Planung unter der Berücksichtigung der Ressourcenverfügbarkeit eingebettet werden können. (Artigues und Roubellat, 2000)

Häufig werden während der Projektausführung auch Entscheidungen durch das Management getroffen. Um dem Management die Entscheidungen zu erleichtern, werden beim sogenannten *contingent scheduling* verschiedene Ablaufstrategien berechnet, unter denen das Management in Abhängigkeit der aktuellen Situation eine auswählen kann (Billaut und Roubellat, 1996).

Wie bereits in Kapitel 3.1 beschrieben wurde, sollte eine Anpassung des Rückbauplans oder sogar eine Neuplanung des Rückbaus für ein kerntechnisches Rückbauprojekt aufgrund der lang andauernden und damit teuren Genehmigungsverfahren vermieden werden. Somit ist neben der ersten (kein Baseline Schedule) auch die zweite Möglichkeit (Baseline Schedule ohne Antizipation von Änderungen aufgrund von Unsicherheiten) aus Abbildung 3.3 für den Anwendungsfall dieser Arbeit nicht anwendbar.

Das proactive (robust) scheduling berücksichtigt bereits bei der Planung mögliche Unsicherheiten der Projektausführung, sodass es für die Planung des Rückbaus kerntechnischer Anlagen eine vielversprechende Planungsstrategie darstellt. Ziel ist es, mögliche Schwachstellen bereits während der Planung zu identifizieren, sodass während der Planausführung keine Anpassungen des Plans notwendig sind. Daher wird bei dieser Art der Planung auch von einer „Offline-Planung“ gesprochen. (Ghezail et al., 2010 ; Herroelen und Leus, 2005)

Beim proactive scheduling wird ein deterministischer Schedule berechnet, der bereits einige „Schutzmaßnahmen“ gegen mögliche Planstörungen beinhaltet (Deblaere et al., 2011, S. 308; Herroelen und Leus, 2004, S. 1603). Hierbei spielt die Robustheit (vgl. Kapitel 4.5.1) gegenüber möglichen Planänderungen eine wichtige Rolle. Ein Baseline Schedule kann zwar für die Berechnung mit deterministischen und vorhersagbaren Werten optimal sein, jeder äußere Einfluss oder jede Änderung im Plan kann aber dazu führen, dass die Optimalität hinsichtlich des jeweiligen Zielkriteriums (z. B. minimale Projektdauer oder minimale Projektkosten) verloren geht. Ein solcher Plan ist unflexibel im Umgang mit möglichen unerwarteten Vorkommnissen und wird als nicht robust bezeichnet. (Herroelen und Leus, 2004, S. 1601)

Der Vollständigkeit halber sei an dieser Stelle das sogenannte *proactive-reactive scheduling* oder auch *predictive-reactive scheduling* erwähnt. Hierbei wird zunächst mit Hilfe einer proaktiven Planung ein Plan erstellt, der möglichst während der Ausführung nicht angepasst werden muss. Da es trotzdem zu Störungen und somit zu Planänderungen kommen kann, werden diese während der Projektausführung mit Hilfe von reaktiven Methoden behoben. (Lambrechts et al., 2008, S. 494; Sabuncuoglu und Goren, 2009, S. 144f.; Volk, 2017) Davari und Demeulemeester (2017) kritisieren an diesem Ansatz, dass in den meisten Arbeiten über das proactive-reactive scheduling eine gleichbleibende Robustheit des Plans trotz reaktiver Maßnahmen angenommen wird (Davari und Demeulemeester, 2017, S. 2). Da reaktive Maßnahmen bereits als Anwendung für den im Rahmen dieser Arbeit untersuchten Anwendungsfall ausgeschlossen wurden, wird nicht näher auf das proactive-reactive scheduling eingegangen. Informationen zum proactive-reactive scheduling u. a. in Lambrechts et al. (2008) sowie in Sabuncuoglu und Goren (2009) zu finden.

Um eine ex ante Stabilität (Robustheit) der Projektplanung gewährleisten zu können, sind Informationen zu Veränderungen und zur Variabilität der

Vorgänge notwendig. Auf diese Weise können Unsicherheiten der Projektausführung bereits vor der Projektausführung abgebildet bzw. antizipiert und im Baseline Schedule berücksichtigt werden. (Herroelen und Leus, 2004, S. 1608)

Die Variabilitäten können dazu genutzt werden, um verschiedene potentielle Szenarien zu simulieren. Mit Hilfe der Simulation verschiedener Szenarien können Sensitivitäten des Projekts und seiner möglichen (optimalen) Pläne untersucht und analysiert werden. Durch die Variation der potentiellen Zustände eines Projekts bzw. der Gegebenheiten können Abhängigkeiten oder Änderungen im Projektablauf untersucht werden. (Herroelen und Leus, 2004, S. 1612f.; Herroelen und Leus, 2005, S. 302f.) Die Planung mit Hilfe verschiedener Szenarien bietet sich insbesondere an, wenn Erfahrungen aus der Vergangenheit nicht oder nur sehr schwer auf das neu zu planende Projekt übertragen werden können (Brauers und Weber, 1988, S. 31f.).

Insgesamt bietet sich die proaktive Planung für den Anwendungsfall der Rückbauplanung kerntechnischer Anlagen an. Insbesondere die Simulation und Analyse verschiedener Szenarien gibt Aufschluss über mögliche „Schwachstellen“ in einem Plan, sodass diesen vorgebeugt werden kann. Hierzu ist die Bewertung der Robustheit verschiedener Pläne für verschiedene Szenarien relevant. Zur Bewertung der Robustheit können Robustheitsmaße eingesetzt werden. Detaillierte Ausführungen zur Robustheit von Plänen und zu Robustheitsmaßen sind in Kapitel 4.5 beschrieben.

3.7 Schlussfolgerungen und Notwendigkeit eines neuen Planungswerkzeugs

Das Ziel der Projektplanung für das Anwendungsbeispiel des Rückbaus kerntechnischer Anlagen ist die Minimierung der Projektgesamtkosten, welches unter der Berücksichtigung von Vorgangsbeziehungen, beschränkten und unbeschränkten Ressourcen, dem Mehr-Modus-Fall und unter der Berücksichtigung von Unsicherheiten erreicht werden soll. Der erstellte Plan sollte möglichst plangetreu ausführbar sein und sollte während der Projektausführung nicht angepasst werden müssen. Diese Anforderung ist zentral, da ein Rückbauplan genehmigt werden muss und ein erneutes Genehmigungsverfahren für einen angepassten Plan mit Verzögerungen und signifikanten Kostensteigerungen einhergeht, die vermieden werden sollen.

Ausgehend von diesen in Kapitel 3.1 beschriebenen Anforderungen an einen Planungsansatz zur Planung des Rückbaus kerntechnischer Anlagen wurden in Kapitel 3 existierende Planungsansätze auf ihre Anwendbarkeit für die Beantwortung der Fragestellungen und den Anwendungsfall dieser Arbeit untersucht.

Die in Kapitel 3.3 beschriebenen allgemeinen Scheduling Probleme sind nicht uneingeschränkt für den Anwendungsfall dieser Arbeit einsetzbar. Keines der allgemeinen Scheduling Probleme kann alle Anforderungen aus Kapitel 3.1 erfüllen. Insbesondere ist mit diesen Methoden lediglich eine deterministische Planung möglich und es existieren für diese Methoden keine Lösungsalgorithmen, die eine Planung von Großprojekten mit vielen Vorgängen, Abhängigkeiten und einsetzbaren Ressourcen durchführen können. Daher ist eine Anpassung der allgemeinen Scheduling Probleme auf konkrete Anwendungsfälle notwendig.

Mit Hilfe der in den Kapiteln 3.2 und 3.3 beschriebenen Grundlagen für Projektplanungs- und Scheduling Probleme wurden daher in Kapitel 3.4

existierende operative und strategische Planungsansätze für Rückbauprojekte analysiert und den Anforderungen aus Kapitel 3.1 gegenübergestellt. Die untersuchten strategischen Planungsansätze geben den Hinweis zur Analyse verschiedener Szenarien, um einen ausführbaren Plan zu identifizieren. Darüber hinaus beschränken sich die strategischen Planungsansätze auf strategische Entscheidungen und nicht auf die Identifikation eines Schedules auf operativer Ebene. Aus diesem Grund sind die strategischen Planungsansätze im Rahmen dieser Arbeit nicht anwendbar. Unter den analysierten operativen Planungsansätzen wurden Ansätze mit verschiedenem Fokus identifiziert. Unter den für den Anwendungsfall der Planung des Rückbaus kerntechnischer Anlagen identifizierten operativen Planungsansätzen erfüllt der von Bartels (2009) entwickelte Planungsansatz bereits einige der Anforderungen aus Kapitel 3.1, insbesondere die Minimierung der Projektkosten. Darüber hinausgehende Anforderungen, insbesondere bzgl. des Multi-Mode-Falls, weiterer zu berücksichtigender Kosten und der Planung auf operativer Ebene, werden durch Bartels (2009) nicht erfüllt. Auch die weiteren analysierten operativen Planungsansätze für Rückbauprojekte können die Anforderungen aus Kapitel 3.1 nicht erfüllen. Insbesondere die Anforderungen der Identifikation eines kostenminimalen Rückbauplans (lediglich von Bartels (2009) und Spengler (1998) untersucht) als auch der Planung unter Unsicherheit (lediglich von Volk (2017), Spengler (1998) sowie Schultmann (2003b) untersucht) werden für den Anwendungsfall dieser Arbeit nicht ausreichend berücksichtigt.

Insgesamt ist keiner der analysierten Planungsansätze für die Planung des Rückbaus kerntechnischer Anlagen ohne Anpassungen einsetzbar.

Da die Konzepte und Methoden der Netzplantechnik zur Projektplanung in dieser Arbeit eingesetzt werden können, wurden diese in Kapitel 3.5 beschrieben. Hierbei wurden insbesondere die Vorteile der Anwendung eines GERT-Netzplans zur Berücksichtigung von Unsicherheiten bei der Projektausführung dargestellt.

Auf verschiedene Vorgehensweisen zur Planung eines Projekts unter der Berücksichtigung von Unsicherheiten wurde in Kapitel 3.6 eingegangen. Zur Erfüllung der Anforderung der Identifikation eines plangetreu ausführbaren Plans bietet sich die proaktive (robuste) Planung an. Diese berücksichtigt Unsicherheiten der Planausführung bereits während der Planung. Hierzu schlagen Herroelen und Leus (2004, 2005) die Simulation und den Vergleich verschiedener Szenarien vor, um Sensitivitäten zu erkennen. Insbesondere wenn keine oder nur sehr wenige Erfahrungswerte vorliegen, biete sich nach Aussage von Brauers und Weber (1988, S. 31f.) die Planung mit Hilfe verschiedener Szenarien an. Sofern bereits Erfahrungswerte existieren, sollten diese für die Planung verwendet werden, um Unsicherheiten während der Projektausführung zu minimieren (Yanagihara et al., 2001).

Die zu berücksichtigenden Anforderungen aus Kapitel 3.1 sowie die Grundlagen zur Planung unter Unsicherheit aus Kapitel 3.6 und der Darstellung mit Hilfe von GERT-Netzplänen aus Kapitel 3.5.3 werden im folgenden Kapitel 4 dazu verwendet, um ein neues Planungswerkzeug zu entwickeln.

4 Konzeption eines Planungswerkzeugs für den Rückbau kerntechnischer Anlagen

Die Analyse existierender Planungsansätze für Rückbauprojekte in Kapitel 3 hat gezeigt, dass keiner dieser Ansätze die Anforderungen an ein Planungswerkzeug für die Planung des Rückbaus kerntechnischer Anlagen erfüllt. Aus diesem Grund ist die Entwicklung eines neuen Planungswerkzeugs für den Anwendungsfall notwendig, welches die Anforderungen aus Kapitel 3.1 erfüllt. Hinweise für die Planung unter Unsicherheit können den Rechercheergebnissen aus Kapitel 3.6 entnommen werden. Des Weiteren können zur Darstellung von mit Unsicherheit behafteten Plänen GERT-Netzpläne verwendet werden, die in Kapitel 3.5.3 beschrieben sind.

In diesem Kapitel wird das entwickelte Planungswerkzeug für den Rückbau kerntechnischer Anlagen vorgestellt. Zunächst wird in Kapitel 4.1 der Aufbau des Planungswerkzeugs beschrieben. Dieses besteht aus verschiedenen Modulen, auf welche in den Kapiteln 4.2, 4.3, 4.4 und 4.5 eingegangen wird. Das gesamte Planungswerkzeug ist in mehreren Programmen bzw. Programmiersprachen entwickelt und implementiert worden. Die jeweilige Entwicklungsumgebung, die verwendete Programmiersprache, inkl. einer Begründung, sowie eine Beschreibung zur Verwendung der einzelnen Module des Planungswerkzeugs werden jeweils im Folgenden im Anschluss an die methodische Beschreibung der Module aufgeführt.

4.1 Modellaufbau und Abgrenzungen

Neben den für den Anwendungsfall spezifischen und in der Planung zu berücksichtigenden Rahmenbedingungen ist insbesondere die Identifikation eines möglichst plangetreu ausführbaren Plans auf operativer Ebene mit vielen Vorgängen und teilweise beschränkten Ressourcen eine der wesentlichen Herausforderungen. Hierzu ist eine Planungsmethode (auch als Scheduling Methode bezeichnet) notwendig, welche die Anforderungen aus Kapitel 3.1 erfüllt und insbesondere eine proaktive (robuste) Planung unter Unsicherheit ermöglicht. Die Anforderungen der Minimierung der Projektkosten, der Berücksichtigung von Vorgangsbeziehungen, der Berücksichtigung von Ressourcen und der Berücksichtigung des Mehr-Modus-Falls aus Tabelle 3.1 (in Kapitel 3.1) können durch eine deterministische Scheduling Methode ((2) in Modul (B)) erfüllt werden. Zur Reduktion von Unsicherheiten in der Planung werden einerseits, wie von Yanagihara et al. (2001) vorgeschlagen, bestehende Erfahrungswerte aus einem in dieser Arbeit entwickelten Expertensystem (Modul (A)) verwendet. Da trotz der Reduktion der Unsicherheiten mit Hilfe von Erfahrungswerten weiterhin Unsicherheiten in der Planung existieren, werden andererseits, wie von Herroelen und Leus (2004, 2005) vorgeschlagen, verschiedene Szenarien simuliert ((1) in Modul (B)) und auf ihre Robustheit ((3) in Modul (B)) sowie Sensitivitäten (Modul (C)) überprüft.

Insgesamt wird somit die neu entwickelte, deterministische Scheduling Methode in das Gesamtkonzept aus der Berücksichtigung bestehender Erfahrungswerte durch die Verwendung eines Expertensystems und der Simulation sowie der Bewertung der Robustheit von Szenarien eingebettet (vgl. Abbildung 4.1).

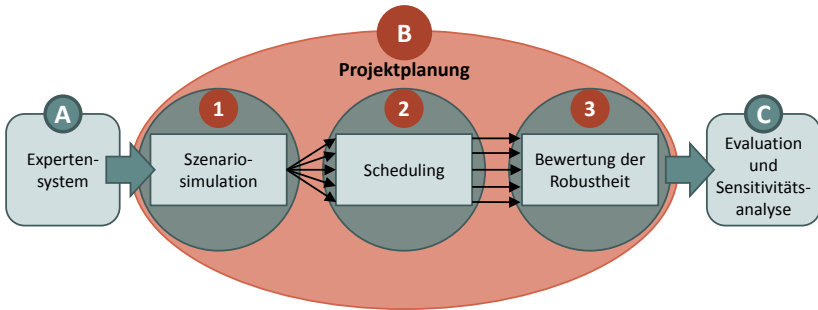


Abbildung 4.1: Überblick über die Bestandteile des entwickelten Planungswerkzeugs zur Planung kerntechnischer Rückbauprojekte

Sofern Erfahrungswerte vorliegen, sollten diese für die Planung zukünftiger Projekte verwendet werden. Aus diesem Grund werden Erfahrungswerte kerntechnischer Rückbauprojekte in einer Datenbank gesammelt. Für ein neu zu planendes Rückbauprojekt können für dieses Projekt durch gezielte Abfragen relevante Erfahrungswerte identifiziert werden. Die Datenbank mit Erfahrungswerten und regelbasierten Abfragen sind Teil des Expertensystems, welches in Kapitel 4.2 beschrieben wird.

Die für ein neu zu planendes kerntechnisches Rückbauprojekt identifizierten Erfahrungswerte können durch den Anwender bei Bedarf angepasst oder ergänzt werden. Da diese (evtl. durch den Anwender angepassten) Erfahrungswerte weiterhin Unsicherheiten unterliegen, werden basierend auf diesen Daten beliebig viele deterministische Szenarien simuliert. Das Vorgehen zur Simulation verschiedener deterministischer Szenarien wird in Kapitel 4.3 vorgestellt. Wenn keine Erfahrungswerte existieren oder diese nicht verwendet werden können, kann der Anwender selbständig auszuführende Vorgänge und die zur Planung notwendigen Informationen ohne die Verwendung des Expertensystems zusammentragen. Entweder handelt es sich bei den Informationen um deterministische Werte (ohne Angaben zu möglichen Unsicherheiten), sodass diese ohne eine Simulation direkt

der Scheduling Methode übergeben werden können¹¹⁵. Oder der Anwender kann für die Informationen Unsicherheiten angeben, sofern keine Sicherheit über die Ausführung besteht. Beispielsweise können Experten die Ausführungswahrscheinlichkeiten und Intervalle der Dauern von Vorgängen schätzen. Basierend auf diesen (mit Unsicherheiten belegten) Informationen kann ebenfalls das Planungswerkzeug (inkl. der Simulation deterministischer Szenarien, der Optimierung sowie der Bewertung der Robustheit und der anschließenden Evaluation mit Sensitivitätsanalysen) ohne die Verwendung des Expertensystems verwendet werden.

Jedes der deterministischen Szenarien (sowohl als direkte Eingabe durch den Anwender als auch durch die Simulation) wird mit einer Scheduling Methode des Operations Research hinsichtlich der Projektgesamtkosten optimiert. Hierzu wird eine Scheduling Methode entwickelt, welche die Anforderungen aus Kapitel 3.1 (abgesehen von den Anforderungen bzgl. der Unsicherheit) erfüllt. Die entwickelte Scheduling Methode wird in Kapitel 4.4 beschrieben.

Nachdem für jedes deterministische Szenario ein kostenoptimierter Schedule berechnet wurde, werden diese Schedules hinsichtlich ihrer Robustheit untersucht. Hierzu werden Robustheitskriterien verwendet, mit deren Hilfe der robusteste Schedule identifiziert wird. Die zur Untersuchung verwendeten Robustheitsmaße und die Wahl eines robusten Schedules werden in Kapitel 4.5 vorgestellt.

Zuletzt können der identifizierte robusteste Schedule sowie weitere relevante Schedules vom Anwender evaluiert werden. Hierbei spielt insbesondere der Trade-off zwischen der Robustheit und den Projektgesamtkosten eine Rolle. Der Anwender kann gemäß seiner eigenen Risikopräferenz

¹¹⁵ Sofern aus dem Expertensystem lediglich deterministische Werte ausgegeben und verwendet werden, kann das Planungswerkzeug ebenfalls ohne die Simulation von Szenarien und der Auswahl eines robusten Schedules verwendet werden.

einen Schedule auswählen, wobei ihm die Wahl insbesondere durch die Kennzahlen der Projektgesamtkosten und Robustheit potentieller Schedules erleichtert wird. Zur Wahl eines Schedules sollten des Weiteren Sensitivitätsanalysen durchgeführt werden. Sensitivitäten alternativer Vorgänge, der Vorgangsdauern und Zyklen sind bereits durch die Simulation von Szenarien abgedeckt (sofern keine Szenarien simuliert werden, können die entsprechenden Parameter variiert werden). Darüber hinaus können Sensitivitäten bzgl. der Gewichtungen der verwendeten Robustheitsmaße (vgl. Kapitel 4.5.5.2) untersucht werden. Die Evaluation von Schedules sowie eine Sensitivitätsanalyse durch die Variation der Gewichtungen werden exemplarisch an den Anwendungsbeispielen in Kapitel 5.3 durchgeführt.

4.2 Expertensystem¹¹⁶

Ein planmäßig ausführbarer Plan ist insbesondere von den verfügbaren Informationen abhängig (IAEA, 2016, S. 14). Hierzu sind einerseits Informationen der rückzubauenden Anlage und andererseits Erfahrungswerte aus anderen Projekten relevant. Aus diesem Grund sollten für die Planung eines kerntechnischen Rückbauprojekts die Erfahrungen bereits abgeschlossener kerntechnischer Rückbauprojekte oder Teilprojekte genutzt werden. Dies setzt einerseits voraus, dass die relevanten Erfahrungsdaten zur Verfügung gestellt werden. Wenn dies der Fall ist, müssen die verfügbaren Daten nutzbar gemacht werden. Dies bedeutet, dass die zur Verfügung gestellten Daten in adäquater Weise strukturiert und gespeichert werden und relevante Daten für ein zu planendes kerntechnisches Rückbauprojekt in geeigneter Weise ausgewählt werden können.

¹¹⁶ Teile dieses Kapitels sind aus Hübner et al. (2018b) entnommen.

Aus diesem Grund ist in einem ersten Schritt zur Planung eines kerntechnischen Rückbauprojekts zu überlegen, wie die Daten bereits abgeschlossener oder noch laufender Projekte genutzt werden können. Dies bezieht sowohl die Konzeption zur Dokumentation und Speicherung, die Wahl einer geeigneten Software als auch die Implementierung mit ein (vgl. Kapitel 4.2.1).

Zur Verwendung der gespeicherten Daten bietet es sich an, regelbasierte Abfragen zu erstellen, um nicht alle gespeicherten, sondern lediglich die für ein zu planendes Projekt relevanten Daten zu identifizieren. Darüber hinaus sollten die abgerufenen Daten in einem Format vorliegen, sodass die Daten möglichst einfach ausgewertet und für die weitere Planung genutzt werden können. Aus diesem Grund wird die Verwendung des in dieser Arbeit entwickelten Expertensystems in Kapitel 4.2.2 näher beschrieben.

In Kapitel 4.2.3 wird darauf eingegangen, welche Daten bereits im Expertensystem hinterlegt sind und wie in Zukunft weitere Daten erhoben und gespeichert werden können.

4.2.1 Datenbankentwicklung

Damit eine Datenbank zur Sammlung und gezielten Abfrage von Erfahrungswerten über einen längeren Zeitraum hinweg den an sie gestellten Anforderungen und Erwartungen gerecht wird und Fehler sowie Schwachstellen bereits bei der Entwicklung ausgeschlossen werden können, ist ein gut durchdachter Datenbankentwurf von hoher Relevanz. In der Literatur existieren verschiedene Modelle zur Entwicklung einer Datenbank, die im Folgenden kurz vorgestellt werden.

Zur Entwicklung von Software ist das sogenannte „**Wasserfallmodell**“ eines der bekanntesten Modelle. Das Wasserfallmodell beschreibt verschiedene Schritte, die nicht streng sequentiell, sondern iterativ durchgeführt werden

sollen. Teilweise sind Rückschritte im Wasserfallmodell notwendig, um Fehler in der Erstellung einer Software zu beheben. Nähere Informationen zum Wasserfallmodell sind in Royce (1987) zu finden. Ausgehend von diesem allgemeinen Modell zur Softwareentwicklung entwickelten einige Autoren das Wasserfallmodell zur Datenbankentwicklung weiter.

Der Datenbankentwurf nach Geisler (2014) sieht die folgenden vier Schritte vor:

1. **Erarbeiten eines konzeptionellen Designs:** Auf der Grundlage einer Analyse der realen Umgebungsbedingungen und den Anforderungen an die zu entwickelnde Datenbank wird ein Datenmodell erstellt, das die Realität möglichst genau abbilden soll. Hierbei werden die Art der Datenbank und das Datenbankmanagementsystem (DBMS) noch nicht definiert, sodass das konzeptionelle Datenmodell plattformunabhängig bleibt.
2. **Auswahl eines geeigneten DBMS:** Hierbei soll das DBMS das konzeptionelle Design abbilden können. Des Weiteren spielen die Kosten (Anschaffungs- bzw. Lizenzkosten, Kosten für Betrieb und Installation), die Plattformabhängigkeit bzw. Portierbarkeit, die Hardwareanforderungen, die Kompatibilität zu bereits bestehenden Systemen sowie die zum Umgang mit dem DBMS notwendige Ausbildung der Mitarbeiter eine wichtige Rolle.
3. **Erarbeiten des logischen Designs:** Das plattformunabhängige konzeptionelle Modell wird in eine von dem ausgewählten DBMS abhängige Zielplattform überführt, z. B. in ein relationales Datenmodell.

4. **Physikalisches Design einer Datenbank:** Die Art der physikalischen Speicherung der Datenelemente ist entscheidend, um die Performance bestmöglich auszunutzen, und ist maßgeblich abhängig von der zur Verfügung stehenden Hardware und dem verwendeten DBMS. Hierbei werden die Speicherorte der einzelnen Elemente der Datenbank sowie der Zugriff auf diese festgelegt.

Ein ähnliches Datenbankentwurfsmodell wie Geisler (2014) schlagen auch Lang und Lockemann (1995) vor, wobei diese ein noch stärkeres Gewicht auf die Anforderungsanalyse legen. Saake et al. (2013) schlagen ein siebenstufiges Phasenmodell zum Datenbankentwurf vor, welches die vier Schritte von Geisler (2014) und die vier Schritte von Lang und Lockemann (1995) detaillierter beschreibt. Der Datenbankentwurfsprozess von Saake et al. (2013) sieht die folgenden Phasen vor: Anforderungsanalyse, konzeptioneller Entwurf, Verteilungsentwurf, logischer Entwurf, Datendefinition, physischer Entwurf sowie Implementierung und Wartung. Hierbei wird insbesondere der Verteilungsentwurf hervorgehoben, der relevant ist, wenn die zu speichernden Daten auf mehreren verschiedenen Datenträgern verteilt gespeichert werden.

Aus den in der Literatur vorgeschlagenen Datenbankentwurfsmodellen wird im Folgenden ein für die Erstellung eines Expertensystems im Rahmen dieser Arbeit passendes Vorgehen abgeleitet. Dieses vereint die Vorteile der genannten Modelle und ist auf die vorliegende Aufgabenstellung angepasst. Das in dieser Arbeit berücksichtigte und im Folgenden angewendete Datenbankentwurfsmodell besteht aus den in Abbildung 4.2 aufgeführten Schritten. Eine Begründung für die Wahl dieser Schritte ist in Hübner et al. (2018b) zu finden.



Abbildung 4.2: Datenbankentwurfsmodell dieser Arbeit

Da bereits durch das logische Design (vierter Schritt des Datenbankentwurfsmodells) in dieser Arbeit ein physischer Entwurf implementiert wird, ist der physische Entwurf (fünfter Schritt des Datenbankentwurfsmodells) in dieser Arbeit nicht auszuführen. Aus diesem Grund werden im Folgenden die ersten vier Schritte aus Abbildung 4.2 näher beschrieben.

4.2.1.1 Anforderungsanalyse

In der Anforderungsanalyse sollen die realen Begebenheiten des Anwendungsfalls „Rückbau kerntechnischer Anlagen“ betrachtet und hieraus Anforderungen an die zu erstellende Datenbank abgeleitet werden. Hierbei ist vor allem zu klären, welche Informationen bzw. Daten zur Nutzung des Expertensystems benötigt sowie abgefragt und somit in der Datenbank gespeichert werden sollen.

Das Ziel der Nutzung des Expertensystems ist es, dass relevante Daten vergangener Rückbauprojekte als Erfahrungswerte für zu planende

kerntechnische Rückbauprojekte identifiziert werden können. Dazu sollten die relevanten Daten möglichst so ausgegeben werden, dass diese für die Simulation verschiedener Szenarien ohne eine Bearbeitung nutzbar sind. Relevante Daten für eine Simulation können aus den Anforderungen an die Scheduling Methode aus Kapitel 3.1 abgeleitet oder können Kapitel 4.3.3.1 entnommen werden. Diese umfassen die folgenden Punkte:

- Vorgangsbezogene Informationen zu:
 - Name des Vorgangs
 - Anzahl möglicher Modi
 - Je Modus eine Angabe zu:
 - Art der Verteilung der Vorgangsdauer (deterministisch oder betaverteilt)
 - Parameter der Dauer (bei deterministischen Dauern ein deterministischer Wert; bei betaverteilten Dauern die minimale, maximale und wahrscheinlichste Dauer)
 - Je verfügbarer Ressource die benötigte Anzahl der jeweiligen Ressource
 - Wahrscheinlichkeit der Ausführung
 - Betrag der Erhöhung oder Senkung der Restbetriebskosten durch die Beendigung des Vorgangs
 - Maximale Anzahl an zulässigen Wiederholungen
 - Angabe der Anzahl normaler Nachfolger
 - Angabe aller normalen Nachfolger (Nummern der Vorgänger)
 - Angabe der Anzahl no-wait Nachfolger¹¹⁷
 - Angabe aller no-wait Nachfolger (Nummern der Vorgänger)

¹¹⁷ No-wait Nachfolger entsprechen der in Kapitel 3.1 beschriebenen unterbrechungsfreien Abfolge von Vorgängen, d. h. bestimmte Vorgänge sollen unmittelbar und ohne Pausen (ohne Wartezeit) hintereinander ausgeführt werden.

- Ressourcenbezogene Informationen:
 - Name der Ressource
 - Maximal verfügbare Anzahl dieser Ressource im gesamten Projektverlauf
 - Art der Ressource (erneuerbar oder nicht-erneuerbar)
 - Kosten je Einheit und Zeiteinheit
 - Beschaffungskosten
- Projektbezogene Kosten:
 - Vorgegebene Deadline des Projektabschlusses
 - Höhe der Restbetriebskosten zu Beginn des Rückbauprojekts

Da die aufgeführten Daten Erfahrungsdaten bereits abgeschlossener Rückbauprojekte sind, sollten diese Daten dem zugehörigen Rückbauprojekt zugeordnet sein. Dies ist auch für die Wahl relevanter Daten für ein zu planendes Rückbauprojekt von Bedeutung. Denn entweder soll der Anwender direkt nach den Daten eines bereits abgeschlossenen und in im Expertensystem hinterlegten kerntechnischen Rückbauprojekts suchen können oder er möchte sich Daten von Projekten ausgeben lassen, die dem zu planenden Rückbauprojekt möglichst ähnlich sind. Für solche Abfragen sind zusätzliche Angaben über die einem Projekt zugehörigen Daten notwendig. Aus diesem Grund sollen je gespeichertem Projekt in der Datenbank folgende Informationen hinterlegt werden:

- Name des Rückbauprojekts
- Reaktortyp
- Generation des Reaktors

Es ist abzusehen, dass mit zunehmender Anzahl an in der Datenbank gespeicherten Projekten weitere Informationen eines Projekts gespeichert werden könnten, wie beispielsweise das Land, in dem das Rückbauprojekt stattfand, Namen der Hersteller der Reaktoren oder die Namen der Rückbauunternehmen, die das gespeicherte Rückbauprojekt durchgeführt

haben. Die Datenbank ist daher so konzipiert, dass Erweiterungen dieser Art vorgenommen werden können.

4.2.1.2 Konzeptionelles Datenmodell

Zur grafischen Beschreibung eines realen Sachverhalts in einem möglichst exakten und vollständigen Datenmodell hat sich die Sprache des Entity-Relationship-Modells (ER-Modell) etabliert. Die ER-Modellierung wird auch in dieser Arbeit zur Beschreibung des konzeptionellen Datenmodells verwendet (zur grafischen Darstellung wird die Crow's-Foot-Darstellung verwendet (Geisler, 2014)). Die zugrundeliegenden Konzepte und Darstellungsweisen der ER-Modellierung werden im Folgenden als bekannt vorausgesetzt. Nähere Informationen zum ER-Modell und seiner Modellierung sind in Chen (1976) und Jarosch (2016) zu finden. Des Weiteren sind in Hübner et al. (2018b) eine Zusammenfassung der ER-Modellierung und eine ausführliche Übertragung auf den geschilderten Anwendungsfall zu finden. Im Folgenden werden lediglich die wesentlichen Erkenntnisse zur Erstellung des konzeptionellen Datenmodells in dieser Arbeit beschrieben.

Gemäß Jarosch (2016) werden zur Erstellung des konzeptionellen Datenmodells die folgenden vier Schritte durchgeführt:

1. **Objektklassifizierung:** Identifizierung von Objekttypen, deren Informationen gespeichert werden sollen. Hierbei ist zu beachten, dass es sich um eine Menge aus gleichartigen Objekten handelt und nicht um konkrete Instanzen des Objekttyps. Es wird somit lediglich der Informationstyp und im Weiteren deren Struktur sowie deren abstrakten Eigenschaften festgehalten, aber nicht deren konkrete wertmäßige Ausgestaltung.

2. **Abstraktion:** Die Vielfalt aller bekannten Informationen über die Objekttypen wird auf einen definierten Satz relevanter Eigenschaften reduziert. Wie bereits erläutert wurde, wird lediglich die abstrakte Eigenschaft, nicht aber der Eigenschaftswert einer Instanz festgelegt.
3. **Identifizierung:** Hierbei wird eine Methode angewendet, um verschiedene Objekte desselben Objekttyps zu unterscheiden. Zur Unterscheidung der Objekte werden die Attributwerte mit identifizierender Eigenschaft (teilweise durch künstliche Attributwerte mit identifizierender Eigenschaft) oder die Kombination mehrerer Attributwerte mit (teil-)identifizierenden Eigenschaften verwendet. Die identifizierende Eigenschaft wird auch als Schlüssel bezeichnet.
4. **Sachlogische Zusammenhänge:** Beschreibung der sachlogischen Zusammenhänge der Objekttypen untereinander. Hierbei handelt es sich um die Beschreibung der Beziehungen zwischen Objekttypen bzw. Objekten. Hierbei sind Beziehungen zwischen Objekten des gleichen Objekttyps (rekursive Beziehungstypen) und Beziehungen zwischen Objekten unterschiedlicher Objekttypen (duale Beziehungstypen) zu unterscheiden. Um die Beziehungstypen aussagekräftig zu machen, werden auch die Optionalität und die Kardinalität der Beziehungen angegeben.

Darüber hinaus werden als Kriterien zur Qualitätssicherung des konzeptionellen Datenmodells die ersten drei Normalformen¹¹⁸ herangezogen. Insgesamt ergibt sich somit das in Abbildung 4.3 dargestellte konzeptionelle Datenmodell zum Speichern von Erfahrungswerten kerntechnischer Rückbauprojekte.

¹¹⁸ Informationen zu den Normalformen können u.a. in Jarosch (2016) nachgelesen werden.

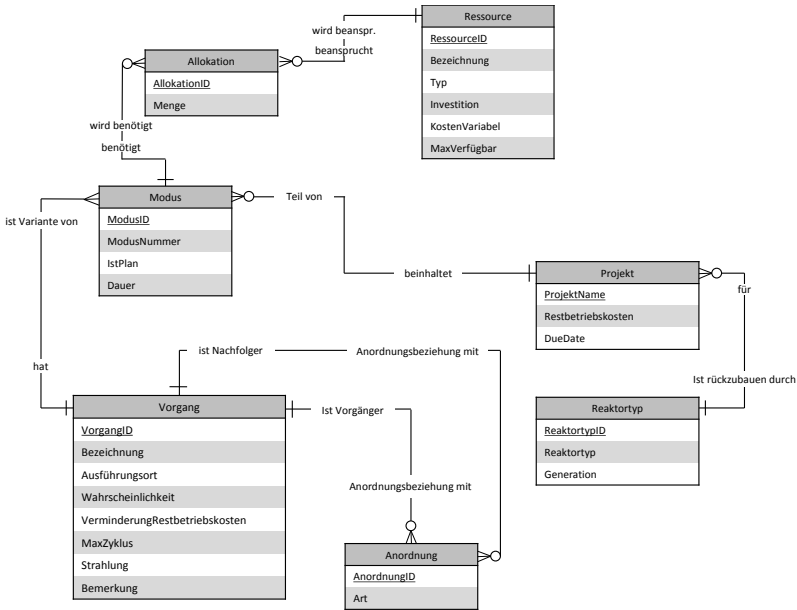


Abbildung 4.3: Konzeptionelles Datenmodell zum Speichern von Erfahrungswerten kerntechnischer Rückbauprojekte

4.2.1.3 Auswahl eines geeigneten Datenbankmanagementsystems

Zur Auswahl eines Datenbankmanagementsystems (DBMS) wird zunächst das Datenbankmodell ausgewählt. Hierbei kann zwischen verschiedenen Modellen unterschieden werden:

Hierarchische Datenbanken werden für die Nutzung des Anwendungsfalls dieser Arbeit ausgeschlossen, da sie keine sogenannten CM:CN-Beziehungen¹¹⁹ darstellen können und ihr Management sowie die Implementierung nicht so einfach handhabbar sind wie bei anderen

¹¹⁹ Für detaillierte Informationen zu CM:CN-Beziehungen vgl. Hübner et al. (2018b).

Datenbankmodellen (Jarosch, 2016, S. 118f.; Geisler, 2014, S. 55f.). Aufgrund ihrer strukturellen Abhängigkeit (beispielsweise dass zur Verwendung des Datenbankmodells die Struktur der Daten bekannt sein muss) bieten sich auch *Netzwerk-Datenbankmodelle* nicht für den Anwendungsfall dieser Arbeit an (Geisler, 2014, S. 59). Insbesondere aufgrund der strukturellen Unabhängigkeit (Geisler, 2014, S. 59f.) sind *relationale Datenbanken* für den Anwendungsfall dieser Arbeit einsetzbar. Der größte Vorteil eines relationalen Datenbankmodells gegenüber anderen Datenbankmodellen ist das relationale DBMS (RDBMS), welches eine komplette Abkapselung von der physikalischen Datenspeicherung ermöglicht. Dies bedeutet, dass sich der Anwender keine Gedanken über die physikalische Datenspeicherung machen muss und sich ausschließlich mit der logischen Struktur der Daten beschäftigen kann. (Geisler, 2014, S. 60) Nähere Informationen zu relationalen Datenbanken und ihren Eigenschaften sind in Elmasri und Navathe (2011), Geisler (2014), Jarosch (2016) und Sauer (2002) zu finden. In Hübner et al. (2018b) sind die für diese Arbeit relevanten Eigenschaften relationaler Datenbanken zusammengefasst. Neben relationalen Datenbanken bieten sich für den Einsatz in dieser Arbeit auch sogenannte NoSQL-Datenbanken an. NoSQL-Datenbanken werden vor allem zur Verarbeitung sehr großer Datenmengen (Big Data) verwendet. (Meier und Kaufmann, 2016, S. 18) Insbesondere aufgrund der Popularität und des im Gegensatz zu NoSQL-Datenbanken höheren Reifegrads von relationalen Datenbanken wird dieses Datenbankmodell für diese Arbeit als sinnvoll angesehen und ausgewählt. Des Weiteren sind auch die DBMS für relationale Datenbanken weiter verbreitet, was ebenfalls für die Wahl dieses Datenbankmodells spricht.

Auf der Grundlage des gewählten Datenbankmodells ist auch die Wahl eines DBMS möglich. Die populärsten RDBMS sind MySQL, Microsoft Server SQL und Microsoft Access. Da im Rahmen dieser Arbeit nur vergleichsweise kleine relationale Datenbanken benötigt werden, ist die Verwendung von Microsoft Access als RDBMS ausreichend. Darüber hinaus

existieren weitere Vorteile, welche für die Verwendung von Microsoft Access sprechen. Insbesondere ist die Möglichkeit der benutzerfreundlichen Datenabfrage bzw. Datenmanipulation über ein grafisches Front-End ein großer Vorteil dieses RDBMS. Außerdem spricht die weite Verbreitung und Kompatibilität mit anderen gängigen Programmen der Microsoft Office Suite, wie bspw. Microsoft Excel, für die Nutzung von Microsoft Access.

Sollten die Datenbankanforderungen im Zeitverlauf komplexer und umfangreicher werden, dann ist jederzeit ein Wechsel auf eine Microsoft SQL Server-Datenbank mit Hilfe einer Migration möglich.

4.2.1.4 Logisches Design

Im Folgenden wird das konzeptionelle Datenmodell aus Kapitel 4.2.1.2 auf das in Kapitel 4.2.1.3 ausgewählte Datenbankmodell der relationalen Datenbank angepasst und in dem in Kapitel 4.2.1.3 ausgewählten DBMS Microsoft Access implementiert.

Hierzu sind einige Anpassungen des konzeptionellen Datenmodells notwendig, um es zu einem relationalen Modell umzuwandeln. Einerseits werden die Objekttypen mit ihren Attributen in sogenannte Relationen umgewandelt, die in Tabellenform dargestellt werden. Andererseits werden die Beziehungstypen mit Hilfe des Verweisprinzips mittels Fremdschlüsseln in die Relationen integriert. Anstatt von Objekttypen und Beziehungstypen im konzeptionellen ER-Modell existieren im logischen Entwurf des relationalen Modells nur noch Relationen, die auch als Tabellen darstellbar sind, um eine bessere Verständlichkeit zu erreichen. Im Folgenden werden die einzelnen Relationen vorgestellt, die in Microsoft Access implementiert sind.

In der Relation „Reaktortyp“ werden Informationen über den Typ des Reaktors gespeichert, z. B. ob es sich um einen Druckwasser- oder Siedewasserreaktor handelt (vgl. Abbildung 4.4). Als Primärschlüssel wird das

organisatorische Attribut „ReaktortypID“ verwendet. Diesem wird in Microsoft Access der Felddatentyp „AutoWert“ zugewiesen, sodass die Domäne dieses Attributs lediglich Zahlen vom Zahlentyp „Long Integer“ beinhaltet und der Wert automatisch beim Anlegen einer neuen Instanz mit einer Zahl aus diesem Bereich belegt wird.

Reaktortyp	
Feldname	Felddatentyp
ReaktortypID	AutoWert
Reaktortyp	Text
Generation	Zahl

Reaktortyp(ReaktortypID, Reaktortyp, Generation)

Abbildung 4.4: Relation "Reaktortyp"

Wie im konzeptionellen Modell aus Kapitel 4.2.1.2 erarbeitet wurde, sind „Reaktortyp“ und „Generation“ weitere Attribute der Relation „Reaktortyp“. Das Attribut „Reaktortyp“ kann mit einem kurzen Text mit bis zu 100 Zeichen und das Attribut „Generation“ mit einer Zahl vom Typ Integer belegt werden. Die Eingabe eines Wertes beim Attribut „Reaktortyp“ ist im Anwendungsfall obligatorisch, während nicht zwingend eine Generation hinterlegt werden muss. Dies ist dem Umstand geschuldet, dass nicht für jeden Reaktortyp unterschiedliche Generationen existieren.

Die Relation „Projekt“ in Abbildung 4.5 besitzt als eindeutigen Primärschlüssel das Attribut „ProjektName“, welches mit einem kurzen Text von maximal 100 Zeichen zu belegen ist. Als Fremdschlüssel ist in dieser Relation der Primärschlüssel „ReaktortypID“ aus der Relation „Reaktortyp“ eingefügt, der mit einem Wert aus der Domäne des Primärschlüssels belegt werden muss. Die Eingabe des Fremdschlüssels ist erforderlich, sodass ein 1:CN-Beziehungstyp von der Relation „Reaktortyp“ zur Relation

„Projekt“ entsteht. Die beiden verbleibenden Attribute „Restbetriebskosten“ und „DueDate“ sind beide mit einem Zahlenwert zu belegen und die Eingabe eines Wertes ist bei beiden genannten Attributen obligatorisch. Die Hinterlegung eines Zahlenwertes beim Attribut „Restbetriebskosten“ ist in Form des Typs Double möglich, während beim Attribut „DueDate“ nur Zahlenwerte vom Typ Long Integer speicherbar sind.

Projekt	
Feldname	Felddatentyp
ProjektName	Text
ReaktortypID	Zahl
Restbetriebskosten	Zahl
DueDate	Zahl

Projekt(ProjektName, ↑ReaktortypID↑, Restbetriebskosten, DueDate)

Abbildung 4.5: Relation "Projekt"

Die zur Ausführung eines Projekts benötigten Ressourcen werden im relationalen Modell in der Relation „Ressource“ modelliert. Hierzu wird als Primärschlüssel das Attribut „RessourceID“ verwendet, welches automatisch mit einem Wert vom Typ Long Integer belegt wird (vgl. Abbildung 4.6). Das Attribut „Bezeichnung“ muss mit einem kurzen Text bis zu einer maximalen Länge von 255 Zeichen belegt werden. Das Attribut „Typ“ hingegen muss mit einem kurzen Text von maximal 50 Zeichen belegt werden. Auch für die drei Attribute „Investition“, „KostenVariabel“ und „MaxVerfügbar“ ist die Eingabe eines Wertes erforderlich. Hier können jeweils Zahlenwerte vom Typ Double hinterlegt werden.

Ressource	
Feldname	Felddatentyp
RessourceID	AutoWert
Bezeichnung	Text
Typ	Text
Investition	Zahl
KostenVariabel	Zahl
MaxVerfügbar	Zahl

Ressource(RessourceID, Bezeichnung, Typ, Investition, KostenVariabel, MaxVerfügbar)

Abbildung 4.6: Relation "Ressource"

Die Relation „Vorgang“ besteht aus acht Attributen (vgl. Abbildung 4.7). Als Primärschlüssel fungiert das Attribut „VorgangID“, welches automatisch beim Anlegen eines neuen Datensatzes mit einem eindeutigen Wert vom Typ Long Integer belegt wird. Die drei Attribute „Bezeichnung“, „Ausführungsort“ und „Bemerkung“ sind jeweils mit einem kurzen Text mit einer maximalen Zeichenlänge von 255 Zeichen zu belegen. Die Hinterlegung eines Wertes ist dabei für die Attribute „Ausführungsort“ und „Bemerkung“ optional, für das Attribut „Bezeichnung“ jedoch obligatorisch. Die Attribute „Wahrscheinlichkeit“ und „VerminderungRestbetriebskosten“ müssen mit einem Zahlenwert vom Typ Double belegt werden. Die maximale Zyklusanzahl eines Vorgangs wird im Attribut „MaxZyklus“ in Form eines Zahlenwertes vom Typ Integer hinterlegt, wobei der Standardwert auf „1“ gesetzt ist. Das Attribut „Strahlung“ gibt die Strahlungsintensität wieder und ist mit einem Zahlenwert vom Typ Double zu belegen. Als Standardwert wird für das Attribut „Strahlung“ der Wert „0“ gespeichert. An dieser Stelle ist die Annahme zu nennen, dass die Zykluszahl sowie die Strahlungsintensität für Mitarbeiter bei der Ausführung des Vorgangs unabhängig vom Modus sind.

Vorgang	
Feldname	Felddatentyp
VorgangID	AutoWert
Bezeichnung	Text
Ausführungsort	Text
Wahrscheinlichkeit	Zahl
VerminderungRestbetriebskosten	Zahl
MaxZyklus	Zahl
Strahlung	Zahl
Bemerkung	Text

Vorgang(VorgangID, Bezeichnung, Ausführungsort, Wahrscheinlichkeit, VerminderungRestbetriebskosten, MaxZyklus, Strahlung, Bemerkung)

Abbildung 4.7: Relation "Vorgang"

Zeitliche Anordnungsbeziehungen zwischen Vorgängen werden mit Hilfe der Relation „Anordnung“ gespeichert (vgl. Abbildung 4.8). Als Primärschlüssel dieser Relation wird das Attribut „AnordnungID“ verwendet, welches automatisch mit einem für die Relation eindeutigen Zahlenwert vom Typ Long Integer belegt wird. Des Weiteren enthält die Relation die zwei Fremdschlüsselattribute „VorgangIDVorgänger“ und „VorgangIDNachfolger“. Beide Fremdschlüsselattribute sind jeweils über eine referenzielle Integrität mit dem Primärschlüssel „VorgangID“ aus der Relation „Vorgang“ verbunden und können somit nur Werte annehmen, die bereits dort vergeben wurden. Dadurch wird jeweils ein 1:CN-Beziehungstyp vom Attribut „VorgangID“ aus der Relation „Vorgang“ zu den Attributen „VorgangIDVorgänger“ und „VorgangIDNachfolger“ der Relation „Anordnung“ gespeichert. Als letztes Attribut der Relation „Anordnung“ ist das Attribut „Art“ zu nennen, welches angibt, ob es sich um einen no-wait oder einen normalen Nachfolger handelt.

Anordnung		
	Feldname	Felddatentyp
🔑	AnordnungID	AutoWert
	VorgangIDVorgänger	Zahl
	VorgangIDNachfolger	Zahl
	Art	Text

**Anordnung(AnordnungID, ↑VorgangIDVorgänger↑,
↑VorgangIDNachfolger↑, Art)**

Abbildung 4.8: Relation "Anordnung"

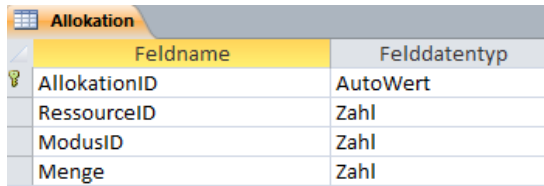
Jeder Vorgang kann in verschiedenen Modi ausgeführt werden. Die je Modus zu speichernden Informationen sind in der Relation „Modus“ hinterlegt (vgl. Abbildung 4.9). Der Primärschlüssel wird automatisch als Zahlenwert vom Typ Long Integer generiert und im Attribut „ModusID“ gespeichert. Mit dem Fremdschlüssel „ProjektName“ existiert durch eine referenzielle Integrität auf den Primärschlüssel der Relation „Projekt“ eine Beziehung zur Relation „Projekt“. Auf die gleiche Weise wird auch mit dem Fremdschlüssel „VorgangID“ durch eine referenzielle Integrität auf den Primärschlüssel der Relation „Vorgang“ eine Beziehung zur Relation „Vorgang“ erstellt. Bei beiden Beziehungen handelt es sich jeweils um einen 1:CN-Beziehungstyp, der jeweils von den Relationen „Vorgang“ und „Projekt“ auf die Relation „Modus“ zeigt. Zusätzliche Attribute der Relation „Modus“ sind „ModusNummer“, „IstPlan“ und „Dauer“. Das Attribut „ModusNummer“ ist mit einem Zahlenwert vom Typ Integer zu belegen und enthält den hinterlegten Standardwert „1“. Für das Attribut „IstPlan“ gibt es nur zwei Möglichkeiten der Wertbelegung. Entweder es wird mit dem Text „Ist“ oder mit dem Text „Plan“ belegt, um die Dimension des Wertes des Attributs „Dauer“ anzugeben. Das Attribut „Dauer“ ist mit einem Zahlenwert vom Typ Double zu belegen.

Modus	
Feldname	Felddatentyp
ModusID	AutoWert
ProjektName	Text
VorgangID	Zahl
ModusNummer	Zahl
IstPlan	Text
Dauer	Zahl

**Modus(ModusID, ↑ProjektName↑, ↑VorgangID↑,
ModusNummer, IstPlan, Dauer)**

Abbildung 4.9: Relation "Modus"

Mit Hilfe der Relation „Allokation“ (vgl. Abbildung 4.10) wird eine Beziehung zwischen den Relationen „Modus“ und „Ressource“ hergestellt, um zu speichern, welche Ressourcen von welchem Ausführungsmodus eines Vorgangs beansprucht werden. Der Primärschlüssel „AllokationID“ wird automatisch mit einem Zahlenwert vom Typ Long Integer belegt. Die Beziehung zwischen den Relationen „Modus“ und „Ressource“ wird durch die Fremdschlüsselattribute „RessourceID“ und „ModusID“ erstellt, die jeweils über referenzielle Integrität mit den Primärschlüsseln der Relationen „Ressource“ und „Modus“ verknüpft sind. Dadurch entstehen zwei 1:CN-Beziehungstypen, die jeweils von der anderen Relation in Richtung der Relation „Allokation“ bestehen. Die Eingabe beider Fremdschlüssel ist erforderlich. Ebenso ist die Eingabe eines Zahlenwertes vom Typ Double für das Attribut „Menge“ erforderlich, um die Höhe der beanspruchten Ressourcen festzuhalten. Dabei ist ein Standardwert von „0“ hinterlegt.



Allokation	
Feldname	Felddatentyp
AllokationID	AutoWert
RessourceID	Zahl
ModusID	Zahl
Menge	Zahl

Allokation(AllokationID, ↑RessourceID↑, ↑ModusID↑, Menge)

Abbildung 4.10: Relation "Allokation"

Das gesamte logische Design mit allen Beziehungen der zuvor genannten Relationen ist in Abbildung 4.11 dargestellt.

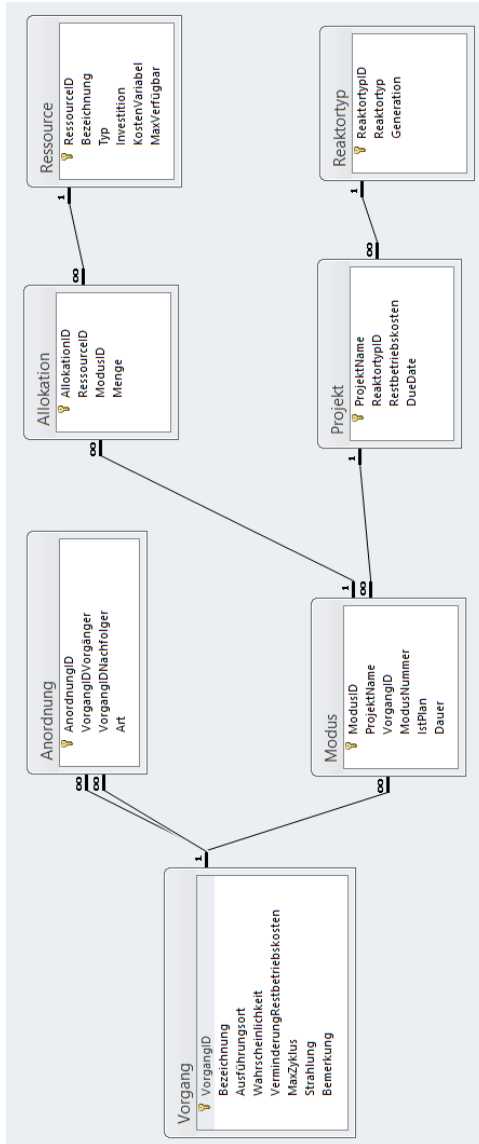


Abbildung 4.11: Logisches Design des Expertensystems, implementiert in Microsoft Access

Mit diesem logischen Design ist gleichzeitig auch ein physischer Entwurf implementiert worden, da das RDBMS Microsoft Access bei der Erstellung des logischen Designs automatisch einen physischen Entwurf anlegt, der nicht weiter bearbeitet werden muss (Geisler, 2014, S. 60).

4.2.2 Implementierung und Verwendung des Expertensystems

Wie in Kapitel 4.2.1.3 beschrieben wurde, ist das Expertensystem in Microsoft Access implementiert. Zur fehlerfreien Verwendung des Expertensystems müssen in Microsoft Access relevante Verweise auf Objektbibliotheken gesetzt werden (vgl. Abbildung 4.12). Hierzu muss der Visual-Basic Editor geöffnet werden (z. B. durch das Drücken von ALT+F11). Im Menü muss anschließend erst auf „Extras“ und anschließend auf „Verweise“ geklickt werden, damit sich die in Abbildung 4.12 dargestellte Ansicht öffnet. Sofern eine ältere Version der Microsoft Access Datenbank verwendet wird, können die Bezeichnungen abhängig von der installierten Version minimal abweichen, z. B. anstatt „Microsoft Excel 16.0 Object Library“ kann es „Microsoft Excel 14.0 Object Library“ heißen.

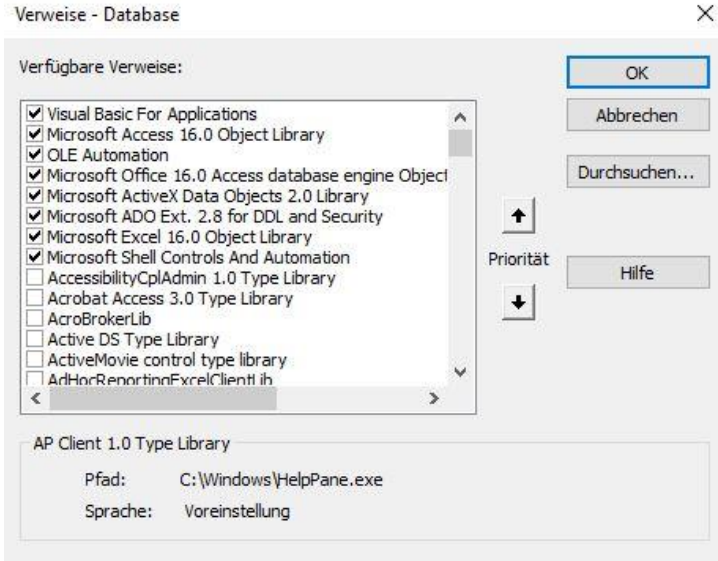


Abbildung 4.12: Verweise auf Objektbibliotheken in Microsoft Access

Grundsätzlich ist bei der Verwendung des Expertensystems zwischen der Dateneingabe und der Datenabfrage zu unterscheiden. Sollen die Erfahrungswerte eines abgeschlossenen Projekts in das Expertensystem integriert werden, dann werden diese Werte durch die Dateneingabe in der Datenbank des Expertensystems gespeichert. Auf die gleiche Weise können auch bereits in der Datenbank gespeicherte Daten geändert werden. Sofern ein Projekt geplant werden soll, kann durch Datenabfragen geprüft werden, ob hierzu relevante Daten in der Datenbank des Expertensystems enthalten sind und diese Daten können durch regelbasierte Abfragen als Grundlage für die nachfolgende Planung extrahiert werden. Im Folgenden werden zunächst in Kapitel 4.2.2.1 die Funktionsweise der Dateneingabe sowie die Änderung von gespeicherten Daten erläutert. Anschließend wird in Kapitel 4.2.2.2 die Datenabfrage beschrieben.

4.2.2.1 Dateneingabe und Änderung von gespeicherten Daten

Prinzipiell kann die Dateneingabe in der Entwurfsansicht direkt in die hinterlegten Tabellen erfolgen. Insbesondere wenn bereits Daten in Tabellenform vorliegen, z. B. in Microsoft Excel, können diese gezielt in die notwendigen Tabellen in Microsoft Access kopiert werden. Im Folgenden wird das Vorgehen zum Eintragen von Daten über die erstellten Formulare in Microsoft Access beschrieben.

Beim Starten des Expertensystems in Microsoft Access öffnet sich zu Beginn das in Abbildung 4.13 abgebildete Formular „f_Start“:

f_Start

Reaktortyp und evtl. Generation auswählen:

Daten ausgeben: Allgemein: Reaktorbezogen: Projektbezogen:

Ressourcen

Daten bearbeiten:

Neuen Reaktortyp aufnehmen Neues Projekt anlegen

Vorgänge einpflegen Allokation Ressourcen


Ressourcen bearbeiten

Abbildung 4.13: Formular "f_Start" beim Starten des Expertensystems

Für die Dateneingabe und Datenbearbeitung ist lediglich der untere Teil des Formulars mit der Überschrift „Daten bearbeiten“ von Interesse (in Abbildung 4.13 rot umrandet). Durch das Klicken auf die Schaltfläche mit der Aufschrift „Neuen Reaktortyp aufnehmen“ öffnet sich das Formular „Formular_Reaktortyp“ (vgl. Abbildung 4.14).

The screenshot shows a web browser window with the title 'Formular_Reaktortyp'. The page has a light blue header with the text 'Reaktortyp' and a 'Zurück' button on the right. Below the header, there is a left sidebar with a navigation arrow. The main content area contains two input fields: 'Reaktortyp' with the text 'Siedewasserreaktor' and 'Generation' with the number '1'.

Abbildung 4.14: Formular "Formular_Reaktortyp"

In der Navigationsleiste am linken unteren Bildrand kann zwischen den bereits in der Datenbank hinterlegten Datensätzen navigiert werden. Durch das Klicken auf das Symbol  kann ein leerer Datensatz aufgerufen werden, in den ein neuer Datensatz (in diesem Fall ein neuer Reaktortyp) eingetragen werden kann.

Bereits bestehende Datensätze können bei Wunsch geändert werden. Wird ein neuer leerer Datensatz im Formular „Formular_Reaktortyp“ (vgl. Abbildung 4.14) aufgerufen, dann sind zwei leere Eingabefelder zu erkennen. Im ersten Feld ist der Reaktortyp in Textform und im zweiten Feld die Generation des Reaktortyps als Zahl des Typs Integer einzutragen (wobei die Angabe der Generation nicht obligatorisch ist). Die Eingaben werden sofort gespeichert, ohne dass eine Bestätigung der Eingaben zum Speichern notwendig ist. Es kann also mit der Navigation in der Navigationsleiste fortgefahren werden oder es kann durch das Klicken auf die Schaltfläche „Zurück“ am oberen rechten Bildschirmrand zum Formular

„f_Start“ zurückgekehrt werden, wobei auch das aktuell geöffnete Formular (in diesem Fall „Formular_Reaktortyp“) geschlossen wird.

Sofern ein neues Projekt in der Datenbank gespeichert werden soll, muss im Formular „f_Start“ (vgl. Abbildung 4.13) die Schaltfläche mit der Aufschrift „Neues Projekt anlegen“ geklickt werden. Dadurch öffnet sich das Formular „f_Projekt“ (vgl. Abbildung 4.15).

Rückbauprojekt	
ProjektName	Biblis A
ReaktortypID	1
Restbetriebskosten	5000
Due Date	100

Abbildung 4.15: Formular "f_Projekt"

Auch in diesem Formular kann über die Navigationsleiste am unteren linken Bildschirmrand zwischen den bestehenden Datensätzen navigiert oder ein neuer leerer Datensatz aufgerufen werden. Um ein neues Projekt anzulegen, sind vier Eingabefelder zu befüllen (vgl. Abbildung 4.15). Im ersten Feld ist der Name des neuen Projekts in Textform einzugeben. Im Feld „ReaktortypID“ kann aus einem Drop-Down-Menü aus den bereits angelegten Reaktortypen ausgewählt werden. Sofern für das neu anzulegende Projekt der korrekte Reaktortyp nicht im Drop-Down-Menü erscheint, muss dieser zuvor über das Formular „Formular_Reaktortyp“ (vgl. Abbildung 4.14) eingegeben werden. In den beiden verbliebenen Eingabefeldern des Formulars „f_Projekt“ sind abschließend noch die Restbetriebskosten zu Beginn des Rückbauprojekts im Feld „Restbetriebskosten“ und die Deadline im Feld „Due Date“ zu hinterlegen.

Die eingegebenen Daten werden, wie zuvor erklärt, automatisch gespeichert.

Um Vorgänge eines Projekts zu speichern, ist die Navigation durch das Klicken auf die Schaltfläche „Vorgänge einpflegen“ im Formular „f_Start“ notwendig, sodass sich das Formular „f_Vorgänge“ öffnet. Dieses Formular ist, wie in Abbildung 4.16 dargestellt, umfangreicher als die anderen bisher beschriebenen Formulare. Dies liegt daran, dass in das Formular „f_Vorgänge“ Unterformulare eingegliedert sind, um die Anordnungsbeziehungen und Modi von Vorgängen ebenfalls mit diesem Formular abzuspeichern. Auch hier lassen sich durch die Navigationsleiste am linken unteren Bildschirmrand bestehende Datensätze durchsehen bzw. abändern und erweitern sowie neue leere Datensätze mit Daten befüllen.

The screenshot shows the 'Eingabeformular Vorgänge' (Input Form Tasks) interface. It includes a 'Zurück' (Back) button in the top right corner. The main form contains several input fields: 'VorgangID' (1), 'Bezeichnung' (Wand abschleifen), 'Ausführungsort' (Innere Wand 2), 'Wahrscheinlichkeit' (100,00%), 'Verminderung der Restbetriebskosten' (50), 'Max. Zyklenzahl' (10), 'Strahlungsintensität' (0), and 'Bemerkung' (fy). Below these are two tables: 'Vorgänger' (Predecessors) and 'Nachfolger' (Successors). The 'Vorgänger' table has one entry with 'VorgangIDVorgänger' 1 and 'VorgangIDNachfolger' 1. The 'Nachfolger' table has three entries: (1, 2) normal, (1, 3) direkt, and (1, 4) normal. At the bottom, there is a sub-form titled 'Modi des Vorgangs' (Modes of the Task) with fields for 'Projektzugehörigkeit des Modus' (Biblis A), 'VorgangID' (1), 'Modusnr. des Vorgangs' (1), 'Ist/Plan - Wert' (Ist), and 'Dauer' (3). A navigation bar at the bottom left shows 'Datensatz: 1 von 1' and search options.

Abbildung 4.16: Formular "f_Vorgänge" mit Unterformularen

Im Feld „VorgangID“ wird jedem neuen Vorgang automatisch eine neue, eindeutige Nummer zugeordnet. Im Feld „Bezeichnung“ ist die Bezeichnung des Vorgangs in Textform einzutragen. Auch der Ausführungsort ist in Textform zu vervollständigen. Die Wahrscheinlichkeit der Ausführung, die Verminderung der Restbetriebskosten, die maximale Anzahl an Zyklen und die Strahlungsintensität sind in Zahlenwerten einzutragen. Hierbei sind jeweils Standardwerte von „0“ hinterlegt, außer bei der maximalen Anzahl an Zyklen. Hier beträgt der voreingestellte Standardwert „1“. Optional ist dem jeweiligen Vorgang eine Bemerkung hinzuzufügen.

Über die beiden Unterformulare „Vorgänger“ und „Nachfolger“ können alle Vorgänger und Nachfolger des aktuell einzupflegenden Vorgangs über jeweils ein Drop-Down-Menü ausgewählt werden. Hierzu ist zum Eintragen aller Vorgänger im linken Unterformular, das mit „Vorgänger“ betitelt ist, jeweils der aktuelle Vorgang unter „VorgangIDNachfolger“ einzutragen und alle Vorgänger dieses Vorgangs sind unter der Rubrik „VorgangIDVorgänger“ einzupflegen bzw. einzusehen. Sofern Nachfolger des aktuell betrachteten Vorgangs eingetragen werden sollen, können im rechten Unterformular, welches mit „Nachfolger“ betitelt ist, jeweils der aktuelle Vorgang unter „VorgangIDVorgänger“ und alle Nachfolger dieses Vorgangs unter der Rubrik „VorgangIDNachfolger“ eingetragen bzw. eingesehen werden. In beiden Unterformularen ist des Weiteren die Art der Anordnungsbeziehung anzugeben. Hierbei ist zwischen den Varianten „normal“ (für die Normalfolge von Vorgängen, sogenannte normale Nachfolger) und „direkt“ (für Vorgänge mit unterbrechungsfreier Abfolge, sogenannte no-wait Nachfolger, vgl. Kapitel 3.1) zu wählen. Werden zukünftig weitere Arten von Anordnungsbeziehungen benötigt, lassen sich diese jederzeit über die Entwurfsansicht in das Auswahlménü integrieren.

Als letzter Abschnitt im Eingabeformular „f_Vorgänge“ befindet sich das Unterformular, in dem die Ausführungsmodi eines Vorgangs gespeichert werden. Im Auswahlfeld „Projektzugehörigkeit des Modus“ ist der Modus eines Vorgangs durch die Drop-Down-Liste einem eingepflegten Projekt

zuzuordnen. Das Feld „VorgangID“ wird automatisch mit der VorgangID des aktuellen Vorgangs befüllt. Anschließend ist einzutragen, um welche Modusnummer es sich handelt und ob es sich bei der einzutragenden Dauer um einen Ist- oder einen Planwert handelt. Die Eingabe der Vorgangsdauer in diesem Modus ist zwingend notwendig.

Um zu speichern, welche Ressourcen zur Ausführung eines Modus benötigt werden, sind ausgehend vom Formular „f_Start“ zunächst die Ressourcen durch das Klicken auf die Schaltfläche „Ressourcen bearbeiten“ zu speichern. Es öffnet sich das Formular „f_Ressource“ (vgl. Abbildung 4.17), in dem jeder neuen Ressource automatisch eine neue, eindeutige ID zugeordnet wird. Des Weiteren sind eine Bezeichnung der Ressource in Textform, Investitionskosten, variable Kosten sowie die maximale Verfügbarkeit der Ressource in Zahlenform anzugeben. Der Typ der Ressource kann über ein Drop-Down-Menü ausgewählt werden, wobei zwischen „erneuerbar“ und „nicht erneuerbar“ gewählt werden kann. Diese Auswahl lässt sich jederzeit über die Entwurfsansicht des Formulars erweitern.

RessourceID	11
Bezeichnung	WASS
Typ	erneuerbar
Investition	200000
KostenVariabel	100
MaxVerfügbar	2

Abbildung 4.17: Formular "f_Ressource"

Nachdem die Ressourcen in der Datenbank gespeichert sind, können diese über das Formular „f_Allokation“ den Modi zugeordnet werden

(vgl. Abbildung 4.18). Dieses Formular hat zwei Drop-Down-Menüs aus denen zum einen die Ressource und zum anderen der Modus in Abhängigkeit des Projekts und des Vorgangs ausgewählt werden können. Die je Vorgang und Modus benötigte Anzahl der jeweiligen Ressource ist als Zahlenwert im Feld „Menge“ einzutragen.

The screenshot shows a web form titled "Allokation der Ressourcen auf Modi" with a "Zurück" button in the top right. The form has three input fields: "RessourceID" with a dropdown menu showing "1", "ModusID" with a dropdown menu showing "1", and "Menge" with a text input field containing the number "5".

Abbildung 4.18: Formular "f_Allokation"

4.2.2.2 Datenabfrage

Die Abfrage von in der Datenbank des Expertensystems gespeicherten Daten ist ebenfalls vom Formular „f_Start“ möglich. Im Gegensatz zur Dateneingabe und Datenänderung ist jedoch zur Datenabfrage nicht der untere Teil des Formulars, sondern das Drop-Down-Menü und die Schaltflächen der Überschrift „Daten ausgeben:“ relevant. Ohne die Wahl eines Reaktortyps und falls vorhanden einer Generation aus dem Drop-Down-Menü ist zunächst nur die Schaltfläche „Ressourcen“ unter der Überschrift „Allgemein:“ sichtbar. Durch das Klicken auf diese Schaltfläche wird der Bericht „b_Ressourcen“ geöffnet, der alle in der Datenbank enthaltenen Ressourcen mitsamt ihren Investitionskosten, variablen Kosten, ihrem Typ und der maximalen Verfügbarkeit auflistet.

Sofern im Drop-Down-Menü ein Reaktortyp und gegebenenfalls dessen Generation ausgewählt wurde(n) erscheinen weitere Schaltflächen unter der Rubrik „Reaktorbezogen:“ und ein zweites Drop-Down-Menü mit der Aufforderung, ein Rückbauprojekt auszuwählen (vgl. Abbildung 4.19).

f_Start

Reaktortyp und evtl. Generation auswählen:

Siedewasserreaktor 2

Rückbauprojekt wählen:

Daten ausgeben:

Allgemein: Reaktorbezogen: Projektbezogen:

Ressourcen

Durchlauf Reaktortyp

Dauer Reaktortyp

Daten bearbeiten:

Neuen Reaktortyp aufnehmen Neues Projekt anlegen

Vorgänge einpflegen Allokation Ressourcen

Ressourcen bearbeiten

Abbildung 4.19: Formular "f_Start" mit ausgewähltem Reaktortyp

Durch das Klicken auf die Schaltfläche mit der Beschriftung „Durchlauf Reaktortyp“ öffnet sich ein Bericht, der alle Vorgänge mit ihrer ID und ihrer Bezeichnung ausgibt, die Teil eines Projekts mit dem ausgewählten Reaktortyp sind. Den Vorgängen werden dabei die Anzahl ihrer ausführbaren Modi, ihre Ausführungswahrscheinlichkeit, die Verminderung der Restbetriebskosten sowie die maximale Anzahl an durchführbaren Zyklen zugeordnet. Des Weiteren werden je Vorgang dessen Vorgänger und die Anzahl sowie eine Auflistung der normalen als auch der no-wait Nachfolger ausgegeben.

Durch das Klicken auf die Schaltfläche mit der Aufschrift „Dauer Reaktortyp“ öffnet sich der Bericht „b_Dauer_Reaktorbezogen“. In diesem werden ebenfalls alle Vorgänge aufgeführt, die Teil eines Rückbauprojekts des ausgewählten Reaktortyps sind. Bei diesem Bericht liefert die Ausgabe zu jedem Vorgang die Modusnummern, in welchen dieser ausgeführt wurde, sowie die Dauer und deren Art der Verteilung. Des Weiteren werden die Art und die Menge der benötigten Ressourcen ausgegeben. Ist die Dauer eines Vorgangs in einem Modus, in verschiedenen in der Datenbank gespeicherten Projekten dieselbe, dann wird die Art der Verteilung mit einem „DET“ gekennzeichnet, was einer deterministischen Verteilung entspricht. Existieren für einen Vorgang in unterschiedlichen Projekten unterschiedliche Dauern, da bspw. Modus eins des Vorgangs eins bei Projekt A länger gedauert hat als bei Projekt B, dann wird die Dauer durch die Angabe von drei mit Semikolon getrennten Zahlen ausgegeben: Als erster Wert wird die minimale Dauer aller Dauern des gewählten Vorgangs aller Projekte in diesem Modus angegeben. Der zweite Wert entspricht der maximalen Dauer. Der dritte Wert ist die durchschnittliche Dauer des gewählten Vorgangs aller Projekte in diesem Modus. Sofern diese drei Werte angegeben werden, liegt eine Beta-Verteilung vor, die mit „BETAS“ gekennzeichnet wird.

Im zweiten, neu erschienenen Drop-Down-Menü im Formular „f_Start“ können alle Rückbauprojekte ausgewählt werden, die den Rückbau eines Reaktors einer kerntechnischen Anlage des im ersten Drop-Down-Menü ausgewählten Reaktortyps beinhalten. Nach dem Treffen der Projektauswahl erscheinen weitere Schaltflächen unter der Rubrik „Projektbezogen“ (vgl. Abbildung 4.20).

The screenshot shows a web application window titled "f_Start". It contains the following elements:

- A label "Reaktortyp und evtl. Generation auswählen:" followed by a dropdown menu with "Siedewasserreaktor 2" selected.
- A label "Rückbauprojekt wählen:" followed by a dropdown menu with "Würgassen" selected.
- A section "Daten ausgeben:" with four columns of buttons:
 - Allgemein:** "Ressourcen"
 - Reaktorbezogen:** "Durchlauf Reaktortyp", "Dauer Reaktortyp"
 - Projektbezogen:** "Info zu Projekt", "Dauer Projekt", "Durchlauf Projekt"
- A section "Daten bearbeiten:" with two columns of buttons:
 - Left column: "Neuen Reaktortyp aufnehmen", "Vorgänge einpflegen", "Ressourcen bearbeiten"
 - Right column: "Neues Projekt anlegen", "Allokation Ressourcen"

Abbildung 4.20: Formular "f_Start" mit ausgewähltem Reaktortyp und ausgewähltem Rückbauprojekt

Die neu erschienenen Schaltflächen „Dauer Projekt“ und „Durchlauf Projekt“ geben die Daten des gewählten Projekts aus, wobei die gleichen Informationen enthalten sind wie in den zuvor geschriebenen Berichten bzgl. der Dauern und des Durchlaufs bei der Auswahl eines Reaktortyps. Durch das Klicken auf die Schaltfläche „Info zu Projekt“ wird ein Bericht mit den dem Rückbauprojekt zugrundeliegenden Informationen geöffnet. Dies sind der Projektname, die Restbetriebskosten, die vorgegebene Deadline

und der rückzubauende Reaktortyp sowie gegebenenfalls dessen Generation.

Alle durch die Schaltflächen geöffneten Berichte verfügen über die „Excel Export“- und „Zurück“-Schaltflächen. Diese befinden sich jeweils am oberen rechten Rand des Berichts. Die Schaltfläche mit der Aufschrift „Zurück“ funktioniert analog zu den in Kapitel 4.2.2.1 beschriebenen „Zurück“-Schaltflächen (der aktuelle Bericht wird dadurch geschlossen und das Formular „f_Start“ wird erneut zur aktiven Ansicht). Wird die Schaltfläche mit der Aufschrift „Excel Export“ in einem der Berichte betätigt, dann wird eine Excel-Datei mit den Abfragedaten erzeugt, die im aktuellen Verzeichnis abgespeichert und automatisch geöffnet wird.

4.2.3 Integration existierender Daten in das Expertensystem

Bisher existieren weltweit erst wenige abgeschlossene kerntechnische Rückbauprojekte. Im Rahmen dieser Arbeit war es trotz intensiver Bemühungen nicht möglich, reale Daten eines abgeschlossenen, laufenden oder zukünftigen kerntechnischen Rückbauprojektes zu erhalten, die ausreichende Informationen zur Berechnung eines Schedules für den vollständigen oder teilweisen Rückbau einer kerntechnischen Anlage beinhalten bzw. die im Rahmen dieser Arbeit verwendet werden dürfen. Die für den Rückbau kerntechnischer Anlagen zuständigen Betreiber sowie Rückbauunternehmen waren aufgrund des mit den Erfahrungswerten einhergehenden Wettbewerbsvorteils bislang nicht an einer Weitergabe ihrer Daten interessiert. Auch frei verfügbare Daten lagen nur in einer unzureichenden Detailtiefe vor und beinhalteten in der Regel keine quantitativen Informationen.

Zum Testen und zur Verifikation des in dieser Arbeit entwickelten Planungswerkzeugs werden Referenzdaten für drei fiktive kerntechnische

Rückbauprojekte erstellt, die in Kapitel 5.1 näher erläutert werden. Hierzu werden Informationen verschiedener Teilprojekte, Informationen aus den Sicherheitsberichten der Kernkraftwerksbetreiber E.ON und EnBW sowie Referenzdaten von Projektpartnern aus dem BMBF-geförderten Forschungsprojekt MogaMaR (Hübner et al., 2018a) zugrunde gelegt. Die Daten der erstellten Referenzprojekte wurden auf Basis dieser Informationen selbst erstellt und durch Experten aus dem Bereich des kerntechnischen Rückbaus validiert. Somit wurde durch Experten bestätigt, dass die in dieser Arbeit verwendeten Daten den Rückbau einer fiktiven kerntechnischen Anlage, wie dieser real durchgeführt werden könnte, wiedergeben. Zur späteren Verwendung der Daten und zum Testen des Expertensystems werden die Referenzdaten des Rückbaus einer Gesamtanlage bis zur grünen Wiese (vgl. Kapitel 5.1.3) in der Datenbank des Expertensystems gespeichert.

4.3 Szenariosimulation

Wie bereits in Kapitel 3.6 beschrieben wurde, sollen Unsicherheiten in der Projektplanung mit Hilfe der Konstruktion verschiedener Szenarien analysiert und berücksichtigt werden. Insbesondere die Unsicherheiten bezüglich der Vorgangsdauern als auch der Vorgangsstruktur, d. h. die Ausführung alternativer Vorgänge sowie die Reihenfolge der Ausführung von Vorgängen, können mit Hilfe von Szenarien simuliert werden.

Das Konzept der Szenariosimulation zum Auffinden von robusten Ablaufplänen wird unter anderem von Herroelen und Leus (2004, S. 1612f./ 2005, S. 302f.) sowie von Mavrotas et al. (2015) vorgeschlagen. Auch wenn Mavrotas et al. (2015) die Simulation von Szenarien zur Analyse der Robustheit von Plänen mit mehreren Zielkriterien verwenden, ist das Vorgehen auf das in dieser Arbeit durchgeführte Vorgehen übertragbar. Mavrotas et al. (2015) schlagen vor, verschiedene Szenarien mit Hilfe der

sogenannten Monte-Carlo-Simulation zu erstellen. Das Ziel der Monte-Carlo-Simulation ist es, mit Hilfe einer großen Anzahl an Zufallsexperimenten Planungsprobleme zu lösen (Fahrmeir et al., 2007; Fishman, 2013). Dieses Prinzip wird auch in dieser Arbeit angewendet, indem viele verschiedene Szenarien simuliert werden, die jeweils als deterministisch angenommen und optimiert werden.

Unter der Simulation von Szenarien wird in dieser Arbeit verstanden, dass verschiedene Realisierungsmöglichkeiten eines Projekts antizipiert werden. Diese Realisierungsmöglichkeiten werden als Szenarien bezeichnet und werden modellbasiert sowie automatisiert auf Basis von den in Kapitel 4.2.1.1 sowie in Kapitel 4.3.3.1 aufgeführten Inputdaten erstellt. Im Folgenden wird aufgezeigt, wie die automatisierte Erstellung verschiedener Szenarien in dieser Arbeit erfolgt. Dazu wird insbesondere darauf eingegangen, wie die Vorgangsstruktur, d. h. die Reihenfolge der Vorgänge, als auch die Vorgangsdauern simuliert werden.

Zur Simulation verschiedener Szenarien wird das Konzept der GERT-Netzpläne (vgl. Kapitel 3.5.3) verwendet, welches sowohl Unsicherheiten bzgl. der Vorgangsdauern als auch Unsicherheiten bzgl. der Ausführungswahrscheinlichkeiten von Vorgängen berücksichtigt. Da das Lösen von GERT-Netzplänen mit Hilfe der sogenannten GERT-Reduktion mit Informationsverlusten verbunden ist, wird für ein Rückbauprojekt ein GERT-Netzplan lediglich als Ausgangsnetzwerk genutzt, von dem ausgehend verschiedene Szenarien simuliert werden. Dazu werden die in Kapitel 3.5.3 beschriebenen Eigenschaften der GERT-Netzpläne minimal angepasst und erweitert: In einem GERT-Netzplan G existiert eine Menge an Vorgängen E und eine Menge an Knoten N . Im Folgenden werden die Knoten nicht wie in Kapitel 3.5.3 explizit definiert, sondern diese ergeben sich implizit aus der Beschreibung der Vorgänge und ihrer Eigenschaften (vgl. Kapitel 4.3.1). Des Weiteren werden Vorgänge im Folgenden nicht mehr durch ihre sie umschließenden Knoten, z. B. $\langle k, l \rangle$, sondern durch eine Nummerierung, z. B. $i = 1$, eindeutig identifiziert. Somit existieren J

Vorgänge, wobei $i \in E = \{1, \dots, J\}$ gilt. Ein exemplarischer GERT-Netzplan, anhand dessen im Folgenden die Funktionsweisen zur Simulation der Vorgangsdauer und der Nachfolger erläutert wird, ist in Abbildung 4.25 in Kapitel 4.3.3 dargestellt.

Zur Simulation eines Szenarios wird in einem ersten Schritt ein Netzwerkdurchlauf von der Quelle bis zur Senke eines Netzplans simuliert (vgl. Kapitel 4.3.1). Auf diese Weise werden alle auszuführenden Vorgänge des simulierten Szenarios bestimmt. In einem zweiten Schritt wird anschließend für alle auszuführenden Vorgänge des jeweiligen Szenarios die Dauer berechnet (vgl. Kapitel 4.3.2). Dieses zweistufige Vorgehen kann beliebig oft durchgeführt werden, sodass beliebig viele Szenarien simuliert werden können.

4.3.1 Simulation der Nachfolger

Jeder Vorgang i besitzt eine Ausführungswahrscheinlichkeit p_i , wobei für Vorgänge, die von einem Knoten mit einem stochastischen Ausgang ausgehen, $\sum_i p_i = 1$ und für Vorgänge, die von einem Knoten mit einem deterministischen Ausgang ausgehen, $p_i = 1$ gilt. Die Ausführung eines Vorgangs nach einem Knoten mit deterministischem Ausgang muss zur Simulation nicht mathematisch bestimmt werden, da die Ausführung mit Sicherheit (100 % Wahrscheinlichkeit) ausgeführt wird. Somit ist insbesondere die Entscheidung zu treffen, welcher Vorgang nach einem Knoten mit stochastischem Ausgang auszuführen ist. Um dies mathematisch zu ermitteln, kann mit diskreten Verteilungen gearbeitet werden. Hierbei bestehen verschiedene Möglichkeiten.

Sofern von einem stochastischen Knoten zwei Vorgänge ausgehen, kann die Entscheidung darüber, welcher der beiden Vorgänge ausgeführt wird, mit Hilfe der sogenannten Bernoulli-Verteilung getroffen werden. Mit Hilfe dieser Verteilung kann die Realisierung zweier Alternativen untersucht

werden, wobei die Alternative 1 mit der Wahrscheinlichkeit p_1 und die Alternative 2 mit der Wahrscheinlichkeit $p_2 = 1 - p_1$ realisiert wird. (Mosler und Schmid, 2008) Dies stimmt mit den Annahmen der GERT-Netzpläne überein. Allerdings existieren auch Knoten mit einem stochastischen Ausgang, von denen mehr als zwei alternative Vorgänge ausgehen.

Um Entscheidungen über die Ausführung eines Vorgangs anhand der Auswahl unter mehr als zwei Alternativen zu treffen, kann je Entscheidung eine Zufallszahl gezogen werden. Hierzu bietet sich die Verwendung einer stetigen Gleichverteilung an. Mit Hilfe dieser stetigen Gleichverteilung und dem im Folgenden beschriebenen Verfahren kann auch eine Bernoulli-Verteilung zur Entscheidung zwischen zwei Alternativen simuliert werden. Daher wird in dieser Arbeit für alle Entscheidungen über die Ausführung eines Vorgangs das im Folgenden beschriebene Verfahren unter der Verwendung der stetigen Gleichverteilung angewendet. Mosler und Schmid (2008) definieren eine Gleichverteilung wie folgt: „Eine Zufallsvariable X mit Parameter $a, b \in \mathbb{R}$, mit $a < b$ heißt gleichverteilt, wenn sie die folgende Dichte besitzt:

$$f(x) = \begin{cases} \frac{1}{b-a}, & \text{falls } a \leq x \leq b, \\ 0, & \text{sonst} \end{cases}$$

Gemäß der Logik der GERT-Netzpläne (vgl. Kapitel 3.5.3) beinhaltet die Menge O_k eines Knotens k alle vom Knoten ausgehenden Vorgänge, wobei $\sum_{i \in O_k} p_i = 1$ gilt. Für jeden Vorgang $i \in O_k$ lässt sich anhand seiner Ausführungswahrscheinlichkeit ein Intervall innerhalb eines vorgegebenen Wertebereichs bilden, welches die Ausführungswahrscheinlichkeit repräsentiert. Verdeutlicht wird dies anhand des in Abbildung 4.21 abgebildeten Beispiels.

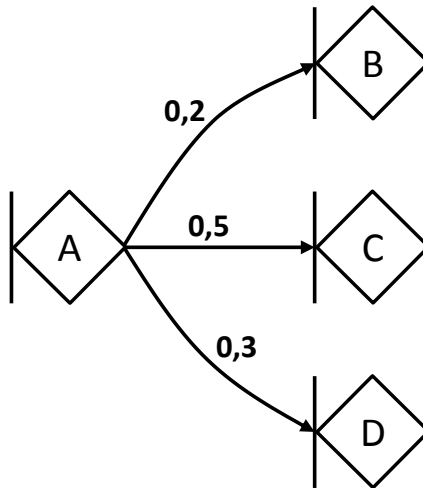


Abbildung 4.21: Beispiel einer stochastischen Vorgangsstruktur

Bei dem in Abbildung 4.21 aufgeführten Beispiel wird die Darstellungsweise als GERT-Netzplan verwendet (vgl. Kapitel 3.5.3) und die Stochastik der Ausführung eines Vorgangs wird mit Hilfe eines STEOR-Knotens abgebildet. In diesem Beispiel gilt, dass die Summe der Ausführungswahrscheinlichkeiten aller vom Knoten A ausgehenden Vorgänge gleich eins ist. Es wird der Wertebereich von 1 bis 100 ($[1; 100]$) vorgegeben. Dieser Wertebereich wird anteilmäßig gemäß der Wahrscheinlichkeiten der drei von Knoten A ausgehenden Vorgänge aufgeteilt, d. h. Vorgang A-B bekommt das Intervall $[1; 20]$, Vorgang A-C das Intervall $[21; 70]$ und Vorgang A-D das Intervall $[71; 100]$ zugeteilt. Um gemäß der Ausführungswahrscheinlichkeit für ein Szenario einen der drei Vorgänge auszuwählen, wird eine Zufallszahl aus dem Wertebereich $[1; 100]$ gezogen. Je nachdem in welches Intervall die Zufallszahl fällt, wird der zum ausgewählten Intervall zugehörige Vorgang in diesem Szenario ausgeführt. Wird beispielsweise die Zufallszahl 27 gezogen, dann fällt diese Zahl in das

Intervall, welches dem Vorgang A-C zugehörig ist, d. h. bei dieser Realisation würde Vorgang A-C ausgeführt werden.

Wie in Kapitel 2.5.3 beschrieben wurde, kann es unter anderem bei der Freimessung dazu kommen, dass Dekontaminationsmaßnahmen wiederholt werden müssen. Dies führt dazu, dass im Netzwerk ein Zyklus entsteht (vgl. Abbildung 4.25 in Kapitel 4.3.3). Zur Abbildung von Zyklen bietet sich die Verwendung von GERT-Netzplänen ebenfalls an. Sofern Zyklen bestehen, kann die maximale Anzahl an Ausführungen eines Vorgangs auf m_f begrenzt werden. Beispielsweise ist die Dekontamination eines Bauteils, wie das Abschleifen der Oberfläche, nicht beliebig häufig ausführbar und sollte auf eine maximale Anzahl an Wiederholungen begrenzt werden. Dazu wird je Vorgang gespeichert, ob und wie oft dieser bereits ausgeführt wurde. Sofern eine erneute Ausführung eines Vorgangs nicht mehr zulässig ist, steht dieser Vorgang bei der Wahl eines Vorgangs nicht mehr zur Verfügung.

4.3.2 Simulation der Vorgangsdauern

Sofern die Vorgänge einer möglichen Realisation, d. h. eines möglichen Szenarios, bestimmt wurden, wird im Anschluss für diese Vorgänge die Vorgangsdauer simuliert. Während die Vorgangsdauern in CPM- und MPM-Netzplänen deterministisch vorgegeben sind, werden diese in PERT- und GERT-Netzplänen als stochastisch oder gemäß der Fuzzy-Logik angenommen (Lootsma, 1989, S. 174f.). Im Folgenden wird sowohl die Fuzzy-Logik als auch die Möglichkeit der Darstellung von Vorgangsdauern als stochastische Verteilungen in PERT- und GERT-Netzplänen vorgestellt. Neben der Funktionsweise werden auch Vor- und Nachteile beider Möglichkeiten beschrieben, sodass im Folgenden herausgearbeitet wird, welche Möglichkeit der Simulation von Vorgangsdauern sich im Rahmen dieser Arbeit am besten eignet.

4.3.2.1 Fuzzy-verteilte Vorgangsdauern

Aufgrund fehlender Erfahrungswerte sind die Wahrscheinlichkeitsfunktionen für die Dauern der Vorgänge in der Regel nicht bekannt. Aus diesem Grund werden die Dauern der Vorgänge häufig von Experten geschätzt. Sofern Experten Vorgangsdauern in Form einer Verteilung schätzen und visualisieren, wird von stochastischen Zeitdauern gesprochen (vgl. Kapitel 4.3.2.2) (Lootsma, 1989, S. 174). Einige Autoren kritisieren dieses Vorgehen, da ihrer Ansicht nach auf diese Weise die erwartete minimale Projektausführungszeit unterschätzt würde (Clark, 1961; Fulkerson, 1962; MacCrimmon und Ryavec, 1964; Martin, 1965; Hartley und Wortham, 1966; Lootsma, 1966). Die in der Regel durch Experten geschätzten Vorgangsdauern werden von Lootsma (1989) als *vage* und *unsicher* bezeichnet. Um diese Problematik zu umgehen, wird vorgeschlagen, fuzzy-verteilte Vorgangsdauern zu verwenden (Lootsma, 1989, S. 175).

Der Begriff „fuzzy“ steht für die Unschärfe, die sich unter anderem auf die mathematische Logik bezieht. Das Konzept der Unschärfe stellt eine Form der Unsicherheit dar und schließt Zustände zwischen wahr und falsch nicht aus. Das im Jahre 1965 von Zadeh entwickelte Konzept versucht dabei unscharfe Begriffe wie beispielsweise „jung“ im Sinne des Alters mathematisch darzustellen. Die Aussage „Person A ist *jünger* und hat *viel* mehr Erfahrung als Person B, wodurch Person A für einen Ausbildungsplatz besser geeignet ist.“ definiert mathematisch nicht eindeutig, was mit „viel“ gemeint ist. Das Verhältnis „jünger“ ist eine unscharfe Relation, da auch mit diesem Begriff keine präzise Aussage getroffen wird. (Noll, 2009, S. 25ff.)

Um mit solchen unscharfen Aussagen umgehen zu können, werden sogenannte Fuzzy-Sets definiert. Dieses Konzept beruht auf der Logik der Mengenlehre. Dabei findet in der klassischen Mengenlehre eine scharfe Trennung der Elemente statt. So gehört ein Element x aus der

Grundmenge X eindeutig zu einer Menge A oder nicht. Anstelle der scharfen Trennung der Elemente von den Mengen ist bei der Unschärfe eine abgestufte Zugehörigkeit zu beobachten, die auch in der Realität auftreten kann. Wird beispielsweise der Versuch unternommen, über das Alter eine Menge zu bilden, dann scheint es nicht sinnvoll zu sein, die Menge „alt“ ab 60 Jahren beginnen zu lassen. Eine Person mit 59 Jahren würde nicht mehr zu der Menge gehören, jedoch hat diese Person eine größere Zugehörigkeit zu der Menge „alt“ als eine andere Person mit 50 Jahren. Fuzzy-Sets stellen unscharfe Mengen oder Fuzzy-Mengen dar und ermöglichen diese Betrachtung. Die Zugehörigkeit eines Elements x zu einem Fuzzy-Set \tilde{A} wird durch eine reelle Zahl aus der abgeschlossenen Menge $[0,1]$ angegeben. Dem Fuzzy-Set wird die Funktion $\mu_{\tilde{A}}$ zugeordnet. Diese Funktion, die eine Zugehörigkeitsfunktion ist, wird folgendermaßen dargestellt: $\mu_{\tilde{A}} : X \rightarrow [0,1]$. Die Grundmenge X kann dabei stetig oder diskret sein.

In dieser Arbeit steht die Planung von Projekten im Vordergrund und dabei ist die Dauer eine stetige Größe. Außerdem ist die Funktion $\mu_{\tilde{A}}(x)$ stückweise stetig. Der Wert $\mu_{\tilde{A}}(x)$ wird Zugehörigkeitsgrad genannt und verdeutlicht, ob ein Element x eher der Menge \tilde{A} zugehört oder nicht. Ein Wert $\mu_{\tilde{A}}(x) = 0$ stellt die Nichtzugehörigkeit des Elements x zu dem Fuzzy-Set dar und $\mu_{\tilde{A}}(x) = 1$ eine volle Zugehörigkeit. Die teilweise Zugehörigkeit haben die Elemente x , die einen Zugehörigkeitsgrad im Intervall $]0,1[$ aufweisen. (Herroelen und Leus, 2005, S. 296; Schultmann und Rentz, 2003)

In Abbildung 4.22 sind eine trianguläre (a) und eine trapezförmige (b) Zugehörigkeitsfunktion dargestellt. Welche Zugehörigkeitsfunktion eingesetzt wird, ist abhängig davon, wie exakt die vorhandene Unschärfe abgebildet werden soll. Der Gedanke an die Wirtschaftlichkeit sollte ebenfalls nicht verloren gehen, da eine exakte Abbildung der Unschärfe auch einen erhöhten Modellierungsaufwand mit sich bringt.

Neben dem Formunterschied unterscheiden sich die trianguläre und die trapezförmige Zugehörigkeitsfunktion bezüglich der Notation einer Fuzzy-Zahl. Eine Fuzzy-Zahl ist als eine konvexe unscharfe Menge über der Grundmenge definiert. Eine weitere Eigenschaft einer Fuzzy-Zahl ist, dass für mindestens ein x die Funktion $\mu_{\tilde{A}}(x)$ den Wert 1 annimmt und $\mu_{\tilde{A}}(x)$ stetig ist. Die Fuzzy-Zahl der triangulären Zugehörigkeitsfunktion wird mit $\tilde{A}_{Dreieck} = (u, m, o)$ dargestellt, wobei $u \leq m \leq o$ gilt. Die drei Variablen u , m und o sind Platzhalter für die drei signifikanten Stellen der Zugehörigkeitsfunktion. u ist die untere Zahl der Grundmenge, ab der $\mu_{\tilde{A}}(x) \geq 0$ und $\mu_{\tilde{A}}(u) = 0$ gilt. Die Variable m gibt die mittlere Zahl mit $\mu_{\tilde{A}}(m) = 1$ an und o ist die obere Zahl mit $\mu_{\tilde{A}}(x \geq o) = 0$. $\tilde{A}_{Trapez} = (u, m_l, m_r, o)$ ist die Kurznotation der Fuzzy-Zahl, die eine trapezförmige Zugehörigkeitsfunktion besitzt. Dabei sind die Variablen u und o wieder Platzhalter für die untere und obere Zahl, wobei m_l und m_r das Intervall $[m_l, m_r]$ angeben, bei der $\mu_{\tilde{A}}(x)$ den Wert 1 annimmt. Weiterhin gilt $u \leq m_l \leq m_r \leq o$. (Kuchta, 2000, S. 306) In Abbildung 4.22 a) wird zusätzlich der sogenannte α -Schnitt dargestellt. Der α -Schnitt eines Fuzzy-Sets ist formal wie folgt definiert:

$$\tilde{A}^\alpha = \{x_i : \mu_{\tilde{A}}(x) \geq \alpha, x_i \in X\}, \text{ für } 0 \leq \alpha \leq 1 \quad (4.1)$$

Dieser Schnitt gibt die Elemente x_i wieder, die einen Zugehörigkeitsgrad größer gleich α haben und vereinfacht mathematische Operationen wie beispielsweise die Addition von zwei Fuzzy-Zahlen (Noll, 2009, S. 28f.).

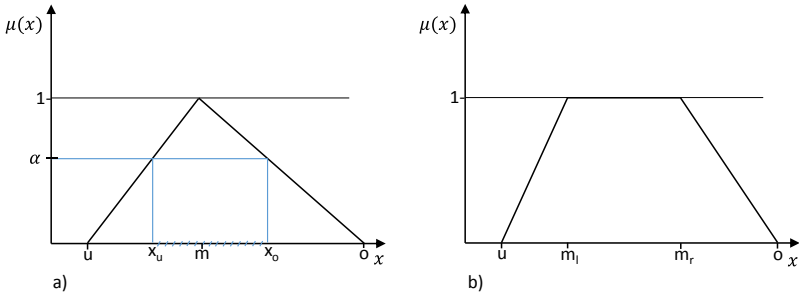


Abbildung 4.22: Trianguläre (a) und trapezförmige (b) Zugehörigkeitsfunktion

Wie in der klassischen Mathematik ist es auch mit Fuzzy-Zahlen möglich, Rechenoperationen durchzuführen oder Fuzzy-Zahlen miteinander zu vergleichen. Eine ausführliche Darstellung der Rechenregeln ist in Bhaskar et al. (2011), Chen und Huang (2007), Lee und Li (1988) sowie Thomas (2009) zu finden. Es zeigt sich, dass Rechenoperationen mit Fuzzy-Zahlen zwar möglich sind, dass diese allerdings zu Fuzzy-Zahlen führen, dessen Intervalle der Unschärfe sich extrem vergrößern. Einerseits ergeben sich sehr große Intervalle, die im Rahmen einer Projektplanung zwar Unsicherheiten gut abdecken, allerdings aufgrund der großen Spannweite wenig aussagekräftig und damit für die Planung nutzlos werden. Andererseits ergeben sich Fuzzy-Zahlen, die für die Projektplanung unrealistisch sind. Beispielsweise ergeben sich bei der Subtraktion, die unter anderem bei der Berechnung frühester und spätester Anfangszeitpunkte oder bei der Berechnung von Puffern durchzuführen ist, negative Zeitpunkte. Des Weiteren ist mit Rechenoperationen von Fuzzy-Zahlen ein erheblicher Rechenaufwand verbunden. Aus diesen Gründen bietet sich die Berechnung von Netzplänen mit Hilfe von Fuzzy-Zahlen in dieser Arbeit nicht an.

4.3.2.2 Stochastisch-verteilte Vorgangsdauern

Im Gegensatz zur Fuzzy-Methode liefert die stochastische Variante ein umso genaueres Ergebnis, je mehr historische Daten vorhanden sind (Lootsma, 1989, S. 174 ff.). Das kann sich bei Tätigkeiten, wie bei Projekten und insbesondere beim Rückbau kerntechnischer Anlagen, als vorteilhaft erweisen. Denn mit zunehmender Erfahrung kann ein solches Projekt umso genauer geplant werden. Im Gegensatz zu Fuzzy-Zahlen, bei denen mit zunehmendem Wissen über die Vorgangsdauern die Punkte u, m und o in einer triangulären bzw. die Punkte u, m_l, m_r und o in einer trapezförmigen Zugehörigkeitsfunktion genauer bestimmt werden können, kann bei stochastisch verteilten Vorgangsdauern zusätzlich zu diesen charakteristischen Punkten auch der Verlauf zwischen diesen Punkten dargestellt werden. Des Weiteren kann auch mit wenigen Erfahrungswerten, z. B. wie bei einer triangulären Zugehörigkeitsfunktion mit den Punkten u, m und o , der Verlauf einer stochastisch verteilten Vorgangsdauer dargestellt werden. Die verschiedenen Möglichkeiten bzw. Verteilungen, um Vorgangsdauern stochastisch verteilt darzustellen und auf diese Weise eine deterministische Vorgangsdauer zu simulieren, werden im Folgenden vorgestellt.

Wie bereits bei fuzzy-verteilten Vorgangsdauern angewendet (vgl. Kapitel 4.3.2.1), schlagen Malcolm et al. (1959) eine 3-Zeiten-Schätzung mit Hilfe der optimistischen, d. h. kürzesten, (t_o), pessimistischen, d. h. längsten, (t_p) und wahrscheinlichsten (t_w) Vorgangsdauer vor. t_o und t_p bilden somit ein kompaktes Intervall $[t_o, t_p]$, innerhalb dessen die Vorgangsdauer liegt. In der pessimistischen Ausführungsdauer ist eine Häufung von auftretenden Störfaktoren berücksichtigt, die eine Zeitverlängerung bewirken kann. Es wird somit angenommen, dass sich eine längere Vorgangsdauer in der Regel negativ auf ein Projekt auswirkt, da beispielsweise eine längere

Projektgesamtdauer oder höhere Kosten die Folge sein können¹²⁰. Die optimistische Dauer enthält hingegen keine Verlustzeiten und ist die kürzest mögliche Ausführungsdauer eines Vorgangs (Schwarze, 2006). Zwischen der optimistischen und der pessimistischen Ausführungsdauer liegt an einer beliebigen Stelle die häufigste, beziehungsweise wahrscheinlichste Dauer, die unter normalen Bedingungen für die Durchführung eines Vorgangs benötigt wird (Schwarze, 2006). Die 3-Zeiten-Schätzung bezieht somit die Unsicherheit hinsichtlich der Ausführungsdauer eines Vorgangs mit ein. Es ist allerdings zu beachten, dass jeder der drei Schätzwerte selbst unsicher ist, sodass das Unsicherheitsproblem durch die 3-Zeiten-Schätzung zwar verringert, jedoch nicht komplett eliminiert wird (Schwarze, 2006).

Sofern in diesem Intervall jede Vorgangsdauer gleich wahrscheinlich ist, handelt es sich um eine **stetige Gleichverteilung**. Hierbei entspricht t_ω jeder annehmbaren Dauer im Intervall $[t_o, t_p]$. Die Dichtefunktion der Gleichverteilung einer auf diesem Intervall gleichverteilten Zufallsvariable ist wie folgt definiert (Cottin und Döhler, 2013, S. 30):

$$f(x) = \begin{cases} \frac{1}{t_p - t_o}, & \text{für } t_o \leq x \leq t_p \\ 0, & \text{sonst} \end{cases} \quad (4.2)$$

Wie im Folgenden gezeigt wird, stellt die Gleichverteilung einen Sonderfall der sogenannten Beta-Verteilung dar. Um aufgrund der Übersichtlichkeit möglichst alle Arten potentieller Verteilungen der Vorgangsdauer mit möglichst wenigen Verteilungsarten darzustellen, wird die Gleichverteilung im Folgenden nicht näher untersucht.

¹²⁰ An dieser Stelle sei angemerkt, dass sich in dem in dieser Arbeit erstellten Planungswerkzeug längere Vorgangsdauern auch positiv auf das Gesamtprojekt auswirken können, z.B. wenn ein Modus so viel günstiger ist als die alternativen Modi, sodass die durch die längere Ausführungsdauer entstehenden Restbetriebskosten kompensiert werden können.

Eine Gleichverteilung der Vorgangsdauer ist äußerst selten. In der Regel wird ein Vorgang mit t_ω am wahrscheinlichsten ausgeführt, wobei für diesen Wert die Verteilung ein globales Maximum besitzt. In einer solchen Wahrscheinlichkeitsverteilung nehmen t_o und t_p in der Regel die geringsten Werte an, sodass diese globale Minima darstellen. (Malcolm et al., 1959)

Die sogenannte **Dreiecks- oder Simpson-Verteilung** genügt diesen Eigenschaften und dessen Verteilung ist definiert als (Cottin und Döhler, 2013, S. 45f.):

$$f(x) = \begin{cases} \frac{2(x - t_o)}{(t_p - t_o)(t_\omega - t_o)}, & \text{falls } t_o \leq x < t_\omega \\ \frac{2(x - t_p)}{(t_p - t_o)(t_\omega - t_p)}, & \text{falls } t_\omega < x \leq t_p \\ 0, & \text{sonst} \end{cases} \quad (4.3)$$

In der Regel kann der Verlauf der Dreiecksverteilung mit dem Verlauf der triangulären Zugehörigkeitsfunktion in der Fuzzy-Logik verglichen werden. Es handelt sich bei der Dreiecksverteilung um eine typische 3-Zeiten-Schätzung. Johnson (1997) kommt in seiner Untersuchung der Güte der Dreiecksverteilung als Stellvertreter der Beta-Verteilung zu dem Schluss, dass in speziellen Fällen die Dreiecksverteilung eine Beta-Verteilung approximieren kann. Nach Williams (1992, S. 265ff.) ist die Dreiecksverteilung im Gegensatz zur Beta-Verteilung zwar einfacher anzuwenden, allerdings ist die Beta-Verteilung flexibler, sodass die Wahrscheinlichkeiten verschiedener Vorgangsdauern realistischer dargestellt werden können. Aus diesem Grund wird die Beta-Verteilung im Folgenden näher analysiert.

Die **Beta-Verteilung** eignet sich, um Verteilungen darzustellen, wenn nur wenige Informationen vorliegen. Des Weiteren ist es möglich, mit Hilfe der

Beta-Verteilung und der Zeitpunkte t_o , t_ω und t_p die Verteilung der Vorgangsdauer flexibler zu modellieren als mit der Dreiecksverteilung. Die Beta-Verteilung ist auf dem Intervall $[0,1]$ definiert. Die Dichtefunktion einer Beta-verteiltern Zufallsvariable mit den Parametern $p, q > 0$ ist auf diesem Intervall definiert als (Cottin und Döhler, 2013, S. 44):

$$f(x) = \frac{x^{p-1} * (1-x)^{q-1}}{B(p, q)} \quad (4.4)$$

mit: $B(p, q) = \int_0^1 t^{p-1} * 1 - q^{q-1} dt$

Hierbei ist $B(p, q)$ die sogenannte Beta-Funktion, die als Normierungsfaktor dafür sorgt, dass es sich bei f tatsächlich um eine Dichtefunktion handelt. Des Weiteren gilt für $p, q > 0$, dass $B(p, q) = \frac{\Gamma(p)\Gamma(q)}{\Gamma(p+q)}$ gilt, wobei Γ die weiter unten aufgeführte Gama-Funktion bezeichnet. (Cottin und Döhler, 2013, S. 44)

Mit Hilfe der Parameter p und q ist es möglich, den Verlauf der Dichtefunktion zu beeinflussen. Beispielsweise gilt, dass eine Beta-Verteilung abhängig von p und q folgende Formen annehmen kann (Cottin und Döhler, 2013, S. 44) (vgl. Abbildung 4.23):

- $p < q$ rechtsschief,
- $p > q$ linksschief,
- $p = q$ symmetrisch,
- $p, q < 1$ U-förmig.

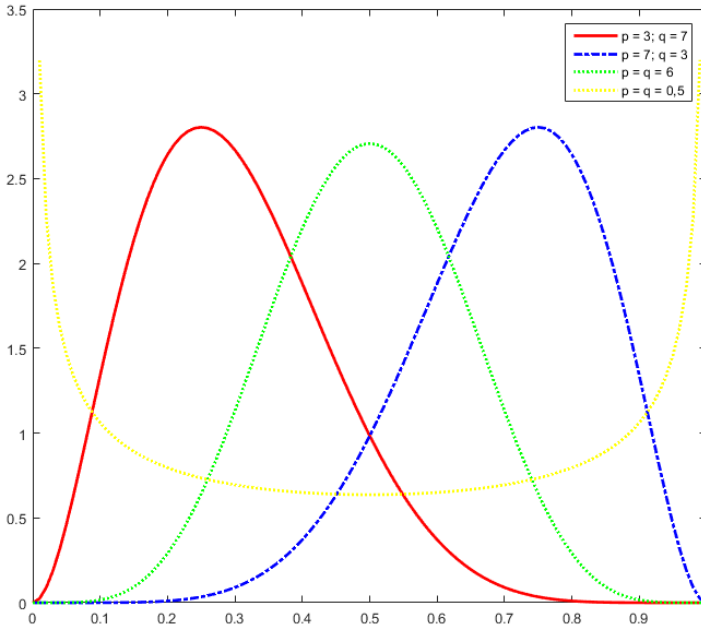


Abbildung 4.23: Verschiedene Verteilungen der Beta-Funktion

Des Weiteren können mit Hilfe dieser Parameter andere Verteilungen dargestellt werden, sodass die Beta-Verteilung beispielsweise eine Dreiecksverteilung (bei $p = 2$ und $q = 1$ bzw. $q = 2$ und $p = 1$) oder eine Gleichverteilung ($p = q = 1$) darstellen kann (Cottin und Döhler, 2013, S. 44) (vgl. Abbildung 4.24).

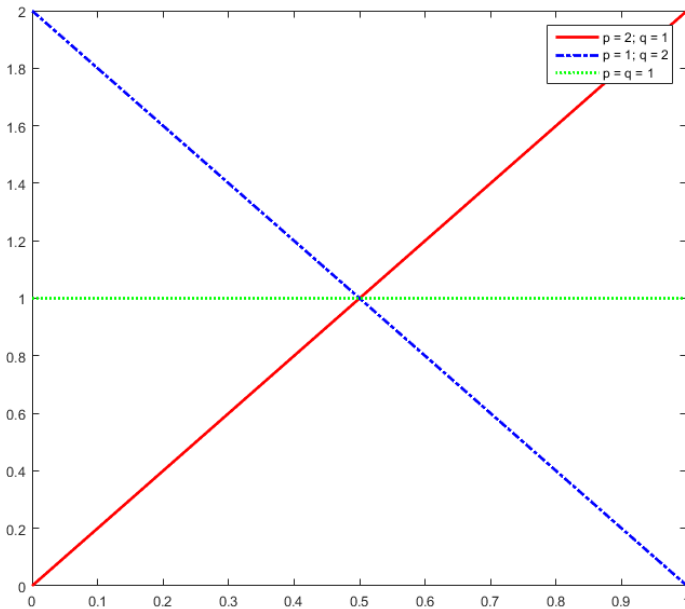


Abbildung 4.24: Darstellung einer Dreiecks- und Gleichverteilung mit der Beta-Funktion

Die Beta-Verteilung ist wie bereits beschrieben auf dem Intervall $[0,1]$ definiert. Um die Beta-Verteilung auf einem beliebigen Intervall $[t_o, t_p]$ darstellen zu können, kann diese verschoben und skaliert werden. Wenn eine Zufallsvariable X mit $B(p, q)$ auf dem Intervall $[0,1]$ Beta-verteilt ist, kann diese Verteilung mit Hilfe der Transformation $Y := t_o + (t_p - t_o) \cdot X$ auf einem beliebigen Intervall $[t_o, t_p]$ dargestellt werden. Für $x \in [t_o, t_p]$ lautet die Dichtefunktion einer allgemein Beta-verteiltern Zufallsvariablen dann (Cottin und Döhler, 2013, S. 44):

$$f(x) = \frac{(x - t_o)^{p-1} * (t_p - x)^{q-1}}{B(t_o, t_p, p, q)} \quad (4.5)$$

mit: $B(t_o, t_p, p, q) = B(p, q) * (t_p - t_o)^{p+q-1}$

Um auf diese Weise eine Beta-Verteilung auf einem beliebigen Intervall aufzustellen, werden vier Parameter benötigt (t_o, t_p, p, q) . Die Abfrage der Parameter p und q durch Experten eines Fachgebietes des Projekts, z. B. Experten im Rückbau kerntechnischer Anlagen, ist allerdings nur schwer oder gar nicht zu bewerkstelligen, da diese Formparameter nicht unmittelbar aus den Vorgangsdauern ersichtlich sind. Demgegenüber können die Parameter t_o , t_p und t_w einfach und günstig erfragt werden (Clark, 1962; Malcolm et al., 1959). Aus den Parametern t_o , t_p und t_w können wiederum die Parameter p und q hergeleitet werden.

Zur Herleitung der Parameter p und q bestehen verschiedene Möglichkeiten. Davis (2008) nutzt dazu die PERT-Formeln für den Erwartungswert und die Varianz (Davis, 2008; Salas-Morera et al., 2013):

$$\mu = \frac{t_o + 4t_w + t_p}{6} \quad (4.6)$$

$$\sigma^2 = \frac{(t_p - t_o)^2}{36} \quad (4.7)$$

Durch die Umformung der Beta-Verteilung nach den Parametern p und q können diese wie folgt berechnet werden (Davis, 2008):

$$p = \left(\frac{\mu - t_o}{t_p - t_o} \right) \left[\left(\frac{(\mu - t_o)(t_p - \mu)}{\sigma^2} \right) - 1 \right] \quad (4.8)$$

$$q = \left(\frac{t_p - \mu}{t_p - t_o} \right) \left[\left(\frac{(\mu - t_o)(t_p - \mu)}{\sigma^2} \right) - 1 \right] \quad (4.9)$$

Durch das Einsetzen der Werte von μ und σ^2 in die umgeformte Beta-Verteilung können die Parameter p und q wie folgt berechnet werden (Davis, 2008):

$$p = \left(\frac{2(t_p + 4t_\omega - 5t_o)}{3(t_p - t_o)} \right) \left[1 + 4 \left(\frac{(t_\omega - t_o)(t_p - t_\omega)}{(t_p - t_o)^2} \right) \right] \quad (4.10)$$

$$q = \left(\frac{2(5t_p - 4t_\omega - t_o)}{3(t_p - t_o)} \right) \left[1 + 4 \left(\frac{(t_\omega - t_o)(t_p - t_\omega)}{(t_p - t_o)^2} \right) \right] \quad (4.11)$$

Allerdings konnte gezeigt werden, dass die Parameter t_o und t_p häufig zu optimistisch geschätzt werden (Moder und Rodgers, 1968) wodurch μ eine Fehlerrate von 40 % und σ^2 eine Fehlerrate von 549 % haben. Um die Parameter μ sowie σ^2 genauer schätzen zu können und anschließend durch das Einsetzen in die umgeformte Formel der Beta-Verteilung die Parameter p und q genauer bestimmen zu können, schlägt Regnier (2005) die Abfrage von Konfidenzintervallen vor. Keefer und Bodily (1983) schlagen die Abfrage von drei Quantilen vor. Dadurch sei der mittlere absolute Fehler von μ auf 0,02 % und der mittlere absolute Fehler von σ^2 auf 0,5 % gesunken (Keefer und Verdini, 1993). Um μ und σ^2 noch genauer schätzen zu können, schlagen Lau et al. (1996) die Abfrage von sieben Quantilen vor.

Die Verwendung von Quantilen führt zwar zu besseren Schätzungen für μ und σ^2 , allerdings sind die befragten Experten in der Regel nicht in der Lage, die benötigten Quantile zu schätzen. Aus diesem Grund bietet sich in der Praxis auch der Einsatz der von Keefer und Verdini (1993) vorgestellten angepassten PERT-Formeln durch Quantile nicht an. Um die Schätzung von Quantilen durch Experten zu vermeiden, schlägt Premachandra (2001) eine Berechnung von μ und σ^2 abhängig vom Modus vor. Diese Einteilung setzt die Kenntnis der Verteilung der Vorgangsdauern voraus. Allerdings soll die Verteilung der Vorgangsdauern erst durch die Angaben der Experten berechnet werden, sodass das Vorgehen von Premachandra (2001) für den Anwendungsfall dieser Arbeit nicht verwendbar ist.

Insgesamt führt dies zu dem Ergebnis, dass zur Bestimmung der Parameter p und q die Schätzung der Parameter t_o , t_p und t_ω durch Experten am einfachsten und günstigsten ist. Dadurch ist die Berechnung von μ und σ^2 mit

Hilfe der PERT-Formeln prinzipiell am besten geeignet. Allerdings haben einige Autoren gezeigt, dass die Annahme einer Beta-verteilten Variable nicht immer zu den PERT-Formeln für μ und σ^2 führt (Healy et al., 1961; Grubbs, 1962; MacCrimmon und Ryavec, 1964; Moder und Rodgers, 1968; Gallagher, 1987), sondern dass diese nur für eine sehr begrenzte Untergruppe von Beta Verteilungen gilt (Grubbs, 1962; Gallagher, 1987). Herrerías-Velasco et al. (2011) stellen daher eine Weiterentwicklung der PERT-Formeln vor, die berücksichtigt, dass der wahrscheinlichste Wert einer Projektdauer mit dem Modus der Beta-Verteilung übereinstimmt. Hierbei stimmt zwar die Formel zur Berechnung von μ mit der von Malcolm et al. (1959) vorgestellten Formel überein, allerdings fügen Herrerías-Velasco et al. (2011) zur Berechnung von σ^2 einen „PERT Varianz Anpassungsfaktor“ ein (Herrerías-Velasco et al., 2011):

$$\mu = \frac{t_o + 4t_\omega + t_p}{6} \quad (4.12)$$

$$\sigma^2 = C(\delta) * \frac{(t_p - t_o)^2}{36}, \quad \text{mit } C(\delta) = \frac{5}{7} + \frac{16}{7} * \delta(1 - \delta) \quad \text{und} \quad (4.13)$$

$$\delta = \frac{t_\omega - t_o}{t_p - t_o}$$

Durch das Einsetzen der Formeln (4.12) und (4.13) in die umgeformte Beta-Verteilung (Formeln (4.8) und (4.9)) können p und q wie folgt berechnet werden:

$$p = - \frac{\left(\frac{t_p}{6} - \frac{5t_o}{6} + \frac{2t_\omega}{3}\right)(35t_o^2 - 166t_o t_p + 96t_o t_\omega + 35t_p^2 + 96t_p t_\omega - 96t_\omega^2 - 180)}{4(t_o - t_p)(4t_o t_\omega - 4t_o t_p + 4t_p t_\omega - 4t_\omega^2 + 45)} \quad (4.14)$$

$$q = \frac{\left(\frac{t_o}{6} - \frac{5t_p}{6} + \frac{2t_\omega}{3}\right)(35t_o^2 - 166t_o t_p + 96t_o t_\omega + 35t_p^2 + 96t_p t_\omega - 96t_\omega^2 - 180)}{4(t_o - t_p)(4t_o t_\omega - 4t_o t_p + 4t_p t_\omega - 4t_\omega^2 + 45)} \quad (4.15)$$

Um mit Hilfe von Expertenschätzungen eine möglichst reale Verteilung der Vorgangsdauern zu erhalten, werden im Rahmen dieser Arbeit die Parameter t_o , t_p und t_w von den Experten erfragt oder diese ergeben sich aus der Abfrage des Expertensystems. Im Anschluss werden die Parameter p und q der angenommenen Beta-Verteilung mit Hilfe der von Herrerías-Velasco et al. (2011) angepassten PERT-Formel berechnet.

Wie in Formel (4.4) zu sehen ist, beinhaltet die Beta-Funktion $B(p, q)$ die Gamma-Funktion. Die zugehörige **Gamma-Verteilung** wird im Folgenden der Vollständigkeit halber beschrieben. Die Gamma-Verteilung ist eine Verteilung mit halboffenem Intervall. Im Anwendungsfall der Darstellung der Vorgangsdauern bedeutet dies, dass die minimale Dauer beispielsweise 0 ist und es keine Obergrenze für die maximale Dauer gibt. Die Dichtefunktion einer Gamma-verteilten Zufallsvariable ist für $x > 0$ und die benötigten Parameter $k > 0$ und $\lambda > 0$ definiert als (Cottin und Döhler, 2013, S. 31f.):

$$f(x) = \frac{\lambda^k}{\Gamma(k)} * x^{k-1} * e^{-\lambda x} \quad (4.16)$$

mit $\Gamma(x) = \int_0^{\infty} t^{x-1} * e^{-t} dt$

Hierbei wird $\Gamma(x)$ als Gamma-Funktion bezeichnet. Der Ausdruck $\frac{\lambda^k}{\Gamma(k)}$ dient in der Dichtefunktion als Normierungsfaktor, der gewährleistet, dass der Flächeninhalt unter der Dichtefunktion gleich 1 ist. Die Form der Dichtefunktion hängt vom sogenannten Formparameter k und die Stauchung der Dichtefunktion bzgl. der x-Achse hängt vom sogenannten Skalenparameter λ ab. Sofern $k = 1$ ergibt sich die Exponentialverteilung.

Als weitere Verteilung mit halboffenem Intervall führen McCombs et al (2009) die **Weibull-Verteilung** als mögliche Verteilung zur Darstellung von Vorgangsdauern an. Die Dichtefunktion einer Weibull-verteilten

Zufallsvariablen hat ebenfalls zwei Parameter $k > 0$ und $\lambda > 0$ und nimmt für $x > 0$ folgende Form an (Cottin und Döhler, 2013, S. 33):

$$f(x) = k * \lambda * x^{k-1} * e^{-\lambda x^k} \quad (4.17)$$

Für $k = 1$ ergibt sich auch bei der Weibullverteilung die Exponentialverteilung.

Die Weibull-Verteilung besitzt wie die Gamma-Verteilung ein halboffenes Intervall. Das bedeutet, dass diese Verteilungen keine definierten Endpunkte haben. Da die Verteilungen die Dauer eines Vorgangs darstellen sollen und aufgrund des halboffenen Intervalls sehr große Vorgangsdauern simuliert werden können, bieten sich die Gamma- und die Weibull-Verteilung für die Simulation von Vorgangsdauern in dieser Arbeit nicht an (Fente et al., 2000, S. 234). Im Gegensatz dazu besitzt die Beta-Verteilung aufgrund der optimistischen und pessimistischen Dauer ein abgegrenztes Intervall, in dem sich die Vorgangsdauern befinden (Fente et al., 2000, S. 234). Des Weiteren ist es möglich, mit Hilfe der Beta-Verteilung weitere Verteilungsarten, wie beispielsweise die Gleich- oder die Dreiecksverteilung, darzustellen. Zusätzlich kann der Verlauf der Beta-Verteilung mit Hilfe der Parameter p und q bestimmt werden, sodass ein Intervall zwischen optimistischer und pessimistischer Vorgangsdauer und eine beliebige Lage der wahrscheinlichsten Dauer in diesem Intervall modelliert werden können (vgl. Abbildung 4.23). Aus diesen Gründen bietet sich die Verwendung der Beta-Verteilung zur Darstellung der Vorgangsdauern in dieser Arbeit an, sofern unsichere Dauern abgebildet werden müssen.

Zur Simulation/Auswahl einer Vorgangsdauer für ein Szenario wird die Funktion *betarnd* in Matlab verwendet, die anhand der durch die Parameter p und q gegebenen Verteilung einen Wert der Beta-Verteilung bestimmt (vgl. Kapitel 4.3.3).

4.3.3 Implementierung

Die Simulationslogik basierend auf einem GERT-Netzplan wird im Folgenden anhand des Beispielnetzwerks aus Abbildung 4.25 erläutert.

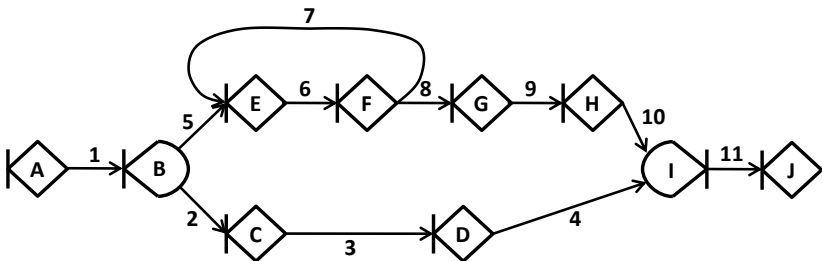


Abbildung 4.25: Beispielnetzwerk

4.3.3.1 Aufstellen des GERT-Netzwerks durch einen Excel-Import

Die Simulation verschiedener Szenarien wird mit Hilfe einer in Matlab implementierten Berechnungslogik durchgeführt. Hierzu wird in einem ersten Schritt das GERT-Netzwerk, welches zur Simulation verschiedener Szenarien verwendet wird, über einen Excel-Import in Matlab aufgestellt. Beim Starten der Simulationsdatei in Matlab wird der Anwender aufgefordert, die zu importierende Datei über ein Menüfenster auszuwählen. Es ist darauf zu achten, dass es manchmal nach dem Import zu einer Fehlermeldung in Matlab kommen kann. Dies liegt daran, dass Excel vor dem Aufruf evtl. geschlossen wurde, aber noch im Hintergrund weiter ausgeführt wird. Über den Taskmanager kann Excel vollständig geschlossen werden, sodass der Import und die anschließende Simulation ohne Fehlermeldung ausgeführt werden können.

In Excel werden in vier Tabellenblättern die zur Aufstellung des GERT-Netzwerks notwendigen Informationen bereitgestellt. Wie bereits

erläutert wurde, erfolgt die Eingabe lediglich durch die Angabe von Informationen bzgl. der auszuführenden Vorgänge. Informationen zu Knoten im GERT-Netzwerk müssen nicht angegeben werden, da sich diese aus den Angaben zu den Vorgängen ergeben. Der Verzicht auf die explizite Angabe von Knoten-Informationen soll dem Anwender die Eingabe der Daten erleichtern, da sich insbesondere für Laien diese Logik nicht ohne Vorkenntnisse erschließt. Demgegenüber sind für Laien die notwendigen Angaben bzgl. auszuführender Vorgänge nachvollziehbar.

Zunächst werden im **Tabellenblatt „Info“** allgemeine Informationen zum Projekt abgefragt. Hierbei handelt es sich einerseits um die Angabe einer Deadline und zum anderen um die Angabe der Restbetriebskosten bei Projektbeginn. Wie in Kapitel 2.6.4 beschrieben wurde, nehmen die Restbetriebskosten einen großen Einfluss auf die Projektgesamtkosten. In dem in dieser Arbeit beschriebenen mathematischen Modell und in den zur Lösung dieses Modells entwickelten Algorithmen (vgl. Kapitel 4.4) sind die Angaben aus dem Tabellenblatt „Info“ zunächst nicht relevant. Einerseits errechnen sich die Restbetriebskosten aus den Angaben je Vorgang zu den Änderungen der Restbetriebskosten. Andererseits wird eine festgelegte Deadline nicht berücksichtigt. Allerdings können diese Angaben in einer Weiterentwicklung des Planungswerkzeugs relevant werden, z. B. wenn als zusätzliche Nebenbedingung eine gegebene Deadline nur gegen die Zahlung von Strafkosten überschritten werden darf (vgl. Formel (4.33) in Kapitel 4.4.4). Aus diesem Grund werden diese Angaben bereits mit abgefragt.

Im **Tabellenblatt „Ressourcen“** sind Angaben zu den im Projekt einsetzbaren Ressourcen zu machen. Es wird der Name der Ressource, die maximal verfügbare Kapazität über den gesamten Projektverlauf, die variablen Kosten der Ressource, d. h. Kosten pro Einheit und pro Zeiteinheit, sowie die Beschaffungskosten der Ressource abgefragt. Des Weiteren

ist anzugeben, um welche Art von Ressource es sich handelt (erneuerbare oder nicht-erneuerbare Ressource)¹²¹.

Zur Simulation eines Netzwerkdurchlaufs werden die im **Tabellenblatt „Durchlauf“** anzugebenden Informationen berücksichtigt:

- Fortlaufende Vorgangsnummer,
- Anzahl möglicher Modi,
- Name des Vorgangs,
- Bedingungen zur Ausführung des Vorgangs,
- Ausführungswahrscheinlichkeit des Vorgangs,
- Kostenreduktion der Restbetriebskosten nach der Ausführung des Vorgangs,
- maximale Anzahl an Wiederholungen,
- die Anzahl normaler Nachfolger,
- die Anzahl no-wait Nachfolger,
- Auflistung aller normalen Nachfolger,
- Auflistung aller no-wait Nachfolger.

Einige Angaben, wie die fortlaufende Vorgangsnummer, die Anzahl möglicher Modi oder die Angabe des Vorgangsnamens, sind selbsterklärend und werden daher im Folgenden nicht näher erläutert. Dagegen werden die sich nicht intuitiv erklärenden Angaben im Folgenden beschrieben.

Die „Bedingungen zur Ausführung des Vorgangs“ beziehen sich darauf, dass mindestens zwei (oder mehr) Vorgänge abgeschlossen sein müssen, sodass der aktuell betrachtete Vorgang ausgeführt werden kann. Vorgangsbeziehungen mit einem notwendigerweise abgeschlossenen Vorgänger werden bereits durch die Angabe der Nachfolgerbeziehungen

¹²¹ Sofern das mathematische Modell und der Lösungsalgorithmus weiterentwickelt werden, können weitere Arten von Ressourcen angegeben werden.

(ohne die Angabe einer Bedingung) abgedeckt. Hierbei wird ein Knoten mit einem EOR-Eingang simuliert, d. h. der nachfolgende Vorgang wird bzw. die nachfolgenden Vorgänge werden ausgeführt, wenn ein einmündender Vorgang abgeschlossen wurde. Dies kann insbesondere bei einem Zyklus der Fall sein (vgl. Knoten E in Abbildung 4.25). Im Gegensatz zu Vorgängen, die ausgeführt werden, wenn genau ein Vorgänger abgeschlossen wurde (Knoten mit einem EOR-Eingang), existieren auch Vorgänge, die erst ausgeführt werden können, wenn alle Vorgänger abgeschlossen wurden (vgl. Knoten I in Abbildung 4.25). Bei dieser Bedingung wird ein Knoten mit einem UND-Eingang simuliert. Hierzu muss der Anwender als Bedingung alle notwendigerweise abgeschlossenen Vorgänger durch die Angabe der Vorgangsnummern der Vorgänger angeben. Im Beispielnetzwerk müssen zur Ausführung des Vorgangs 11 (ItoJ) der Vorgang 4 (Dtol) und der Vorgang 10 (Htol) abgeschlossen sein.

Knoten mit einem IOR-Eingang haben bei der Simulation von Szenarien keine Relevanz, da angenommen wird, dass ein Vorgang entweder ausgeführt wird, wenn genau ein Vorgänger abgeschlossen wurde (EOR-Eingang) oder wenn alle Vorgänger abgeschlossen sein müssen (UND-Eingang). Wie bereits von Neumann (1990, S. 31f.) beschrieben wurde, kann ein IOR-Knoten durch einen EOR-Knoten dargestellt werden.

Die Nachfolger eines Vorgangs können entweder deterministisch vorgegeben sein, d. h. zwischen einem Vorgang und seinem Nachfolger existiert ein Knoten mit einem DET-Ausgang. Oder die Nachfolger eines Vorgangs werden lediglich mit einer bestimmten Wahrscheinlichkeit ausgeführt. Hierbei existiert zwischen einem Vorgang und seinen potentiellen Nachfolgern ein stochastischer Knoten mit einem ST-Ausgang. Sofern ein Vorgang mit Sicherheit ausgeführt wird, wird diesem die Wahrscheinlichkeit 1 (=100 %) zugewiesen. Sofern ein Vorgang lediglich mit einer Wahrscheinlichkeit <100 % ausgeführt wird, muss die Summe aller Wahrscheinlichkeiten der konkurrierenden Vorgänge gleich 100 % sein.

Sofern ein Zyklus vorliegt, werden bestimmte Vorgänge mehrfach ausgeführt. Wie bereits erläutert wurde, kann die Anzahl der mehrfachen Ausführung durch die Angabe der maximalen Anzahl an Wiederholungen begrenzt werden.

Die Ausführung eines Vorgangs kann mit einer Erhöhung oder einer Senkung der Restbetriebskosten einhergehen. Wenn beispielsweise durch einen Vorgang eine Lüftungsanlage abgebaut wird, ist deren Betrieb nach Abschluss des Vorgangs nicht mehr notwendig, sodass die Restbetriebskosten sinken. Durch einige Vorgänge können die Restbetriebskosten allerdings auch steigen, z. B. wenn eine neue Lüftungsanlage für einen neu geschaffenen Bearbeitungsbereich installiert wird.

Im **Tabellenblatt „Dauer“** werden alle Angaben zur Simulation der einzelnen Vorgangsdauern gespeichert. Da die Dauer abhängig von den je Modus eingesetzten Ressourcen ist, werden je Vorgang alle möglichen Modi aufgeführt. Je Modus werden die benötigten Ressourcen und die Art der Verteilung der Vorgangsdauer angegeben. Hierbei wird, wie in Kapitel 4.3.2 beschrieben wurde, zwischen deterministischen und Beta-verteilten Vorgangsdauern unterschieden. Bei deterministischen Vorgangsdauern wird die als sicher angenommene Vorgangsdauer angegeben. Sofern die Vorgangsdauer nicht mit Sicherheit vorhergesagt werden kann, werden zur Aufstellung der Beta-Verteilung die Parameter der kürzesten (t_o), längsten (t_p) und wahrscheinlichsten Dauer (t_ω) angegeben, woraus, wie in Kapitel 4.3.2.2 gezeigt wurde, die Formparameter p und q der Betaverteilung berechnet werden.

4.3.3.2 Simulationsdurchlauf eines Szenarios

Der Anwender kann beim Ausführen des Simulationsprogramms angeben, wie viele Szenarien simuliert werden sollen. Je Simulationslauf wird im ersten Schritt der Netzwerkdurchlauf simuliert, d. h. es wird ein Weg vom Startvorgang (Quelle, d. h. ein Vorgang ohne Vorgänger) zum Endvorgang

(Senke, d. h. ein Vorgang ohne Nachfolger) identifiziert. Zunächst werden alle Vorgänge ohne Vorgänger identifiziert. Von diesen Vorgängen ausgehend werden alle normalen und no-wait Nachfolger bestimmt. Wie in Kapitel 4.4.2 erklärt wird, handelt es sich bei normalen Nachfolgern um Vorgänge, die ausgeführt werden können, sofern der betrachtete Vorgang abgeschlossen wurde. Dies lässt zu, dass zwischen dem Vorgang und seinem normalen Nachfolger ein dritter Vorgang ausgeführt werden darf. In manchen Fällen ist allerdings die Ausführung von Vorgängen unmittelbar hintereinander, d. h. ohne die zwischenzeitliche Ausführung dritter Vorgänge, notwendig. Solche Nachfolger werden als no-wait Nachfolger bezeichnet.

Sofern die Nachfolger eines Vorgangs mit Sicherheit ausgeführt werden, ist deren Bestimmung trivial. Wenn allerdings die Ausführungswahrscheinlichkeit kleiner als 100 % ist, muss der Nachfolger simuliert werden. Hierzu werden die in Kapitel 4.3.1 beschriebenen Intervalle je Vorgang gemäß ihrer Ausführungswahrscheinlichkeiten im Bereich $[1;100]$ erstellt und anhand der Ziehung einer Zufallszahl aus diesem Bereich der Nachfolger bestimmt. Hierbei kann es durch Zyklen zu einer mehrfachen Ausführung von Vorgängen kommen. Aus diesem Grund ist vor der Erstellung der Intervalle zu prüfen, welche Vorgänge nochmals ausgeführt werden dürfen. Im Beispielnetzwerk (Abbildung 4.25) können der Vorgang 7 und somit auch der Vorgang 6 mehrfach ausgeführt werden. Sofern lediglich eine einmalige Ausführung des Vorgangs 7 erlaubt ist und dieser bereits einmalig ausgeführt wurde, besteht beim zweiten Erreichen des Knotens F keine Auswahl zwischen Vorgang 7 und Vorgang 8. Da in diesem Beispiel der Vorgang 7 kein zweites Mal ausgeführt werden darf, wird nun Vorgang 8 mit 100 %iger Wahrscheinlichkeit ausgeführt. Da eine Entscheidung zwischen drei oder mehr Vorgängen bestehen kann (vgl. beispielsweise Abbildung 4.21), sind die Intervalle im Bereich $[1;100]$ gemäß der Anteile aller zur nochmaligen Ausführung zulässigen Vorgänge jeweils neu zu bestimmen.

Da jede Simulation ein deterministisches Szenario ergeben soll, werden mehrfach ausgeführte Vorgänge als eigenständige Vorgänge betrachtet. Aus diesem Grund wird jedem simulierten Vorgang und deren Wiederholungen eine eindeutige Nummer zugeordnet.

Ein möglicher Netzwerkdurchlauf eines Szenarios des Beispielnetzwerks aus Abbildung 4.25 könnte wie in Abbildung 4.26 dargestellt aussehen.

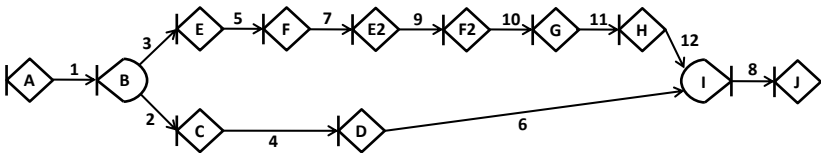


Abbildung 4.26: Möglicher Netzwerkdurchlauf eines Szenarios des Beispielnetzwerks

Je simuliertem Vorgang wird zusätzlich eine Vorgangsdauer simuliert. Dies erfolgt, wie bereits in Kapitel 4.3.2.2 beschrieben wurde, bei Vorgängen mit Beta-verteilten Vorgangsdauern mit Hilfe der Funktion `betrand` in Matlab anhand der zuvor erstellten Beta-Verteilung (vgl. Kapitel 4.3.3.1). Bei Vorgängen mit deterministischen Vorgangsdauern wird dieser Wert übernommen.

In jedem simulierten Szenario werden zusätzlich zur Abfolge der simulierten Vorgänge und ihrer simulierten Vorgangsdauern zusätzliche Informationen, die zur Bestimmung eines kostenoptimalen Plans notwendig sind, ausgegeben. Beispielsweise werden Informationen der je Modus benötigten Ressourcen, deren Kosten und Kapazitäten ausgegeben. Die Ausgabe aller zur Berechnung notwendigen Informationen erfolgt in einer Form, sodass die Daten direkt in das Modell zur Berechnung eines kostenoptimierten Rückbauplans (vgl. Kapitel 4.4) importiert werden können. Auf Wunsch kann der Anwender die simulierten Szenarien nach Microsoft Excel exportieren. Hierbei hat er einerseits die Wahl, ob die Daten in einer

Excel-Arbeitsmappe oder als .csv-Datei exportiert werden sollen. Sofern die Daten in eine Excel-Arbeitsmappe exportiert werden sollen, kann der Anwender des Weiteren entscheiden, ob alle Szenarien in einer Datei jeweils als eine Registerkarte abgespeichert werden sollen oder ob je Szenario eine eigene Excel-Arbeitsmappe angelegt werden soll. Bei der Wahl des Exports der Daten in das .csv-Format ist es nur möglich, jedes Szenario als eigene Datei zu speichern, da im .csv-Format nicht mehr als eine Registerkarte gespeichert werden kann. Für den Import der simulierten Szenarien in die Scheduling Methode zur Berechnung eines kostenoptimierten Rückbauplans (vgl. Kapitel 4.4) ist der Export als .csv-Datei notwendig.

4.4 Mathematisches Modell und Algorithmen zur Berechnung eines kostenoptimierten Rückbauplans

In Kapitel 3.4 wurde deutlich, dass sich keine der bisher für die Planung von Rückbauprojekten verwendeten Scheduling Methoden für die Planung des Rückbaus kerntechnischer Anlagen eignet. Aus diesem Grund wird eine Scheduling Methode für den konkreten Anwendungsfall entwickelt. Hierzu wird auf die in Kapitel 3.3 vorgestellten Scheduling Probleme und deren Erweiterungen zurückgegriffen. In Kapitel 4.4.1 wird daher zunächst ein für den Anwendungsfall allgemeines Scheduling Problem als Grundmodell identifiziert. Dieses wird im Anschluss in Kapitel 4.4.2 an die konkrete Problemstellung durch Erweiterungen angepasst. Das vollständig angepasste mathematische Modell des erweiterten Scheduling Problems wird in Kapitel 4.4.3 beschrieben. Mögliche Weiterentwicklungsmöglichkeiten des Modells werden in Kapitel 4.4.4 aufgezeigt. Anschließend wird in Kapitel 4.4.5 ein Verfahren zur Lösung des Scheduling Problems vorgestellt. Die Implementierung dieses Lösungsverfahrens wird zuletzt in Kapitel 4.4.6

beschrieben. In Kapitel 5 folgt die Anwendung des Lösungsverfahrens anhand von drei Referenzprojekten.

4.4.1 Auswahl eines allgemeinen Scheduling Problems als Grundmodell

Die allgemeinen Scheduling Probleme in Kapitel 3.3 umfassen das RCPSP (Kapitel 3.3.1), das RCPSPDC (Kapitel 3.3.2), das RIP (Kapitel 3.3.3), das RIPT (Kapitel 3.3.4) sowie das RLPSP (Kapitel 3.3.5). Diese Scheduling Probleme unterscheiden sich insbesondere in ihren Optimierungskriterien, den Entscheidungsvariablen und ihren Beschränkungen. Um diese Scheduling Probleme einfacher vergleichen zu können, sind diese übersichtlich in Tabelle 4.1 zusammengefasst.

Hieraus wird deutlich, dass das RCPSP die Projektdauer, das RCPSPDC, das RIP sowie das RIPT die Projektkosten minimiert und das RLPSP für eine ausgeglichene Ressourcennutzung sorgt. Darüber hinaus wird beim RCPSP sowie beim RCPSPDC lediglich ein Schedule berechnet, d. h. die Startzeitpunkte der Vorgänge sowie die resultierende Ressourcenauslastung. Beim RIP und beim RIPT wird zusätzlich die unter der Berücksichtigung minimaler Kosten optimale Ressourcenkapazität bestimmt. Das RLPSP nivelliert den Ressourcenbedarf je Zeitschritt. Alle Scheduling Probleme berücksichtigen die vorgegebenen Vorgangsbeziehungen. Das RCPSP sowie das RCPSPDC sind des Weiteren hinsichtlich der Ressourcenkapazitäten beschränkt. Außerdem ist das RCPSPDC hinsichtlich einer vorgegebenen Deadline beschränkt. Eine vorgegebene Deadline stellt auch beim RIP, RIPT und beim RLPSP eine Beschränkung dar.

Tabelle 4.1: Gegenüberstellung der allgemeinen Scheduling Probleme

Abkürzung	Name	Klassifizierung	Optimierungskriterium	Entscheidungsvariablen	Beschränkungen
RCPSp	Resource-Constrained Project Scheduling Problem	$PS \mid prec \mid C_{max}$	Min. Projektdauer	Schedule (Startzeitpunkte der Vorgänge und resultierende Ressourcenauslastung)	Ressourcenkapazität, Vorgangsbeziehungen
RCPSpDC	RCPSp with Discounted Cashflows	$PS \mid prec, \bar{d} \mid - \sum c_i^f \beta_i$	Min. diskontierte Projektkosten (direkte Vorgangskosten)	Schedule (Startzeitpunkte der Vorgänge und resultierende Ressourcenauslastung)	Ressourcenkapazität, Vorgangsbeziehungen, Fertigstellungszeitpunkt (Deadline)
RIP	Resource Investment Problem	$PS^\infty \mid prec, \bar{d} \mid \sum c_k * \max T_{kt}$	Min. Projektkosten (Ressourcenkosten)	Schedule (Startzeitpunkte der Vorgänge und resultierende Ressourcenauslastung), Ressourcenzkapazität	Fertigungszeitpunkt (Deadline), Vorgangsbeziehungen
RIPT	RIP with Tardiness Penalty	$PS^\infty \mid prec, \bar{d} \mid \sum c_k * \max T_{kt} + p * \max\{0; s_j - D\}$	Min. Projektkosten (Ressourcenkosten und Kosten für Überschreitung einer geg. Deadline)	Schedule (Startzeitpunkte der Vorgänge und resultierende Ressourcenauslastung), Ressourcenzkapazität	Fertigungszeitpunkt (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 und resultierende Ressourcenauslastung), Ressourcenzbedarf je Zeitpunkt	Fertigungszeitpunkt (Deadline), Vorgangsbeziehungen

Um zu entscheiden, welches dieser Scheduling Probleme sich am besten für den Anwendungsfall des Rückbaus kerntechnischer Anlagen eignet, sind hierfür das Zielkriterium, die fix vorgegebenen Rahmenbedingungen und die zu entscheidenden Größen festzustellen. Aus den in Kapitel 3.1 beschriebenen Zielen und Anforderungen ergibt sich für die deterministische Planung, dass ein Scheduling Problem anzuwenden ist, welches die Projektgesamtkosten minimiert und Vorgangsbeziehungen berücksichtigt. Zeitliche Abhängigkeiten werden in jedem der vorgestellten Scheduling Probleme berücksichtigt und können durch Generalized Precedence Relations (GPR, vgl. Kapitel 3.3.6.2) erweitert werden.

Aus der Anforderung der Minimierung der Projektgesamtkosten kommen zunächst das RCPSPDC, das RIP oder RIPT in Frage. Um eine Entscheidung unter diesen Scheduling Problemen zu treffen, werden die für die Kostenminimierung zu berücksichtigenden Größen näher untersucht. Beim kerntechnischen Rückbau entstehen Kosten bei der Ausführung von Vorgängen, bei der Anschaffung von Ressourcen (in Abhängigkeit der Menge anzuschaffender Ressourcen) und es fallen die Restbetriebskosten an. Auf den ersten Blick können vorgangsbezogene Kosten lediglich durch das RCPSPDC und Anschaffungskosten in Form zu bestimmender Kapazitäten für Ressourcen lediglich durch das RIP und RIPT abgebildet werden. Bei genauerer Betrachtung können vorgangsbezogene Kosten als nicht-erneuerbare Ressource modelliert werden, sodass sich das RIP oder das RIPT für den Anwendungsfall besser eignen als das RCPSPDC, da zusätzlich auch die optimalen Kapazitätsmengen der Ressourcen und damit die dabei anfallenden Kosten in die Kostenoptimierung mit einbezogen werden können. Hierzu ist anzumerken, dass die Kapazität einiger Ressourcen vorgegeben ist, z. B. existiert nur ein Reaktorkran. Die Kapazität der meisten anzuschaffenden Ressourcen kann allerdings im Rahmen der Optimierung mit dem RIP bzw. dem RIPT bestimmt werden, da diese nicht fix vorgegeben sind.

Um das RIP oder das RIPT anzuwenden, ist aufgrund der nicht vorgegebenen Kapazität eine zeitliche Beschränkung in Form eines Fertigstellungszeitpunktes (Deadline) gefordert. Hierbei kann es sich entweder um ein fix vorgegebenes Datum oder einen vorläufig geplanten Zeitpunkt handeln, der unter der Zahlung von Strafkosten überschritten werden kann. Da beim Rückbau kerntechnischer Anlagen weder ein fixer Fertigstellungszeitpunkt vorgeschrieben ist, noch ab einem bestimmten Zeitpunkt Strafkosten zu zahlen sind, treffen beide Annahmen des RIP bzw. RIPT nicht auf den Anwendungsfall zu. Allerdings sind zur Minimierung der Projektgesamtkosten die Restbetriebskosten zu berücksichtigen (vgl. Kapitel 2.6.4). Die Restbetriebskosten fallen unabhängig von der Ausführung von Vorgängen je Zeiteinheit an und verursachen daher aufgrund von zeitlichen Verzögerungen erhöhte Kosten. Zur Einsparung von Restbetriebskosten sind daher zeitliche Verzögerungen in der Projektplanung und -ausführung zu vermeiden. Um die Restbetriebskosten in der Optimierung zu berücksichtigen, kann entweder das RIPT oder das RIP angepasst werden.

Im RIPT kann der geplante Fertigstellungszeitpunkt mit dem Zeitpunkt des Projektbeginns gleichgesetzt und die Verzögerungskosten mit denen des Restbetriebs belegt werden. Allerdings wird in diesem Fall ein über den Projektverlauf gleichbleibender Betrag der Restbetriebskosten je Zeiteinheit angenommen. Im Gegensatz dazu können sich die Restbetriebskosten in realen kerntechnischen Rückbauprojekten während der Projektausführung ändern (sowohl ansteigen als auch sinken).

Alternativ kann die Zielfunktion des RIP durch die Berücksichtigung der Restbetriebskosten erweitert werden. Hierbei können durch eine Erweiterung der Zielfunktion sowohl Erhöhungen als auch Reduktionen des Betrags der Restbetriebskosten je Zeiteinheit berücksichtigt werden. Somit ist es mit dem RIP im Gegensatz zum RIPT möglich, die Restbetriebskosten realistischer abzubilden.

Zusammenfassend bietet sich das Grundmodell des RIP als Scheduling Problem an, um den Anwendungsfall des kerntechnischen Rückbaus zu planen. Vorgangsbeziehungen werden berücksichtigt und die Minimierung der Projektkosten erfolgt unter der Berücksichtigung der Kosten in Abhängigkeit der zu beschaffenden Anzahl an Ressourcen. Zusätzlich wird das RIP in Kapitel 4.4.2 erweitert, sodass die vorgangsbezogenen Kosten sowie die Restbetriebskosten berücksichtigt werden.

4.4.2 Erweiterung des Grundmodells

Zunächst ist anzumerken, dass grundsätzlich viele Erweiterungsmöglichkeiten des Grundmodells bestehen, die zu einer realistischeren Modellierung des Anwendungsfalls führen. Es ist allerdings immer abzuwägen, ob der Beitrag zu einer genaueren Modellierung den dadurch erhöhten Datenbedarf, die erhöhte Problemkomplexität und die dadurch erhöhten Rechendauern rechtfertigen. Im Folgenden werden daher die in diesem Sinne erforderlichen und gerechtfertigten Erweiterungen des RIP vorgestellt¹²². Zusätzlich mögliche, aber nicht implementierte Erweiterungen sind in Kapitel 4.4.4 aufgeführt.

Die beim Rückbau kerntechnischer Anlagen auszuführenden Vorgänge können teilweise auf verschiedene Art und Weise ausgeführt werden. Je Ausführungsart, d. h. je Modus, können unterschiedliche Vorgangsdauern entstehen und unterschiedliche Ressourcen benötigt werden. Aus diesem Grund bietet sich die Erweiterung des RIP für den Anwendungsfall durch den **Multi-Mode-Schedulingfall** an. Die je Modus in Abhängigkeit der verwendeten Ressource(n) und Vorgangsdauer anfallenden Kosten (vorgangsbezogene Kosten) können als nicht-erneuerbare Ressource dargestellt werden (siehe unten). Insgesamt wird der durch die Berücksichtigung verschiedener Modi entstehende Komplexitätszuwachs des RIP

¹²² Diese Erweiterungen sind in Hübner et al. (2017e) für das RIPT beschrieben.

in Kauf genommen, da hierdurch eine realitätsnähere Projektmodellierung möglich ist.

Neben der Möglichkeit der Erweiterung von Scheduling Problemen auf den Multi-Mode-Fall wird in Kapitel 3.3.6 die Einführung von verallgemeinerten Vorgangsbeziehungen als zusätzliche Erweiterungsmöglichkeit vorgestellt. Mit Hilfe der verallgemeinerten Vorgangsbeziehungen können verschiedene Vorrangtypen (Ende-Start, Ende-Ende, Start-Ende, Start-Start) sowie minimale und/oder maximale zeitliche Verzögerungen modelliert werden. Beim Rückbau kerntechnischer Anlagen wird das Ziel des Strahlenschutzes über das Ziel der Kostenminimierung gestellt. Um Mitarbeiter einer möglichst geringen Strahlendosis auszusetzen, sollen insbesondere Vorgänge, bei denen mit radioaktiv belastetem Material gearbeitet wird, unterbrechungsfrei ausgeführt werden. Sofern sich die Arbeit mit radioaktiv belastetem Material über mehrere hintereinander auszuführende Vorgänge erstreckt, sollte zwischen diesen Vorgängen möglichst keine Pause liegen (vgl. Kapitel 2.3.2). Um diese Anforderung zu modellieren, wird mit Hilfe von GPR zwischen solchen Vorgängen eine **maximale Verzögerung** von null Zeiteinheiten (zero time lag) eingeführt. Wird lediglich dieser Spezialfall der GPR berücksichtigt (in Kapitel 3.3.6.2 sind weitere Fälle von GPR aufgeführt), kann die Problemkomplexität und damit die Rechendauer im Gegensatz zum allgemeinen GPR reduziert werden. Vorgänge, die ohne Pause/Unterbrechung nacheinander ausgeführt werden sollten, werden als Vorgänge mit *no-wait Bedingung* und die Beziehung dieser Vorgänge wird als *no-wait Vorrangbeziehung* (oder *no-wait Vorgangsbeziehung*) bezeichnet. Alle no-wait Vorrangbeziehungen sind in einer eigenen Menge E^{nw} enthalten. Die Modellierung der no-wait Vorrangbeziehungen kann durch die Einführung einer Nebenbedingung wie Nebenbedingung (3.64) geschehen, wobei diese sich auf die Menge E^{nw} bezieht und die Ungleichung durch eine Gleichung ersetzt wird (vgl. Nebenbedingung (4.24)). Durch das Ersetzen der Ungleichung durch eine Gleichung wird gewährleistet, dass ein Vorgang j unmittelbar nach der

Beendigung seines Vorgängers i startet, wenn gilt $(i, j) \in E^{nw}$. Es ist anzumerken, dass aufgrund des berücksichtigten Multi-Mode-Schedulingfalls keine Aggregation von Vorgängen mit no-wait Vorrangbeziehungen zu einem Vorgang möglich ist. Durch eine Aggregation von Vorgängen, die jeweils in unterschiedlichen Modi ausgeführt werden könnten, würden Entscheidungsmöglichkeiten alternativ einsetzbarer Ressourcen und somit eine genauere Betrachtung anfallender Kosten nicht berücksichtigt.

Bei der Modellierung der **Restbetriebskosten** ist darauf zu achten, dass sich diese mit dem Projektfortschritt in Abhängigkeit der Fertigstellung einzelner Bauabschnitte, wie in Abbildung 2.11 in Kapitel 2.6.4 aufgezeigt, verändern. Die Restbetriebskosten können sich erhöhen, z. B. wenn eine zusätzliche Lüftungsanlage aufgebaut oder die Sicherheitsüberwachung ausgeweitet wird. Oder die Restbetriebskosten sinken, wenn beispielsweise Überwachungssysteme abgebaut werden. Reduzierungen oder Erhöhungen der Restbetriebskosten werden den zugehörigen Vorgängen als zusätzliche Attribute angehängt. Die Höhe der Reduktion der Restbetriebskosten je Zeiteinheit wird mit positivem Vorzeichen ($b_j \geq 0$) und die Höhe des Anstiegs der Restbetriebskosten je Zeiteinheit mit negativen Vorzeichen ($b_j < 0$) dargestellt. Die Zielfunktion des RIP wird daher wie folgt erweitert:

$$\min \sum_{k \in R \cup UR^n} c_k * a_k + \sum_{j=1}^J \sum_{m=1}^{M_j} \sum_{t=ES_j}^{LS_j} b_j * x_{j,m,t} * (t + d_{j,m}) \quad (4.18)$$

b_j Höhe der Reduktion oder des Anstiegs der Restbetriebskosten je Zeiteinheit nach der Fertigstellung von Vorgang j

Die erste Summe in der Zielfunktion ist bereits aus dem Grundmodell des RIP (vgl. Kapitel 3.3.3) bekannt. Diese berechnet die Kosten, die für die Anschaffung aller benötigten Ressourcen entstehen. Die zweite Summe in der Zielfunktion summiert für alle Vorgänge die Restbetriebskosten, die bis zur Fertigstellung des Vorgangs anfallen. Durch die Addition der je Vorgang bezogenen Restbetriebskosten ergeben sich die insgesamt im Projekt entstehenden Restbetriebskosten. Hierbei wird die Änderung der Restbetriebskosten je Zeiteinheit mit dem Fertigstellungszeitpunkt¹²³ des jeweiligen Vorgangs multipliziert, um die absolute Änderung der Restbetriebskosten durch die Fertigstellung des Vorgangs zu berechnen (vgl. Abbildung 4.27). Wenn ein Vorgang h keine Änderung der Höhe der Restbetriebskosten je Zeiteinheit bewirkt ($b_h = 0$), dann erzeugt dies keine zusätzlichen Kosten. Wenn sich nach der Fertigstellung des Vorgangs j die Restbetriebskosten je Zeiteinheit reduzieren ($b_j > 0$), dann wird die Höhe der bisher seit Projektbeginn angefallenen Restbetriebskosten aufgrund dieses Vorgangs zu den Projektgesamtkosten addiert. Wenn dagegen ein Vorgang i nach seiner Fertigstellung die Restbetriebskosten je Zeiteinheit erhöht ($b_i < 0$), dann wird die Höhe der seit Projektbeginn noch nicht angefallenen Restbetriebskosten aufgrund dieses Vorgangs von den Projektgesamtkosten subtrahiert. Durch das umgedrehte Vorzeichen (Reduktion der Restbetriebskosten je Zeiteinheit: $b_j > 0$ und Erhöhung der Restbetriebskosten je Zeiteinheit: $b_i < 0$) werden von den Reduktionen die Erhöhungen abgezogen. Die Restbetriebskosten des in Abbildung 4.27 dargestellten Beispiels errechnen sich demnach durch

$$[b_j * (t + d_{j,m})] + [b_i * (t + d_{i,m})], \text{ mit } b_j > 0 \text{ und } b_i < 0.$$

Dieses Vorgehen ist aufgrund von zwei Annahmen möglich. Einerseits wird angenommen, dass keine negativen Restbetriebskosten existieren dürfen, d. h. die kumulierten Restbetriebskosten je Zeiteinheit sind zu jedem

¹²³ Der Fertigstellungszeitpunkt jedes Vorgangs wird durch die Summe aus dem Startzeitpunkt und die in einem Modus benötigte Dauer des Vorgangs berechnet.

Zeitpunkt größer oder gleich null. Andererseits wird angenommen, dass die Restbetriebskosten je Zeiteinheit zum Projektende null sind, d. h. dass alle Restbetriebskosten während des Rückbaus anfallen und mathematisch in der zweiten Summe der Zielfunktion berücksichtigt werden. Spätestens zum Projektende fallen keine Restbetriebskosten mehr an. Dadurch wird gewährleistet, dass das Problem beschränkt ist.

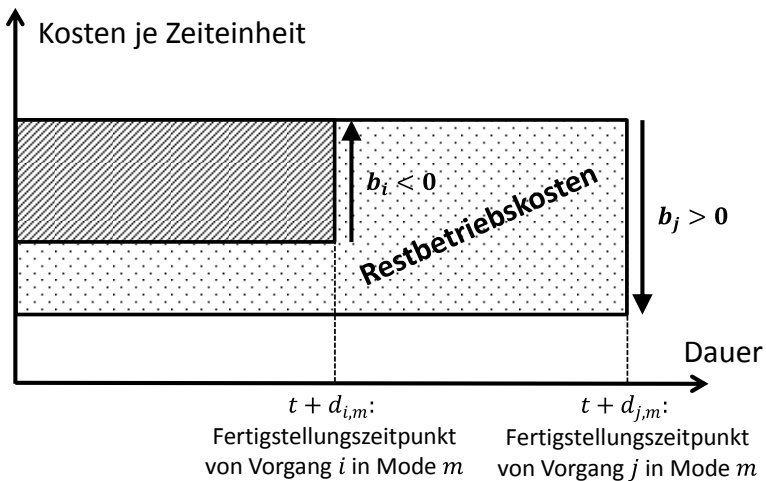


Abbildung 4.27: Grafische Darstellung zur Berechnung anfallender Restbetriebskosten

Es ist anzumerken, dass in dieser Arbeit t Zeitpunkte und nicht Zeitperioden¹²⁴ repräsentiert. Da die Grundmodelle von Scheduling Problemen von Zeitpunkten und nicht von Zeitperioden ausgehen (wie auch in Kapitel 3.3 vorgestellt) und um die Konsistenz bzgl. der formalen

¹²⁴ Wobei eine Periode t zum Zeitpunkt $t - 1$ beginnt und zum Zeitpunkt t endet.

Beschreibung in dieser Arbeit zu bewahren, repräsentiert t im Folgenden Zeitpunkte¹²⁵.

Wie bereits oben erläutert wurde, werden die **variablen Kosten**, die bei der Ausführung eines Vorgangs entstehen, als nicht-erneuerbare Ressource modelliert, weil sich Geld im Laufe der Projektausführung nicht erneuern kann. Inwiefern diese Kosten in die Zielfunktion und damit in die Entscheidung eingehen, wird im Folgenden detaillierter beschrieben. In der Zielfunktion (4.18) ist zu erkennen, dass mit dem Faktor c_k lediglich benutzungsabhängige Fixkosten modelliert werden können. Des Weiteren wird die Anzahl an für das Projekt insgesamt benötigten Ressourcen, d. h. die für das Projekt bereitgestellte Ressourcenkapazität, mit dem Faktor a_k über die gesamte Projektlaufzeit als konstant angenommen. Die Summe $\sum_{k \in R} c_k * a_k$ fasst somit die anfallenden Fixkosten aller erneuerbaren Ressourcen zusammen, welche über den gesamten Projektzeitraum minimiert werden. Um auch die je Modus unterschiedlichen variablen Kosten in die Kostenberechnung und damit in die Minimierung der Projektgesamtkosten aufzunehmen, wird die nicht-erneuerbare Ressource „variables Kostenbudget“ eingeführt. Hierunter werden die variablen Kosten des gesamten Projekts zusammengefasst. Theoretisch wäre es möglich, die benötigte Anzahl an Geldeinheiten je Zeiteinheit abzubilden, was dem Charakter der i.d.R. zeitabhängigen variablen Kosten entspricht. In diesem Fall müsste die Entscheidungsvariable a_k auf $a_{k,t}$, d. h. auf die benötigte Anzahl je Zeiteinheit, erweitert werden. Auf diese Weise könnten die Kosten je Modus wie gewohnt durch die Multiplikation der variablen Kosten mit der benötigten Dauer des Vorgangs berechnet werden. Allerdings würde die Erweiterung der Entscheidungsvariable a_k auf eine Entscheidungsvariable je Zeiteinheit zu einer erheblichen

¹²⁵ Eine Anpassung der mathematischen Formulierung auf Zeitperioden ist durch das Ersetzen von t durch $t - 1$ in der Zielfunktion schnell durchführbar. Alle anderen Nebenbedingungen und der Lösungsalgorithmus müssen nicht angepasst werden, da dieser bereits zum Zeitpunkt $t = 0$ startet.

Komplexitätssteigerung und damit zu einer erheblichen Verlängerung der Rechendauer führen. Aus diesem Grund wird ein anderes Vorgehen gewählt, welches die variablen Kosten je Vorgang und Modus nicht berechnet, sondern als Inputdaten¹²⁶ vorgegeben bekommt. Nachdem mit diesen Angaben ein Schedule berechnet wurde, können im Nachgang anhand dieses Schedules die auszuführenden Vorgänge und die bestimmten Modi abgelesen und dadurch die verwendeten Ressourcen sowie die entstehenden Kosten berechnet werden.

Die Angabe der anfallenden variablen Kosten je Vorgang und Modus ($q_{j,k,m}$) kann als benötigte Anzahl an Geldeinheiten verstanden werden. Dies ist vergleichbar mit der benötigten Anzahl an erneuerbaren Ressourcen je Vorgang und Modus ($r_{j,k,m}$). Da des Weiteren für die nicht-erneuerbare Ressource ein „variables Kostenbudget“ $c_k = 1$ angenommen wird, entspricht die Multiplikation $c_k * q_{j,k,m}$ den variablen Kosten je Vorgang und Modus.

Wie bereits in den Kapiteln 3.3.3 und 3.3.4 in den Nebenbedingungen (3.33) bzw. (3.46) aufgeführt, wird die Anzahl benötigter Ressourcen je Vorgang durch eine zu bestimmende maximale Anzahl verfügbarer Ressourcen a_k begrenzt. Diese Nebenbedingung wird im Folgenden übernommen und um den Multi-Mode-Fall erweitert. Des Weiteren wird in Anlehnung an Nebenbedingung (3.66) aus Kapitel 3.3.6.1 zusätzlich zur Nebenbedingung für erneuerbare Ressourcen (4.19) eine Nebenbedingung für nicht-erneuerbare Ressourcen (4.20) aufgestellt.

$$\sum_{j=1}^J \sum_{m=1}^{M_j} r_{j,k,m} \sum_{\tau=\max\{t-d_{j,m}; ES_j\}}^{\min\{t-1; LS_j\}} x_{j,m,\tau} \leq a_k \quad \forall k \in R; \quad t = 1, \dots, \bar{T} \quad (4.19)$$

¹²⁶ Dies stellt kein Problem dar, da je Vorgang und Modus die variablen Kosten durch den Anwender berechnet werden können.

$$\sum_{j=1}^J \sum_{m=1}^{M_j} q_{j,k,m} \sum_{t \in ES_j}^{LS_j} x_{j,m,t} \leq a_k \quad \forall k \in R^n \quad (4.20)$$

Die Kombination der Zielfunktion (4.18) mit den Nebenbedingungen (4.19) und (4.20) macht deutlich, dass sowohl für jede erneuerbare als auch für die nicht-erneuerbare Ressource k eine maximale Anzahl verfügbarer Ressourcen a_k bestimmt wird, die (unter der gleichzeitigen Berücksichtigung der Restbetriebskosten) zu minimalen Projektgesamtkosten führt.

Im Rahmen der Kostenoptimierung wird die zu beschaffende Anzahl je Ressource bestimmt. Allerdings existieren für einige der erneuerbaren Ressourcen extern **vorgegebene Obergrenzen**, die nicht überschritten werden dürfen. Beispielsweise existiert nur ein Reaktorkran und auch die Anzahl des verfügbaren Eigenpersonals steht zum Projektbeginn fest. Diese Obergrenzen werden als zusätzliche Nebenbedingung im Scheduling Problem aufgeführt (vgl. Nebenbedingung (4.27) in Kapitel 4.4.3).

4.4.3 Nuclear Dismantling Project Scheduling Problem (NDPSP)

Das in Kapitel 4.4.1 ausgewählte und in Kapitel 4.4.2 erweiterte Scheduling Problem für die Planung kerntechnischer Rückbauprojekte wird im Folgenden vollständig formuliert. Das für die Problemstellung entwickelte Scheduling Problem basiert auf einem Multi-mode Resource Investment Problem (MRIP) und kann als ein „Multi-mode Resource Investment Problem unter der Beachtung von no-wait Vorrangbeziehungen und Restbetriebskosten“ bezeichnet werden. Um die Bezeichnung einfacher und griffiger zu gestalten, wird das Problem im Folgenden als *Nuclear Dismantling Project Scheduling Problem* (NDPSP) bezeichnet. Gemäß dem in Kapitel 3.2.1 vorgestellten Klassifikationsschema kann das entwickelte Scheduling Problem als $MPS^\infty/MPS \mid prec/temp \mid f$ klassifiziert werden,

wobei f die angepasste Zielfunktion (4.18) bzw. (4.21) repräsentiert. Die Zielfunktion ist nicht regulär, da wie beim RCPSPDC und RIP die Verschiebung eines Vorgangs in die Zukunft zu geringeren Ressourcenbereitstellungskosten und damit zu einem niedrigeren Zielfunktionswert führen kann.

Das gesamte Scheduling Problem kann als gemischt-ganzzahliges Problem wie folgt formuliert werden:

$$\min \sum_{k \in R \cup R^n} c_k * a_k + \sum_{j=1}^J \sum_{m=1}^{M_j} \sum_{t=ES_j}^{LS_j} b_j * x_{j,m,t} * (t + d_{j,m}) \quad (4.21)$$

unter den Nebenbedingungen

$$\sum_{m=1}^{M_j} \sum_{t=ES_j}^{LS_j} x_{j,m,t} = 1 \quad j = 1, \dots, J \quad (4.22)$$

$$\begin{aligned} \sum_{m=1}^{M_i} \sum_{t=ES_i}^{LS_i} (t + d_{i,m}) * x_{i,m,t} \\ \leq \sum_{m=1}^{M_j} \sum_{t=ES_j}^{LS_j} t * x_{j,m,t} \end{aligned} \quad \forall (i, j) \in E \quad (4.23)$$

$$\begin{aligned} \sum_{m=1}^{M_i} \sum_{t=ES_i}^{LS_i} (t + d_{i,m}) * x_{i,m,t} \\ = \sum_{m=1}^{M_j} \sum_{t=ES_j}^{LS_j} t * x_{j,m,t} \end{aligned} \quad \forall (i, j) \in E^{nw} \quad (4.24)$$

$$\sum_{j=1}^J \sum_{m=1}^{M_j} r_{j,k,m} \sum_{\tau=\max\{t-d_{j,m}; ES_j\}}^{\min\{t-1; LS_j\}} x_{j,m,\tau} \leq a_k \quad \forall k \in R; \quad t = 1, \dots, \bar{T} \quad (4.25)$$

$$\sum_{j=1}^J \sum_{m=1}^{M_j} q_{j,k,m} \sum_{t=ES_j}^{LS_j} x_{j,m,t} \leq a_k \quad \forall k \in R^n \quad (4.26)$$

$$a_k \leq a_k^{max} \quad \forall k \in R \cup R^n \quad (4.27)$$

$$a_k \in \mathbb{R}^+ \quad \forall k \in R \cup R^n \quad (4.28)$$

$$\begin{aligned} x_{j,m,t} \in \{0, 1\} \\ j = 1, \dots, J; \\ m = 1, \dots, M_j; \\ t = 1, \dots, \bar{T} \end{aligned} \quad (4.29)$$

In dieser Formulierung sind zwei Arten an Entscheidungsvariablen enthalten. Zum einen die Entscheidungsvariable a_k , welche die Menge an zu Projektbeginn zu beschaffenden Ressourcen k bestimmt. Zum anderen wird mit der binären Entscheidungsvariablen $x_{j,m,t}$ entschieden, zu welchem Zeitpunkt t ein Vorgang j in welchem Modus m ausgeführt wird.

Das formulierte Problem orientiert sich stark am klassischen MRIP, was insbesondere an den identischen Nebenbedingungen (4.22), (4.23), (4.25), (4.26) und (4.29) zu erkennen ist. Die veränderte Zielfunktion (4.21) sowie die angepasste Nebenbedingung (4.24) wurden bereits in Kapitel 4.4.2 beschrieben. Um die allgemeinen Vorgangsbeziehungen nicht für alle Vorgänge überprüfen zu müssen, sind entsprechend alle no-wait Vorrangbeziehungen in der Menge E^{nw} enthalten.

Zur Ermöglichung oberer Schranken für einzelne Ressourcen wird die Menge a_k^{max} in Nebenbedingung (4.27) eingeführt, welche die oberen Schranken der beschränkten Ressourcen enthält.

Im Gegensatz zum MRIP ist keine Deadline vorgegeben. Als eine obere Grenze T der Gesamtprojektdauer zur Bestimmung der frühesten (ES_j) und spätesten Startzeitpunkte (LS_j) von Vorgängen wird die Summe der maximalen Dauern aller Vorgänge verwendet:

$$T = \sum_{i \in A} \max_{m \in M_i} d_{i,m} \quad (4.30)$$

A Menge aller Vorgänge eines Schedules

Zur Evaluation der berechneten Ergebnisse hinsichtlich ihrer Optimalität der Projektgesamtkosten (welche minimiert werden sollen) ist die Angabe einer unteren Schranke LB relevant. Eine einfache untere Schranke kann wie folgt berechnet werden:

$$\begin{aligned}
LB = & \sum_{k \in R \cup R^n} c_k * a_k^{min} + \sum_{i \in A, b_i > 0} b_i * (ES_i + \min_{m \in M_i} \{d_{i,m}\}) \\
& + \sum_{i \in A, b_i < 0} b_i * (LS_i + \max_{m \in M_i} \{d_{i,m}\})
\end{aligned}
\tag{4.31}$$

Im ersten Summanden von (4.31) wird für jede erneuerbare Ressource $k \in R$ die minimale Ressourceninanspruchnahme im gesamten Projektverlauf $a_k^{min} = \max_{i \in A} \{\min_{m \in M_i} \{r_{i,m,k}\}\}$, d. h. das Maximum über alle minimalen Ressourceninanspruchnahmen aller Vorgänge und somit je Vorgang der Modus mit der geringsten Ressourceninanspruchnahme, verwendet. Für alle nicht-erneuerbare Ressourcen $k \in R^n$ werden im ersten Summanden von (4.31) als minimale Ressourceninanspruchnahme $a_k^{min} = \sum_{i \in A} \min_{m \in M_i} \{q_{i,m,k}\}$, d. h. die Summe über alle minimalen Ressourceninanspruchnahmen aller Vorgänge und somit je Vorgang der Modus mit der geringsten Ressourceninanspruchnahme, verwendet. Die minimale Ressourceninanspruchnahme im ersten Summanden wird mit den Kostenfaktoren der jeweiligen Ressource multipliziert.

Im zweiten Summanden von (4.31) werden nur Vorgänge mit einem positiven Wert der Restbetriebskostenänderung je Zeiteinheit berücksichtigt, welcher mit dem frühesten Ende jedes Vorgangs mit positiver Restbetriebskostenänderung je Zeiteinheit multipliziert wird. Dadurch werden im zweiten Summanden möglichst frühe Reduktionen der Restbetriebskosten berücksichtigt, um die Restbetriebskosten so gering wie möglich zu halten.

Im dritten Summanden von (4.31) werden Vorgänge mit negativer Restbetriebskostenänderung je Zeiteinheit berücksichtigt, indem die Restbetriebskostenänderung je Zeiteinheit mit dem spätest möglichen Ende jedes Vorgangs mit negativer Restbetriebskostenänderung je Zeiteinheit multipliziert wird. Auf diese Weise werden im dritten Summanden möglichst

späte Erhöhungen der Restbetriebskosten berücksichtigt, um die Restbetriebskosten so gering wie möglich zu halten.

4.4.4 Weiterentwicklungsmöglichkeiten des Nuclear Dismantling Project Scheduling Problems

Die in Kapitel 3.1 gestellten Ziele und Anforderungen zur Planung eines kerntechnischen Rückbauprojekts werden mit dem in Kapitel 4.4.3 aufgeführten Scheduling Problem weitestgehend erfüllt. Darüber hinaus ist das in dieser Arbeit entwickelte deterministische Scheduling Problem in seiner Form genauso auf andere Großprojekte anwendbar. Allerdings kann es je Großprojekt spezifische Anforderungen geben, die insbesondere aufgrund von Komplexitätsgründen und dadurch resultierend aus Gründen der Rechendauer nicht implementiert wurden. Auf exemplarische Weiterentwicklungsmöglichkeiten des in Kapitel 4.4.3 aufgeführten Scheduling Problems wird im Folgenden eingegangen.

Das vollständig angepasste Scheduling Problem in Kapitel 4.4.3 berücksichtigt in Nebenbedingung (4.24) no-wait Vorrangbeziehungen, d. h. Vorgänge, die unmittelbar hintereinander ausgeführt werden sollen (zero time lag). Um nicht nur die no-wait Vorrangbeziehungen, sondern auch verallgemeinerte Vorgangsbeziehungen zu berücksichtigen, kann Nebenbedingung (4.24) durch die auf den Multi-Model-Fall erweiterte Nebenbedingung (3.70) in Kapitel 3.3.6.2 ersetzt werden. Wenn die verallgemeinerten Vorgangsbeziehungen auf die no-wait Vorrangbeziehungen angewendet werden sollen, kann diese Nebenbedingung auf die Menge E^{nw} beschränkt werden (vgl. Formel (4.32)).

$$\begin{aligned}
 & - \sum_{m=1}^{M_i} \sum_{t=ES_i}^{LS_i} (t + l_{j,i,m}) * x_{i,m,t} \\
 & \leq - \sum_{m=1}^{M_j} \sum_{t=ES_j}^{LS_j} t * x_{j,m,t}
 \end{aligned}
 \quad \forall (i, j) \in E^{nw} \quad (4.32)$$

Sofern eine **Deadline** für das Großprojekt besteht, die lediglich gegen die Zahlung von Strafkosten überschritten werden darf, kann in der Zielfunktion gemäß dem Grundmodell des RIPT (vgl. u. a. Kapitel 3.3.4) die Deadline D eingeführt werden.

$$\begin{aligned}
 \min \quad & \sum_{k \in R \cup R^n} c_k * a_k + \sum_{j=1}^J \sum_{m=1}^{M_j} \sum_{t=ES_j}^{LS_j} b_j * x_{j,m,t} * (t + d_{j,m}) \\
 & + p * \max\{0; s_j - D\}
 \end{aligned} \quad (4.33)$$

Da aktuell in Deutschland bzw. in den meisten Ländern weltweit keine Projektdeadlines für den Rückbau von kerntechnischen Anlagen gesetzlich vorgegeben sind, wird hier die vereinfachte Zielfunktion gemäß (4.21) verwendet.

Der Rückbau einer kerntechnischen Anlage ist ein Großprojekt, welches sich über mehrere Jahre oder Jahrzehnte erstreckt und sehr hohe Kosten von mehreren hundert Millionen bis zu mehreren Milliarden Euro verursacht (vgl. z. B. Kapitel 2.6.4). Die in diesem langen Zeitraum **anfallenden Kosten werden zwar minimiert, allerdings nicht diskontiert**. Im Wesentlichen wird aus vier Gründen auf die Implementierung der Diskontierung verzichtet:

1. Zur Diskontierung ist ein Zinssatz für einen langen Zeitraum anzunehmen, der auf verschiedene Arten bestimmt werden muss. Ein anzunehmender Zinssatz würde als weiterer Unsicherheitsfaktor in das Gesamtmodell übernommen werden. Dies würde die Aussagekraft einer gefundenen Lösung aufgrund der zunehmenden Unsicherheiten verringern.
2. Um Ein- und Auszahlungen diskontieren zu können, müssen die Zeitpunkte der Zahlungen feststehen. Hierzu müssten einerseits die variablen Kosten, d. h. die nicht-erneuerbaren Ressourcen, und andererseits die Anschaffungskosten der erneuerbaren Ressourcen mathematisch in unterschiedlichen Formeln und zusätzlich mit zeitabhängigen Variablen aufgeführt werden. Die optimale Bestimmung des Anschaffungszeitpunktes von erneuerbaren Ressourcen würde zwar die Genauigkeit der Kostenberechnung, aber gleichzeitig auch die Komplexität und damit die Rechendauer erhöhen.
3. Wie in Kapitel 3.3.2 beschrieben wurde, ist bei der Berücksichtigung von diskontierten Zahlungsflüssen eine Deadline D vorzugeben. Dies würde wie oben gezeigt zu einer Ausweitung der Zielfunktion und damit zu einer höheren Komplexität und einer höheren Rechendauer führen.
4. Es wird angenommen, dass die sehr hohen Restbetriebskosten alle sonstigen zeitbezogenen Zahlungsflüsse in den meisten Fällen überwiegen. D. h. es wird angenommen, dass die Restbetriebskosten aufgrund ihrer Höhe einen größeren Einfluss darauf nehmen, dass das Projekt möglichst schnell abgeschlossen wird, als mögliche Verschiebungen von kostenintensiven Vorgängen aufgrund der Diskontierung.

Eine zusätzliche mögliche Weiterentwicklung bezieht sich auf die Anpassung der Obergrenzen von Ressourcenkapazitäten. Im vorgestellten Scheduling Problem können zwar obere Grenzen für Kapazitäten von Ressourcen a_k angegeben werden, allerdings werden diese in der vorgestellten Formulierung im gesamten Projektzeitraum als konstant angenommen. Manche Ressourcen verändern im Projektverlauf ihre Ressourcenkapazitäten. Sofern es sich bei einer Ressource mit oberen Schranken beispielsweise um das Eigenpersonal im Anwendungsbeispiel des kerntechnischen Rückbaus handelt, ist damit zu rechnen, dass einerseits keine neuen Mitarbeiter eingestellt werden und ältere Mitarbeiter aufgrund ihres Ruhestands aus dem Projekt ausscheiden. Dies hat zur Folge, dass das verfügbare Eigenpersonal über den Projektverlauf abnimmt und die **obere Schranke für Ressourcen zeitlich variabel** sein kann/sollte. Die Berücksichtigung sich im Projektverlauf ändernder Ressourcenkapazitäten würde zu einer Steigerung der Problemkomplexität und somit zu einer Erhöhung der Rechendauer führen. Daher wird in dieser Arbeit auf die Implementierung dieser Weiterentwicklungsmöglichkeit verzichtet.

In Kapitel 3.2.3 werden neben den erneuerbaren und nicht-erneuerbaren Ressourcen unter anderem **kumulative Ressourcen** vorgestellt. Mit Hilfe dieses Ressourcentyps können im Anwendungsfall des kerntechnischen Rückbaus Lagerflächen modelliert werden. Sofern sich Einlagerungs- und Entnahmevorgänge auf verschiedene Perioden aufteilen, kann dies in der bisherigen Modellformulierung nicht abgebildet werden. Durch die Einführung einer weiteren Nebenbedingung könnten kumulative Ressourcen modelliert werden. Allerdings würden dadurch die Komplexität und die Rechendauer steigen, sodass auf diese Erweiterung verzichtet wird. Informationen zur Implementierung von kumulativen Ressourcen sind u. a. in Zimmermann (2001, S. 189) zu finden. Allgemein gilt für kumulative Ressourcen $k \in R^c$, dass Mindest- (\underline{R}_k^c) und Höchstkapazitäten (\overline{R}_k^c) erlaubt sind. Dazu ist die Vorbelegung r_{0k}^c der einzelnen Lager beim Entnehmen von $-r_{iS_k}^c \in \mathbb{Z}_{\geq 0}$ Einheiten zu Beginn (t_{iS}) eines Vorgangs i und

dem Befüllen des Lagers um $r_{i^c k}^c \in \mathbb{Z}_{\geq 0}$ Einheiten zum Abschlusszeitpunkt (t_{i^c}) des Vorgangs i zu berücksichtigen. Die Eintrittszeitpunkte t_{i^s} und t_{i^c} sind so zu wählen, dass für alle $t \in [0, T]$ und alle $k \in R^c$ gilt (vgl. Zimmermann, 2001, S. 189):

$$\underline{R}_k^c \leq r_{0k}^c + \sum_{i \in V: t_{i^s} \leq t} r_{i^s k}^c + \sum_{i \in V} r_{i^c k}^c \leq \overline{R}_k^c \quad (4.34)$$

Die im Scheduling Problem betrachteten Zeitscheiben berücksichtigen ausschließlich die Arbeitszeit zur Ausführung der Vorgänge. Unterbrechungen zwischen Vorgängen durch **Wochenenden** oder **Feiertage** werden nicht berücksichtigt. Verkürzungen der Projektgesamtdauer (nicht der Arbeitszeit) durch **Schichtmodelle** sind ebenfalls nicht im Scheduling Problem abgebildet. Des Weiteren werden zusätzliche Kosten durch den Einsatz von Arbeitskräften an Wochenenden, Feiertagen oder im Schichtbetrieb nicht berücksichtigt. Diese Weiterentwicklungen könnten in das Modell integriert werden. Mögliche Formulierungen sind u. a. in Zimmermann (2001, S. 191) aufgeführt.

4.4.5 Verfahren zur Lösung des Nuclear Dismantling Project Scheduling Problems¹²⁷

Grundsätzlich kann das für den Anwendungsfall des Rückbaus kerntechnischer Anlagen angepasste Mixed Integer Problem (MIP) aus Kapitel 4.4.3 (*Nuclear Dismantling Project Scheduling Problem*) direkt einem Solver, wie beispielsweise CPLEX oder Gurobi, übergeben werden. Allerdings handelt es sich bei dieser mathematischen Formulierung um ein NP-schweres Problem, welches schwer zu lösen ist. Tests mit Problemen

¹²⁷ Die Ausführungen in diesem Kapitel basieren auf gemeinsamen Arbeiten mit den Kollegen Patrick Gerhards und Christian Stürck von der Helmut-Schmidt-Universität.

unterschiedlicher Größe zeigen, dass bereits für kleine Problemgrößen lange Rechendauern benötigt werden und große Problemgrößen nicht lösbar sind (vgl. Kapitel 5.2.4)¹²⁸. Um mit kurzen bis mittleren Rechendauern (einige Sekunden bis wenige Stunden) sowohl für kleine als auch für große Probleme (vgl. zur Problemgröße die Referenzprojekte in Kapitel 5.1) einen optimierten Schedule berechnen zu können, ist ein alternatives Lösungsverfahren notwendig. Dies ist unter anderem auch für die Optimierung mehrerer Szenarien in akzeptabler Zeit notwendig.

Da es sich bei dem Scheduling Problem in dieser Arbeit nicht um ein Standardproblem handelt, existiert bisher kein Lösungsalgorithmus, der dieses lösen kann. An dieser Stelle sei hervorgehoben, dass die meisten in der Literatur aufgeführten Lösungsverfahren lediglich mit kleinen oder mittelgroßen Projekten (10 bis 30 Vorgänge je Projekt) getestet wurden. Lösungsverfahren für größere Projekte mit mehr als 50 Vorgängen¹²⁹ sind in der Literatur sehr selten zu finden. Beispielsweise haben van Peteghem und Vanhoucke (2014) Projekte mit bis zu 100 Vorgängen unter der Zuhilfenahme des MRCPSP untersucht. Kreter et al (2018) untersuchten ihre Methoden zur Lösung eines Single-Mode RIP mit Hilfe von Projekten mit bis zu 500 Vorgängen. Allerdings unterstützt diese Methode nicht den Multi-Mode-Fall.

Die zur Lösung des Scheduling Problems für Großprojekte unter der Berücksichtigung der spezifischen Anforderungen (vgl. Kapitel 3.1 sowie

¹²⁸ Die Rechendauern bei der Übergabe des MIP an einen Solver werden in Kapitel 5.2.4 im Zusammenhang der Evaluation der Güte des entwickelten Lösungsverfahrens aufgezeigt. Hierzu werden die in Kapitel 5.1 beschriebenen Referenzprojekte verwendet.

¹²⁹ Problemgrößen für den hier vorliegenden Multi-Mode-Fall bestehen aus mehreren Hundert Vorgängen.

das MIP in Kapitel 4.4.3) und unter Berücksichtigung der Komplexität¹³⁰ entwickelte Heuristik wird im Folgenden vorgestellt.

Die Heuristik des entwickelten Lösungsalgorithmus löst nicht das Gesamtproblem, sondern untersucht mehrere Subprobleme, die iterativ optimiert werden. Das Ziel des Verfahrens ist es, einen möglichst optimalen Schedule, d. h. einen Schedule mit möglichst minimalen Projektgesamtkosten, zu finden. Das Verfahren besteht aus zwei Schritten:

1. Finden einer initialen zulässigen Lösung,
2. Verbessern der initialen Lösung.

Auf diese beiden Schritte wird im Folgenden detailliert eingegangen.

4.4.5.1 Finden einer initialen zulässigen Lösung mit MLS

Bereits das Finden einer zulässigen Lösung für das beschriebene Problem ist insbesondere aufgrund der zero time lags Nebenbedingung (Nebenbedingung (4.24) in Kapitel 4.4.3), d. h. aufgrund der no-wait Vorrangbeziehungen, und aufgrund der Ressourcenbeschränkungen sehr aufwendig.

Um eine initiale zulässige Lösung, d. h. einen zulässigen Schedule, zu finden, wird die sogenannte *Multi-Start local Search* (MLS) Methode angewendet. Multi-Start-Methoden wurden bereits in vielen Optimierungsproblemen angewendet. Einen Überblick über bestehende Konzepte und Anwendungsgebiete sind in Martí et al. (2013) zu finden. Die

¹³⁰ Beispielsweise würden bei der Optimierung eines Projekts mit 295 Vorgängen, 22 erneuerbaren Ressourcen, einer nicht-erneuerbaren Ressource, maximal drei Modi je Vorgang und Zeitscheiben von Tagen (mit einer maximalen Projektdauer von 4429 Tagen) (vgl. Szenario 101 des Projekts „Gesamter Rückbau“, Kapitel 5.1.3) 892.564 Entscheidungsvariablen und 98.221 Nebenbedingungen aufgestellt. Zur Lösung weiterer Szenarien des Projekts „Gesamter Rückbau“ sind teilweise über eine Million Entscheidungsvariablen notwendig, von denen lediglich 23 Entscheidungsvariablen keine Binärvariablen sind.

in dieser Arbeit verwendete MLS-Methode beinhaltet aufgrund der Besonderheit von no-wait Vorrangbeziehungen das sogenannte *Parallel Schedule Generation Scheme* (PSGS). Hierzu werden alle Vorgänge, die aufgrund einer no-wait Vorrangbeziehung stark miteinander verbunden sind, in einer Menge zusammengefasst, welche als *strong component* bezeichnet wird. Diese strong components werden so eingeplant, dass ein Schedule entsteht (d. h. Zuweisung von Startzeitpunkten), welcher zuletzt durch die MLS-Methode mit Hilfe einer lokalen Suche nochmals verbessert wird. Die einzelnen Teile dieses Vorgehens zum Finden einer initialen, zulässigen Lösung werden im Folgenden jeweils detailliert vorgestellt.

4.4.5.1.1 Parallel Schedule Generation Scheme (PSGS)

Eine Besonderheit des in dieser Arbeit entwickelten Scheduling Problems sind die sogenannten no-wait Vorrangbeziehungen (vgl. Nebenbedingung (4.24) in Kapitel 4.4.3). Eine no-wait Vorrangbeziehung sagt aus, dass Vorgänge ohne eine Unterbrechung unmittelbar hintereinander ausgeführt werden müssen. Wenn somit ein Vorgang i beendet wird, dann muss/müssen sein/seine no-wait Nachfolger unmittelbar im Anschluss (ohne Pause oder Wartezeit) beginnen. Aufgrund der Bestimmung des Startzeitpunktes eines Vorgangs i sind gleichzeitig die Startzeitpunkte aller no-wait Nachfolger und aller no-wait Vorgänger definiert bzw. diese können abgeleitet werden. Um diese Eigenschaft zu berücksichtigen, werden alle Vorgänge, die mit einer no-wait Vorrangbeziehung miteinander in Beziehung stehen, in einer strong component zusammengefasst. Damit bestimmt der Startzeitpunkt eines Vorgangs in der strong component die Startzeitpunkte aller anderen Vorgänge in der strong component. Die Startzeitpunkte aller Vorgänge in einer strong component werden somit parallel bestimmt, was der Grund für die Bezeichnung des PSGS ist.

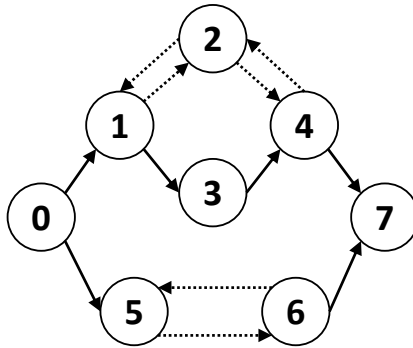
Darüber hinaus ist zu beachten, dass die Startzeitpunkte mancher Vorgänge durch die Startzeitpunkte von Vorgängen mit no-wait

Vorrangbeziehung beeinflusst werden, obwohl zwischen diesen Vorgängen keine no-wait Vorrangbeziehung besteht. Dies ist der Fall, wenn ein Vorgang (oder mehrere hintereinander ausgeführten Vorgänge) ohne no-wait Vorrangbeziehung sowohl Vorgänger als auch Nachfolger mit einer no-wait Vorrangbeziehung der gleichen strong component besitzen (vgl. Vorgang 3 in Abbildung 4.28). Solche Vorgänge werden ebenfalls in die strong component der sie umgebenden Vorgänge mit no-wait Vorrangbeziehung der gleichen strong component aufgenommen.

Eine strong component wird somit wie folgt bestimmt. Ein Vorgangsknotennetzplan $G = (A, E \cup E^{nw} \cup \overline{E}^{nw})$ eines Projekts wird in maximal große Mengen stark verbundener Vorgänge (strong components) unterteilt. Hierbei sind in E alle Pfeile der normalen Vorgangsbeziehungen, in E^{nw} alle Pfeile der no-wait Vorrangbeziehung und in \overline{E}^{nw} alle rückwärtsgerichteten Pfeile der no-wait Vorrangbeziehung ($\overline{E}^{nw} = \{(j, i) : (i, j) \in E^{nw}\}$) enthalten. Rückwärtsgerichtete Pfeile symbolisieren die no-wait Bedingung, da hierdurch der zeitliche Abstand zwischen dem Ende eines Vorgangs und dem Start seines no-wait Nachfolgers eindeutig bestimmt werden kann. In der Menge $C = \{C_1, \dots, C_p\}$ werden alle strong components zusammengefasst. Eine strong component C des Vorgangsknotennetzplans G ist ein maximaler Subgraph $G_C = (C, A_C)$, der alle Vorgänge enthält, sodass zwischen zwei Knoten (Vorgängen) $i, j \in C$ sowohl ein gerichteter Pfad von i nach j als auch von j nach i existiert. Sofern ein Vorgang mit keinem anderen Vorgang gemäß dieser Definition stark verbunden ist, bildet dieser Vorgang seinen eigenen Subgraphen und somit seine eigene strong component.

Da jede strong component G_C durch die in ihr enthaltenen Menge C an Knoten (Vorgängen) bestimmt wird, wird eine strong component im Folgenden auch mit C bezeichnet. Zur Bestimmung der strong components wird der Algorithmus von Tarjan (1972) verwendet. Die Bildung von strong components wird durch das Beispiel in Abbildung 4.28 verdeutlicht. Wie in

der letzten Spalte der Tabelle in Abbildung 4.28 zu sehen ist, werden die bestimmten strong components nummeriert. Die Nummerierung der strong components ist relevant für deren Einplanung. Hierbei ist es unerheblich, welcher strong component welche Nummer zugeordnet wird, da bei der Einplanung die Reihenfolge der Einplanung alterniert wird.



i	m	$d_{i,m}$	$r_{i,m,1}$	ES_i	LS_i	b_i	C
0	1	0	0	0	10	0	$C_0 = \{0\}$
1	1	5	2	0	10	0	$C_1 = \{1,2,3,4\}$
2	1	3	1	5	15	0	$C_1 = \{1,2,3,4\}$
3	1	2	1	5	16	0	$C_1 = \{1,2,3,4\}$
	2	4	1	5	14	0	$C_1 = \{1,2,3,4\}$
4	1	4	1	8	18	0	$C_1 = \{1,2,3,4\}$
5	1	4	1	0	16	0	$C_2 = \{5,6\}$
6	1	2	2	4	20	0	$C_2 = \{5,6\}$
7	1	0	0	12	22	10	$C_3 = \{7\}$

Abbildung 4.28: Beispiel als Vorgangsknotennetz mit zugehörigen Projektdaten (durchgezogene Pfeile symbolisieren normale Nachfolgerbeziehungen, gepunktete Pfeile symbolisieren no-wait Vorrangbeziehungen)

Im Folgenden wird erklärt, wie das PSGS aus einer gegebenen Reihenfolge der Einplanung von strong components, die sogenannte sequence der

strong components π , und aus einem gegebenen Modusvektor M einen Schedule bestimmt. Hierbei ist zu beachten, dass die sequence der strong components π lediglich die Reihenfolge angibt, nach der die einzelnen strong components eingeplant werden. Demgegenüber werden in einem Schedule die Startzeitpunkte der einzelnen Vorgänge angegeben. Der Modusvektor M gibt für jeden Vorgang an, in welchem Modus dieser ausgeführt wird.

Data: sequence π , mode vector M

Result: candidate solution c^{best}

```

1  Compute  $ES_i$  and  $LS_i$  for all activities with CPM using durations of modes in  $M$ 
2  Compute minimum and maximum longest path matrix  $\delta$  for each component
3   $DT := \{0\}$ 
4   $s := 1$ 
5  while  $s \leq \text{number of strong components}$  do
6       $t^{best} := \infty$ 
7       $\Delta := \infty$ 
8      forall  $t \in DT(\pi_s)$  do
9          Calculate cost increase  $\Delta^t$  of scheduling  $C_{\pi_s}$  at  $t$ 
10         if  $\Delta^t < \Delta$  then
11              $t^{best} := t$ 
12              $\Delta := \Delta^t$ 
13         end
14     end
15     if  $t^{best} < \infty$  then
16         Schedule component  $C_{\pi_s}$  at  $t^{best}$  in solution  $c^{best}$ 
17         Update  $ES_i$  and  $LS_i$  for all predecessors and successors of component
            activities
18         Update  $DT$ 
19     end
20     else
21         PSGS failed
22     end
23      $s := s + 1$ 
24 end
25 return  $c^{best}$ 

```

Algorithmus 1: Pseudocode des Parallel Schedule Generation Scheme (PSGS)

Als Input für das PSGS wird eine sequence der strong components π und ein Modusvektor M übergeben. Hierbei ist zu beachten, dass PSGS ein Teil des MLS-Algorithmus ist, bzw. im MLS-Algorithmus enthalten ist. π und M werden im MLS-Algorithmus bestimmt, bevor dem PSGS diese Informationen übergeben werden. Zunächst werden gemäß der CPM mit Hilfe von M die frühesten (ES_i) und spätesten Startzeitpunkte (LS_i) aller Vorgänge i des Problems berechnet (Zeile 1 in Algorithmus 1). Anschließend werden mit Hilfe eines label-correcting Algorithmus (vgl. Neumann et al., 2002) unter der Verwendung des gegebenen Modusvektors M die minimalen start-to-start time lags $\delta_{i,j}$ aller Vorgänge $i, j \in C$ einer jeden strong component berechnet und in einer Matrix gespeichert (Zeile 2 in Algorithmus 1). Ein minimaler start-to-start time lag $\delta_{i,j}$ besagt, wie groß die Zeitdifferenz zwischen dem Start des Vorgangs i und dem Start des Vorgangs j sein darf, d. h. $S_j - S_i \geq \delta_{i,j}$. Für den label-correcting Algorithmus werden im Vorgangsknotennetzplan G folgende Kantengewichte verwendet:

$$\omega_{i,j} = \begin{cases} d_{i,m}, & \text{wenn } (i,j) \in E \vee (i,j) \in E^{nw} \\ -d_{i,m}, & \text{wenn } (i,j) \in \overline{E^{nw}} \end{cases}$$

Sofern $\delta_{i,j} + \delta_{j,i} = 0$ gilt, wird der Start des Vorgangs j vom Start des Vorgangs i beeinflusst, da $S_j = S_i + \delta_{i,j}$ gefolgert werden kann. Wenn für einen Vorgang i ein $\delta_{i,i} > 0$ gefunden wird, ist die Ausführung des Vorgangs in diesem Modus nicht zulässig, da ein Zyklus mit positiver länge gefunden wird, d. h. dass in dieser strong component die no-wait Vorrangbeziehungen nicht eingehalten werden.

Nach der Initialisierung der Menge DT und der Variable s (Zeilen 3-4 in Algorithmus 1) werden so viele Iterationen durchgeführt, wie es strong components im zu untersuchenden Problem gibt (Zeilen 5-24 in Algorithmus 1). Damit wird sichergestellt, dass im Extremfall, wenn es keine no-wait Vorrangbeziehungen gibt und somit jeder Vorgang eine

eigene strong component darstellt, jeder Vorgang untersucht und eingeplant wird.

In jeder Iteration s wird die jeweilige strong component C_{π_s} eingeplant. Zur Einplanung einer strong component wird zunächst der Startzeitpunkt des Vorgangs der einzuplanenden strong component identifiziert, der den geringsten frühesten Startzeitpunkt besitzt, d. h. von Vorgang $j^* = \arg \min\{ES_i: i \in C_{\pi_s}\}$. Für alle anderen Vorgänge der strong component $i \in C_{\pi_s} \setminus \{j^*\}$ werden die Startzeitpunkte durch die Addition von $\delta_{j^*,i}$ bestimmt, d. h. wenn $S_{j^*} = t$, dann gilt $S_i = t + \delta_{j^*,i}$. Für alle no-wait Nachfolger in der strong component können die Startzeitpunkte eindeutig bestimmt werden. Für Vorgänge der strong component ohne no-wait Vorrangbeziehung (vgl. Vorgang 3 in Abbildung 4.28) wird der früheste Startzeitpunkt des Vorgangs gewählt, der die normalen Vorgangsbeziehungen einhält. Sofern die Einplanung des Vorgangs zu diesem Zeitpunkt zu einer Verletzung der Ressourcenbeschränkung führt, werden mithilfe einer unscheduling Methode spätere Startzeitpunkte getestet.

Da die Zielfunktion quasikonkav ist, ist es ausreichend relevante Zeitpunkte zu überprüfen, die in der Menge $DT(\pi_s)$ enthalten sind (vgl. Zeile 8 in Algorithmus 1).

$$DT(\pi_s) = \bigcup_{i \in C_{\pi_s}} \bigcup_{t=ES_{j^*}}^{LS_{j^*}} (t + \delta_{j^*,i}) \cap DT$$

Hierbei ist DT die Menge an Start- und Endzeitpunkten, die bereits eingeplant wurden. Die Menge $DT(\pi_s)$ besteht somit aus allen Zeitpunkten, zu denen sich die Ressourceninanspruchnahme ändern könnte.

Für den jeweils gewählten Zeitpunkt $t \in DT(\pi_s)$ wird zunächst überprüft, ob eine Einplanung zu diesem Zeitpunkt zu einer Überschreitung der Ressourcenverfügbarkeit a_k^{max} der Ressource k führt. Zur Planung werden

lediglich Zeitpunkte berücksichtigt, die zu keiner Überschreitung der Ressourcenverfügbarkeit führen.

Für jeden Zeitpunkt t werden für die strong component C_{π_s} die durch eine Einplanung dieser component zum Zeitpunkt t entstehenden Erhöhungen der Projektgesamtkosten berechnet (Zeile 9 in Algorithmus 1). Hierbei wird der Einfluss negativer Restbetriebskostenänderungen je Zeiteinheit ($b_i < 0$), d. h. ein Anstieg der Restbetriebskosten je Zeiteinheit nach der Ausführung eines Vorgangs, nicht berücksichtigt. Der Grund dafür liegt darin, dass zwar eine Einplanung solcher Vorgänge zu einem möglichst späten Zeitpunkt zunächst zu geringeren Projektgesamtkosten führen würde, dass allerdings dadurch auch Nachfolger mit positiven Restbetriebskostenänderungen je Zeiteinheit ($b_i \geq 0$) nach hinten verschoben würden. Da Vorgänge mit positiven Restbetriebskostenänderungen je Zeiteinheit in der Regel höhere Kostenreduktionen herbeiführen als die Kostenanstiege von Vorgängen mit negativen Restbetriebskostenänderungen je Zeiteinheit, führt dies zu schlechteren Schedules bzgl. der Gesamtkosten. Da der Einfluss negativer Restbetriebskostenänderungen je Zeiteinheit ($b_i < 0$) nicht berücksichtigt wird, können die Kosten durch die Einplanung der strong component zum Zeitpunkt t entweder gleich bleiben oder ansteigen, d. h. $\Delta^t \geq 0$. Sofern bei der Überprüfung des Zeitpunkts t eine Überschreitung der Ressourcenverfügbarkeit a_k^{max} der Ressource k festgestellt wird, wird in $\Delta^t = \infty$ gespeichert.

Wenn die Änderung der Projektgesamtkosten, d. h. der Anstieg der Kosten durch die Einplanung der strong component zum Zeitpunkt t , geringer ist als die bisher berechneten Änderungen der Projektgesamtkosten, dann werden dieser Zeitpunkt und die Änderung der Kosten gespeichert (Zeilen 10-13 in Algorithmus 1). Sofern mehrere Zeitpunkte die gleiche Änderung der Projektgesamtkosten bewirken, wird der frühestmögliche dieser Zeitpunkte gewählt.

Zum Zeitpunkt t^{best} , zu dem die geringsten Kostenänderungen Δ^t anfallen, wird die strong component C_{π_s} im Schedule c^{best} eingeplant (Zeile 16 in Algorithmus 1). Nach der Einplanung der strong component müssen die frühesten und spätesten Startzeitpunkte der Vorgänger sowie der Nachfolger aller Vorgänge der eingeplanten strong component aktualisiert werden (Zeile 17 in Algorithmus 1). Des Weiteren wird die Menge DT aktualisiert (Zeile 18 in Algorithmus 1).

Es ist möglich, dass kein zulässiger Schedule für eine sequence der strong components π gefunden wird, obwohl die sequence an sich bzgl. der Vorgangsbeziehungen zulässig ist. Dann scheitert das PSGS. Dies kann einerseits vorkommen, wenn die gewählten Vorgangsdauern in den entsprechenden Modi einen Kreis mit positiver Länge in einer strong component erzeugen, d. h. dass die no-wait Vorrangbeziehung(en) nicht eingehalten werden. Andererseits kann ein Schedule unzulässig sein, wenn die Ressourceninanspruchnahme die verfügbare Ressourcenkapazität übersteigt. Da der MLS-Algorithmus dem PSGS-Algorithmus viele sequences der strong components π übergibt und diese jeweils überprüft werden, ist die Wahrscheinlichkeit sehr hoch, dass mindestens ein π in einem zulässigen Schedule resultiert. Da im Rahmen der Tests des PSGS kein solcher Fall aufgetreten ist, wurde keine Reparatur-Methode entwickelt. Diese könnte recht einfach implementiert werden, indem diese aus dem PSGS aufgerufen wird, sobald dieses scheitert. In der Reparatur-Methode könnte eine neue Moduskombination erstellt und dem PSGS übergeben werden.

Anhand des Beispiels aus Abbildung 4.28 wird die Funktionsweise des PSGS anschaulich erklärt. Es gilt zu beachten, dass nur Vorgang 3 zwei Modi besitzt. Es wird angenommen, dass lediglich eine erneuerbare Ressource mit dem Kostenfaktor $c_1 = 1$ und keine maximale Ressourcenkapazität α_1^{max} existiert. Für die sequence der strong components $\pi^1 = [0, 1, 2, 3]$ und den Modusvektor $M^1 = [1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1]$ berechnet das PSGS den

in Abbildung 4.29 dargestellten Schedule mit zugehöriger Ressourceninanspruchnahme.

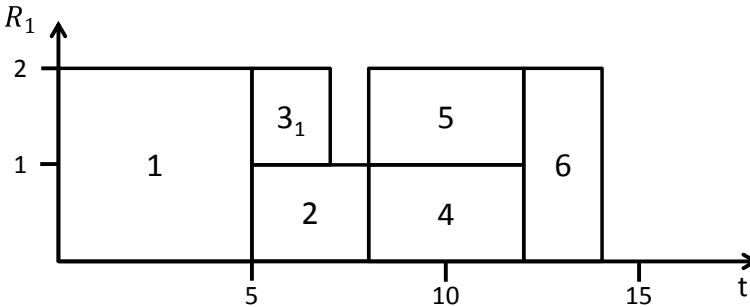


Abbildung 4.29: Beispiel zur Bestimmung eines Schedules mit PSGS für π^1 und M^1

Zunächst wird die strong component C_0 , welche lediglich den Dummy-Vorgang 0 enthält, mit Start und Ende zum Zeitpunkt 0 eingeplant. Anschließend wird die strong component C_1 bestehend aus den Vorgängen 1, 2, 3 und 4 eingeplant. Unabhängig von den gewählten Startzeitpunkten bleiben die Kosten gleich, sodass Vorgang 1 zum Zeitpunkt 0 startet (und alle anderen Vorgänge der strong component bekommen entsprechend der zero time lag Vorgangsbeziehungen ihre Startzeitpunkte zugeordnet). Da somit Vorgang 4 zum Zeitpunkt 12 endet, muss ES_7 nicht angepasst werden. Die nächste einzuplanende strong component (C_2) beinhaltet die Vorgänge 5 und 6. Da jeder Startzeitpunkt von Vorgang 5 früher als zum Zeitpunkt 8 zu einer Erhöhung der Ressourceninanspruchnahme und damit zu einer Erhöhung der Kosten führen würde, wird Vorgang 5 zum Zeitpunkt 8 und gemäß der zero time lag Beziehung Vorgang 6 zum Zeitpunkt 12 gestartet. Dadurch endet Vorgang 6 zum Zeitpunkt 14, sodass $ES_7 = 14$ angepasst werden muss. Zuletzt wird der Start- und Endzeitpunkt des Dummy-Vorgangs 7 (C_3) zum Zeitpunkt 14 eingeplant.

Wenn die strong components 1 und 2 in umgekehrter Reihenfolge eingeplant werden, d. h. $\pi^2 = [0, 2, 1, 3]$, berechnet PSGS (bei der Verwendung von M^1) den in Abbildung 4.30 dargestellten Schedule.

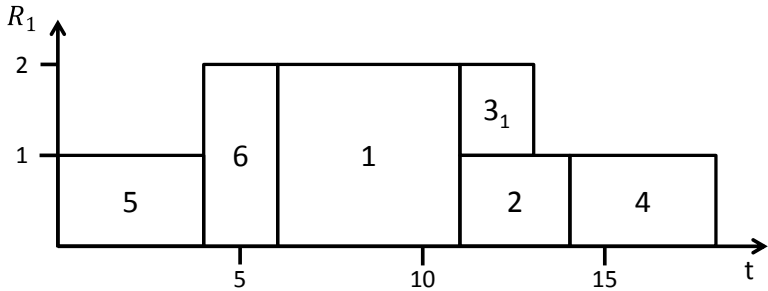


Abbildung 4.30: Beispiel zur Bestimmung eines Schedules mit PSGS für π^2 und M^1

Hierbei wird nach der Einplanung des Dummy-Vorgangs 0 der strong component C_0 zum Zeitpunkt 0 die strong component C_2 mit den Vorgängen 5 und 6 eingeplant. Im Anschluss wird die strong component C_1 mit den Vorgängen 1, 2, 3 und 4 eingeplant. Da eine Einplanung zu einem Zeitpunkt früher als 6 zu einer Erhöhung der Ressourceninanspruchnahme und damit zu einer Erhöhung der Kosten führen würde, wird Vorgang 1 zum Zeitpunkt 6 und die anderen Vorgänge von C_1 gemäß der zero time lag Beziehung gestartet. Der früheste Startzeitpunkt des Dummy-Endvorgangs muss auf $ES_7 = 18$ angepasst werden, da Vorgang 4 zum Zeitpunkt 18 endet. Zuletzt wird der Start- und Endzeitpunkt des Dummy-Vorgangs 7 (C_3) zum Zeitpunkt 18 eingeplant.

Wenn Vorgang 3 in Modus 2 ausgeführt werden sollte (d. h. $M^2 = [1, 1, 1, 2, 1, 1, 1, 1]$), würde bei der Berechnung der start-to-start time lags $\delta_{i,j}$ in der strong component C_1 ein Kreis mit positiver Länge berechnet. Die Vorgänge 2 und 3 müssen einerseits aufgrund der no-wait Vorrangbeziehungen zwischen den Vorgängen 1 und 2 sowie 2 und 4 und

andererseits aufgrund der Vorgangsbeziehungen zwischen den Vorgängen 1 und 3 sowie 3 und 4 parallel ausgeführt werden. Gleichzeitig darf Vorgang 3 aufgrund der genannten Vorgangsbeziehungen nicht länger dauern als Vorgang 2. Wenn Vorgang 3 allerdings in Modus 2 ausgeführt wird, übersteigt dessen Vorgangsdauer die Vorgangsdauer von Vorgang 2. Daher ist der Modusvektor M^2 unzulässig.

4.4.5.1.2 Multi-Start Local Search (MLS)

Wie bereits beschrieben wurde, ist das PSGS ein Teil der Multi-Start Local Search (MLS) Methode, welche im Folgenden beschrieben wird. Der Pseudocode der MLS ist in Algorithmus 2 dargestellt.

Data: time limit T , perturbation parameter for the mode vector p^M , perturbation parameter for the component sequence p^S

Result: best obtained candidate c^{best}

```
1 Calculate mode vector  $M$  with minimal duration modes
2 Calculate initial precedence feasible sequence  $\pi$  randomly
3  $c^{best} := PSGS(\pi, M)$ 
4  $M^{best} := M$ 
5  $\pi^{best} := \pi$ 
6 while time limit  $T$  is not reached do
7    $M^{it} := Perturb(M^{best}, p^M)$ 
8    $\pi^{it} := Perturb(\pi^{best}, p^S)$ 
9    $c^{it} := PSGS(\pi^{it}, M^{it})$ 
10  Try improving  $c^{it}$  and  $\pi^{it}$  with local search
11  if  $costs(c^{it}) < costs(c^{best})$  then
12     $c^{best} := c^{it}$ 
13     $M^{best} := M^{it}$ 
14     $\pi^{best} := \pi^{it}$ 
15  end
16 end
17 return  $c^{best}$ 
```

Algorithmus 2: Pseudocode der Multi-Start Local Search (MLS)

Um die MLS-Methode zu verwenden, ist die Angabe eines Zeitlimits T sowie die Angabe der Perturbationsparameter für den Modusvektor (p^M) und für die sequence der strong components (p^S) notwendig. Diese drei Parameter können vom Anwender vorgegeben werden. Eine Untersuchung, welche Werte der Parameter p^M und p^S zu den besten Ergebnissen in den untersuchten Anwendungsbeispielen führen, ist in Kapitel 5.2.1 zu finden. Mögliche Zeitlimits T , die bei der Anwendung der MLS-Methode bei der Verwendung der in Kapitel 5.2.1 kalibrierten Parameter zu den besten Ergebnissen führen, werden in Kapitel 5.2.2 untersucht.

Zunächst bestimmt der MLS-Algorithmus einen Modusvektor, der für jeden Vorgang die minimale Dauer enthält (Zeile 1 in Algorithmus 2). Anschließend wird zufällig eine bzgl. der Vorgangsbeziehungen zulässige, initiale sequence der strong components π bestimmt (Zeile 2 in Algorithmus 2). Da bei der Erstellung der sequence nicht die Startzeitpunkte der einzelnen Vorgänge, sondern lediglich die Reihenfolge der Einplanung bestimmt werden, ist es ausreichend, wenn lediglich die normalen und nicht die no-wait Vorrangbeziehungen berücksichtigt werden. D. h. wenn $(i, j) \in E$ und i und j nicht zur gleichen strong component gehören, dann muss die strong component, in der Vorgang i enthalten ist, vor der strong component eingeplant werden, in der Vorgang j enthalten ist.

Eine solche zufällige und gleichzeitig bzgl. der Vorgangsbeziehungen zulässige sequence der strong components π wird wie folgt bestimmt: Als erstes wird die strong component, welche den Dummy-Startvorgang enthält, zur sequence hinzugefügt. Danach wird iterativ eine zufällige strong component zu der sequence hinzugefügt, wobei die Vorgänger der jeweiligen strong component (bezogen auf die normalen Vorgangsbeziehungen in E) bereits in der sequence enthalten sind. Dieses Vorgehen wird so oft wiederholt, bis alle strong components in der sequence enthalten sind.

Anschließend werden die erstellte sequence und der bestimmte Modusvektor der PSGS übergeben, um den ersten Schedule als Ergebniskandidaten c^{best} zu bestimmen (Zeile 3 in Algorithmus 2). Dann werden der Modusvektor M^{best} sowie die sequence π^{best} mit M und π initialisiert (Zeilen 4-5 in Algorithmus 2).

Die While-Schleife (Zeilen 6-16 in Algorithmus 2) wird solange ausgeführt, bis das vorgegebene Zeitlimit T erreicht ist. Sie repräsentiert damit den Multi-Start Teil des MLS-Algorithmus, da die Suche nach einem besseren Schedule immer wieder neu gestartet wird. Aufgrund des erneuten Startens der Suche mit Hilfe neuer sequences und neuen Modusvektoren und daraus erstellter Schedules sollen lokale Minima überwunden werden. In jeder Iteration werden zunächst der bisher beste Modusvektor und die bisher beste sequence durcheinandergebracht (im Folgenden als *Perturbation* bezeichnet), um den neuen Modusvektor M^{it} und die neue sequence π^{it} zu erhalten. Bei der Perturbation des Modusvektors (Zeile 7 in Algorithmus 2) wird der Modus eines zufällig gewählten Vorgangs in einen zufällig anderen Modus geändert. Hierbei werden lediglich Modi übernommen, die bzgl. der Vorgangsbeziehungen und insbesondere der no-wait Vorrangbeziehungen (d. h. kein Zyklus mit positiver Länge) zulässig sind. Die Anzahl an Änderungen ist zufällig, allerdings kleiner oder gleich $p^M * |A|$. Zur Perturbation der sequence (Zeile 8 in Algorithmus 2) wird iterativ jeweils eine zufällige strong component aus der sequence gelöscht und an einer anderen bzgl. der Vorgangsbeziehungen zulässigen Stelle der sequence eingefügt. Dieses Vorgehen wird zufällig, aber maximal $p^S * |C|$ mal wiederholt. Die Perturbationsparameter p^M und p^S gewährleisten, dass sich die aufgrund des geänderten Modusvektors und der geänderten sequence ergebene Lösung nicht zu sehr von der aktuell besten Lösung unterscheidet. Damit soll erreicht werden, dass durch nicht zu große Änderungen die bisher beste Lösung nochmals verbessert wird. Die neu bestimmte sequence π^{it} sowie der neu bestimmte Modusvektor M^{it}

werden verwendet, um mit der PSGS einen Schedule c^{it} als Lösungskandidaten zu bestimmen (Zeile 9 in Algorithmus 2).

Mit Hilfe einer lokalen Suche werden π^{it} und der davon abgeleitete Schedule c^{it} weiter verbessert (Zeile 10 in Algorithmus 2). In der lokalen Suche werden jeweils zwei strong components der sequence π^{it} getauscht, wobei die Moduswahl gemäß dem Modusvektor M^{it} nicht verändert wird. Wenn dieser Tausch gemäß der oben beschriebenen Vorgangsbeziehungen zulässig ist, dann werden für die sich dadurch neu ergebene sequence mit Hilfe der PSGS der Schedule und die sich ergebenden Kosten berechnet. Wenn diese Kosten geringer sind als die Kosten der zuvor besten sequence, dann wird die neue sequence als neue beste Lösung gespeichert. Auf diese Weise wird eine sogenannte *first improving move policy* angewendet, d. h. sobald sich eine Verbesserung ergibt, wird diese als neue beste Lösung angenommen. Der Tausch von strong components in der sequence und die anschließende Berechnung sowie die Evaluation der Kosten werden so oft wiederholt, bis alle Tauschmöglichkeiten zweier strong components ausprobiert und diese zu keiner Verbesserung (d. h. geringeren Kosten) geführt haben. Wenn die lokale Suche zu einer Verbesserung des Zielfunktionswertes, d. h. zu geringeren Projektgesamtkosten, der bisher besten gefundenen Lösung geführt hat, dann werden der Schedule mit den geringsten Kosten sowie die zugehörige sequence und der zugehörige Modusvektor gespeichert (Zeilen 11-15 in Algorithmus 2).

Da die Verwendung der PSGS sehr zeitintensiv ist und PSGS für jeden Tausch der strong components angewendet wird, ist die lokale Suche mit großen Rechendauern verbunden. Die Parameter T , p^M und p^S sollten daher so gewählt werden, dass mit diesen Angaben eine gute initiale Lösung gefunden und gleichzeitig nicht zu viel Zeit in Anspruch genommen wird. In Kapitel 5.2.1 werden anhand von drei Referenzprojekten

entsprechende Tests zur Bestimmung der Parameter p^M und p^S und in Kapitel 5.2.2 Tests zur Bestimmung des Parameters T vorgenommen.

4.4.5.2 Verbesserung der initialen Lösung mit ALNS

Um die durch die MLS gefundene initiale Lösung zu verbessern, wird die sogenannte *Adaptive Large Neighbourhood Search* (ALNS) angewendet. Das Konzept der ALNS wurde von Ropke und Pisinger (2006) vorgestellt. Hierbei handelt es sich um eine Erweiterung der sogenannten *Large Neighbourhood Search*, die durch Shaw (1997) etabliert wurde. Im Bereich der Projektplanung und des sogenannten project scheduling wurde das ALNS Konzept bereits erfolgreich von Muller (2011) und Gerhards et al. (2017) auf ein MRCPSP angewendet. Um die ALNS auf das Anwendungsgebiet und das Scheduling Problem dieser Arbeit anzuwenden, wird die ALNS modifiziert.

Das grundsätzliche Vorgehen des ALNS-Algorithmus sieht zwei Schritte vor. In einem ersten Schritt werden Teile der initialen Lösung durch sogenannte *destroy operators* (im Folgenden *destroy Operatoren* genannt) „zerstört“, d. h. Teile der initialen Lösung sind nicht mehr fix, sondern es gibt Alternativen (mehrere Startzeitpunkte und unterschiedliche Moduszuweisungen sind ausführbar). Vorgänge, die sich in „zerstörten“ Teilen befinden, werden im Folgenden aufgrund ihrer Freiheitsgrade als *freie Vorgänge* bezeichnet. Vorgänge, die sich nicht in „zerstörten“ Teilen befinden, werden dagegen als *fixe Vorgänge* bezeichnet. Die *destroy Operatoren* werden anhand ihrer Auswahlwahrscheinlichkeit gewählt (die Auswahlwahrscheinlichkeiten werden in Kapitel 5.2.1 anhand von drei Referenzprojekten bestimmt). In einem zweiten Schritt werden die „zerstörten“ Teile durch einen sogenannten *recreate operator* (im Folgenden *recreate Operator* genannt) wieder repariert. Hierzu wird das Mixed Integer Problem (MIP) aus Kapitel 4.4.3 mit den neuen Freiheitsgraden der „zerstörten“ Teile der initialen Lösung gelöst. Dadurch wird in der Regel ein

neuer zulässiger Schedule identifiziert, der einen besseren Zielfunktionswert aufweist, d. h. der geringere Projektgesamtkosten besitzt.

Durch dieses Vorgehen wird somit nicht das gesamte Problem, sondern jeweils ein Subproblem gelöst, bei dem die Anzahl an Entscheidungsvariablen des zu lösenden MIPs reduziert wird. Der Grund für diese Reduktion der Anzahl an Entscheidungsvariablen ist, dass das MIP hierdurch in vertretbarer Zeit lösbar ist. Ohne die Reduktion der Anzahl an Entscheidungsvariablen ist das MIP mit state-of-the-art Hardware, wie sie zum Zeitpunkt der Erstellung dieser Arbeit zur Verfügung¹³¹ stand, für große Probleme wie dem Rückbau kerntechnischer Anlagen nicht lösbar. Erst durch die Reduktion der Anzahl an Entscheidungsvariablen wird das MIP für das Anwendungsproblem dieser Arbeit und seine besonderen Nebenbedingungen (insbesondere die no-wait Vorrangbeziehungen) lösbar.

Im Folgenden wird zunächst das Vorgehen des ALNS-Algorithmus beschrieben. Dieser Algorithmus verwendet die bereits angesprochenen destroy und recreate Operatoren. Diese Operatoren werden im Anschluss an die Beschreibung des ALNS-Algorithmus vorgestellt.

4.4.5.2.1 Der ALNS-Algorithmus

Der adaptive Teil des ALNS-Algorithmus aus der Literatur besteht darin, dass die Wahrscheinlichkeiten der Wahl von destroy und recreate Operatoren geändert werden. Im Gegensatz dazu besteht der adaptive Teil des ALNS-Algorithmus, der in dieser Arbeit angewendet wird, nicht in der Änderung der Wahrscheinlichkeiten zur Wahl der destroy und recreate Operatoren, sondern in der Anpassung der Nachbarschaft, in der nach besseren Lösungen gesucht wird. Das bedeutet, wenn in einer Iteration keine

¹³¹ Im Rahmen dieser Arbeit wurde auf einem Computer mit 12 Prozessoren mit jeweils 3,4 GHz (Intel® Core™ i7-4930K) und einem Arbeitsspeicher mit einer Kapazität von 64 GB unter Windows Server 2012 (64-bit) gerechnet.

bessere Lösung gefunden wurde (weil die Suche beispielsweise in einem lokalen Minimum stecken bleibt), dann werden die Größe der Nachbarschaft sowie die zulässige Dauer zur Ausführung einer Iteration vergrößert. Die Größe der Nachbarschaft wird durch die Parameter *freeVar* (welche die maximale Anzahl an Entscheidungsvariablen angibt) und *varPerMode* (welche die maximale Anzahl an Entscheidungsvariablen je Modus angibt) angepasst. Sofern in einer Iteration eine bessere Lösung gefunden wird, werden die Größe der Nachbarschaft sowie die zulässige Dauer zur Ausführung einer Iteration auf die initialen Werte zurückgesetzt.

Der Pseudocode der ALNS ist in Algorithmus 3 dargestellt.

```

Data:  $c^{initial}$ ,  $D$ ,  $P$ , initialFreeVar, initialVarPerMode,  $\alpha$ ,  $\beta$ ,
        initialTimePerIteration
Result: best obtained candidate  $c^{best}$ 
1  $c^{best} := c^{initial}$ 
2 freeVar := initialFreeVar
3 varPerMode := initialVarPerMode
4 timePerIteration := initialTimePerIteration
5 while overall time limit is not reached do
6   Choose a destroy operator  $d$  from  $D$  with probabilities in  $P$ 
7    $DC := d(c^{best}, \textit{freeVar}, \textit{varPerMode})$ 
8    $c^{proposed} := r(c^{best}, DC, \textit{timePerIteration})$ 
9   if  $\textit{costs}(c^{proposed}) < \textit{costs}(c^{best})$  then
10     $c^{best} := c^{proposed}$ 
11    freeVar := initialFreeVar
12    timePerIteration = initialTimePerIteration
13    varPerMode := initialVarPerMode
14  else
15    freeVar :=  $\alpha \cdot \textit{freeVar}$ 
16    if number of iterations since last improvement is even then
17      varPerMode :=  $\beta \cdot \textit{varPerMode}$ 
18    end
19    if iteration took longer than timePerIteration then
20      timePerIteration := actual time of iteration + 10
21    end
22  end
23 end
24 return  $c^{best}$ 

```

Algorithmus 3: Pseudocode der Adaptive Large Neighbourhood Search (ALNS)

Als Input des ALNS-Algorithmus werden folgenden Angaben benötigt:

- $c^{initial}$: zulässiger Schedule (ist das Ergebnis der MLS)
- D : Menge an destroy Operatoren, die zur Auswahl stehen
- P : Menge an Wahrscheinlichkeiten, anhand welcher destroy Operatoren gewählt werden. Die Wahrscheinlichkeiten ergeben in Summe eins ($\sum_{p \in P} p = 1$). In Kapitel 5.2.1 werden die Wahrscheinlichkeiten der in dieser Arbeit verwendeten destroy Operatoren bestimmt.
- $initialFreeVar$: initiale Angabe der maximalen Anzahl an Entscheidungsvariablen
- $initialVarPerMode$: initiale Angabe der Anzahl an Entscheidungsvariablen je Modus
- $initialTimePerIteration$: Zeitbeschränkung je Iteration (für den MIP-Solver)
- α, β : Parameter zur Vergrößerung der Nachbarschaft, indem mit diesen Parametern $freeVar$ und $varPerMode$ vergrößert werden (je Anwendungsproblem muss getestet werden, welche Angaben zu guten Ergebnissen führen, vgl. Kapitel 5.2.1)

Der ALNS-Algorithmus (Algorithmus 3) kann in vier Schritte unterteilt werden:

- 1.) Zeilen 1-4: Initialisierung der Variablen: Die Variablen $freeVar$ und $varPerMode$ werden im destroy-Schritt (Zeile 7 in Algorithmus 3 sowie Kapitel 4.4.5.2.2) verwendet. Die Variable $timePerIteration$ wird im recreate-Schritt (Zeile 8 in Algorithmus 3 sowie Kapitel 4.4.5.2.3) verwendet.

Die Schritte zwei bis vier sind in der While-Schleife enthalten. Die While-Schleife wird so oft ausgeführt, solange ein vorgegebenes Zeitlimit nicht überschritten wird.

- 2.) Zeile 7: Der „Zerstör-Schritt“ (destroy-Schritt): Mit Hilfe der Wahrscheinlichkeiten der Menge P wird zunächst in Zeile 6 in Algorithmus 3 zufällig ein destroy Operator d aus der Menge D an verfügbaren destroy Operatoren ausgewählt. Der gewählte destroy Operator „zerstört“ spezifische Teile des Schedules c^{best} , der bisher als Schedule mit den geringsten Kosten identifiziert wurde. Welche Teile des Schedules „zerstört“ werden hängt vom gewählten destroy Operator ab. Die Anzahl an Teilen und deren Größe wird durch die Parameter $freeVar$ und $varPerMode$ festgelegt. Zwei destroy Operatoren und deren Funktionsweise werden in Kapitel 4.4.5.2.2 beschrieben.
- 3.) Zeile 8: Recreate-Schritt: Der recreate Operator stellt ein MIP gemäß des mathematischen Modells in Kapitel 4.4.3 auf. Allerdings werden nicht alle möglichen Entscheidungsvariablen berücksichtigt. Einige der Entscheidungsvariablen sind in c^{best} festgelegt, d. h. besitzen keine Freiheitsgrade möglicher Startzeitpunkte oder unterschiedlicher Moduszuweisungen. Lediglich in den durch den gewählten destroy Operator „zerstörten“ Teilen von c^{best} können Entscheidungsvariablen alterniert werden, d. h. in diesen Teilen besitzen die Entscheidungsvariablen je Vorgang Freiheitsgrade möglicher Startzeitpunkte und unterschiedlicher Moduszuweisungen. Somit wird, wie bereits beschrieben, lediglich ein Subproblem aufgestellt, welches mit einem MIP-Solver, wie CPLEX oder Gurobi, gelöst werden kann. Aufgrund der Reduktion der Anzahl an Entscheidungsvariablen ist das Subproblem im Gegensatz zum Gesamtproblem lösbar. Mit Hilfe des Parameters $timePerIteration$ kann die Rechen-dauer des Solvers limitiert werden. Ansonsten beendet der MIP-Solver seine Suche nur, wenn die sogenannte

*relative optimality gap*¹³² gleich 0 ist, d. h. wenn die Optimalität der gefundenen Lösung bewiesen ist, oder wenn das Zeitlimit einer Iteration erreicht wurde.

- 4.) Zeilen 9-22: Update- und Anpassungs-Schritt: Wenn durch den `recreate` Operator eine bessere Lösung, d. h. ein Schedule mit geringeren Projektgesamtkosten, gefunden wurde, dann wird diese Lösung (d. h. der gefundene Schedule) als neue beste Lösung gespeichert (Zeile 10 in Algorithmus 3) und die Parameter zum Kontrollieren der `destroy` und `recreate` Operatoren werden für den nächsten Durchlauf der `While`-Schleife zurückgesetzt (Zeilen 11-13 in Algorithmus 3).

Wenn allerdings durch den `recreate` Operator keine bessere Lösung gefunden wurde, dann werden die Parameter so angepasst, dass die Nachbarschaft vergrößert wird. Dazu wird der Parameter *freeVar* durch den Faktor α vergrößert (Zeile 15 in Algorithmus 3). Dadurch werden in der nächsten Iteration im `destroy`-Schritt mehr Teile der aktuellen Lösung „zerstört“ und führen damit zu mehr Entscheidungsvariablen für den `recreate`-Schritt. Des Weiteren wird in jeder zweiten Iteration ohne Verbesserung des Zielfunktionswerts der Parameter *varPerMode* durch den Faktor β vergrößert (Zeilen 16-18 in Algorithmus 3), um die Größe der „zerstörten“ Teile zu vergrößern. Zusätzlich wird die Dauer, die der MIP-Solver je Iteration in Anspruch nehmen darf, um 10 Einheiten vergrößert (Zeilen 19-21 in Algorithmus 3). Dies ist unter anderem auch deshalb notwendig, weil die Nachbarschaft, die in der folgenden Iteration untersucht wird, durch die zuvor gemachten Anpassungen vergrößert

¹³² Die *relative optimality gap* bezeichnet den relativen Abstand des Zielfunktionswerts eines Schedules zur unteren Schranke *LB*. Die Berechnung von *LB* ist in Formel (4.31) in Kapitel 4.4.3 beschrieben. Eine detaillierte Beschreibung zur Berechnung der *relative optimality gap* sowie eine Abgrenzung zur *relative tolerance gap* sind in Kapitel 5.2.1 aufgeführt.

wird und daher mit einer längeren Rechendauer zur Untersuchung der vergrößerten Nachbarschaft zu rechnen ist. Die Wahl von 10 Zeiteinheiten (10 Sekunden) als verlängerte Dauer für den MIP-Solver ist willkürlich gewählt und hat sich in den Tests als sinnvoll herausgestellt.

4.4.5.2.2 Destroy Operatoren

Mit Hilfe der MLS wird ein initialer Schedule als initiale Lösung identifiziert. Hierbei sind alle Entscheidungsvariablen fix, d. h. für jeden Vorgang sind der Startzeitpunkt und der Modus, in dem der Vorgang ausgeführt wird, festgelegt. Ziel der ALNS ist es, diese initiale Lösung weiter zu verbessern. Hierzu ist es die Aufgabe der destroy Operatoren, spezifische Teile der initialen Lösung zu „zerstören“. Dadurch entstehen für die „zerstörten“ Teile Freiheitsgrade, d. h. Startzeitpunkte und Moduszuweisungen der Vorgänge in den zerstörten Teilen sind nicht mehr fix (und die Vorgänge werden zu *freien Vorgängen*), wogegen die nicht „zerstörten“ Teile weiterhin fix bleiben. Welche Teile „zerstört“ werden und welche Teile fix bleiben, wird in der Variable *destroyed candidate* (*DC*) gespeichert. In dieser Variable werden Listen über die Modi, in denen die Vorgänge ausgeführt werden können, sowie für jeden Vorgang der früheste (ES_i^d) und späteste Startzeitpunkt (LS_i^d) gespeichert. Die Anzahl an Entscheidungsvariablen in einem *DC* ist abhängig von der Anzahl an Modi und von der Anzahl möglicher Startzeitpunkte der freien Variablen. *DC* ist das Ergebnis, welches ein destroy Operator im ALNS-Algorithmus zurückgibt. Zur Berechnung von *DC* wird dem jeweiligen destroy Operator ein Lösungskandidat *c* (hierbei handelt es sich im ALNS-Algorithmus um den Schedule c^{best} , der bisher als Schedule mit den geringsten Kosten identifiziert wurde, vgl. Zeile 7 in Algorithmus 3), die Variable *freeVar* (maximale Anzahl an Entscheidungsvariablen) sowie die Variable *varPerMode* (Anzahl an Entscheidungsvariablen je Modus) übergeben:

$$DC := d(c, freeVar, varPerMode)$$

Im recreate Schritte (vgl. Kapitel 4.4.5.2.3) ist diese Variable relevant, um das MIP aufzustellen.

Insgesamt kann in dem in dieser Arbeit beschriebenen ALNS-Algorithmus zwischen zwei verschiedenen destroy Operatoren gewählt werden. Jeder destroy Operator besitzt ein anderes Vorgehen, um Teile des initialen Schedules auszuwählen und zu „zerstören“. Zum Verständnis der Funktionsweise der zwei destroy Operatoren werden einige Begriffe und Erklärungen vorgestellt.

Im Gegensatz zu Vorgängen in „zerstörten“ Teilen, die aufgrund ihrer Freiheitsgrade als *freie Vorgänge* bezeichnet werden, werden Vorgänge ohne Freiheitsgrade als *fixe Vorgänge* bezeichnet. *Fixe Vorgänge* besitzen jeweils nur einen Modus und einen Startzeitpunkt, welche im Lösungskandidaten c vorgegeben sind.

Im Gegensatz dazu sind bei *freien Vorgängen* alle theoretischen Modi möglich. Des Weiteren bestehen für die *freien Vorgänge* Freiheitsgrade bzgl. der möglichen Startzeitpunkte. Der früheste (ES_i^d) und späteste Startzeitpunkt (LS_i^d) ist jeweils sowohl abhängig vom Startzeitpunkt s_i des initialen Schedules als auch vom Parameter *varPerMode*. Die in *DC* gespeicherten frühesten (ES_i^d) und spätesten Startzeitpunkte (LS_i^d) eines freien Vorgangs sollen möglichst den durch die CPM berechneten frühesten (ES_i) und spätesten Startzeitpunkten (LS_i) entsprechen. Des Weiteren sollen ES_i^d und LS_i^d ein Intervall bilden, in dessen Mitte sich s_i befindet, damit der mit diesen Werten gefundene Schedule als Warmstart für das Subproblem zulässig ist und zum anderen, damit Verschiebungen des Vorgangs nach vorne und nach hinten möglich sind. Die Größe des Intervalls soll nicht größer sein als die Variable *varPerMode* vorgibt, d. h. $LS_i^d - ES_i^d \leq \text{varPerMode}$.

Grundsätzlich wird die Größe der zu untersuchenden Nachbarschaft durch die Variablen *freeVar* (welche die maximale Anzahl an

Entscheidungsvariablen angibt) und $varPerMode$ (welche die Anzahl an Entscheidungsvariablen je Modus angibt) angepasst. Theoretisch könnte der Algorithmus nur mit der Angabe der Variablen $freeVar$ verwendet werden (ohne die Variable $varPerMode$), sodass je Modus alle Entscheidungsvariablen untersucht würden. Das würde bedeuten, dass je Modus nicht die frühesten (ES_i^d) und spätesten Startzeitpunkte (LS_i^d) neu gewählt bzw. bestimmt werden müssten, sondern dass die durch die CPM bestimmten Werte ES_i und LS_i verwendet werden könnten. Diese durch die CPM bestimmten Werte werden allerdings mit Hilfe der Obergrenze $T = \sum_{i \in A} \max_{m \in M_i} d_{i,m}$ (vgl. Kapitel 4.4.3) bestimmt, welche eine sehr große Obergrenze darstellt, sodass das Intervall von ES_i und LS_i viele Zeitpunkte enthält und somit sehr viele Entscheidungsvariablen entstehen. Würde die Anzahl an Entscheidungsvariablen durch das Intervall zwischen ES_i^d und LS_i^d durch $varPerMode$ nicht so eingegrenzt werden, dass $LS_i^d - ES_i^d \leq varPerMode$ gilt, dann würden nur sehr wenige Vorgänge als freie Vorgänge deklariert werden (da die Obergrenze $freeVar$ mit weniger Vorgängen viel schneller erreicht wäre). Außerdem wächst $varPerMode$ im Verlauf der Suche in jeder zweiten Iteration ohne eine Verbesserung des Zielfunktionswerts um den Faktor β an, damit die möglichen Bereiche immer größer werden. Die Verwendung der Variablen $varPerMode$ sowie die sich daraus ergebenden frühesten (ES_i^d) und spätesten Startzeitpunkte (LS_i^d) sind somit zur Lösung des Problems notwendig.

ES_i^d und LS_i^d werden bestimmt, indem $ES_i^d = s_i - \frac{varPerMode}{2}$ und $LS_i^d = s_i + \frac{varPerMode}{2}$ gesetzt werden. Damit liegt s_i in der Mitte des Intervalls $[ES_i^d, LS_i^d]$. Wenn die frühesten (ES_i^d) und spätesten Startzeitpunkte (LS_i^d) von denen von CPM berechneten frühesten (ES_i) und spätesten Startzeitpunkten (LS_i) abweichen, werden ES_i^d sowie LS_i^d wie folgt angepasst:

- a.) Wenn $ES_i^d < ES_i$, dann wird das Intervall nach rechts verschoben, indem $ES_i^d = ES_i$ gesetzt wird und LS_i^d um $ES_i - ES_i^d$ vergrößert wird (vgl. Abbildung 4.31).

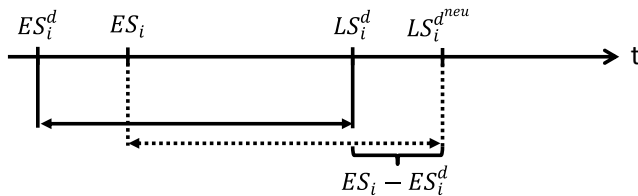


Abbildung 4.31: Anpassung der Startzeitpunkte von freien Vorgängen im destroy Schritt wenn $ES_i^d < ES_i$

- b.) Wenn $LS_i^d > LS_i$, dann wird das Intervall nach links verschoben, indem $LS_i^d = LS_i$ gesetzt wird und ES_i^d um $LS_i^d - LS_i$ verkleinert wird (vgl. Abbildung 4.31).

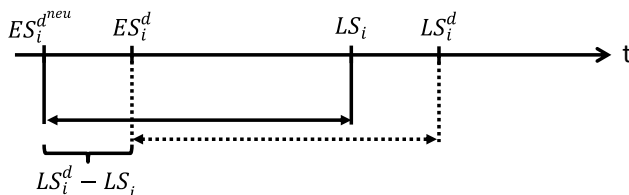


Abbildung 4.32: Anpassung der Startzeitpunkte von freien Vorgängen im destroy Schritt wenn $LS_i^d > LS_i$

- c.) Wenn sowohl $ES_i^d < ES_i$ als auch $LS_i^d > LS_i$, dann werden die Werte aus CPM übernommen: $ES_i^d = ES_i$ und $LS_i^d = LS_i$.

Mit Hilfe dieser Erklärungen und Anpassungen kann für jeden *freien Vorgang* i die Anzahl an Entscheidungsvariablen, die im Recreate-Schritt dem MIP übergeben wird, berechnet werden:

$$|M_i| * (LS_i^d - ES_i^d + 1) \quad (4.35)$$

Die Anzahl an Entscheidungsvariablen mehrerer Vorgänge kann somit auch aufsummiert werden. Ein destroy Operator sucht solange nach neuen *freien Vorgängen*, bis die vorgegebene maximale Anzahl an Entscheidungsvariablen *freeVar* überschritten wird. Da alle anderen Vorgänge fix sind, ergibt sich insgesamt die folgende Anzahl an Entscheidungsvariablen:

$$\sum_{\text{Freie Vorgänge } i} |M_i| * (LS_i^d - ES_i^d + 1) \leq \text{freeVar} \quad (4.36)$$

Im Folgenden werden die zwei in dieser Arbeit verwendeten destroy Operatoren vorgestellt.

- 1.) DTI – destroyTimeInterval: Die Idee hinter diesem destroy Operator ist, dass Vorgänge, die zu gleichen Zeitpunkten ausgeführt werden, als *freie Vorgänge* ausgewählt werden. Somit haben die gewählten *freien Vorgänge* alle sehr ähnliche Start- und/oder Endzeitpunkte, sodass eine Änderung des Modus oder der Startzeitpunkte im MIP die anderen *freien Vorgänge* sehr wahrscheinlich beeinflussen.
Hierzu wird zufällig (gleichverteilt) ein Zeitpunkt $t \in \{1, \dots, T^{max}\}$ ausgewählt (wobei T^{max} die Gesamtdauer des untersuchten Schedules bezeichnet).

DTI wählt iterativ *freie Vorgänge* aus, die eines der folgenden Kriterien erfüllen:

- Der *freie Vorgang* startet zum Zeitpunkt t ,
- Der *freie Vorgang* endet zum Zeitpunkt t ,
- Der *freie Vorgang* startet und endet zum Zeitpunkt t .

Wenn mehr als nur ein Vorgang in t eines dieser Kriterien erfüllt, dann werden die Vorgänge nacheinander in aufsteigender Reihenfolge ihrer Indizes gewählt. Sofern ein Vorgang als *freier Vorgang* ausgewählt wird, werden alle Vorgänge, die zur gleichen strong component gehören, ebenfalls als *freie Vorgänge* ausgewählt. Wenn die Summe der Entscheidungsvariablen der gewählten Vorgänge kleiner als $freeVar$ ist, werden zusätzliche Zeitpunkte t gewählt, sodass in der nächsten Iteration mehr Vorgänge zur Auswahl stehen. Hierzu werden alle Zeitpunkte im Intervall

$[t - 5; t + 5]$ berücksichtigt. Die Wahl von Vorgängen sowie die Vergrößerung des Intervalls werden so lange wiederholt, bis entweder $freeVar$ erreicht ist oder wenn alle Vorgänge im untersuchten Schedule gewählt worden sind. Alle durch DTI nicht gewählten Vorgänge sind weiterhin fix in DC .

- 2.) DPS – destroyPredecessorsAndSuccessors: Dieser destroy Operator fokussiert sich auf Vorgänge, die Vorgangsbeziehungen untereinander besitzen, da diese häufig gegenseitig ihre Start- und/oder Endzeitpunkte beeinflussen.

DPS wählt iterativ eine zufällige strong component $C \in \mathcal{C}$ aus dem initialen Schedule aus, die noch nicht ausgewählt wurde, und markiert alle Vorgänge dieser strong component als *freie Vorgänge*. Anschließend werden in einem ersten Schritt alle strong components, die Nachfolger der Vorgänge der ausgewählten strong component besitzen, und deren Vorgänge als

freie Vorgänge ausgewählt. In einem zweiten Schritt werden alle strong components, die Vorgänger der Vorgänge der ausgewählten strong component besitzen, und deren Vorgänge als *freie Vorgänge* ausgewählt. Sofern es bei einem der zwei Schritte mehr als einen potentiellen Vorgang gibt, der als *freier Vorgang* ausgewählt werden könnte, werden jeweils die Vorgänge in aufsteigender Reihenfolge ihrer Indizes gewählt. DPS stoppt, sobald die Anzahl an Entscheidungsvariablen die Grenze *freeVar* übersteigt.

Sofern alle Nachfolger bzw. Vorgänger als *freie Vorgänge* ausgewählt wurden und *freeVar* noch nicht überschritten wurde, dann wird wieder zufällig eine weitere strong component gewählt, welche bisher noch nicht ausgewählt wurde.

4.4.5.2.3 Recreate Operator

Ziel des recreate Operators ist es, den durch die MLS gefundenen Schedule mit Hilfe einer Variation der freien Entscheidungsvariablen von *freien Vorgängen* aus dem destroy Operator zu verbessern. Das Ergebnis des recreate Operators ist somit eine verbesserte zulässige Lösung (d. h. ein Schedule mit geringeren Projektgesamtkosten) $c^{proposed}$. Um $c^{proposed}$ zu berechnen, wird dem recreate operator der bisher beste bekannte Schedule c^{best} , der *destroy candidate* DC sowie das Zeitlimit *timePerIteration* übergeben:

$$c^{proposed} := r(c^{best}, DC, timPerIteration)$$

Mit Hilfe der Informationen aus DC wird ein MIP aufgestellt. Hierzu wird die mathematische Formulierung aus Kapitel 4.4.3 verwendet. Allerdings werden hierbei die Modusliste aus DC sowie die angepassten frühesten (ES_i^d) und spätesten Startzeitpunkte (LS_i^d) anstatt der von CPM berechneten Werte übernommen. Fixe Vorgänge sind bzgl. ihres Modus und ihres Startzeitpunktes vorgegeben. Für *freie Vorgänge* werden alle

möglichen Modi und abhängig von *varPerMode* eine Untermenge möglicher Startzeitpunkte dem MIP übergeben. Da der übergebene Schedule c^{best} für das MIP zulässig ist, dient c^{best} als Warmstartlösung für den Solver. Auf diese Weise hat der Solver eine zulässige Startlösung sowie eine obere Schranke, sodass der Suchprozess beschleunigt wird.

Um den Suchprozess darüber hinaus weiter zu beschleunigen, wird der Parameter *timePerIteration* verwendet. Mit Hilfe von *timePerIteration* wird die Rechendauer des Solvers zur Lösung des MIPs begrenzt.

Die vom MIP-Solver gefundene Lösung kann eine Verbesserung (d. h. einen Schedule mit geringeren Projektgesamtkosten) des Subproblems im Vergleich zum übergebenen Schedule c^{best} sein. Falls der MIP-Solver allerdings keine bessere Lösung findet, dann kann dies drei Gründe haben:

- 1.) Der übergebene Schedule ist bereits optimal (aber die Optimalität ist nicht bekannt, da die Information der unteren Schranke des MIP-Solvers sich auf das Subproblem und nicht auf das Originalproblem bezieht).
- 2.) Der übergebene Schedule ist lokal optimal für die vom *DC* definierte Nachbarschaft (allerdings kann eine bessere Lösung in einer größeren Nachbarschaft gefunden werden).
- 3.) Der MIP-Solver konnte in der Nachbarschaft keine bessere Lösung finden, da das Zeitlimit *timPerIteration* zu klein war, sodass der MIP-Solver die Suche beenden konnte.

Die letzten beiden Punkte werden im Anpassungsschritt der ALNS berücksichtigt, indem die Größe der Nachbarschaft und das Zeitlimit je Iteration angepasst werden.

4.4.6 Implementierung

Die als Excel-Datei exportierten deterministischen Szenarien können zur Berechnung eines hinsichtlich der Projektgesamtkosten optimierten Schedules in das Berechnungstool importiert werden. Die in den Kapiteln 4.4.5.1 und 4.4.5.2 vorgestellten PSGS-, MLS- und ALNS-Algorithmen sowie die destroy Operatoren sind in der Programmiersprache $C^\#$ implementiert. Das mathematische Modell (MIP) aus Kapitel 4.4.3 wird im recreate-Schritt des ALNS-Algorithmus ebenfalls in $C^\#$ aufgestellt und kann verschiedenen mathematischen Solvern, z. B. CPLEX oder Gurobi, übergeben werden. In dieser Arbeit wurde das MIP mit Hilfe des CPLEX-Solvers mit der Version 12.8.0 gelöst. CPLEX wurde als Solver gewählt, da dieser im Vergleich zu anderen kommerziellen und nicht-kommerziellen Solvern schneller optimierte (oder optimale) Lösungen berechnet als andere vergleichbare Solver (Mittelmann, 2018).

Zur Verwendung des Lösungsverfahrens muss durch das Kompilieren des Codes ein ausführbares Programm erstellt werden. Beim Kompilieren wird eine Ordnerstruktur mit verschiedenen untergeordneten Ordnern erstellt. Zum Ausführen des Lösungsverfahrens sind im Ordner „MRIP_grund\bin\x64\Release“ zwei Dateien zu bearbeiten. Zum einen muss die CFG-Datei mit der Bezeichnung „config“ angepasst und zum anderen eine Windows-Batch-Datei erstellt bzw. angepasst werden. In der Datei „config“ werden je Zeile der Name der zu optimierenden Datei (welche sich im .csv-Format im Ordner „MRIP_grund\bin\x64\Release\instances“ befinden muss) und die zum Ausführen der Algorithmen notwendigen Parameter aufgeführt. Die Bezeichnung der Datei „config“ darf nicht verändert werden, da beim Ausführen des Programms auf diese zugegriffen wird. In der Windows-Batch-Datei (welche beliebig benannt werden darf) werden je Zeile der auszuführende Code und die hierzu aus der Datei „config“ zu verwendende Zeile angegeben. Beispielsweise wird mit der Bezeichnung

„MRIP_grund.exe 2“ der Lösungsalgorithmus, welcher als ausführbares Programm als „MRIP_grund.exe“ bezeichnet ist, mit den Daten aus der zweiten Zeile der Datei „config“ ausgeführt. Die Optimierung startet mit einem Doppelklick auf die Windows-Batch-Datei. Anschließend werden die Zeilen der Windows-Batch-Datei nacheinander von eins beginnend bearbeitet. Somit können in dieser Datei beliebig viele Zeilen eingefügt werden, in denen jeweils das Programm „MRIP_grund.exe“ mit einer beliebigen Zeile der Datei „config“ aufgerufen wird. Auf diese Weise kann ein Szenario mit einer bestimmten Parameterkombination (welche in einer Zeile in der Datei „config“ angegeben ist) beliebig oft ausgeführt werden.

Je Zeile der Windows-Batch-Datei wird eine Optimierung eines Szenarios und einer bestimmten Parameterkombination (eine Zeile der Datei „config“) durchgeführt, sodass für jede Optimierung ein optimierter Schedule berechnet wird. Dieser optimierte Schedule wird im Ordner „MRIP_grund\bin\x64\Release\solutions“ als .csv-Datei gespeichert. Außerdem wird im Ordner „MRIP_grund\bin\x64\Release\logs“ eine .csv-Datei erstellt, in welcher die wesentlichen Eigenschaften aller berechneten Schedules, wie beispielsweise die Projektgesamtkosten, die *relative optimality gap* und die Projektdauer gespeichert werden. Im Ordner „MRIP_grund\bin\x64\Release\logs“ wird darüber hinaus je optimiertem Szenario in jeweils einer separaten .csv-Datei die Optimierhistorie gespeichert. Diese beinhaltet jeweils für den MLS- und den ALNS-Algorithmus die Zeitpunkte, zu denen geringere Projektgesamtkosten berechnet wurden, sowie die zugehörigen Projektgesamtkosten, die *LB* sowie die relative optimality und die absolute gap.

4.5 Auswahl eines robusten Rückbauplans

Wie bereits in Kapitel 3.6 beschrieben wurde, bietet die proaktive Planung die Möglichkeit, einen gegenüber Umwelteinflüssen möglichst unempfindlichen Plan trotz bestehender Unsicherheiten zu identifizieren. Dies ist für die Planung von Großprojekten eine wichtige Voraussetzung, um Verzögerungen sowie Kostensteigerungen während der Projektausführung zu vermeiden. Aufgrund der für den Rückbau notwendigen Genehmigungen ist die Identifikation eines möglichst planmäßig ausführbaren Plans insbesondere bei der Planung des Rückbaus kerntechnischer Anlagen sehr relevant. Unter einem möglichst planmäßig ausführbaren Plan wird in dieser Arbeit ein Schedule verstanden, dessen geplante Vorgänge in der geplanten Reihenfolge und zu den geplanten Startzeitpunkten ausführbar sind.

Das in dieser Arbeit entwickelte Planungswerkzeug stellt zur Identifikation eines solchen Plans verschiedene Szenarien auf, für die jeweils ein optimierter Schedule berechnet wird. Zuletzt muss aus all diesen Schedules ein robuster Plan identifiziert werden. Hierzu existieren verschiedene Möglichkeiten, wie die Pläne der verschiedenen Szenarien bewertet werden können. Anhand von sogenannten Robustheitsmaßen soll eine Entscheidung für einen möglichst planmäßig ausführbaren Plan getroffen werden.

Dazu wird im Folgenden zunächst auf die verschiedenen, allgemeinen Eigenschaften von Plänen und die sich daraus abgeleitete Definition von Robustheit eingegangen (Kapitel 4.5.1). Anschließend werden verschiedene Robustheitstypen und deren Eigenschaften für die Anwendung in dieser Arbeit untersucht (Kapitel 4.5.2). Für die im Rahmen dieser Arbeit anwendbaren Robustheitstypen werden Robustheitsmaße vorgestellt und teilweise neu bzw. weiterentwickelt (Kapitel 4.5.3 und Kapitel 4.5.4). Unter den aufgeführten Robustheitsmaßen wird eine Auswahl getroffen, um diese im Rahmen des Planungswerkzeugs dieser Arbeit anzuwenden (Kapitel 4.5.5). Zuletzt wird in Kapitel 4.5.6 die

Implementierung und Verwendung der ausgewählten Robustheitsmaße zur Evaluation der Robustheit verschiedener Schedules im Planungswerkzeug beschrieben.

4.5.1 Eigenschaften von Plänen und Definition von Robustheit

Zur Beschreibung verschiedener Typen von Robustheit können verschiedene Eigenschaften von Plänen/Schedules herangezogen werden. Um den Begriff der Robustheit und die unterschiedlichen Typen von Robustheit besser beschreiben zu können, werden im Folgenden einige charakteristische Eigenschaften von Plänen beschrieben.

- **Stabilität:** Die Stabilität eines Plans besagt, dass die geplanten Startzeitpunkte, die geplante Dauer und die benötigten Ressourcen zur Ausführung von Vorgängen im Verlauf des Projekts möglichst nicht abgeändert werden müssen. Eine Änderung des Plans soll selbst dann nicht nötig sein, wenn neue Informationen bekannt werden oder wenn ungeplante Ereignisse auftreten. Je weniger Änderungen eines Plans während der Ausführung notwendig sind, desto stabiler ist der Plan. Umgekehrt ist ein Plan umso unstabiler, je mehr Änderungen am Plan vorgenommen werden müssen. Änderungen des Plans oder eine Neuplanung von Vorgängen können notwendig sein, wenn ein Vorgang aufgrund technischer Gegebenheiten nicht mehr ausführbar ist, wenn sich die Ausführung eines unmittelbaren Vorgängers verzögert hat oder wenn aufgrund neuer Informationen ein zusätzlicher oder abgeänderter Vorgang notwendig wird, um die Projektziele zu erreichen (Herroelen und Leus, 2005, S. 291f.; Rosenhead et al., 1972; Schatteman et al., 2008, S. 14; Scholl, 2001, S. 94).

- **Flexibilität:** Ein Plan wird als flexibel bezeichnet, wenn dieser bei Bekanntwerden neuer Informationen oder beim Eintreten unerwarteter Ereignisse weiterhin ausführbar ist oder so angepasst werden kann, dass die Zielkriterien weiterhin bestmöglich erreicht werden. Die Eigenschaft der Flexibilität bezieht somit nicht nur die grundsätzliche Möglichkeit der Anpassung oder Änderung von Vorgängen im Plan mit ein, sondern berücksichtigt insbesondere die zielgerichtete Wirkung der Anpassungen bzw. Änderungen zur Erreichung der Projektziele (Schneeweiß, 1992, S. 141; Scholl, 2001, S. 94).
- **Elastizität:** Die Elastizität eines Plans bezeichnet ähnlich zur Flexibilität die Eigenschaft beim Bekanntwerden neuer Informationen oder beim Eintreten unerwarteter Ereignisse eines Plans weiterhin ausführbar zu sein oder so angepasst zu werden, sodass der Plan weiterhin ausführbar ist. Im Gegensatz zur Flexibilität bezieht die Elastizität nicht die zielgerichtete Wirkung der Änderung eines Plans mit ein, d. h. dass bei einer Planänderung nicht darauf geachtet wird, ob gleichzeitig die Projektziele erreicht werden können (Scholl, 2001, S. 94f.).
- **Nervosität:** Die Anzahl an Planänderungen während der Umsetzung eines Plans wird als Nervosität bezeichnet. Pläne mit einem geringen Grad an Nervosität, d. h. wenigen oder keinen Planänderungen während der Projektausführung, sind somit stabil. (Scholl, 2001, S. 95).
- **Optimalität:** Ein Plan wird als optimal bezeichnet, wenn er unter allen theoretisch umsetzbaren Plänen den höchsten Zielerreichungsgrad aufweist. Allerdings lässt sich bei den meisten Projekten aufgrund der vorhandenen Unsicherheiten ex ante kein optimaler Plan bestimmen. Aus diesem Grund wird die Eigenschaft der Optimalität in diesen Fällen häufig aufgeweicht und es

wird nach einem Plan gesucht, der in möglichst vielen bzw. in allen Szenarien ein hohes Maß an Optimalität aufweist. Hierzu kann auch ein definiertes Anspruchsniveau definiert werden. (Scholl, 2001, S. 93).

Mit Hilfe der oben definierten Begriffe bzw. Eigenschaften von Plänen kann der Begriff der **Robustheit** definiert werden. Scholl (2001, S. 97) beschreibt die Robustheit als eine Mischung aus Stabilität und Flexibilität: Einerseits können die geplanten Startzeitpunkte der einzelnen Vorgänge bei einem stabilen Plan auch bei ungeplanten Ereignissen eingehalten werden. Andererseits wird durch die Flexibilität eines Plans sichergestellt, dass bei Bekanntwerden neuer Informationen oder beim Eintreten unerwarteter Ereignisse der Plan weiterhin ausführbar ist oder so angepasst werden kann, dass die Zielkriterien, z. B. die Projektdauer oder die Projektkosten, weiterhin bestmöglich erreicht werden. (Scholl, 2001, S. 97; Sevaux und Sörensen, 2004)

Allgemein ausgedrückt ist ein Plan robust, wenn er trotz Unsicherheiten während seiner Realisierung ohne Anpassungen ausführbar ist (Davenport et al., 2014; Le Pape, 1991). Die Robustheit von Plänen bezeichnet somit deren „Unempfindlichkeit [...] gegenüber Umwelteinflüssen“ (Schneeweiß, 1992, Kap. 4.5.2; Scholl, 2001, S. 93). Ein robuster Plan ist auch beim Auftreten unvorhergesehener Ereignisse, bei zukünftigen Entwicklungen und in verschiedenen Szenarien möglichst planmäßig ausführbar (Gebhard, 2009, S. 33; Hazır et al., 2010, S. 634; Scholl, 2001, S. 93; Wallenius et al., 2008). In ähnlicher Weise definieren auch Al-Fawzan und Haouari (2005) den Begriff der Robustheit, indem ein robuster Plan mit „kleinen“ Erhöhungen der Dauern einiger Vorgänge weiterhin ausführbar ist. Herroelen und Leus (2004) gehen des Weiteren darauf ein, dass ein robuster Plan bestmöglich gegenüber Unterbrechungen des Plans geschützt ist.

Die aufgeführten Definitionen und Beschreibungen des Begriffs der Robustheit durch verschiedene Autoren sind alle relativ ähnlich. Allerdings sind diese gleichzeitig unpräzise im Hinblick auf die Messung der Robustheit. In der Literatur werden verschiedene Arten von Robustheit, d. h. der Bezug der Robustheit auf verschiedene Eigenschaften eines Plans, und verschiedene Maße zur Quantifizierung der Robustheit beschrieben. Allerdings wird teilweise nicht zwischen der Art der Robustheit (im Folgenden als *Robustheitstyp* bezeichnet) und *Robustheitsmaßen* unterschieden oder beide Begriffe werden vermischt verwendet. Aus diesem Grund werden in Kapitel 4.5.2 mögliche Robustheitstypen aus der Literatur beschrieben und es wird evaluiert, welcher Robustheitstyp zur Robustheitsbewertung im Rahmen dieser Arbeit sinnvoll anwendbar ist.

4.5.2 Robustheitstypen

Es existieren verschiedene Robustheitstypen, die verschiedene Eigenschaften von Plänen beim Eintreten unerwarteter Ereignisse beschreiben. Im Folgenden wird auf diese Robustheitstypen näher eingegangen. Zusätzlich wird gemäß den Anforderungen aus Kapitel 3.1 evaluiert, ob der jeweilige Robustheitstyp im Rahmen dieser Arbeit zur Bewertung der Robustheit relevant ist oder nicht. Hierbei spielt vor allem die Einhaltung der geplanten Reihenfolge von Vorgängen, deren Startzeitpunkte sowie der geplante Einsatz von Ressourcen eine wichtige Rolle.

Quality Robustness

Die *Quality Robustness*¹³³ bewertet die Unempfindlichkeit des Zielfunktionswerts eines Plans bei der Ausführung in unterschiedlichen Szenarien (Hazir et al., 2010, S. 634; Herroelen und Leus, 2005; Schatteman et al., 2008). Wenn ein Plan flexibel ist und die Projektziele, wie die Dauer oder Kosten eines Projekts, trotz möglicher Planänderungen eingehalten werden, wird dies als Quality Robustness bezeichnet.

Es wird dabei untersucht, wie stark sich der Zielfunktionswert eines Plans beim Eintreten verschiedener Szenarien verändert oder wie wahrscheinlich eine Änderung des Zielfunktionswerts ist (Demeulemeester und Herroelen, 2011, S. 52; Herroelen und Leus, 2004). Sofern beispielsweise die Minimierung der Projektdauer als Zielkriterium vorgegeben ist, kann mit Hilfe der Quality Robustness untersucht werden, mit welcher Wahrscheinlichkeit *Prob* die Projektdauer D_a eines Plans a die maximale Dauer δ_a nicht überschreitet (Demeulemeester und Herroelen, 2011, S. 52): $Prob(D_a \leq \delta_a)$.

Scholl (2001, S. 99ff.) untersucht die Veränderung des Zielfunktionswertes eines Plans beim Eintreten verschiedener Szenarien durch einen Vergleich des Zielfunktionswerts $z_s(a)$ eines Plans a für ein Szenario s mit einem zuvor definierten Anspruchsniveau A . Hierbei verwendet Scholl (2001) für die Beschreibung der Quality Robustness den Begriff der *Ergebnisrobustheit*. Im Vergleich zur Quality Robustness unterscheidet sich die Art der Bewertung der Zielfunktionswerte verschiedener Pläne bei der Ergebnisrobustheit lediglich minimal. Beide Begriffe (Quality Robustness und Ergebnisrobustheit) beziehen sich auf die Bewertung des

¹³³ Im Folgenden werden die Bezeichnungen der Robustheitstypen aus den Quellen in der Literatur übernommen. Daher erhalten die in englischen Quellen beschriebenen Robustheitstypen den Zusatz „Robustness“ und die in deutschen Quellen beschriebenen Robustheitstypen den Zusatz „Robustheit“.

Zielfunktionswertes eines Plans. Der Unterschied der Ergebnisrobustheit zur Quality Robustness besteht aufgrund der Definition eines Anspruchsniveaus. Im Gegensatz zur oben beschriebenen Wahrscheinlichkeit, dass eine maximale Dauer δ_a nicht überschritten wird (Quality Robustness), untersucht die Ergebnisrobustheit die Wahrscheinlichkeit, mit der das Anspruchsniveau überschritten, genau eingehalten oder unterschritten wird. Sofern ein Plan das Anspruchsniveau für jedes Szenario erreicht oder sogar überschreitet, d. h. $z_s(a) \geq A, \forall s \in S$ (wobei S die Menge aller möglichen Szenarien angibt), wird dieser Plan als total ergebnisrobust bezeichnet. Wenn ein Plan das Anspruchsniveau für jedes Szenario exakt erreicht, d. h. $z_s(a) = A, \forall s \in S$, dann wird dieser Plan als total ergebnisstabil bezeichnet. Ein Plan a wird als relativ ergebnisrobust bezeichnet, wenn das Anspruchsniveau in allen Szenarien s „[...] weitgehend eingehalten wird und/oder eventuelle Abweichungen gering sind.“ (Scholl, 2001, S. 100) Problematisch bei der Ermittlung der Ergebnisrobustheit eines Plans ist insbesondere die Wahl des Anspruchsniveaus, welches einen großen Einfluss auf die Bewertung der Robustheit besitzt.

Wird als Anspruchsniveau der bestmögliche Zielfunktionswert im jeweiligen Szenario (z_s^*) verwendet, wird diese Art der Quality bzw. Ergebnisrobustheit auch als *Optimalitätsrobustheit* bezeichnet (Scholl, 2001, S. 102f.; Daniels und Kouvelis, 1995).

Solution Robustness

Herroelen und Leus (2004) beschreiben die *Solution Robustness* als den Grad der Sensitivität der Startzeitpunkte der einzelnen Vorgänge eines Plans in Abhängigkeit von Änderungen der Inputdaten, d. h. in Abhängigkeit von sich im Vergleich zum Planungszeitpunkt geänderten Umwelteinflüssen. Sofern die geplanten Startzeitpunkte der Vorgänge trotz unerwarteter Umweltzustände eingehalten werden, wird dies als *Solution Robustness* bezeichnet. (Herroelen und Leus, 2004, S. 1602; Herroelen und Leus, 2005, S. 291) Ein Schedule, der als solution robust

bezeichnet wird, kann auch als stabil bezeichnet werden (Van de Vonder et al., 2005).

Ähnliche Definitionen der Solution Robustness verwenden auch Goren und Sabuncuoglu (2008), Hazir et al. (2010, S. 634) sowie Van de Vonder et al. (2005, 2008).

Zulässigkeitsrobustheit

Dieser Robustheitstyp untersucht, ob ein Plan für jedes Szenario zulässig, d. h. wie geplant oder mit geringen Modifikationen ausführbar, ist. Somit bezieht sich die Zulässigkeitsrobustheit nicht auf die Bestimmung eines optimalen Plans, sondern darauf, ob ein Plan in der Realität überhaupt ausführbar ist. Sofern ein Plan ohne Änderungen ausgeführt werden kann, wird dieser als total zulässigkeitsrobust bezeichnet. Ein solcher Plan weist ein hohes Maß an Stabilität auf. Sind Anpassungsmaßnahmen des Plans in geringem Maße oder mit geringer Wahrscheinlichkeit notwendig, sodass der Plan ausführbar wird, dann wird dieser Plan als relativ zulässigkeitsrobust bezeichnet. Ein relativ zulässigkeitsrobuster Plan sollte daher flexibel sein. Scholl (2001) geht davon aus, dass es in der Praxis sehr selten Pläne gibt, die nicht relativ zulässigkeitsrobust sind. Vielmehr können in der Regel kleinere Anpassungen vorgenommen werden, sodass ein Plan durchführbar wird. (Scholl, 2001, S. 104)

Informationsrobustheit

Die Informationsrobustheit bezieht sich auf die Planung mit unterschiedlichem Informationsstand. Ein Plan, der mit einem Informationsstand I1 geplant wurde, wird als total informationsrobust bezeichnet, wenn er selbst bei einem besseren Informationsstand I2 immer noch als genauso gut eingestuft wird, wie bei Informationsstand I1 (Scholl, 2001). Scholl (2001) merkt an, dass eine Planung in der Praxis immer mit dem besten zur Verfügung stehenden Informationsstand ausgeführt wird bzw.

werden sollte. Somit ist eine Beurteilung eines Plans bzgl. eines besseren Informationsstandes lediglich ex post möglich (Scholl, 2001, S. 105).

Planungsrobustheit

Dieser Robustheitstyp wird vor allem bei der reaktiven und rollierenden Planung eingesetzt und kann als Weiterführung der Informationsrobustheit verstanden werden. Während bei der Informationsrobustheit bestimmt wird, ob ein Plan bei einem besseren Informationsstand immer noch als genauso gut eingestuft wird, wie bei einem schlechteren Informationsstand, wird bei der Planungsrobustheit ermittelt, wie oft bzw. wie wahrscheinlich Planungsanpassungen bei unerwarteten Umweltzuständen, Fehleinschätzungen oder bei einer besseren Informationslage durchgeführt werden. (Scholl, 2001, S. 108ff.) Wie bereits bei der Informationsrobustheit argumentiert wurde, werden während der proaktiven Planung keine Plananpassungen vorgenommen bzw. können diese erst ex post bestimmt werden.

Bewertungsrobustheit

Die Bewertungsrobustheit bezieht sich nicht direkt auf die Unsicherheit während der Planausführung, sondern auf die Platzierung eines Plans in einer Präferenzreihenfolge bei der Verwendung verschiedener Robustheitsmaße. Sofern die Platzierung eines Plans in einer Präferenzreihenfolge unabhängig vom verwendeten Robustheitsmaß gleich bleibt, wird dieser Plan als bewertungsrobust bezeichnet. (Scholl, 2001, S. 110f.)

Die Bewertungsrobustheit konzentriert sich somit auf den relativen Vergleich der Robustheitsbewertung durch verschiedene Robustheitsmaße.

Flexibilitätsrobustheit

Zur Messung der Flexibilität von Plänen können unterschiedliche Maße eingesetzt werden. Diese werden dem Robustheitstyp der Flexibilitätsrobustheit zugeordnet. (Billaut et al., 2008, S. 27f.; Rasconi et al., 2010, S. 53)

Eignung von Robustheitstypen

Aufgrund der notwendigen Genehmigungen in kerntechnischen Rückbauprojekten sollten möglichst alle **geplanten Vorgänge** in der **geplanten Reihenfolge** zu den **geplanten Startzeitpunkten** ausgeführt werden. Zusätzliche, ungeplante Vorgänge sowie ungeplante Wiederholungen von Vorgängen sollten möglichst vermieden werden, da in den meisten Fällen eine erneute Genehmigung notwendig ist.

Grundsätzlich ist es bei einem kerntechnischen Rückbauprojekt wünschenswert, dass die geplanten Rückbaukosten eingehalten oder sogar unterschritten werden. Eine Überschreitung der Rückbaukosten sollte vermieden werden. Dies spricht für die Anwendung der Quality Robustness im Anwendungsfall dieser Arbeit. Gleichzeitig sollen aufgrund der benötigten Genehmigung(en) auch die Startzeitpunkte der geplanten Vorgänge eingehalten werden, weshalb die Verwendung der Solution Robustness als sinnvoll erscheint. Van de Vonder et al. (2005) zeigen, dass es nicht immer möglich ist, gleichzeitig die Quality und die Solution Robustness zu optimieren. Daher sollte der Trade-off zwischen diesen beiden Robustheitstypen (und auch zwischen anderen Robustheitstypen) berücksichtigt werden. Da eine Neu- oder Umplanung aufgrund des dadurch benötigten Genehmigungsprozesses mit einer erheblichen Projektverlängerung und gleichzeitig mit einer erheblichen Verteuerung des Rückbauprojekts verbunden ist, kann ein Schedule, der *solution robust* ist, in vielen Fällen gleichzeitig eine sehr gute Quality Robustness gewährleisten. Insbesondere die hohen Kosten bei einer Umplanung (aufgrund der

benötigten Genehmigungen) geben der Solution Robustness im Verhältnis zur Quality Robustness ein höheres Gewicht, denn die Projektkosten können durch die möglichst planmäßige Durchführung des Plans besser eingehalten werden. Aus diesem Grund eignet sich die Solution Robustness für den Anwendungsfall dieser Arbeit besser als die Quality Robustness. Im Folgenden wird daher die Solution Robustness als relevant und die Quality Robustness (sowie ihre speziellen Ausprägungen der Ergebnisrobustheit und Optimalitätsrobustheit) im Rahmen dieser Arbeit für den untersuchten Anwendungsfall als irrelevant angesehen. Auf Robustheitsmaße der Solution Robustness wird in Kapitel 4.5.3 näher eingegangen.

In dem in dieser Arbeit vorgestellten Planungswerkzeug werden verschiedene Szenarien gebildet. Ziel ist es, einen Plan zu finden, der in verschiedenen Szenarien jeweils möglichst planmäßig ausführbar ist. Zur Bewertung der Ausführbarkeit eines Plans in verschiedenen Szenarien spielt die Zulässigkeitsrobustheit eine wichtige Rolle. Allerdings konnten in einer ausführlichen Literaturrecherche keine Robustheitsmaße für die Zulässigkeitsrobustheit identifiziert werden. Aus diesem Grund werden in dieser Arbeit Robustheitsmaße anderer Robustheitstypen stellvertretend zur Bestimmung eines zulässigen Schedules verwendet. Insbesondere sind zur Bewertung der Zulässigkeit eines Plans die Einhaltung der Startzeitpunkte und der geplanten Vorgänge sowie deren Reihenfolgen relevant, welche durch Maße anderer Robustheitstypen untersucht und evaluiert werden.

Da die Robustheitstypen der Informationsrobustheit sowie der Planungsrobustheit lediglich ex post anwendbar sind, ist deren Verwendung im Rahmen dieser Arbeit nicht zielführend. Daher werden die Informationsrobustheit und die Planungsrobustheit im Folgenden nicht näher untersucht oder verwendet.

Gemäß der Bewertungsrobustheit werden die Robustheitsbewertungen verschiedener Robustheitsmaße verglichen. Allerdings konnten für diesen

Robustheitstyp in einer ausführlichen Literaturrecherche keine Robustheitsmaße identifiziert werden. Dennoch wird die Idee des relativen Vergleichs der Robustheitsbewertung durch verschiedene Robustheitsmaße in dieser Arbeit verwendet (vgl. Kapitel 4.5.5.2).

Da Planänderungen bzw. Plananpassungen während der Projektausführung beim Rückbau kerntechnischer Anlagen vermieden werden sollen, ist die Flexibilitätsrobustheit im Rahmen dieser Arbeit nicht sinnvoll anwendbar.

Die Einhaltung der Reihenfolge bzw. Abfolge der Vorgänge in verschiedenen Szenarien wird von den untersuchten Robustheitstypen lediglich von der Planungsrobustheit sowie von der Flexibilitätsrobustheit untersucht. Allerdings wird die Planungsrobustheit vor allem bei der rollierenden und nicht bei der proaktiven Planung eingesetzt. Die Flexibilitätsrobustheit bezieht sich insbesondere auf die Möglichkeiten der Plananpassungen während der Planausführung, welche im Anwendungsfall vermieden werden sollen. Aus diesem Grund können diese Robustheitstypen im Planungswerkzeug dieser Arbeit nicht verwendet werden.

Somit untersucht keiner der analysierten Robustheitstypen die Robustheit der Ablaufpläne bzgl. der Reihenfolge der Vorgänge für die proaktive Planung. Dies stellt somit eine Forschungslücke dar, welche durch die Einführung eines neuen Robustheitstyps, der sogenannten *Sequence Robustness*, geschlossen wird. Ein Schedule wird als *sequence robust* bezeichnet, wenn dieser mit allen geplanten Vorgängen (ohne Vorgänge auszulassen oder zusätzliche Vorgänge einzufügen) in der geplanten Reihenfolge in verschiedenen Szenarien ausgeführt werden kann. Diese Definition gleicht der Zulässigkeitsrobustheit, ist aber von dieser abzugrenzen. Die Zulässigkeitsrobustheit bezieht sich lediglich auf die allgemeine Ausführbarkeit eines Plans in verschiedenen Szenarien und bezieht dabei insbesondere die Flexibilität mit ein. Im Gegensatz dazu fokussiert sich die *Sequence Robustness* auf die planmäßige Ausführbarkeit der geplanten Vorgänge

hinsichtlich ihrer Struktur und ihrer Beziehungen untereinander (die geplanten Vorgänge sollen in der geplanten Reihenfolge ausgeführt werden). Eine Anpassung während der Planausführung sollte bei der Sequence Robustness vermieden werden.

Die Eignung der vorgestellten Robustheitstypen für die proaktive Planung im Rahmen dieser Arbeit ist in Tabelle 4.2 zusammengefasst.

Tabelle 4.2: Vergleich von Robustheitstypen

Eigenschaft des Schedules	Robustheitstyp	Anwendbarkeit für die proaktive Planung allgemein	Anwendbarkeit für die proaktive Planung in dieser Arbeit aufgrund gegebener Anforderungen aus Kapitel 3.1
Unempfindlichkeit der Zielfunktionswerte eines Plans	Quality Robustness	Ja	Nein
Unempfindlichkeit der Startzeitpunkte der Vorgänge	Solution Robustness	Ja	Ja
Anwendbarkeit eines Schedules in möglichst jedem Szenario	Zulässigkeitsrobustheit	Ja (Da in der Literatur keine Robustheitsmaße gefunden werden konnten, können Robustheitsmaße anderer Robustheitstypen angewendet werden.)	Ja (Da in der Literatur keine Robustheitsmaße gefunden werden konnten, können Robustheitsmaße anderer Robustheitstypen angewendet werden.)

Unempfindlichkeit eines Plans bei unterschiedlicher Qualität und Quantität an Informationen	Informationsrobustheit	Nein, da lediglich ex post anwendbar und bestmöglicher Informationsstand zum Zeitpunkt der Planung vorausgesetzt wird.	Nein
Anzahl oder Wahrscheinlichkeit der Plananpassungen	Planungsrobustheit	Nein, da lediglich ex post anwendbar	Nein
Vergleich der Robustheitsbewertung mit verschiedenen Robustheitsmaßen	Bewertungsrobustheit	Ja (Verwendung von Robustheitsmaßen anderer Robustheitstypen)	Ja (Verwendung von Robustheitsmaßen anderer Robustheitstypen)
Flexibilität im Falle von unvorhergesehenen Situationen	Flexibilitätsrobustheit	Ja (da die Ausführbarkeit mit Plananpassungen beibehalten werden kann)	Nein, da Plananpassungen vermieden werden sollen
Ausführbarkeit der geplanten Vorgänge (keine Vorgänge weglassen und keine zusätzlichen Vorgänge) in der geplanten Reihen-/Abfolge	Sequence Robustness	Ja	Ja

Insgesamt sind die Solution Robustness, die Zulässigkeitsrobustheit, die Bewertungsrobustheit sowie die Sequence Robustness für den Anwendungsfall im Rahmen dieser Arbeit anwendbar. Da für die Zulässigkeits- sowie für die Bewertungsrobustheit keine Robustheitsmaße in der Literatur gefunden wurden, werden diese im Planungswerkzeug dieser Arbeit nicht durch eigene Robustheitsmaße berücksichtigt. Stattdessen werden für die Zulässigkeitsrobustheit Robustheitsmaße der Solution und Sequence Robustness verwendet. Für die Bewertungsrobustheit werden keine ersatzweisen Robustheitsmaße verwendet, sondern es wird lediglich das Konzept des Vergleichs von Plänen anhand von Robustheitsmaßen der Solution und Sequence Robustness genutzt.

Im Folgenden wird näher auf Robustheitsmaße der Solution und Sequence Robustness eingegangen. Dabei werden für die Solution Robustness Robustheitsmaße aus der Literatur beschrieben und teilweise für den Anwendungsfall dieser Arbeit weiterentwickelt. Für die neu definierte Sequence Robustness werden neu entwickelte Robustheitsmaße vorgestellt.

4.5.3 Robustheitsmaße für die Solution Robustness

Zur Messung der Solution Robustness eines Schedules können verschiedene Robustheitsmaße verwendet werden, die sich in zwei Kategorien unterscheiden lassen: Paarweise Vergleiche oder Bewertung eines Plans mit Hilfe einer genaueren Analyse des Plans. Um zu bewerten, ob die Startzeitpunkte eines Schedules in verschiedenen Szenarien eingehalten werden können, kann der Schedule jeweils mit den Schedules in anderen Szenarien paarweise verglichen werden. Diese Art der Robustheitsbewertung ist aufwändig. Um den Aufwand der Robustheitsbewertung zu verringern, befassen sich viele Autoren mit Robustheitsmaßen, die lediglich den zu untersuchenden Schedule genauer analysieren. Beispielsweise untersuchen einige Autoren die in Plänen integrierten zeitlichen Puffer (vgl. Chtourou und Haouari, 2008; Al-Fawzan und Haouari, 2005; Kobylański und Kuchta, 2007; Lambrechts et al., 2008; Hazır et al., 2010; Khemakhem und Chtourou, 2013). Streng genommen handelt es sich hierbei nicht um Robustheitsmaße, da die Robustheit nicht unmittelbar hinsichtlich der Ausführbarkeit eines Schedules in verschiedenen Szenarien untersucht wird. Stattdessen wird die Robustheit indirekt durch zeitliche Puffer im Plan bewertet. Hierbei wird angenommen, dass Puffer zeitliche Verzögerungen abfangen können. Auf diese Weise sollen trotz auftretender Verzögerungen einzelner Vorgänge die Startzeitpunkte aller anderen Vorgänge eingehalten werden können.

Im Folgenden wird zunächst auf Robustheitsmaße durch einen paarweisen Vergleich und anschließend auf Maße zur Bewertung der Robustheit mit Hilfe von Puffern eingegangen.

4.5.3.1 Paarweise Vergleiche von Schedules

Vergleich der Startzeitpunkte

Der Grad der Sensitivität der Startzeitpunkte der einzelnen Vorgänge eines Plans in Abhängigkeit von Änderungen der Inputdaten kann durch den Unterschied zwischen den geplanten ($GS_i \in S^\rho$) und den tatsächlich ausgeführten Startzeitpunkten ($S_i \in S^R$) der einzelnen Vorgänge $i \in V^a$ eines Projekts a untersucht werden. Da das Verschieben von Startzeitpunkten unterschiedlicher Vorgänge zu unterschiedlichen Auswirkungen in einem Projektplan führen kann, z. B. führt die Verzögerung eines Vorgangs auf dem kritischen Pfad zu einer Verzögerung des gesamten Projekts, werden die einzelnen Abweichungen unterschiedlich gewichtet (ω_i) (Demeulemeester und Herroelen, 2011, S. 50 f.; Herroelen und Leus, 2004; Lamas und Demeulemeester, 2016, S. 410):

$$\Delta(S^\rho, S^R) = \sum_{i \in V^a} \omega_i |S_i - GS_i| \quad (4.38)$$

Je niedriger die Unterschiede sind, d. h. je mehr sich der Wert dieses Maßes dem Wert null annähert, desto höher ist die Solution Robustness des Plans.

Das Prinzip des paarweisen Vergleichs der Startzeitpunkte von Vorgängen kann auf den Vergleich von Schedules verschiedener Szenarien erweitert werden. Hierbei ist zu berücksichtigen, dass nicht nur die Startzeitpunkte gleicher Vorgänge verschiedener Schedules wie in Formel (4.38) verglichen werden, sondern dass auch die Existenz dieser Vorgänge in den zu vergleichenden Schedules überprüft wird. Hierzu wird die Differenz der

Startzeitpunkte mit der Anzahl gleicher Vorgänge in beiden Plänen normiert (vgl. Formel (4.39)). Je mehr sich der Wert dieses Maßes dem Wert null annähert, desto höher ist die Solution Robustness des Plans.

$$\sum_{i=1}^{|V^a|} \frac{|GS_i^a - GS_i^b|}{\sum_{i=1}^{|V^a|} g_i}, \forall a, b \in P; \forall i \in V^a \cap V^b \quad (4.39)$$

mit: $g_i = 1$, wenn $i \in V^a \cap V^b$; ansonsten $g_i = 0$.

Auf diese Weise wird ein Zielkonflikt zwischen dem Vergleich der Startzeitpunkte gleicher Vorgänge verschiedener Schedules und der Überprüfung der Existenz dieser Vorgänge in den zu vergleichenden Schedules vermieden. Je ähnlicher die Startzeitpunkte gleicher Vorgänge sind, desto mehr nähert sich der Wert des Robustheitsmaßes dem Wert null an. In diesem Fall würde eine Robustheitsbewertung nahe null für einen solution robusten Schedule sprechen. Gleichzeitig gibt die Anzahl gleicher Vorgänge in den zu untersuchenden Schedules an, wie ähnlich sich die Pläne sind. Um diese Eigenschaft in das Robustheitsmaß einfließen zu lassen, sodass eine größere Anzahl gleicher Vorgänge zu einem geringeren Wert des Robustheitsmaßes führt, wird der Kehrwert der Anzahl gleicher Vorgänge verwendet.

Confidence Level

Zur Bewertung der Solution Robustness in der proaktiven Planung schlagen Lamas und Demeulemeester (2016) das sogenannte *Confidence Level* (CL) vor. Dieses Robustheitsmaß gibt die Wahrscheinlichkeit an, mit der die geplanten Startzeitpunkte GS_i der Vorgänge $i \in V^a$ eines Projekts a den Startzeitpunkten S_i bei der Projektausführung entsprechen (vgl. Formel (4.40)) (Lamas und Demeulemeester, 2016, S. 410):

$$CL^a = Prob(GS_i^a = S_i), \forall i \in V^a \quad (4.40)$$

Lamas und Demeulemeester (2016) nutzen dieses Robustheitsmaß in einem neu entwickelten Algorithmus zur Projektplanung in einem RCPSP als Nebenbedingung. In dieser Nebenbedingung wird die Differenz der Startzeitpunkte aller Vorgänge $i, j \in V$, die eine Vorgänger-Nachfolger-Beziehung besitzen, d. h. j ist Nachfolge-Vorgang von i ($(i, j) \in V^2$), mit der Dauer des Vorgangs i (d_i) verglichen (Lamas und Demeulemeester, 2016, S. 413). Die Wahrscheinlichkeit, dass diese Differenz größer ist als die Dauer d_i , soll größer oder gleich einem vorgegebenen Anspruchswert $(1 - \alpha)$ sein (vgl. Formel (4.41)). Durch die Einhaltung des Anspruchswertes sollen robuste Pläne ermittelt werden.

$$P(S_j - S_i \geq M(x_{i,j} - 1) + d_i, \forall (i, j) \in V^2, i \neq j) \geq (1 - \alpha) \quad (4.41)$$

In dieser Nebenbedingung ist M eine frei wählbare obere Schranke der Projektdauer und $x_{i,j}$ ist eine Entscheidungsvariable, die 1 ist, wenn Vorgang j nach Vorgang i ausgeführt wird und 0 sonst.

In der beschriebenen Form ist dieses Robustheitsmaß für den Anwendungsfall dieser Arbeit, d. h. zur Bestimmung der Robustheit beim Vergleich verschiedener Pläne, nicht einsetzbar. Damit dieses Robustheitsmaß auch zur Bewertung eines Plans bzw. zum Vergleich alternativer Pläne (jeweils ein Plan je Szenario) einsetzbar ist, wird die Idee des Vergleichs der Differenz der Startzeitpunkte zweier Vorgänge, die eine Vorgänger-Nachfolger-Beziehung ($(i, j) \in V^2$) besitzen, mit der Vorgangsdauer des Nachfolge-Vorgangs zur Entwicklung eines neuen Maßes übernommen. Hierzu wird zunächst ein Maß zur Bewertung der Robustheit einzelner Vorgänge eines Plans und im Anschluss ein Maß zur Bewertung der Robustheit eines Plans vorgestellt.

Zur Bewertung der Robustheit eines Vorgangs i , vergleicht das neu entwickelte Maß die Differenz der Startzeitpunkte von Vorgang i und dessen Nachfolger-Vorgang j eines Plans a mit der Dauer von Vorgang i in jedem anderen Plan $k \in P$ ($GS_j^a - GS_i^a \geq d_i^k$). Sofern die Ungleichung erfüllt ist, ist die geplante Zeitspanne $GS_j^a - GS_i^a$ groß genug, um Vorgang i mit der Dauer d_i^k aus Plan k in Plan a auszuführen. Für den Vorgang i eines Plans a wird gezählt, wie oft $GS_j^a - GS_i^a \geq d_i^k$ für alle $k \in P$ gilt. Die Anzahl möglicher Ausführungen in verschiedenen Szenarien, d. h. die Anzahl, wie oft die Ungleichung erfüllt ist, wird anschließend durch die Anzahl geteilt, wie oft Vorgang i in den überprüften Plänen k vorkommt. Das Confidence Level CL_i^a wird für jeden Vorgang i und alle seine Nachfolger j in einem Plan a berechnet (vgl. Formel (4.42)).

$$CL_i^a = \frac{\sum_{k=1}^{|P|} z_{ij}^k}{\sum_{k=1}^{|P|} e_i^k} \quad (4.42)$$

mit:

- $i \in V^a$
- $j \in Succ(i)^a$
- $k \in P$
- $e_i^k = 1$, wenn $i \in V^k$; ansonsten $e_i^k = 0$
- $z_{ij}^k = 1$, wenn $GS_j^a - GS_i^a \geq d_i^k$ und $e_i^k = 1$; ansonsten $z_{ij}^k = 0$.

Zur Bewertung der Ausführbarkeit des gesamten Plans a in anderen Szenarien bestehen mehrere Möglichkeiten. Im Folgenden werden verschiedene Möglichkeiten aufgeführt, die jeweils aufeinander aufbauen. Hierbei werden die einzelnen Schritte der Weiterentwicklung zur Eliminierung der jeweiligen Nachteile aufgeführt.

Eine Möglichkeit, um die Ausführbarkeit eines Plans a in anderen Szenarien mit Hilfe von Formel (4.42) zu bewerten, kann das Minimum aller Quotienten CL_i^a verwendet werden, wobei das Robustheitsmaß dann

aussagt, dass ein Plan umso robuster ist, je höher der Wert des Confidence Levels ist. Die Verwendung des Minimums leitet sich aus dem Ansatz von Lamas und Demeulemeester (2016) her, die ein Anspruchsniveau in einer Nebenbedingung ihres RCPSP vorgeben, welches von jedem Vorgang eines Plans mindestens erreicht werden soll. Da zum Vergleich verschiedener Pläne kein Anspruchsniveau vorgegeben wird, sondern der Wert des Maßes zur Bewertung der Robustheit verwendet wird, muss ein Wert des Confidence Levels eines jeden Plans bestimmt werden, der vergleichbar ist. Mit dem Vergleich der Minima aller CL_i^a aller Pläne wird somit die schlechteste Übertragbarkeit eines Plans auf andere Szenarien verglichen. Ein Plan, dessen schlechteste Übertragbarkeit besser ist als die schlechteste Übertragbarkeit eines anderen Plans, besitzt somit eine größere Solution Robustness.

Mit den beschriebenen Anpassungen berechnet sich das Confidence Level eines Plans a bei insgesamt $|P|$ Plänen wie in Formel (4.43) dargestellt.

$$CL^a = \min_i \{CL_i^a\} \quad (4.43)$$

Die Berücksichtigung lediglich des Minimums der Confidence Levels aller Vorgänge hat allerdings folgenden Nachteil: Wenn lediglich ein einziger Vorgang eines Plans ein geringes Confidence Level aufweist, wogegen allerdings alle anderen Vorgänge einen hohen Wert für ihr Confidence Level besitzen, wird durch die Verwendung des Minimums für das Confidence Level des untersuchten Plans die Robustheit des Plans als gering eingeschätzt. Ein Plan mit lediglich einem niedrigen Confidence Level-Wert eines Vorgangs und ansonsten großen Werten der Confidence Levels aller anderen Vorgänge kann den gleichen Confidence Level-Wert aufweisen wie ein Plan, in dem alle Vorgänge niedrige Confidence Level-Werte aufweisen. Um diesen Nachteil zu vermeiden, kann der Durchschnitt aller Confidence Level-Werte aller Vorgänge eines Plans berechnet werden

(vgl. Formel (4.44)). Dadurch wird der Einfluss von Ausreißern auf den Confidence Level-Wert eines Plans verringert.

$$CL^a = \frac{1}{|V^a|} \sum_{i=1}^{|V^a|} CL_i^a \quad (4.44)$$

Je früher in einem Plan Änderungen auftreten, desto größer ist die Wahrscheinlichkeit, dass weitere Vorgänge neu geplant werden müssen. Daher kann der Durchschnitt aller Confidence Level-Werte aller Vorgänge eines Plans zusätzlich mit der Anzahl an Nachfolgern je Vorgang gewichtet werden (vgl. Formel (4.46)). Da die Confidence Level-Werte verschiedener Pläne verglichen werden und verschiedene Pläne eine unterschiedliche Anzahl an Vorgängen beinhalten können, muss zur Vergleichbarkeit die Anzahl an Nachfolgern je Vorgang mit der Anzahl der Nachfolger aller Vorgänge eines Plans normiert werden (vgl. Formel (4.45)).

$$W_i^a = |\overline{Succ(i)^a}| * \frac{1}{\sum_{i=1}^{|V^a|} |\overline{Succ(i)^a}|} \quad (4.45)$$

$$CL^a = \frac{1}{|V^a|} \sum_{i=1}^{|V^a|} W_i^a * CL_i^a \quad (4.46)$$

mit:

- $|\overline{Succ(i)^a}|$: Gesamtanzahl aller Nachfolger eines Vorgangs i in Plan a

4.5.3.2 Robustheitsbewertung mit Hilfe einer Analyse des Plans

Die im Folgenden beschriebenen Maße gehen nicht direkt auf die Robustheit eines Plans ein, allerdings können mit Hilfe einer Analyse des jeweiligen Schedules Aussagen über die Robustheit eines Plans gemacht werden. Die Robustheit der im Folgenden beschriebenen Maße basiert auf dem **zeitlichen Puffer einzelner Vorgänge** und auf **Ressourcenpuffern**. Dabei wird nicht die Möglichkeit betrachtet, wie ein Plan mit ungeplanten

Ereignissen umgeht, sondern es wird davon ausgegangen, dass der gezielte Einsatz von Puffern den Umgang mit ungeplanten Ereignissen erleichtert. Beispielsweise wird davon ausgegangen, dass zeitliche Verzögerungen eines Plans mit ausreichend zeitlichem Puffer aufgefangen werden können, sodass die Startzeitpunkte der Vorgänge trotz der Verzögerungen möglichst eingehalten werden können (Davenport et al., 2014). Die Wirksamkeit des Einsatzes von Puffern zur Einhaltung eines Plans bei Verzögerungen während der Planausführung wurde wissenschaftlich belegt (Hu et al., 2017, S. 1).

Bei der Verwendung von Puffern können die Ansätze der Methode des kritischen Pfads (CPM) (vgl. Kapitel 3.5.2) und der Methode der kritischen Kette (critical chain method (CCM) oder critical chain project management (CCPM)) unterschieden werden. CPM berücksichtigt zeitliche Puffer jedes einzelnen Vorgangs. Zur Bewertung der Robustheit eines Plans ist in diesem Zusammenhang vor allem der sogenannte Freie Puffer zur Bewertung eines Plans relevant. Der Freie Puffer FP_i^a eines Vorgangs i in einem Plan a beinhaltet die Dauer, die Vorgang i nach hinten verschoben werden kann, d. h. um die Vorgang i später enden kann, sodass der Startzeitpunkt (die Startzeitpunkte) seines Nachfolgers (seiner Nachfolger) trotzdem noch planmäßig ausführbar ist (sind). Einige Maße verwenden zudem den Gesamtpuffer GP_i^a eines Vorgangs i in einem Plan a , der die Dauer beinhaltet, die Vorgang i nach hinten verschoben werden kann, ohne die Gesamtprojektdauer zu verlängern. Detailliertere Beschreibungen des Gesamtpuffers und des Freien Puffers sind in Kapitel 3.5.1 zu finden.

Da für den Anwendungsfall im Rahmen dieser Arbeit ein Plan identifiziert werden soll, dessen Vorgänge zeitlich wie geplant beginnen und enden, bietet sich die Verwendung des Freien Puffers an.

Im Gegensatz zu CPM berücksichtigt CCPM keine zeitlichen Puffer jedes einzelnen Vorgangs, sondern den zeitlichen Puffer eines (Teil-)Projekts. Dies kann in einigen Projekten Vorteile gegenüber den Vorgangspuffern

aufweisen, da häufig die Einhaltung der Projektgesamtdauer und weniger die Einhaltung der Start- und Endzeitpunkte einzelner Vorgänge im Vordergrund steht. Allerdings stellt der Rückbau kerntechnischer Anlagen einen Sonderfall dar, bei dem die Einhaltung der Start- und Endzeitpunkte einzelner Vorgänge aufgrund der benötigten Genehmigungen relevant ist. Aus diesem Grund werden die CCPM sowie die zeitlichen Puffer von Teilprojekten oder des Gesamtprojekts im Folgenden nicht näher berücksichtigt. Als Vorteil der CCPM sei hervorgehoben, dass zum Umgang mit Störungen während der Projektausführung Ressourcenpuffer berücksichtigt werden, die eine planmäßige Ausführung eines Plans ermöglichen sollen (Hu et al., 2017, S. 160ff.). Im Folgenden werden daher auch Ressourcenpuffer in den Ersatzmaßen berücksichtigt. Nähere Informationen zu CCPM sind u. a. in Goldratt (1997) zu finden.

Bei allen Ersatzmaßen, die auf Vorgangspuffern beruhen, ist zu beachten, dass ein Zielkonflikt zwischen der Robustheit aufgrund eingebauter Puffer und dem Projektziel (beispielsweise Minimierung der Projektdauer oder der Projektkosten) bestehen kann. Grund dafür ist, dass ein Plan gemäß den Ersatzmaßen mit Vorgangspuffern umso robuster ist, je mehr zeitliche Puffer im Plan enthalten sind. Andererseits führt dies in der Regel zu einer Verlängerung der Projektdauer und häufig auch zu einer Erhöhung der Projektkosten.

Theoretisch sind alle im Folgenden untersuchten Ersatzmaße durch die Betrachtung der Vorgangspuffer im Anwendungsfall dieser Arbeit einsetzbar. Eine Auswahl der für den Anwendungsfall praktikabelsten Ersatzmaße wird in Kapitel 4.5.5.1 getroffen.

Summe der freien Vorgangspuffer

Damit ein Plan trotz kleiner Erhöhungen der Vorgangsdauern planmäßig ausführbar bleibt, schlagen Al-Fawzan und Haouari (2005, S. 177) vor, als Ersatzmaß zur Beurteilung der Robustheit eines Plans die Freien Puffer aller Vorgänge $i \in V^a$ eines Plans a aufzusummieren (vgl. Formel (4.47)).

$$\sum_{i=1}^{|V^a|} FP_i^a \quad (4.47)$$

Je größer die Summe ist, desto robuster ist der Plan. Verschiedene Pläne $a \in P$ können somit anhand der Summe ihrer Freien Puffer verglichen werden. Es wird davon ausgegangen, dass je mehr Puffer in einem Plan vorhanden ist, desto besser kann verhindert werden, dass Verzögerungen einzelner Vorgänge zu einer Verzögerung des Gesamtprojekts führen.

Kobyłański und Kuchta (2007) kritisieren diesen Ansatz, da nicht die Verteilung der Freien Puffer im Plan betrachtet wird, sondern lediglich die Summe. Somit kann ein Plan, der lediglich einen sehr großen Puffer bei einem Vorgang aufweist, die gleiche Summe an Freien Puffern besitzen, wie ein Plan, der die Pufferzeit auf verschiedene Vorgänge verteilt. Aus diesem Grund schlagen Kobyłański und Kuchta (2007) eine Erweiterung dieses Ersatzmaßes auf die Maße der *Minimalen Vorgangspuffer* sowie dem *Minimalen Vorgangspuffer/-dauer Verhältnis* vor, welche im Folgenden beschrieben werden.

Minimale Vorgangspuffer

Um sicherzustellen, dass zeitliche Puffer möglichst gleichmäßig auf alle Vorgänge verteilt werden, schlagen Kobylański und Kuchta (2007) vor, lediglich den kleinsten Freien Puffer aller Vorgänge i eines Plans a zu betrachten. Der Plan mit dem größten minimalen Freien Puffer ist somit der robusteste Plan aller Pläne $a \in P$:

$$\min\{FP_i^a, \forall i \in V^a\} \quad (4.48)$$

Kobylański und Kuchta (2007) zeigen, dass die Verwendung dieses Maßes zu einer mindestens genauso guten Quality und Solution Robustness führt, wie das Maß der *Summe der freien Vorgangspuffer* nach Al-Fawzan und Haouari (2005). Nichtsdestotrotz werden Pläne mit dem gleichen minimalen Freien Puffer als gleichgestellt betrachtet, obwohl ihre Struktur und die Verteilung der Freien Puffer sehr unterschiedlich sein können (Khemakhem and Chtourou, 2013, S. 250).

Minimales Vorgangspuffer/-dauer Verhältnis

Da es bei Vorgängen mit längerer Dauer in der Regel wahrscheinlicher ist, dass es bei diesen Vorgängen zu Verzögerungen kommt, wird je Vorgang i der freie Puffer FP_i^a ins Verhältnis zur Dauer d_i^a des Vorgangs gesetzt. Für einen Plan a wird das Minimum dieses Verhältnisses gesucht (vgl. Formel (4.49)).

$$\min\left\{\frac{FP_i^a}{d_i^a}, \forall i \in V^a\right\} \quad (4.49)$$

Auch bei diesem Maß ist der Plan mit dem größten Minimum der robusteste. Kobylański und Kuchta (2007) zeigen, dass auch die Verwendung dieses Maßes zu einer mindestens genauso guten Quality und Solution Robustness führt, wie das Maß der *Summe der freien*

Vorgangspuffer. Dieses Maß weist den gleichen Nachteil wie das Maß *Minimale Vorgangspuffer* auf, da Pläne mit dem gleichen minimalen Freien Puffer-Dauer Verhältnis als gleichgestellt betrachtet werden, obwohl ihre Struktur und die Verteilung der Freien Puffer sehr unterschiedlich sein können (Khemakhem and Chtourou, 2013, S. 250).

Gewichteter, abnehmender freier Puffernutzen

Mit Hilfe dieses Maßes wird einerseits eine gleichmäßige Verteilung der Pufferzeiten auf alle Vorgänge eines Plans und andererseits die Gewichtung, d. h. der Einfluss einzelner Vorgänge auf den Gesamtplan, berücksichtigt (Lambrechts et al., 2008).

Bei der Verwendung dieses Maßes zum Vergleich verschiedener Ablaufpläne $a \in P$ sollte der Plan verwendet werden, der den größten Wert des Maßes aufweist. Der Wert des Maßes bestimmt sich mit Hilfe der Dauer des Freien Puffers und einem Gewichtungsfaktor (vgl. Formel (4.50)). Je länger die Dauer des Freien Puffers eines Vorgangs i ist, desto weniger stark erhöht jede zusätzliche Zeiteinheit an zugewiesenem Puffer den Wert des Maßes. Dadurch wird eine gleichmäßige Verteilung der Puffer auf verschiedene Vorgänge gewährleistet. Da Lambrechts et al. (2008) nur mit ganzen Zahlen arbeiten, wird der freie Puffer auf die nächste ganze Zahl (Zeiteinheit) aufgerundet.

Um Vorgänge, die bei Planabweichungen hohe Kosten verursachen, beispielsweise aufgrund der Bindung von Ressourcen, stärker zu gewichten, wird der Gewichtungsfaktor *cumulative instability weight* (CIW) (Gewicht der kumulierten Instabilität) eingeführt. Dadurch werden Pläne bevorzugt, die solchen Vorgängen einen größeren Puffer zuweisen. Zusätzlich wird durch Gewichtungen in CIW die Auswirkung auf nachfolgende Vorgänge berücksichtigt, sodass nicht nur die Auswirkungen von Planabweichungen auf den untersuchten Vorgang, sondern auf den gesamten Plan berücksichtigt werden. (Lambrechts et al., 2008)

$$\sum_{i=1}^{|V^a|} CIW_i^a * \sum_{j=1}^{[FP_i^a]} e^{-j}, \forall i \in V^a \quad (4.50)$$

mit:

$$CIW_i^a = \omega_i^a + \sum_{j \in Succ(i)^a} \omega_j^a$$

Es ist anzumerken, dass die Werte der Gewichte ω_i^a und ω_j^a einen Einfluss auf die Robustheitsbewertung mit Hilfe dieses Maßes haben. Lambrechts et al. (2008) machen in ihrem Paper allerdings keine Angaben zur Bestimmung dieser Gewichte.

Durch die Anzahl nachfolgender Vorgänge gewichteter freier Vorgangspuffer

Die Idee, die Position der Puffer im Projektplan zur Bewertung der Robustheit zu berücksichtigen, greifen Chtourou und Haouari (2008) ebenfalls auf. Chtourou und Haouari (2008) nehmen an, dass Verzögerungen zu Beginn eines Projekts einen höheren Neuplanungsaufwand verursachen als Planänderungen am Ende eines Projekts. Aus diesem Grund bevorzugen sie Pläne, dessen Vorgänge zu Beginn des Plans mehr Pufferzeit zugeteilt wird (Chtourou und Haouari, 2008). Dazu wird die Anzahl an Nachfolgern eines Vorgangs i in Plan a zur Gewichtung seines Freien Puffers verwendet (vgl. Formel (4.51)) (Chtourou und Haouari, 2008).

$$\sum_{i=1}^{|V^a|} (FP_i^a * |\overline{Succ(i)^a}|), \forall i \in V^a \quad (4.51)$$

Gewichtung der Pufferzeit mit der Anzahl benötigter Ressourcen

Als Gewichtungsfaktor des Freien Puffers kann gemäß Chtourou und Haouari (2008) auch die Anzahl benötigter Ressourcen r_i^k aller Ressourcentypen $k \in K$ des jeweiligen Vorgangs $i \in V^a$ in Plan a verwendet werden (vgl. Formel (4.52)).

$$\sum_{i=1}^{|V^a|} (FP_i^a * \sum_{k=1}^K r_{ik}^a), \forall i \in V^a \quad (4.52)$$

Die Verwendung der Ressourceninanspruchnahme als Gewichtungsfaktor berücksichtigt, dass durch eine Verzögerung eines Vorgangs, der Ressource k in Anspruch nimmt, diese Ressource auch für andere Vorgänge längere Zeit als geplant nicht zur Verfügung steht. Dies kann nicht nur die nachfolgenden Vorgänge, sondern insbesondere parallel ablaufende Vorgänge beeinflussen und zu höheren Kosten führen. Insbesondere bei Vorgängen, die viele Ressourcen in Anspruch nehmen, können Verzögerungen größere Auswirkungen auf den Gesamtplan nehmen. Aus diesem Grund werden mit Hilfe dieses Maßes Pläne mit Vorgängen bevorzugt, die bei gleicher Ressourceninanspruchnahme einen größeren Freien Puffer besitzen.

Gemischte Gewichtung mit Anzahl der nachfolgenden Vorgänge und benötigten Ressourcen

Die Vorteile der Gewichtung mit Hilfe der Anzahl aller nachfolgenden Vorgänge und der Gewichtung mit Hilfe der Anzahl benötigter Ressourcen können in einem Gewichtungsfaktor zusammengefasst werden (vgl. Formel (4.53)) (Chtourou und Haouari, 2008):

$$\sum_{i=1}^{|V^a|} (FP_i^a * |\overline{Succ(i)^a}| * \sum_{k=1}^K r_{ik}^a), \forall i \in V^a \quad (4.53)$$

Alternativen zur Verwendung der zeitlichen Puffer

Die Nutzung der zeitlichen Puffer zur Bewertung der Robustheit wird damit argumentiert, dass der gezielte Einsatz von zeitlichen Puffern die Bewältigung ungeplanter Ereignisse erleichtert. Allerdings können aufgrund des eingangs beschriebenen Zielkonflikts zwischen Puffern und Zielfunktionswerten Projektpläne mit unverhältnismäßig großen Puffern zwar eine hohe Robustheit, allerdings auch eine erheblich längere Projektdauer aufweisen. Daher schlagen Chtourou und Haouari (2008) für folgende vier Maße (diese Maße sind ebenfalls in der ersten Spalte von Tabelle 4.3 aufgeführt) zwei alternative Möglichkeiten der Berücksichtigung der Puffer vor:

- Summe der freien Vorgangspuffer (Formel (4.47)),
- Durch nachfolgende Vorgänge gewichteter freier Vorgangspuffer (Formel (4.51)),
- Gewichtung der Pufferzeit mit der Anzahl benötigter Ressourcen (Formel (4.52)),
- Gemischte Gewichtung mit Anzahl der nachfolgenden Vorgänge und benötigten Ressourcen (Formel (4.53)).

Als Alternative für die Vorgangspuffer schlagen Chtourou und Haouari (2008) vor, dass der Freie Puffer durch die Binärvariable α_i^a ersetzt wird, welche zwar die Existenz aber nicht die Länge eines Freien Puffers berücksichtigt. Dadurch werden Projektpläne bei der Verwendung der Binärvariablen nicht unnötig in die Länge gezogen.

Um die Länge eines Puffers mit in die Bewertung eines Plans hinsichtlich der Robustheit einfließen zu lassen und gleichzeitig zu verhindern, dass ein Projektplan nicht unnötig in die Länge gezogen wird, schlagen Chtourou und Haouari (2008) vor, eine angemessene Länge des Puffers in der Bewertung zu berücksichtigen. Kleine Puffer werden vollumfänglich zur

Bewertung der Robustheit berücksichtigt. Sofern der Puffer zu groß¹³⁴ ist, wird lediglich die gemäß Chtourou und Haouari (2008) potentiell für den Plan nützliche Dauer des Puffers berücksichtigt, indem ein festgelegter Anteil *frac* der jeweiligen Vorgangsdauer d_i^a in die Bewertung mit einfließt.

Die vier genannten Maße werden in Tabelle 4.3 in ihrer oben vorgestellten Form (erste Spalte) und den beiden Abwandlungsmöglichkeiten (mittlere und rechte Spalte) aufgeführt.

¹³⁴ Chtourou und Haouari (2008) diskutieren allerdings nicht, wann ein Puffer zu groß ist.

Tabelle 4.3: Abwandlungsmöglichkeiten zur Bewertung von Puffern (Quelle: Chtourou und Haouari (2008))

Vgl. (4.47)	(4.54)	(4.55)
$\sum_{i=1}^{ V^a } FP_i^a$	$\sum_{i=1}^{ V^a } \alpha_i^a$	$\sum_{i=1}^{ V^a } \min\{FP_i^a; frac * d_i^a\}$
Vgl. (4.51)	(4.56)	(4.57)
$\sum_{i=1}^{ V^a } (FP_i^a * \overline{Succ(i)}^a)$	$\sum_{i=1}^{ V^a } (\alpha_i^a * \overline{Succ(i)}^a)$	$\sum_{i=1}^{ V^a } (\min\{FP_i^a; frac * d_i^a\} * \overline{Succ(i)}^a)$
Vgl. (4.52)	(4.58)	(4.59)
$\sum_{i=1}^{ V^a } (FP_i^a * \sum_{k=1}^K r_{ik}^a)$	$\sum_{i=1}^{ V^a } (\alpha_i^a * \sum_{k=1}^K r_{ik}^a)$	$\sum_{i=1}^{ V^a } (\min\{FP_i^a; frac * d_i^a\} * \sum_{k=1}^K r_{ik}^a)$
Vgl. (4.53)	(4.60)	(4.61)
$\sum_{i=1}^{ V^a } (FP_i^a * \overline{Succ(i)}^a * \sum_{k=1}^K r_{ik}^a)$	$\sum_{i=1}^{ V^a } (\alpha_i^a * \overline{Succ(i)}^a * \sum_{k=1}^K r_{ik}^a)$	$\sum_{i=1}^{ V^a } (\min\{FP_i^a; frac * d_i^a\} * \overline{Succ(i)}^a * \sum_{k=1}^K r_{ik}^a)$
$\alpha_i^a = 1$, wenn $FP_i^a > 0$ und $\alpha_i^a = 0$, wenn $FP_i^a = 0 \forall i \in V^a$ $0 < frac < 1$		

Maße als Kombination aus Pufferfunktionen und Gewichtungsfaktoren

Maße zur Bewertung der Robustheit eines Plans können mit verschiedenen Gewichten kombiniert werden (Chtourou und Haouari, 2008). Diese Idee greifen Khemakhem und Chtourou (2013) auf und schlagen vor, verschiedene Pufferfunktionen¹³⁵ (vgl. Tabelle 4.4) mit unterschiedlichen Gewichtungsfaktoren (vgl. Tabelle 4.5) zu kombinieren. Durch die vielen verschiedenen Kombinationsmöglichkeiten ergeben sich 88 Möglichkeiten für unterschiedliche Robustheitsmaße (inklusive der Robustheitsmaße bestehend aus Pufferfunktionen ohne einen Gewichtungsfaktor). Im Folgenden werden die Pufferfunktionen, die als Ersatzmaß für die Bewertung der Robustheit von Plänen herangezogen werden können und von Khemakhem und Chtourou (2013) vorgeschlagen werden, sowie die verschiedenen Gewichte aufgeführt. Hierbei sind teilweise bereits zuvor beschriebene Pufferfunktionen bzw. Gewichte enthalten.

¹³⁵ Khemakhem und Chtourou (2013) bezeichnen Ersatzmaße zur Bewertung der Robustheit, die auf Vorgangspuffern beruhen und keinen Gewichtungsfaktor besitzen, als Pufferfunktionen.

Tabelle 4.4: Pufferfunktionen nach Khemakhem und Chtourou (2013)

	Name der Pufferfunktion	Mathematische Formulierung	Formelnummer
PF1	Summe der Freien Puffer	$\sum_{i=1}^{ V^a } FP_i^a$	Vgl. (4.47)
PF2	Summe Binär-Puffer	$\sum_{i=1}^{ V^a } \alpha_i^a$	Vgl. (4.54)
PF3	Minimum aus freiem Puffer und Grenzwert	$\sum_{i=1}^{ V^a } \min\{FP_i^a; frac * d_i^a\}$	Vgl. (4.55)
PF4	Abnehmende Pufferfunktion	$\sum_{j=1}^{ FP_i^a } e^{-j}$	Vgl. (4.50) Ohne Gewichtungsfaktor
PF5	Puffer Selbstanspruch	$\sum_{i=1}^{ V^a } \beta_i^a$, mit $\beta_i^a = 1$, wenn $FP_i^a \geq SP\%_i^a * d_i^a$ und $\beta_i^a = 0$ sonst	(4.62)
PF6	Pufferanspruch für unmittelbare Vorgänger	$\sum_{i=1}^{ V^a } \sum_{j=1}^{ Pred(i)^a } \gamma_j^a$, mit $\gamma_j^a = 1$, wenn $FP_i^a \geq SP\%_j^a * d_j^a$ und $\gamma_j^a = 0$ sonst	(4.63)
PF7	Pufferanspruch für vorhergehende Vorgänge	$\sum_{i=1}^{ V^a } \sum_{j=1}^{ AA(i)^a } \sigma_j^a$, mit $\sigma_j^a = 1$, wenn $FP_i^a \geq SP\%_j^a * d_j^a$ und $\sigma_j^a = 0$ sonst	(4.64)
PF8	Kombinierter Pufferanspruch	$\sum_{i=1}^{ V^a } (\beta_i^a + (\sum_{j=1}^{ AA(i)^a } \sigma_j^a))$, mit $\beta_i^a = 1$, wenn $FP_i^a \geq SP\%_i^a * d_i^a$ und $\beta_i^a = 0$ sonst Und $\sigma_j^a = 1$, wenn $FP_i^a \geq SP\%_j^a * d_j^a$ und $\sigma_j^a = 0$ sonst	(4.65)
$SP\%_i^a$: Anspruchsniveau bzgl. des Freien Puffers von Vorgang i in Plan a			

Die Pufferfunktionen PF1-PF4 entsprechen den Ideen der zuvor erläuterten Maße *Summe der freien Vorgangspuffer* (Formel (4.47)) und seiner Abwandlungen gemäß Chtourou und Haouari (2008) (Formeln (4.54) und (4.55)) sowie dem Maß *Gewichteter abnehmender freier Puffernutzen* (Formel (4.50)) ohne den Gewichtungsfaktor CIW. Zusätzlich schlagen Khemakhem and Chtourou (2013) die Pufferfunktionen PF5-PF8 vor. In Formel (4.62) soll der Freie Puffer eines Vorgangs groß genug sein, um Verzögerungen der eigenen Vorgangsdauer abzufangen. Dagegen soll der Freie Puffer eines Vorgangs in Formel (4.63) groß genug sein, um die Verzögerungen aller unmittelbar vorhergehenden Vorgänge zu bewältigen. In Formel (4.64) soll der Freie Puffer sogar die Verzögerungen aller Vorgänger absorbieren können. Eine Mischung aus den Formeln (4.62) und (4.64) stellt die Formel (4.65) dar, indem durch den Freien Puffer eines Vorgangs sowohl die Verzögerungen der eigenen Vorgangsdauer als auch die Verzögerungen aller Vorgänger abgefangen werden sollen.

Die Pufferfunktionen PF5-PF8 verwenden das Anspruchsniveau *sufficiency percentage* (SP%), welches einen Anteil der Vorgangsdauer¹³⁶ darstellt. Das Produkt aus SP% und der Vorgangsdauer d_i^a eines zu untersuchenden Vorgangs dient als Grenzwert, welcher durch den Freien Puffer des Vorgangs mindestens erreicht sein sollte. Khemakhem und Chtourou (2013) schlagen Grenzwerte vor, die mindestens erreicht sein sollten, da ihrer Meinung nach ein Puffer zur Bewältigung von ungeplanten Ereignissen nur hilfreich ist, wenn dieser groß genug ist und zu kurze Puffer nicht zu einer Verbesserung der tatsächlichen Robustheit eines Plans führen. Mit Hilfe der Binärvariablen β , γ und σ wird somit einerseits die Bewertung der Robustheit nicht erhöht, wenn der vorgegebene Grenzwert nicht erreicht ist. Andererseits wird die Bewertung der Robustheit um eins erhöht, wenn der vorgegebene Grenzwert mindestens erreicht wird. Gleichzeitig wird somit

¹³⁶ Der Anteil SP% der Vorgangsdauer d_i^a eines Vorgangs i in Plan a ist mit von Chtourou und Haouari (2008) beschriebenen Anteil *frac* vergleichbar.

berücksichtigt, dass eine weitere Ausdehnung des Puffers über das Anspruchsniveau hinaus zu keiner Erhöhung der tatsächlichen Robustheit, aber zu einer Erhöhung der Projektdauer führt.

Die in Tabelle 4.4 genannten Pufferfunktionen können gemäß Khemakhem und Chtourou (2013) mit den Gewichten in Tabelle 4.5 beliebig kombiniert werden, um bestimmte Eigenschaften der Robustheit detaillierter in der Robustheitsbewertung zu berücksichtigen.

Tabelle 4.5: Gewichtungen für Pufferfunktionen nach Khemakhem und Chtourou (2013)

	Name der Gewichtung	Mathematische Formulierung
W1	Anzahl unmittelbarer Nachfolger	$ Succ(i)^a $
W2	Benötigte Anzahl an Ressourcen	$\sum_{k=1}^K r_{ik}^a$
W3	Kombination aus W1 und W2	$ Succ(i)^a * \sum_{k=1}^K r_{ik}^a$
W4	Anzahl aller (transitiven) Nachfolger	$ \overline{Succ(i)}^a $
W5	Verhältnis benötigter Anzahl an Ressourcen zur Anzahl verfügbarer Ressourcen	$\sum_{k=1}^K \frac{r_{ik}^a}{R_k^a}$
W6	Anzahl Nachfolger ohne Freien Puffer	$ \{j \in \overline{Succ(i)}^a : FP_j^a = 0\} $
W7	Inverse der aggregierten Freien Puffer aller unmittelbaren Nachfolger	$\frac{1}{\sum_{j \in Succ(i)^a} FP_j^a + 1}$

W8	Vorgangsrang	$r(i)$
W9	Anzahl vorhergehender Vorgänge	$ AA(i)^a $
W10	Vorgangsposition im Plan	CNF_i^a

Die Gewichte W1-W4 wurden bereits zuvor erklärt. Das Gewicht W5 (Verhältnis benötigter Anzahl an Ressourcen zur Anzahl verfügbarer Ressourcen) ist eine Erweiterung der Gewichtung W2. Nach Ansicht von Khemakhem und Chtourou (2013) sollte zur Bewertung der Robustheit nicht nur die benötigte Anzahl an Ressourcen je Ressourcentyp, sondern das Verhältnis der benötigten Anzahl zur verfügbaren Anzahl je Ressourcentyp berücksichtigt werden. Damit wird Rechnung getragen, dass beispielsweise ein Vorgang, der 4 von 4 verfügbaren Ressourcen des gleichen Typs in Anspruch nimmt größeren Einfluss auf die Robustheit eines Plans nimmt, als ein Vorgang, der 6 von 12 verfügbaren Ressourcen benötigt (Khemakhem und Chtourou, 2013).

Auf dem Maß Durch nachfolgende Vorgänge gewichteter freier Vorgangspuffer basiert das Gewicht W6, indem Pläne mit Vorgängen zu bevorzugen sind, die mehr Nachfolger mit Freiem Puffer besitzen. Außerdem können Pläne mit Vorgängen bevorzugt werden, die einen Freien Puffer besitzen und nach Vorgängen ohne Freien Puffer ausgeführt werden. Dies bietet den Vorteil, dass potentielle Verzögerungen wahrscheinlicher behoben werden können und somit eine Verlängerung der Projektdauer verhindert werden kann. (Khemakhem und Chtourou, 2013)

In ähnlicher Weise funktioniert das Gewicht W7, welches Pläne mit ausreichend gepufferten Vorgängen bevorzugt, desto weniger kumulierten Puffer seine Nachfolger haben. Durch die Addition der Zahl 1 im Nenner wird gewährleistet, dass das Gewicht immer berechnet werden kann. (Khemakhem und Chtourou, 2013)

Der Vorgangsrang eines Vorgangs ($W8$) gibt die maximale Anzahl an Vorgängen an, die beendet sein müssen, damit der Vorgang starten kann. Je näher sich ein Vorgang am Projektende befindet, desto höher ist sein Rang. Ausgehend von der Idee, dass auftretende Verzögerungen gegen Projektende schlechter kompensiert werden können, sollte Vorgängen mit einem höheren Rang ein größerer Puffer zugewiesen werden. (Khemakhem und Chtourou, 2013)

Auf der gleichen Logik basieren auch die Gewichte $W9$ und $W10$. Im Gegensatz zu Gewicht $W8$ berücksichtigt das Gewicht $W9$ nicht den Vorgangsrang, sondern die Anzahl vorhergehender Vorgänge. Beim Gewicht $W10$ wird der Plan in eine bestimmte Anzahl an Zeitabschnitten (NF , engl. number of time fragments) unterteilt. Der Wert CNF_i^a (engl. count NF) des Gewichts $W10$ ist umso größer, je später der Zeitabschnitt ist, in dem Vorgang i ausgeführt wird. (Khemakhem und Chtourou, 2013)

Verteilung der Freien Puffer in einem Plan

Da eine gleichmäßige Verteilung der Puffer in einem Plan dessen Robustheit erhöht, schlagen Khemakhem und Chtourou (2013) Maße mit der Varianz der Verteilung des Freien Puffers vor. Bei den folgenden Maßen (4.66) und (4.67) wird untersucht, wie sich die Puffer auf verschiedene Pfade in einem Plan verteilen. In Formel (4.66) wird diese Verteilung je Plan a mit Hilfe des durchschnittlichen aggregierten Freien Puffers aller Pfade in Plan a und der Standardabweichung der aggregierten Freien Puffer aller Pfade in Plan a bestimmt.

$$\frac{\overline{SSP^a}}{\sqrt{\text{Var}(SSP^a)}} \quad (4.66)$$

mit:

- $\overline{SSP^a} = \frac{\sum_{p=1}^{NP^a} SSP_p^a}{NP^a}, \forall a \in P$
- SSP_p^a : aggregierter Freier Puffer aller Vorgänge auf Pfad p , der von der Quelle zur Senke führt, in Plan a
- NP^a : Anzahl der Pfade in Plan a

Die Variable SSP^a eines Plans a nimmt mit einer Anzahl von NP^a Pfaden von der Quelle zur Senke für jeden Pfad p unterschiedliche Ausprägungen SSP_p^a an. Über alle diese Ausprägungen eines Plans a können die Varianz und die Standardabweichung bestimmt werden. Der Mittelwert aller Ausprägungen SSP_p^a wird durch die berechnete Standardabweichung geteilt. (Khemakhem und Chtourou, 2013)

In ähnlicher Weise überprüft auch das Maß mit der Formel (4.67) die Robustheit eines Plans (Khemakhem und Chtourou, 2013). Hierbei wird die Verteilung des Freien Puffers auf verschiedene Pfade mit Hilfe der Anzahl an Vorgängen mit einem echt positiven Freien Puffer eines Pfades und dessen Standardabweichung bestimmt.

$$\frac{\overline{NSP^a}}{\sqrt{\text{Var}(NSP^a)}} \quad (4.67)$$

mit:

- $\overline{NSP^a} = \frac{\sum_{p=1}^{NP^a} NSP_p^a}{NP^a}, \forall a \in P$
- NSP_p^a : Anzahl an Vorgängen auf Pfad p in Plan a , die einen echt positiven Freien Puffer haben.
- NP^a : Anzahl der Pfade in Plan a

Im Gegensatz zu den beiden zuvor genannten Maßen wird in Formel (4.68) nicht die Verteilung der Puffer auf einzelne Pfade, sondern die Verteilung der Puffer auf alle Vorgänge untersucht (Khemakhem und Chtourou, 2013):

$$\frac{\overline{FP^a}}{\sqrt{\text{Var}(FP^a)}} \quad (4.68)$$

mit:

- $\overline{FP^a} = \frac{\sum_{i=1}^{|V^a|} FP_i^a}{|V^a|}, \forall a \in P, i \in V^a$

Nutzung des Gesamtpuffers anstatt des Freien Puffers

Hazır et al. (2010) modifizieren existierende Robustheitsmaße, indem sie anstatt des Freien Puffers FP_i^a den Gesamtpuffer¹³⁷ GP_i^a verwenden. Beispielsweise tauschen sie in den Formeln (4.51) und (4.55) den Freien Puffer gegen den Gesamtpuffer. Zusätzlich kombinieren sie verschiedene Pufferfunktionen aus Tabelle 4.4 (wobei anstatt des Freien Puffers der Gesamtpuffer verwendet wird) mit Gewichtungsfaktoren aus Tabelle 4.5, z. B. PF1 und W1 oder PF4 und W4. Gemäß Hazır et al. (2010, S. 635) liegt der Vorteil der Nutzung des Gesamtpuffers darin, dass dieser eine höhere Korrelation zur Quality Robustness aufweist. Nichtsdestotrotz sind Pufferfunktionen mit einem Gesamtpuffer Maße zur Bewertung der Solution Robustness.

Ähnlich wie Lambrechts et al. (2008) mit ihrem Maß (4.50) schlagen auch Hazır et al. (2010) ein Maß vor, mit dem einerseits jede zusätzliche Zeiteinheit eines Puffers ein abnehmendes Gewicht je Vorgang besitzt und andererseits die Auswirkungen auf alle nachfolgenden Vorgänge berücksichtigt werden (vgl. Formel (4.69)). Allerdings verwenden

¹³⁷ Eine Beschreibung des Gesamtpuffers ist in Kapitel 3.5.1 zu finden.

Hazır et al. (2010) dazu zum einen das Verhältnis des Gesamtpuffers GP_i^a eines Vorgangs i in Plan a zur Dauer d_i^a des Vorgangs i in Plan a , sodass wie von Kobyłański und Kuchta (2007) in ihrem Maß des *Minimalen Vorgangspuffer/-dauer Verhältnisses* (Formel (4.49)) der Puffer in Abhängigkeit von der Vorgangsdauer berücksichtigt wird. Das Puffer-Dauer-Verhältnis SDR (engl. slack/duration ratio) sorgt für eine gleichmäßige Verteilung der Puffer auf die Vorgänge eines Plans. Zum anderen wird die Bewertung der Auswirkungen einer Planabweichung durch die Anzahl an Nachfolgevorgängen gewichtet (W4). Für einen Plan $a \in P$ ergibt sich somit folgendes Maß:

$$\sum_{i=1}^{|V^a|} |Succ(i)^a| * \sum_{j=1}^{\lfloor SDR_i^a \rfloor} e^{-j}, \forall i \in V^a \quad (4.69)$$

mit: Puffer-Dauer-Verhältnis SDR (engl. slack/duration ratio): $SDR_i^a = \frac{GP_i^a}{d_i^a}$

Hazır et al. (2010) nutzen die SDR für ein weiteres Maß, um potentiell kritische Vorgänge zu identifizieren. Hierbei wird ein potentiell kritischer Vorgang PCA_i^a eines Plans a definiert als ein Vorgang, dessen SDR nicht mindestens einem zuvor definierten Anspruchsniveau ξ entspricht. Um die Robustheit eines Plans zu berechnen, schlagen Hazır et al. (2010) vor, die Anzahl potentiell kritischer Vorgänge durch die Anzahl aller Vorgänge eines Plans zu teilen (vgl. Formel (4.70)).

$$\frac{|PCA_i^a|}{|V^a|} \quad (4.70)$$

mit: $PCA_i^a = 1$, wenn $SDR_i^a \leq \xi$; 0 sonst und $SDR_i^a = \frac{GP_i^a}{d_i^a}$

Hazır et al. (2010) betrachten des Weiteren die gleichmäßige Verteilung der eingeplanten Pufferzeiten auf alle Vorgänge mit Hilfe der Varianz des Puffer-Dauer-Verhältnisses. Hierbei wird der Varianz-Koeffizient CV (engl.

coefficient of variation) für einen Plan a berechnet, indem die Standardabweichung durch den Mittelwert des Puffer-Dauer-Verhältnisses geteilt wird (vgl. Formel (4.71)).

$$CV^a = \frac{\sqrt{\text{Var}(SDR^a)}}{SDR^a} \quad (4.71)$$

mit:

- $SDR^a = \frac{\sum_{i=1}^{|V^a|} SDR_i^a}{|V^a|}$
- Puffer-Dauer-Verhältnis SDR (engl. slack/duration ratio):
 $SDR_i^a = \frac{G_i^a}{d_i^a}$

Die Variable SDR^a eines Plans a mit einer Anzahl von $|V^a|$ Vorgängen nimmt für jeden Vorgang i unterschiedliche Ausprägungen SDR_i^a an. Über alle diese Ausprägungen eines Plans a können die Varianz und die Standardabweichung bestimmt werden. Um den Varianz-Koeffizienten zu erhalten, wird die Standardabweichung durch den Mittelwert aller Ausprägungen SDR_i^a geteilt.

Je größer der Wert des Maßes (4.71) ist, desto ungleichmäßiger sind die Puffer im Verhältnis zur Dauer im Plan verteilt. Umgekehrt weist ein niedriger Wert des Maßes darauf hin, dass die Pufferzeiten in einem Plan gleichmäßig verteilt sind und somit eine höhere Robustheit besteht. (Hazır et al., 2010, S. 636)

4.5.4 Robustheitsmaße der Sequence Robustness

Eine Überprüfung der Reihenfolge der Vorgänge ist insbesondere im Hinblick auf die Anwendbarkeit eines Plans in unterschiedlichen Szenarien relevant. Hierbei können verschiedene Bedingungen zur Ausführung

unterschiedlicher Vorgänge oder unterschiedlicher Vorgangsreihenfolgen führen. Beispielsweise sind beim Rückbau kerntechnischer Anlagen aufgrund von Kontaminationen häufig Dekontaminationsmaßnahmen erforderlich. Die Art der Dekontaminationsmaßnahme bzw. die Entscheidung über den Einsatz bestimmter Technologien (vgl. Kapitel 2.4.2) ist dabei vom jeweiligen Zustand der Anlagenteile oder Bauteile abhängig. Außerdem sind je nach Zustand, der häufig erst während des Rückbaus identifiziert wird, unterschiedliche Vorgänge, Wiederholungen von Vorgängen oder unterschiedliche Reihenfolgen von Vorgängen notwendig. Um einen Schedule zu identifizieren, der trotz dieser Unterschiede je Szenario und damit trotz der vorherrschenden Unsicherheiten in möglichst vielen Szenarien ausführbar ist, werden die Robustheitsmaße der Sequence Robustness entwickelt und im Folgenden vorgestellt.

Die Maße können jeweils einer der folgenden Kategorien zugeordnet werden: Bewertung mit Hilfe von Durchschnittswerten über alle Pläne oder paarweise Vergleiche. Paarweise Vergleiche sind aufwändiger und erfordern mehr Rechendauer als die Bewertung von Plänen mit Hilfe von Durchschnittswerten. Allerdings überprüfen diese die Ausführbarkeit in allen Szenarien detaillierter aufgrund der direkten Vergleiche. Die entwickelten Robustheitsmaße beider Kategorien sowie deren Vor- und Nachteile werden im Folgenden beschrieben.

4.5.4.1 Robustheitsbewertung mit Hilfe von Durchschnittswerten über alle Pläne

Im Folgenden werden Maße vorgestellt, die teilweise aufeinander aufbauen, indem die jeweiligen Nachteile einzelner Maße schrittweise behoben werden. Daher sollten nicht alle im Folgenden vorgestellten, neu entwickelten Robustheitsmaße zur Bewertung der Sequence Robustness eines Plans verwendet werden.

Differenz der geplanten Dauer zur durchschnittlichen Dauer aller Pläne

Um sich einem Maß für die Sequence Robustness eines Plans a anzunähern, kann dessen Gesamtdauer D_a mit der durchschnittlichen Gesamtdauer aller $|P|$ Pläne verglichen werden (vgl. Formel (4.72)). Je größer der Unterschied zwischen der Gesamtdauer eines Plans und der durchschnittlichen Gesamtdauer aller anderen Pläne ist, desto wahrscheinlicher ist es, dass sich der untersuchte Plan in seiner Vorgangsstruktur und -reihenfolge von den anderen Plänen unterscheidet.

$$\left| D_a - \frac{\sum_{p=1}^{|P|} D_p}{|P|} \right|, \forall a, p \in P \quad (4.72)$$

Es ist allerdings zu berücksichtigen, dass ein Schedule, dessen Dauer der durchschnittlichen Dauer aller Pläne entspricht, nicht zwangsläufig die gleiche Vorgangsstruktur wie die anderen Schedules aufweist. Somit gibt dieses Maß lediglich einen ersten Hinweis auf die Sequence Robustness eines Plans, ist aber noch nicht ausreichend, um eine eindeutige Aussage zu treffen.

Differenz zur durchschnittlichen Anzahl an Vorgängen

Anstatt der Projektdauer kann die Anzahl an Vorgängen eines Plans a mit der durchschnittlichen Anzahl an Vorgängen aller $|P|$ Pläne verglichen werden (vgl. Formel (4.73)). Je näher der Wert dieses Maßes bei null ist, desto ähnlicher ist die Anzahl an Vorgängen, die in Plan a ausgeführt werden, zur durchschnittlichen Anzahl an Vorgängen aller Pläne.

$$\left| |V^a| - \frac{\sum_{p=1}^{|P|} |V^p|}{|P|} \right|, \forall a, p \in P \quad (4.73)$$

Allerdings ist auch bei diesem Robustheitsmaß darauf zu achten, dass ein Schedule, dessen Anzahl auszuführender Vorgänge der durchschnittlichen Anzahl an Vorgängen aller Pläne entspricht, nicht zwangsläufig die gleiche Vorgangsstruktur aufweist wie die anderen Schedules.

Differenz zur durchschnittlichen Anzahl verschiedener Vorgänge

Um nicht nur die Anzahl an Vorgängen verschiedener Pläne zu vergleichen, sondern um auch die Ähnlichkeit der Vorgänge zu berücksichtigen, kann die Anzahl voneinander verschiedener Vorgänge je Plan mit der Anzahl voneinander verschiedener Vorgänge in den anderen Plänen verglichen werden (vgl. Formel (4.74)).

$$\left| |VV^a| - \frac{\sum_{p=1}^{|P|} |VV^p|}{|P|} \right|, \forall a, p \in P \quad (4.74)$$

mit: VV^a : Menge voneinander verschiedener Vorgänge in Plan a

Die Anzahl voneinander verschiedener Vorgänge gibt einen besseren Hinweis darauf, ob ein Plan die gleichen Vorgänge enthält wie der Durchschnitt aller Pläne. Allerdings können zwei Pläne mit völlig unterschiedlichen Vorgängen ebenfalls die gleiche Anzahl unterschiedlicher Vorgänge besitzen.

Anteil an Vorgangstartzeitpunkten in einem vorgegebenen Intervall

Um die Vorgangsstruktur von Plänen besser zu vergleichen, können die Vorgangstartzeitpunkte betrachtet werden. Es wird überprüft, wie ähnlich sich die Startzeitpunkte gleicher Vorgänge in verschiedenen Plänen sind. Hierbei findet nicht wie bei der Solution Robustness ein direkter Vergleich der Vorgangstartzeitpunkte verschiedener Pläne statt, sondern es wird zunächst für jeden Vorgang ein Intervall definiert, in dem ein zuvor festgesetzter Anteil der Startzeitpunkte des Vorgangs in allen anderen Plänen

liegen soll. Für den jeweils betrachteten Plan wird überprüft, ob je Vorgang der Vorgangsstartzeitpunkt in diesem Intervall liegt oder nicht (g_i^a).

Als Intervall, in dem der Vorgangsstartzeitpunkt liegen sollte, kann beispielsweise der Interquantilabstand zweier Quantile Q_x^i und Q_{1-x}^i der Startzeitpunkte von Vorgang i verwendet werden. D. h. dass zunächst je Vorgang i ein Intervall vom geringsten bis zum größten Vorgangsstartzeitpunkt aufgestellt wird, in dem alle Vorgangsstartzeitpunkte von Vorgang i liegen. Im Anschluss wird festgelegt, wie viel dieses Intervall verkleinert werden soll, in dem die Vorgangsstartzeitpunkte bei der Überprüfung liegen sollten. Sofern beispielsweise die Quantile $Q_{0,1}^i$ und $Q_{0,9}^i$ als Intervallgrenzen festgelegt werden, liegen 80 % der Vorgangsstartzeitpunkte des Vorgangs i aller Pläne in diesem Intervall. Je Plan wird je Vorgang überprüft, ob dieser Vorgang jeweils im für den jeweiligen Vorgang vorgesehenen Intervall liegt oder nicht. Je mehr Vorgänge eines Plans in dem jeweiligen Intervall liegen, desto ähnlicher ist die Vorgangsstruktur des Plans zu den verglichenen Plänen.

Es ist allerdings zu beachten, dass ein Vorgang, der im Extremfall nur in einem Plan vorkommt, auf jeden Fall in dem vorgegebenen Intervall liegt. Damit würde der Wert des Robustheitsmaßes erhöht werden, obwohl ein Plan mit Vorgängen, die nur in wenigen anderen Plänen vorkommen, weniger sequence robust ist als ein Plan, der Vorgänge beinhaltet, die in vielen anderen Plänen vorkommen. Aus diesem Grund wird das Robustheitsmaß nur erhöht, wenn ein Vorgang in dem zuvor festgelegten Intervall liegt und in mindestens $\frac{1}{x}$ der Pläne vorkommt (wobei x der Bezeichnung des ersten Quantils entspricht (Q_x^i)). Mit der Mindestanzahl von $\frac{1}{x}$ Plänen, in denen ein Vorgang vorkommen muss, wird sichergestellt, dass es auch Startzeitpunkte gibt, die nicht im Intervall $[Q_x^i, Q_{1-x}^i]$ liegen. Gleichzeitig wird davon ausgegangen, dass ausreichend viele Pläne verglichen werden, d. h. beispielsweise bei der Verwendung der Quantile

$[Q_{0,1}^i, Q_{0,9}^i]$ werden mehr als 10 Pläne verglichen. Insgesamt ergibt sich das Maß als:

$$\frac{\sum_{i=1}^{|V^a|} (g_i^a * z_i)}{\sum_{i=1}^{|V^a|} z_i}, \forall a \in P, \forall i \in V^a \quad (4.75)$$

mit:

- $g_i^a = 1$, wenn $GS_i^a \in [Q_x^i, Q_{1-x}^i]$, sonst $g_i^a = 0$.
- $z_i = 1$, wenn Vorgang i in mindestens $\frac{1}{x}$ der Pläne vorkommt, sonst $z_i = 0$. Da in jedem Plan mindestens der gleiche Dummy-Startvorgang enthalten ist, existiert mindestens ein $z_i = 1$, sodass der Nenner des Maßes nie 0 ist.

Aufgrund unterschiedlicher Vorgangsdauern und Vorgangsstrukturen verschiedener Pläne kann es dazu kommen, dass das definierte Intervall der Vorgangsstartzeitpunkte sehr groß ist. Damit würde der Wert dieses Robustheitsmaßes für viele Pläne sehr groß werden, obwohl die Vorgangsstruktur eines Plans sehr unterschiedlich zu denen der anderen Pläne sein kann.

4.5.4.2 Paarweise Vergleiche von Schedules

Häufig ist eine Aussage über die Sequence Robustness eines Plans schwierig, wenn dieser Plan mit Durchschnittswerten aller anderen Pläne verglichen wird. Aus diesem Grund bietet sich der paarweise Vergleich eines Plans mit jeweils allen anderen Plänen an, um eine bessere Aussage über dessen Sequence Robustness zu treffen.

Anzahl gleicher Vorgänger-Nachfolger-Beziehungen

Das Prinzip des paarweisen Vergleichs wird bei diesem Maß angewendet, indem ein Plan jeweils nur mit einem anderen Plan hinsichtlich gleicher

Vorgänger-Nachfolger-Beziehungen verglichen wird. Ein solcher paarweiser Vergleich wird ausgehend von einem Plan a mit allen anderen zu vergleichenden Plänen durchgeführt (vgl. Formel (4.76)).

$$\sum_{i=1}^{|V^a|} \sum_{j=1}^{|V^a|} 1 - |f_{ij}^a - f_{ij}^b|, \forall a, b \in P; \forall i, j \in V^a \cap V^b \quad (4.76)$$

mit: $f_{ij}^a = 1$, wenn in Plan a Vorgang j ein Nachfolger¹³⁸ von Vorgang i ist; ansonsten $f_{ij}^a = 0$.

Je größer der Wert dieses Maßes ist, desto mehr Vorgänge i und j eines Plans a haben die gleichen Vorgänger-Nachfolger-Beziehungen wie in allen anderen Plänen, d. h. desto ähnlicher sind sich diese Pläne in der Vorgangsstruktur.

4.5.5 Verwendung ausgewählter Robustheitsmaße

In den Kapiteln 4.5.3 und 4.5.4 wurden Robustheitsmaße sowie Ersatzmaße für die Solution und die Sequence Robustness beschrieben. In diesem Kapitel wird eine Auswahl aus den in dieser Arbeit vorgestellten Robustheitsmaßen getroffen, die im Rahmen des Planungswerkzeugs dieser Arbeit anwendbar sind (vgl. Kapitel 4.5.5.1). Basierend auf der Auswahl anwendbarer Robustheitsmaße wird eine Entscheidungsmethodik entwickelt, mit deren Hilfe verschiedene Robustheitsmaße kombiniert werden können, um eine Aussage über die Robustheit eines Schedules zu treffen (vgl. Kapitel 4.5.5.2).

¹³⁸ Hierbei werden nur die in Kapitel 4.3.3.2 definierten und in Kapitel 4.4.2 zur Aufstellung des mathematischen Modells verwendeten normalen oder no-wait Nachfolger berücksichtigt.

4.5.5.1 Auswahl anwendbarer Robustheitsmaße

Zur Auswahl eines Schedules sind in dieser Arbeit sowohl die Einhaltung der Startzeitpunkte als auch die Einhaltung der Reihenfolge der auszuführenden Vorgänge relevant. Die Unsicherheiten bzgl. dieser beiden Aspekte können in einem Schedule durch verschiedene Maße mit unterschiedlichen Vor- und Nachteilen bewertet werden (vgl. Kapitel 4.5.3 und 4.5.4). Im Folgenden werden aus den bereits vorgestellten Robustheitsmaßen für die Anwendung des Planungswerkzeugs relevante Maße ausgewählt und am Ende dieses Kapitels in Tabelle 4.6 zusammengefasst.

Zur Bewertung der Solution Robustness werden die folgenden Maße als sinnvoll erachtet und im Rahmen dieser Arbeit verwendet:

- M1: *Vergleich der Startzeitpunkte* (Formel (4.39)),
- M2: *erweitertes Confidence Level* (Formeln (4.42), (4.45) und (4.46)),
- M3: *angepasster Kombiniertes Pufferanspruch* (Formel (4.65) zu (4.78) weiterentwickelt),
- M4: *Minimales Vorgangspuffer/-dauer Verhältnis* (Formel (4.49)),
- M5: *erweiterte Binäre Summe der freien Vorgangspuffer* (Formel (4.54) zu (4.79) weiterentwickelt),
- M6: *weiterentwickelte Binäre Summe der freien Vorgangspuffer gewichtet mit der Anzahl benötigter Ressourcen* (Formel (4.58) zu (4.80) weiterentwickelt).

Je ähnlicher die Vorgangstartzeitpunkte eines Schedules zu den Vorgangstartzeitpunkten in unterschiedlichen Schedules sind, desto höher ist die Wahrscheinlichkeit, dass der Schedule auch in anderen Szenarien ausführbar ist. Es bieten sich zur Untersuchung der Startzeitpunkte die Maße des Vergleichs der Startzeitpunkte (Formel (4.39)) sowie das erweiterte Confidence Level (Formeln (4.42), (4.45) und (4.46)) an, weil diese die Vorgangstartzeitpunkte unterschiedlicher Schedules vergleichen

und damit untersuchen, ob die Startzeitpunkte auch in anderen Schedules ausführbar sind.

Zur Untersuchung der Solution Robustness bietet sich darüber hinaus die Verwendung einer Pufferfunktion mit einem Freien Puffer an, da mit ausreichend zeitlichem Puffer zeitliche Verzögerungen eines Plans aufgefangen werden können, sodass die Startzeitpunkte der Vorgänge trotz der Verzögerungen möglichst eingehalten werden können. Khemakhem und Chtourou (2013) zeigen, dass die von ihnen eingeführte Pufferfunktion PF8: *Kombinierter Pufferanspruch* (vgl. Formel (4.65) in Tabelle 4.4) die höchste positive Korrelation mit der Solution und Quality Robustness eines Plans unter all den von ihnen untersuchten Pufferfunktionen aufweist. Aus diesem Grund wird dieses Maß für den Anwendungsfall dieser Arbeit ausgewählt. Als Wert für den *sufficiency percentage* $SP\%$ schlagen Khemakhem und Chtourou (2013) vor, $SP\%$ auf die erwartete Verzögerung der Vorgangsdauer zu setzen. Die einfachste Möglichkeit diese zu berechnen, ist die Differenz der geplanten Dauer d_i^a von Vorgang i in Plan a zum Erwartungswert $E(d_i)$ der Dauer von Vorgang i zu betrachten, sofern der Erwartungswert größer als die Vorgangsdauer ist, d. h. wenn $E(d_i) - d_i^a \geq 0$. Denn nur in solchen Fällen ist eine Verzögerung der Vorgangsdauer zu erwarten. Somit wird Formel (4.77) angenommen.

$$SP\%_i^a * d_i^a = \max\{0, E(d_i) - d_i^a\} \quad (4.77)$$

Da die Pläne im Anwendungsfall unterschiedlich viele Vorgänge beinhalten können, muss das Maß angepasst werden, da bei einer reinen Aufsummierung der binären Werte β_i^a und σ_j^a bei Plänen mit mehr Vorgängen mehr Werte aufsummiert würden, sodass die Vergleichbarkeit der Ergebnisse nicht mehr gegeben wäre. Daher wird das Maß (Formel (4.65)) mit den maximalen Werten, d. h. mit $\beta_i^a = \sigma_j^a = 1, \forall i, j$, normiert (vgl. Formel (4.78)).

$$\frac{\sum_{i=1}^{|V^a|} (\beta_i^a + \left(\sum_{j=1}^{|AA(i)^a|} \sigma_j^a \right))}{\sum_{i=1}^{|V^a|} (1 + |AA(i)^a|)} \quad (4.78)$$

Chtourou und Haouari (2008) testeten ebenfalls die von ihnen entwickelten Robustheitsmaße auf ihre Aussagekraft bezüglich der tatsächlichen Robustheit der Pläne und schlugen die Maße *Summe der freien Vorgangspuffer* (Formel (4.47)), *Durch die Anzahl nachfolgender Vorgänge gewichteter freier Vorgangspuffer* (Formel (4.51)), *Binäre Summe der freien Vorgangspuffer* (Formel (4.54)) und *Binäre Summe der freien Vorgangspuffer gewichtet mit der Anzahl benötigter Ressourcen* (Formel (4.58)) vor.

Allerdings zeigten Kobylański und Kuchta (2007), dass das von ihnen eingeführte Maß *Minimales Vorgangspuffer/-dauer Verhältnis* (Formel (4.49)) eine mindestens so hohe Korrelation zur Solution Robustness und Quality Robustness eines Plans aufweist wie das Maß *Summe der freien Vorgangspuffer*. Aus diesem Grund wird das Maß *Minimales Vorgangspuffer/-dauer Verhältnis* anstatt des Maßes *Summe der freien Vorgangspuffer* im Folgenden verwendet.

Das Maß *Durch die Anzahl nachfolgender Vorgänge gewichteter freier Vorgangspuffer* kann nicht normiert werden, um die Ergebnisse verschiedener Schedules zu vergleichen. Aufgrund der Gewichtung des Freien Puffers mit der Anzahl an Nachfolgern, werden Pläne mit mehr Vorgängen höhere Werte erzielen, auch wenn das Ergebnis durch die Anzahl an Vorgängen geteilt wird. Der Grund liegt darin, dass Vorgänge aus Plänen mit mehr Vorgängen mehr nachfolgende Vorgänge haben können, als das in Plänen mit weniger Vorgängen der Fall ist. Da FP_i^a zudem keine binäre Variable ist, lässt sich auch kein maximal erreichbarer Wert für jeden Plan errechnen, mithilfe dessen ein Quotient gebildet werden könnte. Aus diesem Grund wird das von Chtourou und Haouari (2008) vorgeschlagene Maß *Durch die Anzahl nachfolgender Vorgänge gewichteter freier Vorgangspuffer* ebenfalls nicht im Rahmen dieser Arbeit verwendet.

Um die Vergleichbarkeit zwischen Schedules mit unterschiedlicher Anzahl an Vorgängen zu gewährleisten, wird das Maß *Binäre Summe der freien Vorgangspuffer* mit der Anzahl an in einem Schedule enthaltenen Vorgängen normiert. Es ergibt sich somit das Maß *Durchschnittlicher binärer Puffer* in Formel (4.79), welches im Rahmen dieser Arbeit verwendet wird.

$$\frac{\sum_{i=1}^{|V^a|} \alpha_i^a}{|V^a|} \quad (4.79)$$

Für das von Chtourou und Haouari (2008) vorgeschlagene Maß *Binäre Summe der freien Vorgangspuffer gewichtet mit der Anzahl benötigter Ressourcen* (Formel (4.58)) wird eine Normierung durch den maximal erreichbaren Wert vorgenommen, um die Ergebnisse verschiedener Schedules vergleichbar zu machen. Zusätzlich wird das Gewicht r_{ik}^a (Anzahl der verwendeten Ressourcen k durch Vorgang i in Plan a) durch die mit der verfügbaren Menge der jeweiligen Ressource normierten Anzahl der Ressourcen ersetzt (vgl. Gewicht W5 aus Tabelle 4.5). Das Maß mit der Formel (4.80) wird in dieser Arbeit verwendet.

$$\frac{\sum_{i=1}^{|V^a|} (\alpha_i^a * \sum_{k=1}^K \frac{r_{ik}^a}{R_k})}{\sum_{i=1}^{|V^a|} \sum_{k=1}^K \frac{r_{ik}^a}{R_k}} \quad (4.80)$$

Zur Bewertung der Sequence Robustness werden die folgenden Maße im Rahmen dieser Arbeit verwendet:

- M7: *Differenz der geplanten Dauer zur durchschnittlichen Dauer aller Pläne* (Formel (4.72)),
- M8: *Differenz zur durchschnittlichen Anzahl verschiedener Vorgänge* (Formel (4.74)),
- M9: *Anteil an Vorgangstartzeitpunkten in einem vorgegebenen Intervall* (Formel (4.75)),
- M10: *Anzahl gleicher Vorgänger-Nachfolger-Beziehungen* (Formel (4.76)).

Obwohl das Maß *Differenz der geplanten Dauer zur durchschnittlichen Dauer aller Pläne* sehr vage Aussagen bzgl. der Sequence Robustness trifft (bzgl. der Nachteile der einzelnen Maße vgl. die Ausführungen in Kapitel 4.5.4.1), gibt es einen ersten Überblick bzw. einen ersten Eindruck, ob die Struktur der untersuchten Schedules den anderen Schedules gleicht. Ebenso gibt auch das Maß *Differenz zur durchschnittlichen Anzahl verschiedener Vorgänge* einen guten Überblick über die Ähnlichkeit der Strukturen verschiedener Schedules. Das Maß *Anteil an Vorgangstartzeitpunkten in einem vorgegebenen Intervall* untersucht die Ähnlichkeit von Vorgängen und deren Startzeitpunkten in verschiedenen Schedules.

Mit Hilfe des Maßes *Anzahl gleicher Vorgänger-Nachfolger-Beziehungen* ist die detaillierteste Betrachtung der Vorgangsstruktur mit denen in dieser Arbeit vorgestellten Robustheitsmaßen möglich. Hierdurch wird nicht nur die Gleichheit der Vorgänge in unterschiedlichen Schedules, sondern insbesondere die Ähnlichkeit der Vorgängerbeziehungen untersucht, welche einen Hinweis für ähnliche Vorgangsreihenfolgen gibt.

Mit Hilfe der Kombination aus unterschiedlichen Robustheitsmaßen (vgl. Kapitel 4.5.5.2) erfolgt eine umfassende Robustheitsbewertung der Schedules bzgl. der Vorgangstartzeitpunkte sowie der Vorgangsstruktur. In Tabelle 4.6 sind die dazu ausgewählten Robustheitsmaße zusammengefasst dargestellt.

Tabelle 4.6: Im Rahmen dieser Arbeit gewählte Robustheitsmaße

M1	$\sum_{i=1}^{ V^a } \frac{ GS_i^a - GS_i^b }{\sum_{i=1}^{ V^a } g_i}, \forall a, b \in P; \forall i \in V^a \cap V^b$	(4.39)
M2	$CL^a = \frac{1}{ V^a } \sum_{i=1}^{ V^a } W_i^a * CL_i^a,$ mit $CL_i^a = \frac{\sum_{k=1}^{ P } z_{ij}^k}{\sum_{k=1}^m e_i^k}$ und $W_i^a = \overline{Succ(i)^a} * \frac{1}{\sum_{i=1}^{ V^a } \overline{Succ(i)^a} }$	(4.46) mit (4.42), (4.45)
M3	$\frac{\sum_{i=1}^{ V^a } (\beta_i^a + (\sum_{j=1}^{ AA(i)^a } \sigma_j^a))}{\sum_{i=1}^{ V^a } (1 + AA(i)^a)},$ mit $\beta_i^a = 1$, wenn $FP_i^a \geq SP\%_i^a * d_i^a$ und $\beta_i^a = 0$ sonst; und $\sigma_j^a = 1$, wenn $FP_j^a \geq SP\%_j^a * d_j^a$ und $\sigma_j^a = 0$ sonst; $SP\%_i^a * d_i^a = \max\{0, E(d_i) - d_i^a\}$	(4.78) mit (4.77)
M4	$\min \left\{ \frac{FP_i^a}{d_i^a}, \forall i \in V^a \right\}$	(4.49)
M5	$\frac{\sum_{i=1}^{ V^a } \alpha_i^a}{ V^a }$	(4.79)
M6	$\frac{\sum_{i=1}^{ V^a } (\alpha_i^a * \sum_{k=1}^K \frac{r_{ik}^a}{R_k})}{\sum_{i=1}^{ V^a } \sum_{k=1}^K \frac{r_{ik}^a}{R_k}}$	(4.80)
M7	$\left D_a - \frac{\sum_{p=1}^{ P } D_p}{ P } \right , \forall a, p \in P$	(4.72)
M8	$\left VV^a - \frac{\sum_{p=1}^{ P } VV^p }{ P } \right , \forall a, p \in P,$ mit: VV^a : Menge voneinander verschiedener Vorgänge in Plan a	(4.74)
M9	$\frac{\sum_{i=1}^{ V^a } (g_i^a * z_i)}{\sum_{i=1}^{ V^a } z_i}, \forall a \in P, \forall i \in V^a,$ mit $g_i^a = 1$, wenn $GS_i^a \in [Q_x^i, Q_y^i]$, sonst $g_i^a = 0$. $z_i = 1$, wenn Vorgang i in mindestens $\frac{1}{x}$ der Pläne vorkommt, sonst $z_i = 0$.	(4.75)
M10	$\sum_{i=1}^{ V^a } \sum_{j=1}^{ V^a } 1 - f_{ij}^a - f_{ij}^b , \forall a, b \in P; \forall i, j \in V^a \cap V^b,$ mit: $f_{ij}^p = 1$, wenn in Plan p Vorgang j ein Nachfolger von Vorgang i ist; ansonsten $f_{ij}^p = 0$.	(4.76)

Wie bereits beschrieben wurde, können Trade-offs zwischen Robustheitsmaßen existieren (Van de Vonder et al., 2005). Allerdings konnten keine Trade-offs zwischen den ausgewählten Robustheitsmaßen in Tabelle 4.6 nachgewiesen werden. Vielmehr ist davon auszugehen, dass sich die Aussagen der Maße bzgl. der Robustheit ergänzen, beispielsweise geben Maße der Solution Robustness Hinweise auf die Sequence Robustness.

4.5.5.2 Kombinierte Verwendung ausgewählter Robustheitsmaße

Um die Vorteile der ausgewählten Robustheitsmaße (vgl. Kapitel 4.5.5.1) und gleichzeitig sowohl die Unsicherheiten der Vorgangsstartzeitpunkte als auch die Unsicherheiten der Vorgangsstruktur zu berücksichtigen, werden die zu vergleichenden Schedules anhand aller ausgewählten Maße bewertet und das Bewertungsergebnis nach dessen Relevanz gewichtet. Mit Hilfe dieses Prinzips der Zielgewichtung nach Laux et al. (2014, S. 76) kann für die finale Entscheidung für einen Schedule die gewichtete Summe aller Robustheitsmaße je Schedule herangezogen werden. Der Schedule mit der höchsten gewichteten Summe aller Robustheitsmaße ist somit der robusteste.

Damit das Vorgehen der Zielgewichtung angewendet werden kann, müssen sich die Bewertungen der einzelnen Maße je Schedule in der gleichen Größenordnung befinden. Aus diesem Grund werden die Ergebnisse jedes Robustheitsmaßes wie von Scholl (2001, S. 47) vorgeschlagen auf das Intervall $[0, 1]$ transformiert, wobei der Plan mit dem schlechtesten Ergebnis des jeweiligen Maßes den Wert 0 und der Plan mit dem besten Ergebnis den Wert 1 erhält. Hierbei ist zu beachten, dass auch Maße, bei denen ein geringerer Wert eine höhere Robustheit symbolisiert, wie beispielsweise beim Maß *Differenz der geplanten Dauer zur durchschnittlichen Dauer aller Pläne*, eine Transformation auf das Intervall $[0, 1]$ wie oben beschrieben vorgenommen wird. Auf diese Weise können die Ergebnisse der unterschiedlichen Robustheitsmaße miteinander verglichen und kombiniert werden.

Die Gewichte für die einzelnen anwendbaren Robustheitsmaße kann der Anwender wählen. Voraussetzung ist, dass die Summe der Gewichte eins ergibt. Da ein Schedule gesucht wird, der sowohl solution als auch sequence robust ist, und da die verschiedenen gewählten Maße unterschiedliche Vor- und Nachteile besitzen, sollten die Gewichtungen ausgeglichen sein.

Da ein Schedule gesucht wird, der in allen Aspekten der Robustheit gute Werte in den betreffenden Maßen erzielt, sollte auf einen Ausgleich der Gewichtungen zwischen den Maßen M1-M2, M3-M6 und M7-10 geachtet werden. Die Maße M1 und M2 gehen insbesondere darauf ein, ob die Startzeitpunkte der Vorgänge in verschiedenen Schedules identisch sind. Im Gegensatz dazu berücksichtigen die Maße M3-M6 im Schedule integrierte Puffer. Die Maße M7-10 gehen auf die Robustheit bezüglich der Vorgangsstruktur ein. Diese drei untersuchten Eigenschaften eines Schedules werden im Rahmen dieser Arbeit zu gleichen Teilen berücksichtigt.

Aus diesem Grund wird den Maßen M1 und M2 jeweils das Gewicht $G1 = G2 = 0,17$ zugeteilt (vgl. Tabelle 4.7). Da Khemakhem und Chtourou (2013) gezeigt haben, dass sich das Maß M3 von den Puffermaßen am besten eignet, um Aussagen zur Robustheit eines Plans treffen zu können, wird dieses im Vergleich zu den anderen Puffermaßen M4-M6 höher gewichtet. Die Maße M7-M10 werden jeweils mit $G7 = G8 = G9 = G10 = 0,0825$ gewichtet.

Tabelle 4.7: Den ausgewählten Maßen zugeordnete Gewichte für die Untersuchung in Kapitel 5.2.5

G1	G2	G3	G4	G5	G6	G7	G8	G9	G10
0,17	0,17	0,12	0,07	0,07	0,07	0,0825	0,0825	0,0825	0,0825

4.5.6 Implementierung

Als Ergebnis der Optimierung (vgl. Kapitel 4.4.5) wird je optimiertem Schedule eine .csv-Datei erzeugt. Zur Bewertung der optimierten Schedules hinsichtlich ihrer Robustheit, sind die optimierten Schedules, d. h. die einzelnen .csv-Dateien, in einem Ordner abzuspeichern, in dem darüber hinaus (außer allen optimierten Schedules) keine weitere Datei enthalten ist.

Die in Kapitel 4.5.5.1 ausgewählten Robustheitsmaße sind in Matlab implementiert. Beim Starten des Programms wird der Anwender zunächst aufgefordert, eine beliebige Datei aus dem Ordner mit den .csv-Dateien auszuwählen. Dadurch importiert Matlab automatisch alle in diesem Ordner enthaltenen Dateien, d. h. alle optimierten Schedules.

Nachdem alle Schedules erfolgreich importiert wurden, wird der Anwender gefragt, ob die Szenarien durch eine Simulation erstellt wurden. Wenn dies der Fall ist, wird der Anwender dazu aufgefordert, diejenige Datei auszuwählen, die als Basis für die Szenariosimulation diene. Dies ist notwendig, um die Erwartungswerte der einzelnen Vorgangsdauern zu bestimmen.

Im Anschluss soll der Name des in den optimierten Schedules enthaltenen Dummy-Startvorgangs eingegeben werden. Der Name des Dummy-Startvorgangs wird bei der Optimierung als „Dummy-Start“ dem Schedule hinzugefügt. Dieser Name wird später für den Funktionsaufruf für die Maße *Confidence Level* und *Kombinierter Pufferanspruch* benötigt.

Da es in der weiteren Berechnung einen Unterschied macht, mit welcher Nummerierung der Dummy-Startvorgang bezeichnet wird, ist dies vom Anwender anzugeben. Sofern die Schedules aus der Optimierung übernommen wurden, besitzt der Dummy-Startvorgang standardmäßig die Nummerierung 0.

Nun wird der Anwender nach der von ihm gewünschten Gewichtung der zehn ausgewählten Maße (Kapitel 4.5.5.1) gefragt. Hierbei können die in Tabelle 4.7 (Kapitel 4.5.5.2) vorgeschlagenen Gewichtungen übernommen werden. Alternativ ist jede andere Gewichtung möglich, wenn die Gewichte positiv sind und in Summe eins ergeben. Der Anwender kann auch Maße mit null gewichten, sodass diese Maße im weiteren Verlauf der Robustheitsbewertung nicht berücksichtigt werden.

Sofern für das Maß *Anteil an Vorgangstartzeitpunkten in einem vorgegebenen Intervall* mit einem Gewicht größer als null gewichtet wurde, wird der Anwender nach den gewünschten Quantilgrenzen gefragt.

Mit den Angaben werden zunächst alle Informationen, wie beispielsweise die Freien Puffer der Vorgänge je Schedule, berechnet. Anschließend werden die Plan- und Vorgangsobjekte erzeugt und in Matlab abgespeichert. Mit all diesen Informationen werden die Robustheitsmaße berechnet, die vom Anwender eine Gewichtung größer null erhalten haben. Für die Ausgabe werden die berechneten Maße mit Hilfe der vom Anwender angegebenen Gewichtung gewichtet. Das berechnete Ergebnis der Robustheitsbewertung beinhaltet je Schedule die Ergebnisse der einzelnen Robustheitsmaße sowie der normierten Robustheitsmaße und das gewichtete Ergebnis bei der Kombination der Robustheitsmaße mit den gewählten Gewichtungen.

Der Anwender wird nach der Beendigung der Berechnung gefragt, ob er die Berechnungsergebnisse nach Microsoft Excel exportieren möchte. Sofern ein Export der berechneten Ergebnisse erwünscht ist, können der Name und der Speicherort der zu exportierenden Berechnungsergebnisse ausgewählt werden.

5 Anwendung des Planungswerkzeugs auf ausgewählte kerntechnische Rückbauprojekte

Das in Kapitel 4 entwickelte Planungswerkzeug wird in diesem Kapitel anhand von drei Referenzprojekten verifiziert sowie kalibriert. Anschließend wird das Planungswerkzeug anhand eines der Referenzprojekte angewendet. Allerdings wird bei der Anwendung des Planungswerkzeugs aufgrund von zu wenigen verfügbaren realen Daten unterschiedlicher kerntechnischer Rückbauprojekte (vgl. Kapitel 4.2.3) auf die Verwendung des Expertensystems und die Auswahl von Daten aus bereits abgeschlossenen und dokumentierten Referenzprojekten verzichtet.

Die untersuchten Projekte werden zunächst in Kapitel 5.1 vorgestellt. Anschließend wird das Planungswerkzeug in Kapitel 5.2 für die Planung der untersuchten Projekte eingesetzt. Im ersten Schritt werden für jedes Projekt verschiedene deterministische Szenarien simuliert (Kapitel 5.2.1). Diese Szenarien werden zur Kalibrierung der Parameter des MLS- sowie des ALNS-Algorithmus verwendet. Anschließend wird für jedes dieser Szenarien ein optimierter Schedule mittels der kalibrierten Parameter berechnet (Kapitel 5.2.2). Außerdem werden in Langzeittests die Zeitlimits beider Algorithmen untersucht. Die berechneten Schedules werden in Kapitel 5.2.3 validiert. In Kapitel 5.2.4 wird die Güte des in dieser Arbeit entwickelten Lösungsverfahrens mit Hilfe einer Gegenüberstellung zur Optimierung mit Hilfe des angepassten Mixed Integer Problem (MIP) aus Kapitel 4.4.3 und dem CPLEX-Solver sowohl mit als auch ohne

Warmstartlösung aufgezeigt. Zuletzt wird exemplarisch für jeden der optimierten Schedules des größten Referenzprojekts mit Hilfe der entwickelten und gewichteten Robustheitsmaße aus Kapitel 4.5.5 deren Robustheit bestimmt (Kapitel 5.2.5). Basierend auf der gewichteten Robustheit und den Projektkosten werden in Kapitel 5.2.5 Schedules identifiziert, die für einen Planer von Interesse sein könnten. Des Weiteren wird in Kapitel 5.3 eine exemplarische Sensitivitätsanalyse durchgeführt, um die Auswirkungen verschiedener Gewichtungen der Robustheitsmaße auf die Robustheitsbewertung aufzuzeigen.

5.1 Beschreibung untersuchter Projekte

Trotz intensiver Bemühungen war es nicht möglich, reale Daten eines abgeschlossenen, laufenden oder zukünftigen kerntechnischen Rückbauprojektes zu erhalten, die ausreichende Informationen zur Berechnung eines Schedules beinhalten bzw. die im Rahmen dieser Arbeit verwendet werden dürfen. Aufgrund ihres Wettbewerbsvorteils waren für den Rückbau kerntechnischer Anlagen zuständige Betreiber sowie Rückbauunternehmen bisher nicht an einer Weitergabe ihrer Daten interessiert. Um trotzdem an Daten kerntechnischer Rückbauprojekte zu gelangen, wurden in einer ausführlichen Analyse unter anderem die im Netzwerk der International Atomic Energy Agency (IAEA Nuclear Knowledge Management) hinterlegten Erfahrungswerte kerntechnischer Rückbauprojekte untersucht. Allerdings beinhalten diese Erfahrungswerte keine quantitativen und damit für die Anwendung des Planungswerkzeugs dieser Arbeit brauchbaren Informationen. Darüber hinaus wurden Unterlagen zum Rückbau der Kernkraftwerke Biblis und Brunsbüttel, des Forschungsreaktors ASTRA, des Forschungsreaktors 2 des Kernforschungszentrums Karlsruhe sowie die Sicherheitsberichte der Kernkraftwerke Neckarwestheim und Mülheim-Kärlich untersucht.

Für die **Kernkraftwerke Biblis A und Brunsbüttel** wurde bereits im Jahr 1977 eine **wissenschaftliche Untersuchung** durchgeführt, die den Rückbau dieser Anlagen untersuchte. Zum Zeitpunkt der Studie war noch kein Kernkraftwerk in Deutschland vollständig zurückgebaut, sodass wissenschaftliches Neuland betreten wurde. Es gab bereits Technologien zum Rückbau kerntechnischer Anlagen, jedoch wird in der Studie mehrfach betont, dass die Weiterentwicklung der Technologien bzw. die Neuentwicklung entsprechender Spezialwerkzeuge notwendig sei. Die einzelnen Arbeitsvorgänge zur totalen Beseitigung der beiden Reaktortypen werden in detaillierten Ablaufplänen dargestellt. Unter anderem werden Angaben zu den Abhängigkeiten zwischen den Vorgängen sowie zum zeitlichen Ablauf gemacht und es erfolgt eine Abschätzung der Dauer der Arbeitsschritte. Allerdings werden die Kosten für die jeweilige Ausführung der Maßnahmen nicht abgeschätzt und auch die Zuordnung notwendiger Ressourcen zu den Arbeitsschritten wird nicht vorgenommen. Somit bieten diese Daten einen guten Einblick in die im Jahr 1977 geplanten Arbeitsschritte und deren Abhängigkeiten, allerdings fehlen zur Planung, vor allem zur Minimierung der Rückbaukosten, relevante Angaben, wie die Vorgangskosten oder eingesetzte Ressourcen nach dem aktuellen Stand der Technik.

In Zusammenarbeit mit der IAEA wurde eine Case Study zum Rückbau des **Forschungsreaktors ASTRA** auf dem Gelände des Austrian Research Centre Seibersdorf (ARCS) durchgeführt. In der Case Study werden zentrale Arbeitsvorgänge genauer beschrieben. Die Abfolge der Beschreibungen ist jedoch nicht chronologisch, sodass sich die Vorrangreihenfolgen der Vorgänge nicht ableiten lassen. Zusätzlich fällt auf, dass viele erforderliche Bearbeitungsschritte nicht genannt werden. Darüber hinaus enthält die Studie zum Rückbau des Forschungsreaktors ASTRA keine Informationen zu den Kosten oder der konkreten Dauer der einzelnen Arbeitsschritte.

Die in der Studie zum Rückbau des **Forschungsreaktors 2 des Kernforschungszentrums in Karlsruhe** aufgeführten Arbeitsvorgänge beschreiben die einzelnen Schritte beim Zerlegen des Reaktorblocks. Die weiteren

Systeme und Gebäude werden im Rahmen der Studie nicht näher betrachtet. Die detaillierte Beschreibung der Arbeiten am Reaktorblock wird durch Strahlenschutz-, Konditionierungs- und Demontagekonzepte ergänzt. Jedoch werden die einzelnen Schritte nicht durch quantitative Daten, wie die Vorgangsdauern und entstehende Kosten, spezifiziert.

Die im Rahmen des Genehmigungsprozesses für die Stilllegung von Kernkraftwerken zu erstellenden Sicherheitsberichte enthalten Darstellungen der wichtigsten Arbeitsvorgänge beim Rückbau. Für diese Arbeit wurden die **Sicherheitsberichte zum Rückbau der Kernkraftwerke in Mülheim-Kärlich und in Neckarwestheim** genauer untersucht. Allerdings enthalten die Sicherheitsberichte ebenfalls keine quantitativen Daten (vor allem für die Vorgangsdauern und entstehenden Kosten), da diese lediglich zur ersten Spezifikation der geplanten Arbeitsvorgänge und zur Information der Aufsichtsbehörde erstellt werden. Des Weiteren werden in den Sicherheitsberichten lediglich die zentralen Schritte des Rückbaus beschrieben, sodass unzählige Arbeiten, die in der Praxis durchgeführt werden müssen, fehlen. Informationen zu den Kosten einzelner Arbeitsschritte fehlen ebenfalls. Daher kann durch die Untersuchung von Sicherheitsberichten (auch Sicherheitsberichte anderer kerntechnischer Rückbauprojekte) nur ein erster Eindruck über die Umfänge des Rückbauprojektes gewonnen werden.

In den untersuchten Dokumenten werden die durchgeführten bzw. geplanten Rückbauarbeiten teilweise lediglich qualitativ und nicht quantitativ beschrieben. In allen untersuchten Dokumenten ist die beschriebene Detailtiefe mit relevanten Informationen, vor allem Informationen zu den Kosten einzelner Vorgänge, nicht vorhanden. Aus diesem Grund waren diese Informationen für das Planungswerkzeug dieser Arbeit nicht verwendbar.

Da keine brauchbaren Daten abgeschlossener oder geplanter kerntechnischer Rückbauprojekte verfügbar waren, wurde im Rahmen dieser Arbeit

nach Bauplänen kerntechnischer Anlagen gesucht. Auch diese gefundenen Daten konnten nicht verwendet werden, da der Bau häufig unzureichend dokumentiert wurde und Änderungen während des Betriebs ebenfalls selten dokumentiert wurden.

Zusammenfassend muss festgestellt werden, dass keine Daten eines abgeschlossenen, laufenden oder zukünftigen kerntechnischen Rückbauprojektes verwendet werden konnten. Eine Gegenüberstellung eines mit Hilfe des in dieser Arbeit entwickelten Planungswerkzeugs berechneten Plans mit einem real durchgeführten Plan bzw. mit den Ereignissen während der Durchführung eines realen Projekts ist daher leider nicht möglich.

Um das in dieser Arbeit entwickelte Planungswerkzeug dennoch mit Daten testen und verifizieren zu können, wurden für diese Arbeit Referenzdaten für die Rückbauplanung kerntechnischer Anlagen erstellt. Zur Erstellung der Referenzdaten wurden Informationen verschiedener Teilprojekte, Informationen aus den Sicherheitsberichten der Kernkraftwerksbetreiber E.ON und EnBW sowie Referenzdaten von Projektpartnern aus dem Forschungsprojekt MogaMaR (Hübner et al., 2018a) zugrunde gelegt. Auf dieser Grundlage war es möglich, Referenzdaten für drei fiktive Projekte zu erstellen, die zur Verwendung des Planungswerkzeugs geeignet sind. Hierbei wurden bewusst drei Projekte unterschiedlicher Größe, d. h. mit unterschiedlicher Anzahl an Vorgängen und unterschiedlicher Anzahl an benötigten Ressourcen, gewählt, um das Planungswerkzeug auf Projekte verschiedener Größe zu kalibrieren und anzuwenden.

Die Daten der erstellten Referenzprojekte wurden durch drei Experten¹³⁹ im kerntechnischen Rückbau validiert. Hierbei wurden die Daten der

¹³⁹ Zwei Experten sind für Rückbauunternehmen kerntechnischer Anlagen tätig und befassen sich in ihrer täglichen Arbeit mit der Planung solcher Projekte. Ein weiterer Experte ist für die Dokumentation der Betriebsführung sowie der Rückbauarbeiten inkl. der Stoffströme kerntechnischer Anlagen zuständig.

erstellten Referenzprojekte mit Daten realer Daten verglichen. Somit wurde durch Experten bestätigt, dass die in dieser Arbeit verwendeten Daten den Rückbau einer fiktiven kerntechnischen Anlage, wie dieser real durchgeführt werden könnte, wiedergeben.

Im Folgenden werden die Daten der drei in dieser Arbeit untersuchten kerntechnischen Rückbauprojekte vorgestellt. Das kleinste Projekt beinhaltet den Rückbau eines Druckwasserreaktors (DWR) inklusive der Einbauten des Reaktordruckbehälters (RDB-Einbauten). Mit dem Rückbau eines Siedewasserreaktors (SWR) inklusive der RDB-Einbauten sowie dem Rückbau des Maschinenhauses stehen Daten für ein mittelgroßes Projekt zur Verfügung. Zuletzt wird mit dem Rückbau einer Gesamtanlage bis zur Grünen Wiese ein großes Projekt untersucht. Alle drei Projekte werden zunächst zur Kalibrierung und Verifikation des gesamten Planungswerkzeugs verwendet. Nach der Kalibrierung wird das große Projekt als Fallstudie zur ausführlichen Berechnung im Planungswerkzeug verwendet.

Alle im Folgenden beschriebenen Projekte enthalten Vorgänge deren Dauern bzw. deren Verteilungen der Vorgangsdauern in Tagen angegeben sind. Hierbei wird ein Ein-Schicht-Betrieb mit acht Stunden Arbeitszeit pro Arbeitstag angenommen. Des Weiteren wird die reine Arbeitszeit (inkl. Rüstzeiten, Wartungen der Werkzeuge etc.) für die Ausführung der jeweiligen Vorgänge berücksichtigt, d. h. Wochenenden oder Feiertage, an denen nicht gearbeitet wird, werden nicht berücksichtigt.

5.1.1 Rückbau eines DWR inklusive RDB-Einbauten

Das kleinste der drei Referenzprojekte beinhaltet den Rückbau eines Druckwasserreaktors (DWR) inklusive der RDB-Einbauten. Im Folgenden wird dieses Referenzprojekt auch als „Rückbau eines DWR“ oder lediglich als „DWR“ bezeichnet. Für die Simulation stehen insgesamt 55 Vorgängen (ohne Dummy-Vorgänge) zur Verfügung, wobei 50 dieser Vorgänge in

einem Modus, vier in zwei und ein Vorgang in drei Modi ausgeführt werden können (vgl. Tabelle 5.1). 51 Vorgänge werden mit Sicherheit (deterministische Ausführung) und vier Vorgänge werden mit einer Wahrscheinlichkeit $p < 1$ ausgeführt. Die Dauer von 48 Vorgängen ist deterministisch vorgegeben, wobei sieben Vorgänge eine beta-verteilte Dauer besitzen. Insgesamt bestehen zwischen den Vorgängen 30 normale und 35 no-wait Vorgangsbeziehungen. Zur Ausführung der Vorgänge werden insgesamt 36 erneuerbare Ressourcen benötigt. Zusätzlich wird eine nicht-erneuerbare Ressource verwendet, die je Vorgang und Modus die anfallenden Kosten ohne den Einbezug der Kosten durch die Ressourcennutzung angibt.

Tabelle 5.1: Charakteristika des Referenzprojekts Rückbau DWR inklusive RDB-Einbauten

Anzahl aufgeführter Vorgänge	55
Anzahl Vorgänge mit einem Modus	50
Anzahl Vorgänge mit zwei Modi	4
Anzahl Vorgänge mit drei Modi	1
Anzahl Vorgänge mit deterministischer Ausführung	51
Anzahl Vorgänge mit stochastischer Ausführung	4
Anzahl Vorgänge mit deterministischer Dauer	48
Anzahl Vorgänge mit beta-verteilter Dauer	7
Anzahl normale Nachfolgerbeziehungen	30
Anzahl no-wait Nachfolgerbeziehungen	35
Anzahl erneuerbarer Ressourcen	36
Anzahl nicht-erneuerbarer Ressourcen (Kosten je Vorgang und Modus ohne Ressourcenkosten)	1

Das in Abbildung 5.1 dargestellte stochastische Netzwerk (Vorgangsknotennetzplan) zeigt, dass der Projektablauf zumeist sequentiell verläuft. Aufgrund technisch gegebener Vorgangsreihenfolgen ist bei einigen Vorgängen vorgegeben, dass diese hintereinander ausgeführt werden müssen.

Die im Netzwerk abgebildeten Vorgänge sind nummeriert und der jeweilige Vorgangsname kann Tabelle 5.2 entnommen werden.

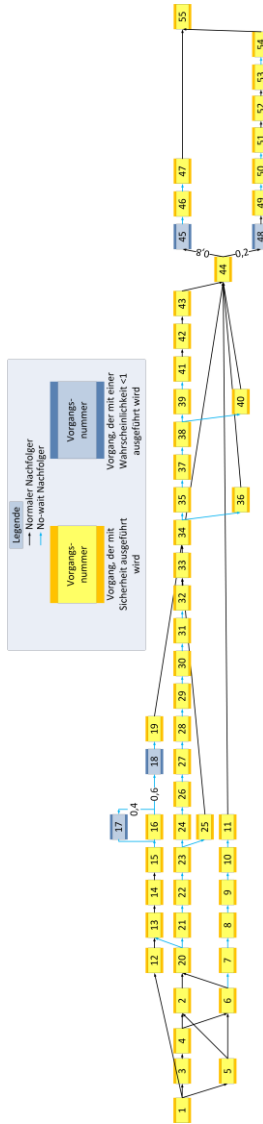


Abbildung 5.1: Vorgangsknotennetzplan des Referenzprojekts Rückbau DWR inklusive RDB-Einbauten

Tabelle 5.2: Vorgangsnamen des Referenzprojekts Rückbau DWR inklusive RDB-Einbauten

Nr.	Vorgangname
1	Einbau eines Beckenbodenschutzes und Einzug einer Arbeitsbühne im Brennelementlagerbecken und im Reaktorbecken
2	Fluten von Flut- und Brennelementlagerbecken und Reaktorbecken
3	Installation Zerlegemaschinen und Vorbereitung Zerlegeplätze
4	Einbringen eines Wassertopfes/Abschirmbehälters zur Vermeidung der Abrasiv-Ausbreitung beim WASS-Verfahren
5	Installation einer Anlage zur Dekontamination abgebauter Teile inkl. Luftabsaugung/Filtertechnik
6	Entfernen der Deckelschrauben und Heben des RDB-Deckels auf den Reaktorbedienungsflur
7	Vordekontamination des RDB-Deckels
8	Zerlegung des RDB-Deckels
9	Transport des RDB-Deckels zur Nachdekontamination und Nachzerlegung
10	Nachdekontamination des RDB-Deckels
11	Freimessung (inkl. Dokumentation) und Lagerung bis zum Abtransport oder Einbringung in das Zwischenlager
12	Demontage, Vorzerlegung und Transport zur Nachbehandlung der nuklearen Messtechnik (Sonden, Messköpfe)
13	Demontage, Vorzerlegung und Transport zur Nachbehandlung der Instrumentierungsanzlen
14	Lagerung bis zur Nachbehandlung der Instrumentierungsanzlen
15	Zerlegung der Instrumentierungsanzlen in Einzelteile
16	Identifikation und Beseitigung festsitzender Kontamination, Freimessung (inkl. Dokumentation) und verpacken der Einzelteile der Instrumentierungsanzlen
17	Nacharbeiten für Dekontamination
18	Freimessung (inkl. Dokumentation) und verpacken der Einzelteile der Instrumentierungsanzlen
19	Lagerung bis zum Abtransport der Instrumentierungsanzlen
20	OKG: Ausheben OKG auf Drehteller
21	OKG: SSFE demontieren, ggf. puffern und auf Ablängsäge zerlegen
22	OKG: SSFE-Stützen abtrennen
23	OKG: Tragstützen abtrennen
24	Trennen der SSFE-Stützrippen
25	Zerlegen der SSFE-Stützen
26	Zerlegen der Tragstützen

27	Zerlegen der Gitterplatte
28	Lösen der Verschraubungen Oberer Rost mit Deckplatte
29	Abheben der Deckplatte und auf Drehteller ablegen
30	In-Rost-Struktur verbliebene SSFE-Stützen trennen und ausheben
31	Oberen Rost mittels WASS auf KC-Gebindegröße zerlegen
32	Tragring auf Drehteller zerlegen
33	UW-NZ-Bereich räumen
34	UKG: Ausheben UKG auf Drehteller
35	UKG: Kernbehälter inkl. Kernumfassung und Formrippen zerlegen
36	Siebtonne / Schemel von Kalotte lösen
37	Unteren Rost in Wassertopf stellen und mittels WASS zerlegen
38	Stauplatte mittels WASS zerlegen
39	Tragring auf Drehteller heben und mit Mastbandsäge zerlegen
40	Abrasiv aus Wassertopf absaugen und UW-NZ-Bereich räumen
41	Ausheben der Siebtonne / Schemels auf Drehteller und zerlegen
42	Ausräumen und Reinigung des Reaktorbeckens
43	Schrittweise Trockenlegung und Trocknung des RDB & Zerlegung des RDB: Der Füllstand wird bis zur jeweiligen Schnitthöhe abgesenkt
44	Probemessung der Kalotte
45	Zerlegen der Kalotte (wenn keine Alpha-Strahler gefunden wurden)
46	Dekontamination der Einzelteile der Kalotte
47	Freimessung (inkl. Dokumentation) und verpacken der Einzelteile der Kalotte
48	Errichtung einer Einhausung um die Kalotte (wenn Alpha-Strahler gefunden wurden)
49	Vordekontamination der Kalotte
50	Zerlegung der Kalotte in Einzelteile
51	Verpacken der Einzelteile
52	Transport zur Dekontaminationsnachbehandlung
53	Dekontamination der Einzelteile
54	Freimessung (inkl. Dokumentation) und verpacken der Einzelteile der Kalotte
55	Errichten Grüne Wiese

Die blauen Pfeile in Abbildung 5.1 zeigen die no-wait und die schwarzen Pfeile die normalen Vorgangsbeziehungen an. Einerseits können zwischen sequentiell auszuführenden Vorgängen, aber auch zwischen verschiedenen Strängen sequentieller Vorgänge normale und no-wait

Vorgangsbeziehungen bestehen (vgl. Abbildung 5.2). Bei der Planung muss daher beachtet werden, dass die no-wait Nachfolger ohne Unterbrechung hintereinander ausgeführt werden.

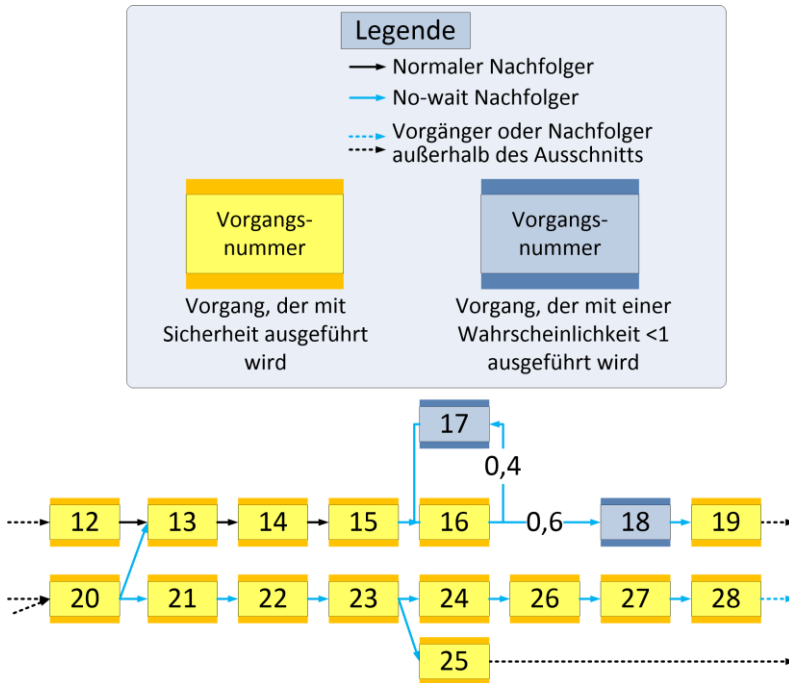


Abbildung 5.2: Normale und no-wait Nachfolger im Referenzprojekt Rückbau DWR inklusive RDB-Einbauten

Des Weiteren ist zu sehen, dass die in blau gekennzeichneten Knoten, welche die Vorgänge mit stochastischer Ausführung repräsentieren, zur Ausführung alternativer Stränge sequentieller Vorgänge führen können. Beispielsweise wird die Kalotte nach ihrer Probemessung (Vorgangsnummer 44) mit einer Wahrscheinlichkeit von 80 % ohne Vorbehandlung zerlegt, wenn keine Alpha-Strahler gefunden wurden

(Vorgangsnummer 45) (vgl. Abbildung 5.3). An den Vorgang mit der Nummer 45 schließen sich weitere Vorgänge an (als nächstes Vorgang 46), die sequentiell ausgeführt werden müssen. Während der Probemessung können allerdings mit einer 20 %igen Wahrscheinlichkeit Alpha-Strahler gefunden werden, sodass zur Dekontamination zunächst eine Einhausung um die Kalotte errichtet werden muss (Vorgangsnummer 48).

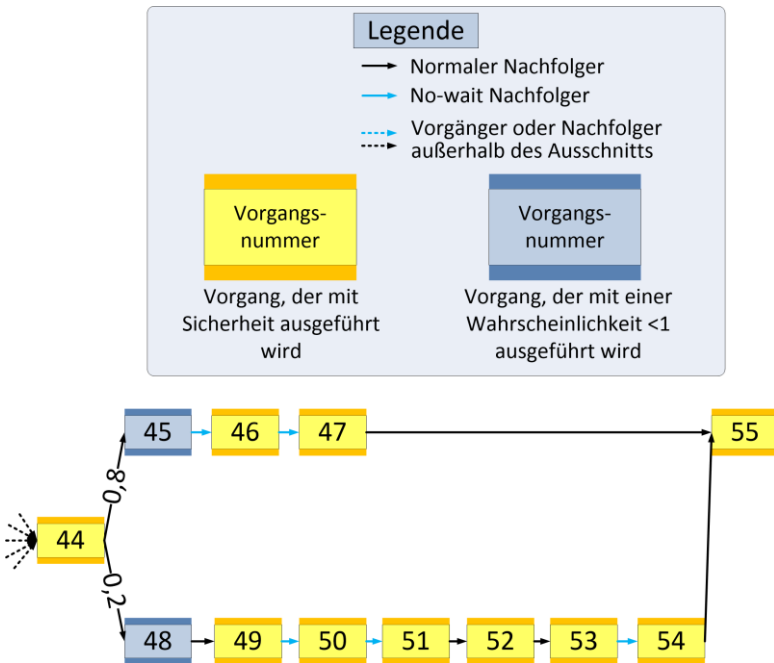


Abbildung 5.3: Stochastische Ausführung paralleler Stränge sequentieller Vorgänge im Referenzprojekt Rückbau DWR inklusive RDB-Einbauten

Darüber hinaus ist in diesem Netzwerk ein Zyklus vorhanden, der aufgrund von Nacharbeiten im Rahmen von Dekontaminationsmaßnahmen mit einer Wahrscheinlichkeit von 40 % ausgeführt wird (vgl. Vorgang 17 in Abbildung 5.2). Da Nacharbeiten im Rahmen von Dekontaminationsvorgängen (z. B.

das Abtragen der Oberfläche) nicht beliebig oft ausgeführt werden können (vgl. Kapitel 2.4.2), wird die Ausführung der Nacharbeiten auf maximal zwei begrenzt.

5.1.2 Rückbau eines SWR inklusive RDB-Einbauten sowie Rückbau des Maschinenhauses

Als mittelgroßes Referenzprojekt wird der Rückbau eines Siedewasserreaktors (SWR) inklusive der RDB-Einbauten sowie der gleichzeitig zu planende Rückbau des Maschinenhauses untersucht (im Folgenden auch als „Rückbau eines SWR“ oder als „SWR“ bezeichnet). Für die Simulation stehen insgesamt 92 Vorgänge zur Verfügung, von denen 87 in einem Modus, vier in zwei Modi und ein Vorgang in drei Modi ausgeführt werden können (vgl. Tabelle 5.3). 84 der 92 Vorgänge werden mit Sicherheit und acht Vorgänge mit einer Wahrscheinlichkeit $p < 1$ ausgeführt. Die Dauern von 75 Vorgängen sind deterministisch vorgegeben, wogegen bei 17 Vorgängen die Dauern beta-verteilt sind. Zwischen den Vorgängen bestehen insgesamt 99 normale und 19 no-wait Vorgangsbeziehungen. Es kann aus 37 erneuerbaren Ressourcen gewählt werden und eine nicht-erneuerbare Ressource repräsentiert die Kosten je Vorgang und Modus ohne den Einbezug der variablen sowie Beschaffungskosten der erneuerbaren Ressourcen.

Tabelle 5.3: Charakteristika des Referenzprojekts Rückbau SWR inklusive RDB-Einbauten sowie Rückbau des Maschinenhauses

Anzahl aufgeführter Vorgänge	92
Anzahl Vorgänge mit einem Modus	87
Anzahl Vorgänge mit zwei Modi	4
Anzahl Vorgänge mit drei Modi	1
Anzahl Vorgänge mit deterministischer Ausführung	84
Anzahl Vorgänge mit stochastischer Ausführung	8
Anzahl Vorgänge mit deterministischer Dauer	75
Anzahl Vorgänge mit beta-verteilter Dauer	17
Anzahl normale Nachfolgerbeziehungen	99
Anzahl no-wait Nachfolgerbeziehungen	19
Anzahl erneuerbarer Ressourcen	37
Anzahl nicht-erneuerbarer Ressourcen (Kosten je Vorgang und Modus ohne Ressourcenkosten)	1

Analog zum Rückbauprojekt des DWR (vgl. Kapitel 5.1.1) sind auch beim Rückbauprojekt des SWR einige Vorgänge sequentiell, d. h. hintereinander, auszuführen. Teilweise ähneln sich die auszuführenden Vorgänge, da ähnliche Bauteile rückzubauen sind. Allerdings sind teilweise auch andere Rückbauarbeiten auszuführen, insbesondere aufgrund der unterschiedlichen Funktionsweise (vgl. Kapitel 2.2.2) oder unterschiedlicher Bauteile (vgl. Kapitel 2.2.3). Zusätzlich zu dem in Kapitel 5.1.1 betrachteten Rückbauprojekt, sind in diesem Projekt neben dem Reaktordruckbehälter und seinen Einbauten auch das Maschinenhaus und alle darin verbauten Komponenten rückzubauen (siehe rot umrandetes Teilnetzwerk

in Abbildung 5.4 oder die Detailansicht in Abbildung 5.5). Dieser Teil des Rückbaus könnte als eigenes unabhängiges Teilprojekt ausgelagert werden, beispielsweise wenn dieses als Auftrag an ein Subunternehmen vergeben würde. Allerdings ist es möglich, durch eine integrierte Betrachtung als Gesamtprojekt Ressourcen, die in allen Teilprojekten benötigt werden, besser aufzuteilen. Hierbei kann es sich bei den Ressourcen beispielsweise um den Strahlenschutz, Hebewerkzeuge, Behältnisse oder spezialisierte Mitarbeiter handeln. Mit Hilfe einer integrierten Betrachtung in einem Gesamtprojekt können die Ressourcen hinsichtlich ihrer zu beschaffenden Anzahl und ihres Einsatzes so eingeplant werden, dass Kosten im Vergleich zum erforderlichen Ressourceneinsatz bei zwei Teilprojekten eingespart werden.

Der Vorgangsknotennetzplan des Referenzprojekts SWR in Abbildung 5.4 soll die zunehmende Komplexität bei der Berücksichtigung zusätzlicher Vorgänge in einem Projekt darstellen. Die zugehörigen Vorgänge dieses Referenzprojekts sind in Anhang A.3 aufgeführt.

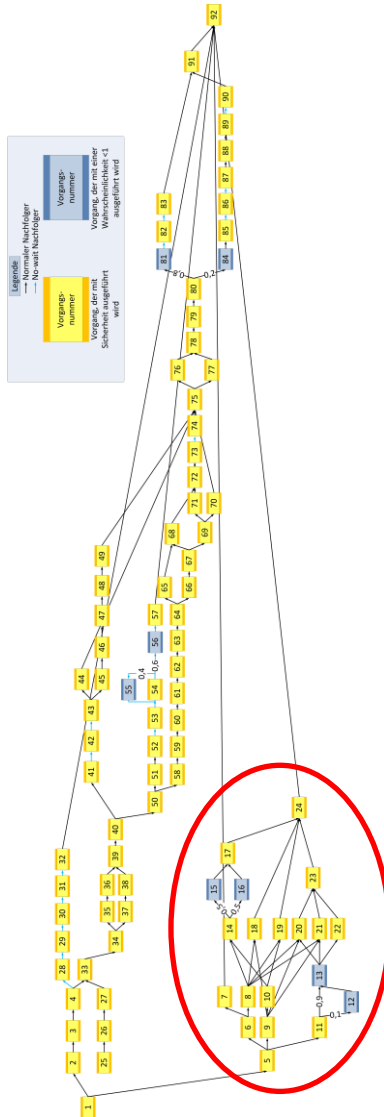


Abbildung 5.4: Vorgangsknotenetzplan des Referenzprojekts Rückbau eines SWR inklusive RDB-Einbauten sowie Rückbau des Maschinenhauses (rot umkreist)

In diesem Referenzprojekt sind ebenfalls normale und no-wait Nachfolger, Vorgänge mit stochastischer Ausführung sowie Zyklen enthalten. Da diese exemplarisch bereits in Kapitel 5.1.1 aufgezeigt wurden, wird darauf nicht weiter eingegangen.

Die zum Rückbau des Maschinenhauses und seiner Komponenten auszuführenden Vorgänge sind im Gegensatz zum Rückbau der Einbauten des Reaktordruckbehälters bzgl. der Reihenfolge ihrer Ausführung flexibler planbar, da weniger sequentiell, sondern mehr parallel angeordnete Vorgänge existieren (vgl. Abbildung 5.5).

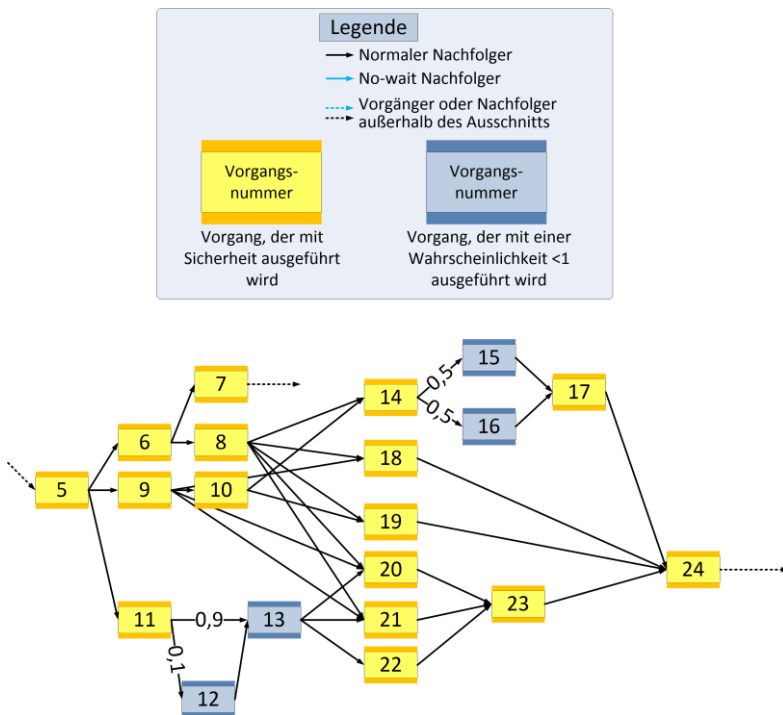


Abbildung 5.5: Rückbau des Maschinenhauses des Referenzprojekts Rückbau eines SWR inklusive RDB-Einbauten sowie Rückbau des Maschinenhauses

5.1.3 Rückbau einer Gesamten Anlage bis zur Grünen Wiese

Zuletzt wird der Rückbau einer gesamten kerntechnischen Anlage bis zur Grünen Wiese betrachtet (im Folgenden auch als „Rückbau einer Gesamtanlage“ bezeichnet). Dieses Projekt umfasst den Rückbau des Reaktor-druckbehälters (ein DWR), der RDB-Einbauten, alle Komponenten des Reaktorraums, den Rückbau des Kühlsystems, den Rückbau der Turbinen, des Generators und aller Komponenten des Maschinenhauses sowie den Rückbau aller Gebäudestrukturen. Dieses Gesamtprojekt ist im Gegensatz zu den bisher aufgeführten Referenzprojekten der Kapitel 5.1.1 und 5.1.2 mit etwa 300 Vorgängen sehr umfangreich. Allerdings können zu planende kerntechnische Rückbauprojekte noch umfassender sein als das im Folgenden beschriebene Referenzprojekt. Da das Referenzprojekt basierend auf Daten verschiedener Quellen (siehe erster Abschnitt von Kapitel 5.1) erstellt wurde, ist die Darstellung des Referenzprojekts einer Gesamtanlage bis zur Grünen Wiese von den verfügbaren Daten abhängig. Da diese Daten nicht bis in die letzte Detaillierungsebene des Rückbaus zur Verfügung standen, sind die im Referenzprojekt aufgeführten Daten bis zu dieser Detaillierungsebene limitiert.

Des Weiteren war es das Ziel, dass alle Vorgänge des Referenzprojekts in der gleichen Detaillierungsebene beschrieben werden, d. h. dass nicht unterschiedliche Teilprojekte in unterschiedlichen Detaillierungstiefen beleuchtet werden. Aus diesem Grund ist beispielsweise die Betrachtung der einzusetzenden Ressourcen nicht so detailliert wie es in den Referenzprojekten der Kapitel 5.1.1 und 5.1.2 der Fall ist.

Insgesamt ergibt sich ein Projekt mit 305 Vorgängen, die für die Simulation genutzt werden können. Dies stellt im Gegensatz zu den in dieser Arbeit identifizierten Scheduling Problemen und Lösungsverfahren, welche mit ca. 30 bis 60 Vorgängen rechnen (vgl. u. a. Kapitel 3.4.1 sowie die Erkenntnisse in Kapitel 3.4.3), ein vergleichsweise großes und komplexes Projekt

dar (vgl. Abbildung 5.6). Die Komplexität dieses Referenzprojekts im Gegensatz zu den bisher betrachteten Projekten in der Literatur besteht des Weiteren darin, dass das Referenzprojekt des Gesamtückbaus in Zeitscheiben von Tagen betrachtet wird (im Vergleich dazu hatte Bartels (2009) Zeitscheiben von drei Monaten betrachtet) und die Obergrenze der maximalen Projektdauer T gemäß der Formel (4.30) in Kapitel 4.4.3 bei 4.787 Tagen liegt. Trotz der Komplexität dieses Referenzprojekts aufgrund der Projektgröße werden darüber hinaus zum ersten Mal zusätzliche Nebenbedingungen, wie no-wait Nachfolgerbeziehungen, und die Zielsetzung der Kostenminimierung kombiniert.

Von den 305 aufgeführten Vorgängen können 268 in einem Modus, sieben in zwei und 30 Vorgänge in drei Modi ausgeführt werden (vgl. Tabelle 5.4). Da die Detailtiefe nicht so ausgeprägt vorliegt, wie es in den Beispielprojekten der Kapitel 5.1.1 und 5.1.2 der Fall ist, sind Vorgänge mit stochastischer Ausführung seltener aufgeführt. Beispielsweise wird der in Abbildung 5.2 in Kapitel 5.1.1 beschriebene Dekontaminationsvorgang (Vorgang 17), welcher mit einer vorgegebenen Wahrscheinlichkeit wiederholt werden muss, in diesem Gesamtprojekt nicht explizit betrachtet. Solche Unsicherheiten in der Ausführung werden allerdings aufgrund der höheren Detailtiefe durch die beta-verteilten Vorgangsdauern berücksichtigt (die mehrfache Ausführung führt zu einer längeren Vorgangsdauer des aggregierten Vorgangs wogegen eine einmalige Ausführung in einer kürzeren Vorgangsdauer resultiert). In diesem Gesamtprojekt sind lediglich zwei Vorgänge mit stochastischer Ausführung vorhanden. Hierbei handelt es sich um die Entscheidung, ob der Generator verkauft oder verschrottet wird. Abhängig von dieser Entscheidung sind alternative Vorgänge auszuführen.

240 Vorgänge besitzen eine deterministische Dauer und die Dauer von 65 Vorgängen ist beta-verteilt. Insgesamt bestehen in diesem Projekt 333 normale Nachfolgerbeziehungen und 107 no-wait Nachfolgerbeziehungen zwischen den Vorgängen. Wie bereits oben beschrieben wurde, werden

lediglich 22 unterschiedliche erneuerbare Ressourcen berücksichtigt. Zusätzlich repräsentiert (wie bei den beiden vorherigen Projekten) eine nicht-erneuerbare Ressource die Kosten je Vorgang und Modus ohne den Einbezug der variablen sowie Beschaffungskosten der erneuerbaren Ressourcen.

Tabelle 5.4: Charakteristika des Referenzprojekts Rückbau einer Gesamtanlage bis zur Grünen Wiese

Anzahl aufgeführter Vorgänge	305
Anzahl Vorgänge mit einem Modus	268
Anzahl Vorgänge mit zwei Modi	7
Anzahl Vorgänge mit drei Modi	30
Anzahl Vorgänge mit deterministischer Ausführung	303
Anzahl Vorgänge mit stochastischer Ausführung	2
Anzahl Vorgänge mit deterministischer Dauer	240
Anzahl Vorgänge mit beta-verteilter Dauer	65
Anzahl normale Nachfolgerbeziehungen	333
Anzahl no-wait Nachfolgerbeziehungen	107
Anzahl erneuerbarer Ressourcen	22
Anzahl nicht-erneuerbarer Ressourcen (Kosten je Vorgang und Modus ohne Ressourcenkosten)	1

Viele der Stränge an sequentiell auszuführenden Vorgängen in diesem Gesamtprojekt sind im Verhältnis zu anderen Strängen sequentiell, wobei sowohl no-wait als auch normale Vorgangsbeziehungen zwischen

Vorgängen eines Strangs bestehen. Die Stränge können parallel ausgeführt werden, sofern ausreichend viele Ressourcen zur Verfügung stehen. Zwischen den Strängen bestehen lediglich normale Vorgangsbeziehungen, allerdings können viele Vorgänge erst ausgeführt werden, wenn ihre Vorgänger abgeschlossen sind. Insgesamt bestehen viele Abhängigkeiten im Gesamtprojekt, was an den vielen Pfeilen in Abbildung 5.6 zu erkennen ist. Abbildung 5.6 ist lediglich eingefügt, um die Komplexität (Anzahl an Vorgängen und die vielen Anhängigkeiten) des Gesamtprojekts aufzuzeigen. Eine detaillierte Betrachtung der wesentlichen Eigenschaften erfolgt im Folgenden. Die zugehörigen Vorgänge dieses Referenzprojekts sind in Anhang A.4 aufgeführt.

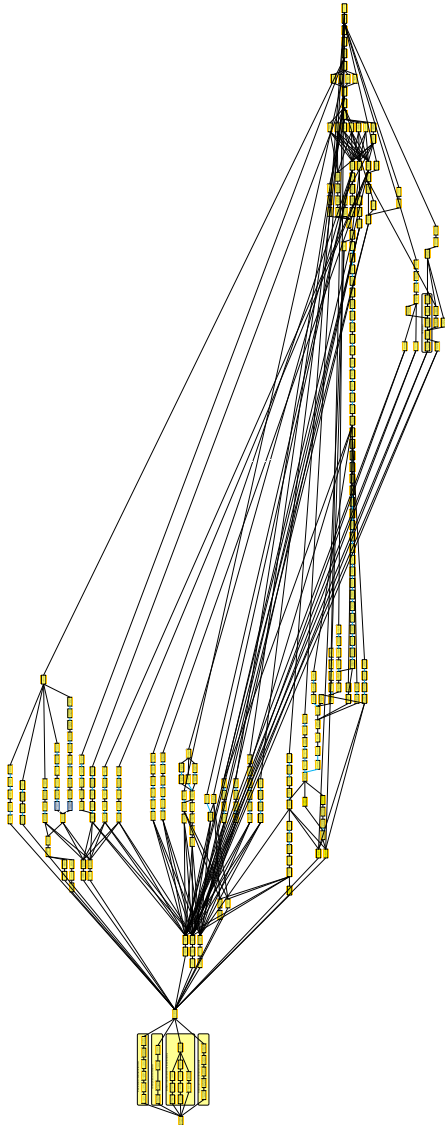


Abbildung 5.6: Vorgangsknotennetzplan des Referenzprojekts Rückbau einer Gesamtanlage bis zur Grünen Wiese

Wie bereits in Abbildung 5.6 zu sehen ist, ist zu Beginn des Rückbaus zunächst ein Bündel an Vorgängen auszuführen. Das Projekt startet mit der radiologischen Charakterisierung, die teilweise bereits in der Nachbetriebsphase beginnt und auch während des gesamten Rückbaus durchgeführt wird (teilweise als eigene Vorgänge im Netzwerk explizit hervorgehoben). Nach der ersten radiologischen Charakterisierung beginnen vier vorbereitende Maßnahmen, die unabhängig voneinander ausgeführt werden können und alle abgeschlossen sein müssen, damit die Rückbauarbeiten starten können. Hierbei handelt es sich um (vgl. Abbildung 5.7):

- Organisatorische Beistellungen/Maßnahmen (z. B. Überwachungssysteme (Vorgang 4) oder die Installation von Ausstattungen zur Dekontamination von Personen (Vorgang 7))
- Erstellung von Ersatzsystemen/Ersatzmaßnahmen (z. B. Energieversorgung (Vorgang 25) und Aufbau von Lüftungs-/Filtersystemen (Vorgang 16))
- Schaffen der Strukturen zur Abfall- und Reststoffbehandlung (z. B. die Errichtung von Transportrouten und Schleusen (Vorgang 24) oder die Installation einer Anlage zur Dekontamination abgebauter Teile (Vorgang 8))
- Freischalten und Entfernen/Behandeln von Betriebsstoffen (z. B. Beseitigung nicht mehr benötigter System-Flüssigkeiten (Vorgang 31) oder betrieblicher Abfälle (Vorgang 34))

Erst nachdem all diese vorbereitenden Maßnahmen abgeschlossen sind, kann mit den Rückbauarbeiten begonnen werden.

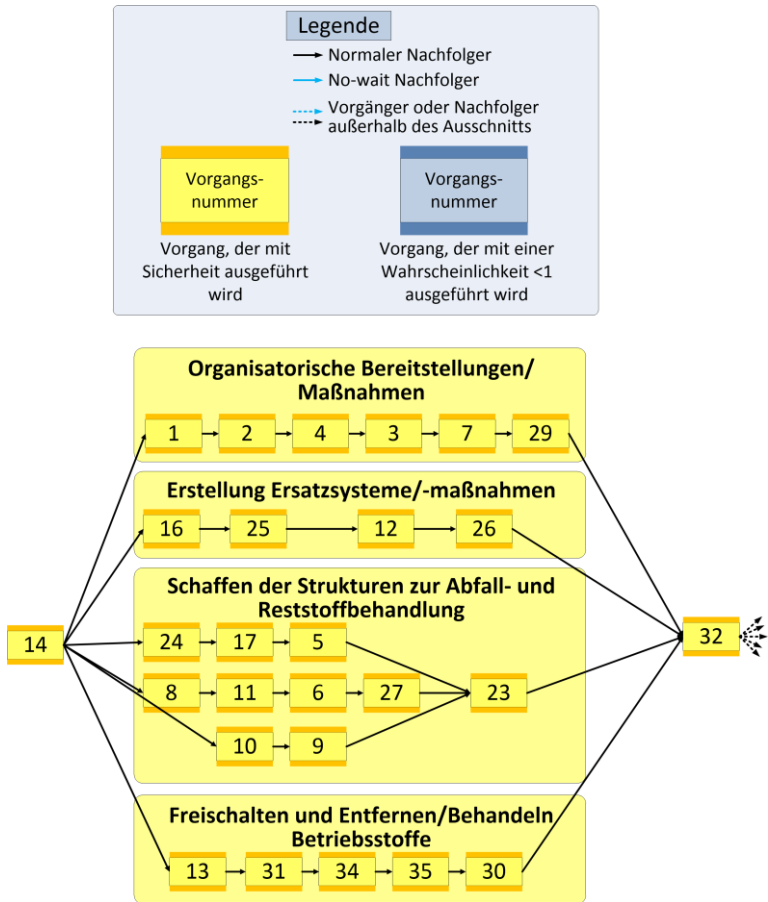


Abbildung 5.7: Vorbereitende Maßnahmen im Referenzprojekt „Rückbau einer Gesamtanlage bis zur Grünen Wiese“

Zu den in diesem Projekt beschriebenen Vorgängen ist anzumerken, dass ein komponentenweiser Rückbau unterstellt wird. In der Praxis wird demgegenüber häufig ein raum- bzw. abbaubereichsbezogener Rückbau durchgeführt. Hierzu werden auf Basis der radiologischen

Charakterisierung/Kategorisierung Abbaubereiche definiert. Für diese Abbaubereiche werden die konkreten Abbauvorhaben geplant und ausgearbeitet (Arbeitsmappen mit einer Beschreibung des Vorgehens beim Abbau, resultierende Abbauaufträge/-arbeitsscheine sowie eine kaufmännische Betrachtung auf dieser Ebene). Anschließend werden die Abbaubereiche raumweise abgearbeitet, indem jeder Bereich leergeräumt und freigemessen wird. Eine Ausnahme bilden hierbei Großkomponenten wie die Turbine, der Generator oder der Reaktordruckbehälter. Alle Bauteile und Komponenten werden so zersägt, dass sie in speziellen Behältern (Behälter, in denen sich abgebaute Teile befinden, werden als Gebinde bezeichnet) verpackt werden können. Die resultierenden Gebinde werden der Rückbaulogistik übergeben und in die Strukturen zur Abfall- und Reststoffbehandlung eingespeist (z. B. in einem Reststoffbearbeitungszentrum behandelt).

Das Planungswerkzeug, welches in dieser Arbeit beschrieben wird, ist auch in der Lage, einen Rückbauplan für einen raum- bzw. abbaubereichsbezogenen Rückbau zu berechnen. Hierzu müssten die Vorgänge und einige Vorgangsbeziehungen abgeändert werden. Da aus Sicht einiger Experten ein komponentenweiser Rückbau sowohl möglich und aufgrund der logischen Reihenfolge intuitiver nachvollziehbar ist, wird diese Art des Rückbaus auch in dieser Arbeit angewendet.

Für den Rückbau einiger Komponenten sind zusätzliche, vorbereitende Maßnahmen nötig. Beispielsweise sind vor dem Rückbau des Reaktordruckbehälters eine neue Materialschleuse und eine Einhausung zu errichten. In diesem Projekt wird der Rückbau folgender Komponenten betrachtet:

- Notstromaggregate
- Abgasanlage
- Turbine

- Generator (hierbei wird entschieden, ob der Generator verkauft (80 % Wahrscheinlichkeit) oder verschrottet wird (20 % Wahrscheinlichkeit))
- Kondensationskammern
- Kondensatoren
- Speisewasserpumpe
- Speisewasservorwärmer
- Dampftrockner
- Dampferzeuger und Komponenten
- Druckhalter
- Umwälzpumpen
- Wasserreinigung
- Wasserstandkontrolle inkl. Wasserstandkontrollbecken
- Reaktorschnellabschaltung
- Reaktordruckbehälter inkl. Betonriegel über dem Flutbecken, RDB-Deckel, RDB-Einbauten
- Biologischer Schild und Containment
- Wasserkreisläufe (Primär- und Sekundärkreislauf) sowie Kanalisation
- Gebäudestrukturen und Kühltürme

Zuletzt werden auch die Vorgänge „Errichtung der Grünen Wiese“ und „Erstellung des Gesamtabschlussberichts“ geplant.

Dieses Referenzprojekt dient zunächst gemeinsam mit den anderen beiden Referenzprojekten zur Verifikation und Kalibrierung des Planungswerkzeugs. Anschließend wird das Referenzprojekt des Rückbaus einer Gesamtanlage bis zur Grünen Wiese als Fallstudie verwendet. Mit Hilfe dieser Fallstudie wird die Funktionsweise des kalibrierten Planungswerkzeugs genauer vorgestellt.

5.2 Bestimmung optimierter Rückbaupläne und deren Robustheit

Da bislang zu wenige Erfahrungswerte im Expertensystem enthalten sind (vgl. Kapitel 4.2.3 und Kapitel 5.1), ist eine Kombination der Daten verschiedener Projekte nicht möglich, um Daten für ein neu zu planendes Rückbauprojekt zu erhalten. Stattdessen entspricht die Abfrage der Daten aus dem Expertensystem derzeit lediglich den Daten der einzelnen Referenzprojekte. Mit zunehmender Anzahl an im Expertensystem hinterlegten Daten, können diese kombiniert werden und die regelbasierten Abfragen geben die relevanten Daten für ein neu zu planendes Projekt aus. Da eine Kombination verschiedener Daten nicht möglich ist, sind die Daten der Referenzprojekte mit Unsicherheiten belegt und werden ohne die Abfrage aus dem Expertensystem verwendet.

Die mit Unsicherheiten belegten Daten der Referenzprojekte aus den Kapiteln 5.1.1, 5.1.2 und 5.1.3 dienen zur Kalibrierung und Verifikation des Planungswerkzeugs (Kapitel 5.2.1). Hierzu werden je Referenzprojekt verschiedene Szenarien simuliert. Mit Hilfe des kalibrierten Planungswerkzeugs werden für das Projekt des Rückbaus einer Gesamtanlage (Kapitel 5.1.3) jeweils kostenoptimierte Schedules berechnet (Kapitel 5.2.2) und unter den optimierten Szenarien ein robuster Schedule identifiziert (Kapitel 5.2.5).

5.2.1 Szenariosimulation und Kalibrierung der Parameter für die Optimierung

Mit Hilfe von simulierten Szenarien werden die zur Optimierung benötigten Parameter des MLS- und des ALNS-Algorithmus kalibriert. Insgesamt werden für jedes der drei Referenzprojekte 200 Szenarien

simuliert, von denen je Referenzprojekt 100 Szenarien zur Kalibrierung und 100 Szenarien zum Testen vorgesehen sind¹⁴⁰. Dadurch wird gewährleistet, dass nicht die gleichen Szenarien zur Kalibrierung und zum Testen verwendet werden. Es werden bewusst drei Referenzprojekte unterschiedlicher Größe (Anzahl Vorgänge, Anzahl Ressourcen, unterschiedliche Nachfolgerbeziehungen etc.) verwendet, sodass die kalibrierten Parameter für jede Projektgröße getestet werden und verwendbar sind. Im Folgenden werden die jeweils 200 Szenarien der drei Referenzprojekte beschrieben.

Die zur Kalibrierung je Referenzprojekt simulierten Szenarien unterscheiden sich aufgrund der bereits in Kapitel 5.1 beschriebenen Struktur in der Anzahl an Vorgängen, der Anzahl an Vorgängen mit unterschiedlichen Modi, der Anzahl an Vorgängen mit stochastischer oder deterministischer Ausführung, in der Dauer und den Nachfolgerbeziehungen (vgl. die Projekteigenschaften in Tabelle 5.1, Tabelle 5.3 und Tabelle 5.4).

Die simulierten Szenarien des **Rückbaus eines DWR inklusive der RDB-Einbauten** besitzen zwischen 47 und 55 Vorgänge, von denen abhängig vom Szenario vier bis sieben Vorgänge in mehr als einem Modus ausgeführt werden können. Die Anzahl der normalen Nachfolgerbeziehungen schwankt zwischen 25 und 28 und die Anzahl der no-wait Nachfolgerbeziehungen liegt zwischen 30 und 35 (vgl. Tabelle 5.5).

Im Gegensatz zum DWR sind in den simulierten Szenarien des Referenzprojekts **Rückbau eines SWR inklusive RDB-Einbauten sowie Rückbau des Maschinenhauses** 82 bis 92 Vorgänge auszuführen. Je nach Szenario können von diesen Vorgängen vier bis sieben Vorgänge in mehr als einem

¹⁴⁰ Wie im Folgenden beschrieben, werden bei der Anwendung des MLS-Algorithmus für das DWR-Projekt bereits optimale Schedules berechnet. Um die Kalibrierungsergebnisse dadurch nicht zu verzerren, werden die 100 Szenarien des DWR-Projekts zur Kalibrierung im Folgenden nicht verwendet.

Modus ausgeführt werden. 66 bis zu 72 Vorgänge besitzen normale und 14 bis 19 Vorgänge besitzen no-wait Nachfolgerbeziehungen. Insgesamt sind, abhängig vom Szenario, 86 bis zu 94 normale und 14 bis 19 no-wait Nachfolgerbeziehungen je Szenario enthalten (vgl. Tabelle 5.5).

Mit 295 bis zu 299 Vorgängen besitzen die simulierten Szenarien des Referenzprojekts **Rückbau einer Gesamtanlage bis zur Grünen Wiese** im Gegensatz zu den anderen Referenzszenarien deutlich mehr Vorgänge. In den simulierten Szenarien dieses Referenzprojekts können 33 bis 37 Vorgänge in mehr als einem Modus ausgeführt werden, 204 bis 206 Vorgänge besitzen normale und 100 bis 102 Vorgänge no-wait Nachfolgerbeziehungen. Die Anzahl aller normalen Nachfolgerbeziehungen schwankt je nach Szenario zwischen 328 und 330 und die Anzahl aller no-wait Nachfolgerbeziehungen schwankt zwischen 101 und 103 (vgl. Tabelle 5.5).

Es ist zu erkennen, dass für jedes der drei Referenzprojekte die 100 Szenarien für die Kalibrierung und die 100 Szenarien zum Testen bzgl. der aufgeführten Kennzahlen gleich sind (vgl. Tabelle 5.5). Allerdings ist zu berücksichtigen, dass diese Kennzahlen nicht zwangsläufig aussagen, dass die simulierten Szenarien identisch sind.

Tabelle 5.5: Eigenschaften der simulierten Szenarien zur Kalibrierung und zum Testen

Projekt	Anzahl Szenarien	Anzahl Vorgänge	Anzahl Vorgänge mit mehr als einem Modus	Anzahl Vorgänge mit einer Erhöhung der Restbetriebskosten	Anzahl Vorgänge mit einer Reduktion der Restbetriebskosten	Anzahl verwendete erneuerbare Ressourcen	Anzahl Vorgänge mit normalen Nachfolgerbeziehungen	Anzahl normale Nachfolgerbeziehungen	Anzahl Vorgänge mit no-wait Nachfolgerbeziehungen	Anzahl no-wait Nachfolgerbeziehungen
DWR	100	47-55	4-7	0	0	36	21-24	25-28	26-31	30-35
	100	47-55	4-7	0	0	36	21-24	25-28	26-31	30-35
SWR	100	82-92	4-7	4	2	37	66-72	86-94	14-19	14-19
	100	82-92	4-7	4	2	37	66-72	86-94	14-19	14-19
Gesamter Rückbau	100	295-299	33-37	7	12	22	204-206	328-330	100-102	101-103
	100	295-299	33-37	7	12	22	204-206	328-330	100-102	101-103

Die ersten 100 simulierten Szenarien der drei Referenzprojekte sind zur Kalibrierung der Parameter des MLS- sowie des ALNS-Algorithmus vorgesehen.

Als Maß der Ergebnisqualität der Kalibrierung wird die sogenannte *relative optimality gap* verwendet. Hierbei handelt es sich um die relative Abweichung der oberen Schranke UB (upper bound: Kosten des berechneten Schedules c^{best}) zur unteren Schranke LB (lower bound: vgl. Formel (4.31)

in Kapitel 4.4.3 zur Berechnung der LB). Somit berechnet sich die relative optimality gap wie folgt:

$$\text{relative optimality gap} = \frac{UB - LB}{LB} \quad (5.1)$$

Es ist zu beachten, dass die relative optimality gap von der sogenannten *relative tolerance gap* zu unterscheiden ist. Während die relative optimality gap die relative Abweichung der oberen Schranke zur unteren Schranke angibt (bezogen auf die untere Schranke), besagt die relative tolerance gap, um wie viel Prozent sich die obere Schranke, d. h. der aktuell berechnete Zielfunktionswert, theoretisch verbessern kann. Somit wird die absolute gap ins Verhältnis zur (aktuellen) oberen Schranke gesetzt:

$$\text{relative tolerance gap} = \frac{UB - LB}{UB} \quad (5.2)$$

Die relative optimality gap (Formel (5.1)) wird in dieser Arbeit zur Kalibrierung der Parameter und zum Vergleich des entwickelten Lösungsverfahrens mit der Optimierung mit dem CPLEX-Solver ohne die Verwendung einer Heuristik verwendet. Die relative tolerance gap (Formel (5.2)) wird in dieser Arbeit nicht genutzt. Da sie aber vom CPLEX-Solver als Ergebnis ausgegeben wird, ist eine Abgrenzung der relative tolerance gap von der relative optimality gap notwendig.

Zur Kalibrierung wird das in C# implementierte Lösungsverfahren sowie der im recreate-Schritt verwendete CPLEX-Solver 12.8.0 auf einem Computer mit einer CPU mit 3,4 GHz (Intel i7 6700) und einem Arbeitsspeicher mit einer Kapazität von 16 GB RAM ausgeführt.

Um die Parameter des Lösungsverfahrens zu kalibrieren, wird das *irace*-Softwarepaket der Statistiksoftware R verwendet (vgl. López-Ibáñez et al., 2016). Dieses Softwarepaket führt ein sogenanntes *iterated racing* aus, welches eine Weiterentwicklung des von Birattari et al. (2010) vorgeschlagenen iterativen *F-racing Algorithmus* ist.

Mit Hilfe von *irace* werden alle Parameter des MLS- sowie des ALNS-Algorithmus kalibriert, allerdings nicht die vorgegebenen Zeitlimits beider Algorithmen. Die Zeitlimits beider Algorithmen werden nicht kalibriert, da damit zu rechnen ist, dass die in *irace* für die Zeitlimits anzugebene obere Schranke als bester Wert kalibriert würde, da dieser zu besseren Lösungen führt. D. h. je länger gerechnet wird, desto besser sind die Lösungen. Allerdings ist dies nicht zielführend, da die Zeitlimits vom Anwender beschränkt werden sollten, indem eine gewünschte Rechendauer vorgegeben wird. In Tabelle 5.6 wird exemplarisch gezeigt, welchen Einfluss verschiedene Zeitlimits auf die Kalibrierung der Parameter des MLS-Algorithmus haben. In Kapitel 5.2.2 werden darüber hinaus mit Hilfe von Langzeittests Intervalle bestimmt, in denen die gewählten Zeitlimits des MLS- sowie des ALNS-Algorithmus liegen sollten, um bei der Verwendung der im Folgenden kalibrierten Parameter die besten Ergebnisse zu berechnen. Der Anwender ist somit bei der Verwendung der kalibrierten Parameter (außer der Zeitlimits) flexibel bzgl. der gewählten Rechendauer bei der Anwendung des MLS- und des ALNS-Algorithmus.

Zur Kalibrierung der Parameter wird jeweils separat für den MLS- und den ALNS-Algorithmus mit Hilfe von *irace* eine vom Anwender vorgegebene Anzahl an Experimenten durchgeführt. Ein Experiment entspricht einem MLS- bzw. einem ALNS-Durchlauf, in dem *irace* eine Parameterkombinationen für ein Szenario untersucht. Insgesamt werden verschiedene Parameterkombinationen erstellt, die jeweils alle mit Hilfe verschiedener Szenarien untersucht werden. Zur Kalibrierung der Parameter des ALNS-Algorithmus wird für jedes Szenario zu Beginn mit Hilfe des MLS-Algorithmus eine Startlösung bestimmt. Sofern ein Szenario

für mehrere Experimente genutzt wird, wird dem ALNS-Algorithmus jeweils die gleiche Startlösung übergeben. Ein Experiment wird so lange ausgeführt, wie das vom Anwender angegebene Zeitlimit vorgibt. Dadurch entspricht beispielsweise die Rechendauer zur Durchführung von 500 Experimenten bei einem Zeitlimit von 600 Sekunden $500 * 600 = 300.000$ Sekunden (ca. 83 Stunden = ca. 3,5 Tage). Da *irace* basierend auf statistischen Tests die Parameter kalibriert, führt eine größere Anzahl an Experimenten und eine längere Ausführung eines Experiments (größeres Zeitlimit) zu einer genaueren Kalibrierung der Parameter. Allerdings sind dazu längere Rechendauern notwendig (sowohl bei einer größeren Anzahl an Experimenten als auch bei einem größeren Zeitlimit). Folglich ist bei der Kalibrierung der Parameter auf ein ausgewogenes Verhältnis zwischen der aufgewendeten Rechendauer und der Genauigkeit der kalibrierten Parameter zu achten. Der Aufwand einer längeren Rechendauer ist immer ins Verhältnis zu der dadurch gewonnenen Verbesserung der kalibrierten Parameter zu setzen.

Im Rahmen dieser Arbeit wird durch verschiedene Experimente ein solches ausgewogenes Verhältnis angestrebt. Wie in Kapitel 5.2.4 gezeigt, ist das entwickelte Lösungsverfahren im Gegensatz zur Optimierung mit Hilfe des angepassten Mixed Integer Problem (MIP) aus Kapitel 4.4.3 und dem CPLEX-Solver sowohl mit als auch ohne Warmstartlösung in der Lage, mit viel kürzeren Rechendauern mindestens so gute Ergebnisse zu berechnen bzw. bei großen Projekten überhaupt eine Lösung zu berechnen. Durch ausführlichere Kalibrierungsexperimente als die in dieser Arbeit durchgeführten Experimente würden die Parameter lediglich weiter verbessert. Dadurch wären die Algorithmen (MLS und ALNS) noch effizienter, sodass eine noch schnellere Berechnung der Ergebnisse zu erwarten ist. Allerdings sind die in dieser Arbeit kalibrierten Parameter ausreichend gut, um in kurzer Zeit optimierte Schedules zu berechnen (vgl. Kapitel 5.2.4).

Zunächst werden die Parameter des MLS-Algorithmus kalibriert. Während der Kalibrierung wurde festgestellt, dass der MLS-Algorithmus für jedes

Szenario des DWR-Projekts in durchschnittlich 0,62 Sekunden einen optimalen Schedule findet, d. h. die Optimalität wird durch $UB = LB$ bewiesen. Da dies die Ergebnisse der Kalibrierung verzerren würde, werden die Szenarien des DWR-Projekts für die folgenden Kalibrierungsexperimente des MLS- und des ALNS-Algorithmus nicht weiter berücksichtigt. Somit werden zur Kalibrierung im Folgenden lediglich jeweils 100 Szenarien der Referenzprojekte des SWR und des Rückbaus einer Gesamtanlage verwendet. Da der MLS-Algorithmus für jedes Szenario des DWR-Projekts einen optimalen Schedule gefunden hat, ist zu schließen, dass entweder die gegebenen Daten des DWR-Referenzprojekts bereits einen annähernd optimalen Schedule beinhalten oder dass der MLS-Algorithmus für Probleme der Größe des DWR-Referenzprojekts sehr schnell einen (fast) optimalen Schedule findet. Somit scheint für Probleme dieser Größe die Wahl unterschiedlicher Werte für den Parameter T nicht relevant zu sein. Bereits $T = 10$ Sekunden führt zu optimalen Lösungen.

Für jedes der Zeitlimits $T = 10, 30, 60, 90, 120, 600$ Sekunden bestimmt *irace* die Parameter $p^M \in [0; 0,2]$ und $p^S \in [0; 0,5]$ (vgl. Tabelle 5.6). Für beide Parameter liegt die untere Intervallgrenze bei 0, da in diesem Fall keine Perturbation durchgeführt würde. Somit stellt diese untere Intervallgrenze die niedrigst mögliche Grenze dar. Eine größere obere Intervallgrenze für p^M als die gewählte wäre bei der Verwendung der gegebenen Szenarien zur Kalibrierung nicht sinnvoll, da im Durchschnitt lediglich etwa 10 % der Vorgänge in mehr als einem Modus ausgeführt werden. Bei einer größeren oberen Intervallgrenze würde eine größere Anzahl an Perturbationen des Modusvektors zugelassen, wobei keine neuen Moduskombinationen gefunden würden, da lediglich 10 % der Vorgänge in mehreren Modi ausgeführt werden können. Mit der gewählten oberen Intervallgrenze für p^S soll die maximale Anzahl an Perturbationen ausgehend von der bisher besten gefundenen sequence limitiert werden. Bei einer größeren oberen Intervallgrenze würden mehr Perturbationen zugelassen, wodurch sequences erzeugt würden, die sich von der bisher besten

gefundenen sequence zunehmend unterscheiden. Dabei wird davon ausgegangen, dass auch der von der geänderten sequence erstellte Schedule weiter von der bisher besten gefundenen Lösung abweicht und somit in der Regel keine Verbesserung aufgrund einer zu großen Abweichung gefunden werden kann. Sowohl für p^M als auch für p^S ist in Tabelle 5.6 zu sehen, dass die kalibrierten Parameter keine Werte an der oberen Intervallgrenze annehmen. Dadurch kann die Schlussfolgerung gezogen werden, dass die Vergrößerung der oberen Intervallgrenzen keinen Einfluss auf die kalibrierten Werte haben würde.

Tabelle 5.6: Kalibrierungsergebnisse bei 2000 Experimenten in *irace* und unterschiedlichen Zeitlimits

T [Sekunden]	10	30	60	90	120	600
p^M	0,06	0,06	0,04	0,05	0,11	0,05
p^S	0,38	0,45	0,45	0,35	0,29	0,46

Wie in Tabelle 5.6 zu sehen ist, ändern sich die Parameter bei jeweils 2000 Experimenten und mit zunehmendem T nur geringfügig. Kleine Abweichungen der kalibrierten Parameter sind lediglich bei einem Zeitlimit von $T = 120$ zu erkennen. Dies kann auf die Zufälligkeit der Wahl der Parameterkombinationen und auf die Zufälligkeit der Wahl der untersuchten Szenarien durch *irace* zur Durchführung von Experimenten zurückgeführt werden. Es ist davon auszugehen, dass auch bei größeren T ähnliche Parameter kalibriert würden. Auf eine Kalibrierung mit größeren T wird aufgrund hoher Rechendauern verzichtet. Da die kalibrierten Parameter mit $T = 600$ die größte Genauigkeit aufweisen, werden diese Parameter

im Folgenden verwendet. Auf mögliche Zeitlimits T bei der Verwendung dieser Parameter wird in Kapitel 5.2.2 eingegangen.

Nachdem die Parameter des MLS-Algorithmus bestimmt wurden, werden im Folgenden die Parameter für den ALNS-Algorithmus kalibriert. Hierzu wird nochmals das *irace*-Softwarepaket verwendet. Als Szenarien zur Kalibrierung stehen wie bei der Kalibrierung der Parameter des MLS-Algorithmus lediglich je 100 Szenarien des SWR-Referenzprojekts und des Referenzprojekts eines gesamten Rückbaus, d. h. insgesamt 200 Szenarien, zur Verfügung. Da während der Kalibrierung der Parameter für den MLS-Algorithmus das DWR-Projekt mit allen verwendeten Zeitlimits optimal gelöst wurde, würde die für den ALNS-Algorithmus berechnete Startlösung des DWR-Projekts mit dem MLS-Algorithmus bereits optimal sein. Bei der Übergabe einer optimalen Lösung an den ALNS-Algorithmus würde dieser nicht mehr angewendet. Aus diesem Grund werden die 100 Szenarien des DWR-Referenzprojekts auch nicht zur Kalibrierung des ALNS-Algorithmus verwendet.

Zur Wahl der Parameter des ALNS-Algorithmus stehen folgende Werte zur Verfügung (bzgl. der angegebenen Werte ist zu beachten, ob es sich um Mengen oder um Intervalle handelt):

- $initialFreeVar \in \{2000; 4000\}$;
- $initialTimePerIteration \in \{10; 30\}$;
- $initialVarPerMode \in [2; 200]$;
- $\alpha \in [1; 1,5]$;
- $\beta \in [1; 1,5]$ und
- $P = \{p_1; p_2\}$ mit $p_1 \in [0; 1]$, $p_2 = 1 - p_1$.

Die Parameter p_1 und p_2 bezeichnen die Wahrscheinlichkeiten, mit denen die destroy Operatoren DTI (p_1) bzw. DPS (p_2) gewählt werden. Für jedes der zwei Referenzprojekte wird mit Hilfe des MLS-Algorithmus unter der Verwendung der oben bestimmten Parameter p^M sowie p^S und einer

Rechendauer von $T = 10$ Sekunden ein initialer Schedule berechnet. Auf diese Weise wird zur Berechnung der einzelnen Szenarien dem ALNS-Algorithmus jeweils die gleiche Startlösung übergeben. Eine Rechendauer von 10 Sekunden im MLS-Schritt zur Bestimmung einer Startlösung ist ausreichend, da lediglich eine (für alle Szenarien gleiche) Startlösung gefunden werden soll.

Aus dem bereits oben genannten Grund des ausgewogenen Verhältnisses zwischen aufgewendeter Rechendauer und Genauigkeit der kalibrierten Parameter, werden zur Kalibrierung für den ALNS-Algorithmus ein Zeitlimit von 600 Sekunden (10 Minuten) festgesetzt und 500 Experimente durchgeführt. Wie in Kapitel 5.2.4 gezeigt, sind die mit diesen Vorgaben kalibrierten Parameter des ALNS-Algorithmus ausreichend, um in kurzer Zeit optimierte Schedules zu berechnen.

Als Ergebnis der Experimente sind die folgenden Parameterkonfigurationen am besten geeignet:

- $initialFreeVar = 2000$;
- $initialTimePerIteration = 30$
- $initialVarPerMode = 174$;
- $\alpha = 1,33$;
- $\beta = 1,03$;
- $p_1 = 0,85$ und
- $p_2 = 0,15$.

Die Ergebnisse der Kalibrierung zeigen, dass wie bei der Kalibrierung der Parameter des MLS-Algorithmus die Intervallgrenzen der Parameter des ALNS-Algorithmus zur Kalibrierung richtig gewählt wurden, da sich die Werte der kalibrierten Parameter nicht an den Intervallgrenzen befinden.

Die kalibrierten Parameter zeigen des Weiteren, dass es effizienter ist, mit einer geringen Anzahl an freien Vorgängen zu starten ($initialFreeVar$)

und die Anzahl relativ schnell zu erhöhen (hoher Wert für α). Dagegen führen die Verwendung eines großen Werts für den Parameter *initialVarPerMode* und ein geringer Wert für β schneller zu besseren Lösungen. Der destroy Operator DTI scheint effizienter zu sein als der destroy Operator DPS, was an einem höheren Wert für p_1 im Gegensatz zu p_2 erkennbar ist.

Die kalibrierten Parameter des MLS- sowie des ALNS-Algorithmus werden in Kapitel 5.2.2 für ausführlichere Experimente verwendet.

Es ist anzumerken, dass die kalibrierten Parameter auch zur Optimierung mit Hilfe des MLS- und des ALNS-Algorithmus für Projekte anderer Größe und anderer Struktur verwendet werden können. Da die Parameter mit Hilfe von Szenarien der Referenzprojekte kalibriert wurden, bietet sich allerdings eine erneute Kalibrierung der Parameter für Projekte anderer Größe und anderer Struktur an. Wie bereits beschrieben, kann der Anwender bei der Kalibrierung die Genauigkeit der kalibrierten Parameter beeinflussen, sofern in *irace* mehr Experimente und längere Zeitlimits vorgegeben werden. Ebenso lassen sich die im Folgenden bestimmten Intervalle der Zeitlimits abhängig von der gewählten Rechendauer der Langzeittests sowie der Anzahl untersuchter Szenarien genauer oder weniger genau bestimmen.

5.2.2 Bestimmung der Zeitlimits des MLS- und des ALNS-Algorithmus sowie Berechnung optimierter Schedules

In Kapitel 5.2.1 wurden die Parameter des MLS- und des ALNS-Algorithmus kalibriert. Hierbei wurden allerdings nicht die Zeitlimits beider Algorithmen kalibriert, da dies, wie beschrieben, einerseits nicht zielführend wäre und da andererseits der Anwender flexibel bzgl. der Rechendauer bei der Anwendung des MLS- und des ALNS-Algorithmus sein soll. Im Folgenden

werden in Langzeittests die Intervalle der Zeitlimits des MLS- und des ALNS-Algorithmus bestimmt, aus denen der Anwender die Zeitlimits beider Algorithmen bei der Verwendung der in Kapitel 5.2.1 kalibrierten Parameter wählen sollte, um möglichst optimale Ergebnisse zu berechnen. Die Langzeittests wurden mit Hilfe der ersten fünf Szenarien des Referenzprojekts des gesamten Rückbaus durchgeführt, die nicht zur Kalibrierung, sondern zum Testen simuliert wurden (Szenarien 101 bis 105).

In den Langzeittests wurde ein Zeitlimit von 28.800 Sekunden (480 Minuten = 8 Stunden) verwendet. Es zeigt sich, dass der MLS-Algorithmus den Zielfunktionswert bereits nach wenigen Minuten verbessert (vgl. exemplarisch Abbildung 5.8) und sich dieser einer Geraden asymptotisch annähert. Die Ergebnisse der Langzeittests des MLS-Algorithmus der Szenarien 101 bis 105 sind in Anhang A.5 aufgeführt.

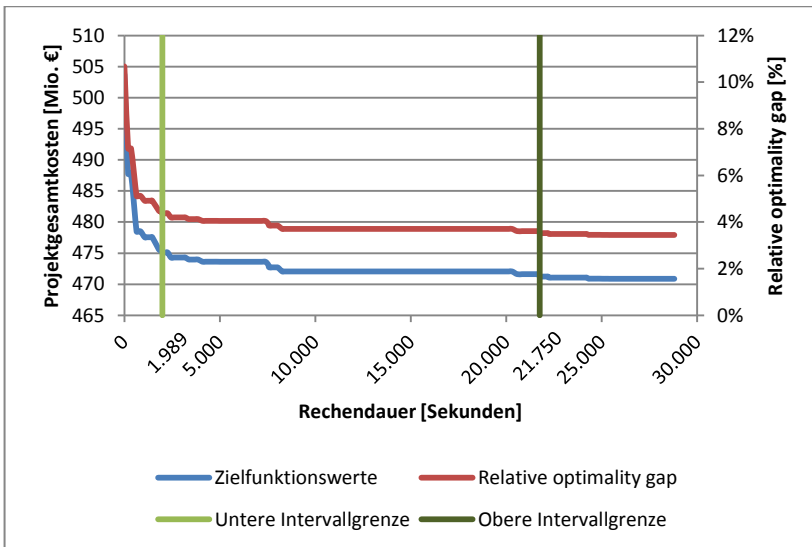


Abbildung 5.8: Verlauf des Zielfunktionswerts „Projektgesamtkosten“ in Abhängigkeit der Rechendauer des MLS-Algorithmus für Szenario 101 des Referenzprojekts des Rückbaus einer Gesamtanlage

Bei der Bestimmung der Intervallgrenzen des zu wählenden Zeitlimits T des MLS-Algorithmus ist auf ein ausgewogenes Verhältnis zwischen der benötigten Rechendauer und der durch eine längere Rechendauer erreichten Verbesserung des Zielfunktionswertes zu achten. Unter der Berücksichtigung eines solchen ausgewogenen Verhältnisses wird je untersuchtem Szenario die untere Intervallgrenze gesetzt, sobald das Verbesserungspotential des Zielfunktionswertes zum nach Ablauf des Zeitlimits zuletzt gefundenen Zielfunktionswert weniger als 1 % beträgt. Die obere Intervallgrenze wird gesetzt, sobald dieses Verbesserungspotential erstmals unter 0,1 % sinkt. Auf diese Weise wird in einer vertretbaren Rechendauer eine ausreichend gute Startlösung mit dem MLS-Algorithmus berechnet.

Unter der Berücksichtigung dieser Bedingungen, ergeben sich für die in den Langzeittests untersuchten Szenarien die in Tabelle 5.7 aufgeführten Intervallgrenzen. Zur Wahl einer einheitlichen unteren und oberen Intervallgrenze werden die maximalen Rechendauern der in Tabelle 5.7 aufgeführten Intervallgrenzen verwendet. Als minimales Zeitlimit für den MLS-Algorithmus wird somit $T = 2.806$ Sekunden (ca. 47 Minuten) (vgl. Szenario 105 in Tabelle 5.7) und als maximales Zeitlimit wird $T = 27.356$ Sekunden (ca. 456 Minuten) empfohlen (vgl. Szenario 102 in Tabelle 5.7).

Es ist anzumerken, dass dieses Intervall lediglich auf Basis der Langzeittests von fünf Szenarien bestimmt wurde. Durch Langzeittests weiterer Szenarien kann dieses Intervall genauer bestimmt werden. Aufgrund langer Rechendauern wurde darauf verzichtet. Des Weiteren repräsentieren die in den Langzeittests untersuchten Szenarien sehr gut die nicht untersuchten simulierten Szenarien, sodass bei den Langzeittests dieser Szenarien mit ähnlichen Ergebnissen zu rechnen ist.

Tabelle 5.7: Intervallgrenzen für den MLS-Algorithmus der Szenarien 101 bis 105 des Referenzprojekts des Rückbaus einer gesamten Anlage (bestimmt in Langzeittests mit einer Rechendauer von 28.800 Sekunden)

	Untere Grenze [Sekunden (Minuten)]	Obere Grenze [Sekunden (Minuten)]
Szenario 101	1.989 (33)	21.750 (363)
Szenario 102	512 (9)	27.356 (456)
Szenario 103	2.390 (40)	11.811 (197)
Szenario 104	2.728 (45)	16.993 (283)
Szenario 105	2.806 (47)	10.141 (169)

Die oberen Intervallgrenzen geben nicht zwangsläufig die Rechendauern wieder, nach denen im vorgegebenen Zeitlimit keine besseren Lösungen mehr gefunden werden. Die Rechendauern, nach denen in den Langzeittests je Szenario keine bessere Lösung gefunden wird, sind in Tabelle 5.8 dargestellt.

Tabelle 5.8: Langzeittests des MLS-Algorithmus mit einem Zeitlimit $T=28.800$ Sekunden (480 Minuten = 8 Stunden) mit den Angaben der Rechendauern bis keine Verbesserung des Zielfunktionswertes innerhalb des Zeitlimits mehr gefunden wird (angewendet auf die Szenarien 101 bis 105 des Referenzprojekts des Rückbaus einer Gesamtanlage)

	Rechendauer nach der inner- halb des vorgeg. Zeitlimits keine Verbesserung Eintritt [Sekun- den (Minuten)]	Mit dem Lö- sungsverfahren berechneter mi- nimaler Zielfunk- tionswert [€]	relative opti- mality gap
Szenario 101	25.386 (423)	470.880.127	3,45%
Szenario 102	27.356 (456)	470.663.023	3,48%
Szenario 103	27.411 (457)	472.499.166	3,53%
Szenario 104	28.245 (471)	475.077.362	3,59%
Szenario 105	25.541 (426)	470.564.177	3,54%

Für die Langzeittests des ALNS-Algorithmus wird jeweils mit Hilfe des MLS-Algorithmus eine Startlösung berechnet. Als Zeitlimit für den MLS-Algorithmus wird das minimale Zeitlimit $T = 2.806$ Sekunden verwendet. Dem ALNS-Algorithmus wird ein Zeitlimit von 25.994 Sekunden (ca. 433 Minuten) übergeben. Somit wird jedes Szenario insgesamt 28.800 Sekunden (480 Minuten = 8 Stunden) optimiert.

Wie beim MLS-Algorithmus ist auch beim Langzeittest des ALNS-Algorithmus eine asymptotische Annäherung des Zielfunktionswertes an eine Gerade zu erkennen (vgl. exemplarisch Abbildung 5.9).

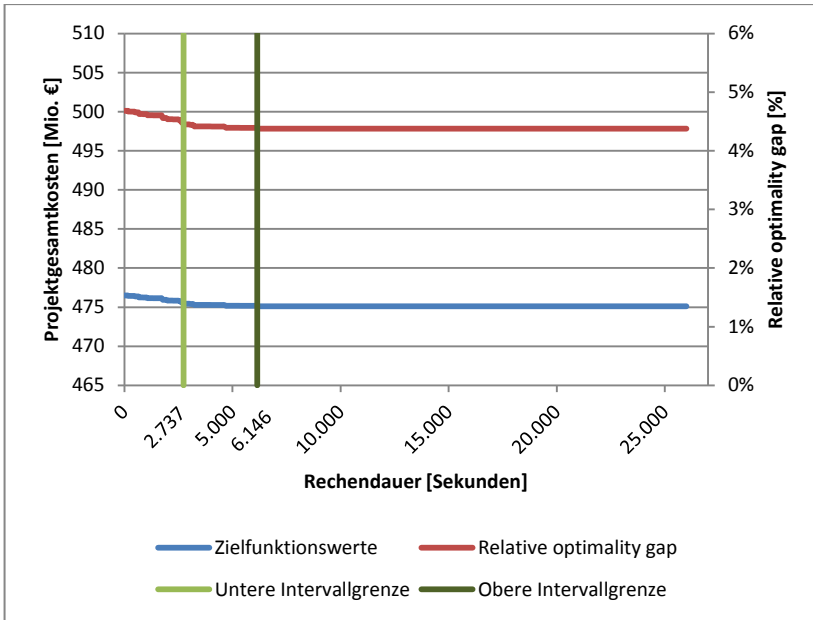


Abbildung 5.9: Verlauf des Zielfunktionswerts „Projektgesamtkosten“ und der relative optimality gap in Abhängigkeit der Rechendauer des ALNS-Algorithmus für Szenario 101 des Referenzprojekts des Rückbaus einer Gesamtanlage

In den Langzeittests werden in allen fünf untersuchten Szenarien dem ALNS-Algorithmus bereits Schedules mit einer geringen relative optimality gap übergeben (vgl. die Abbildungen in Anhang A.6 sowie Tabelle 5.9). Dadurch kann der ALNS-Algorithmus die übergebene Startlösung nur noch wenig verbessern (vgl. exemplarisch Abbildung 5.10). Die Ergebnisse der Langzeittests des ALNS-Algorithmus bei der Verwendung weiterer Szenarien mit einem Zeitlimit von insgesamt 28.800 Sekunden (8 Stunden; wovon MLS 2.806 Sekunden und ALNS 25.994 Sekunden Rechendauer zugeteilt wird) sind in Anhang A.6 aufgeführt.

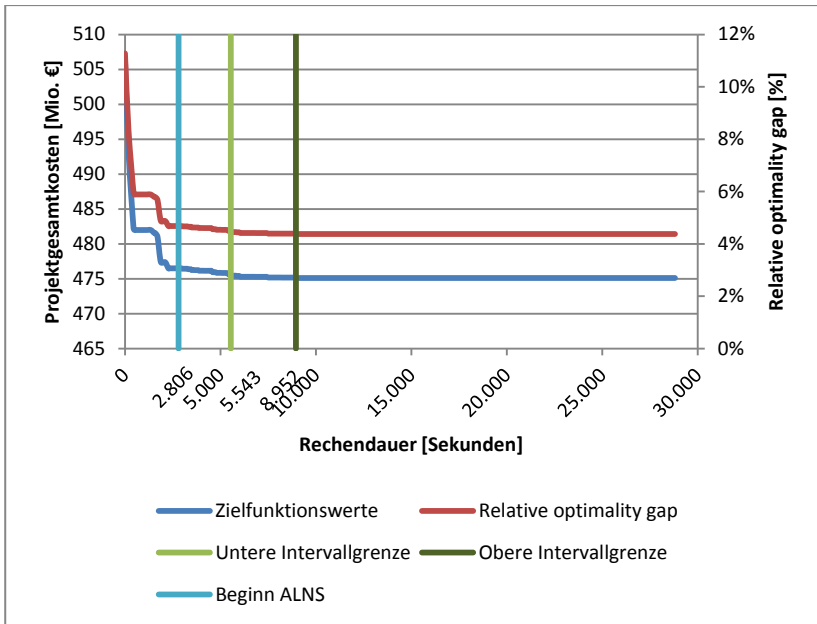


Abbildung 5.10: Verlauf des Zielfunktionswerts „Projektgesamtkosten“ und der relative optimality gap in Abhängigkeit der Rechendauer des MLS- und des ALNS-Algorithmus für Szenario 101 des Referenzprojekts des Rückbaus einer Gesamtanlage

Wie bei der Bestimmung der Intervallgrenzen der zu wählenden Zeitlimits des MLS-Algorithmus ist auch bei der Bestimmung der Intervallgrenzen der Zeitlimits des ALNS-Algorithmus auf ein ausgewogenes Verhältnis zwischen der benötigten Rechendauer und der durch eine längere Rechendauer erreichte Verbesserung des Zielfunktionswertes zu achten. Unter der Berücksichtigung eines solchen ausgewogenen Verhältnisses wird die untere Intervallgrenze je Szenario gesetzt, sobald das Verbesserungspotential des Zielfunktionswertes zum nach Ablauf des Zeitlimits zuletzt gefundenen Zielfunktionswert weniger als 0,1 % beträgt. Die obere Intervallgrenze wird gesetzt, sobald dieses Verbesserungspotential

erstmalig unter 0,01 % sinkt. Wie beim MLS-Algorithmus wird auf diese Weise in einer vertretbaren Rechendauer eine ausreichend gute Lösung mit dem ALNS-Algorithmus berechnet.

Bei der Anwendung dieser Kriterien ergeben sich für die in den Langzeittests untersuchten Szenarien die in Tabelle 5.9 aufgeführten Intervallgrenzen. Im Gegensatz zum MLS-Algorithmus werden zur Wahl einer einheitlichen unteren und oberen Intervallgrenze nicht die maximalen Rechendauern der in Tabelle 5.9 aufgeführten Intervallgrenzen verwendet. Es ist zu erkennen, dass die Intervallgrenzen des Szenarios 104 mit den in dieser Arbeit zugrunde gelegten Kriterien im Gegensatz zu den Intervallgrenzen der anderen Szenarien sehr hoch sind. Ein möglicher Grund hierfür ist, dass die übergebene Startlösung eine höhere relative optimality gap besitzt und der ALNS-Algorithmus eine längere Rechendauer benötigt, um diese durch das Finden besserer Lösungen zu senken. Aus diesem Grund wird Szenario 104 für die Bestimmung der Intervallgrenzen nicht berücksichtigt. Durch dieses Vorgehen wird das ausgewogene Verhältnis zwischen benötigter Rechendauer und der durch eine längere Rechendauer erreichten Verbesserung des Zielfunktionswertes berücksichtigt, da ein größeres Zeitlimit für die übrigen untersuchten Szenarien (Szenarien 101, 102, 103 und 105) bei der Anwendung der gewählten Kriterien viel zu groß gewählt wäre.

Zur Bestimmung einheitlicher Intervallgrenzen werden die maximalen Rechendauern der übrigen in Tabelle 5.9 aufgeführten Intervallgrenzen verwendet. Dem minimalen Zeitlimit für den ALNS-Algorithmus wird somit eine Dauer von 3.464 Sekunden (ca. 58 Minuten) (vgl. Szenario 103 in Tabelle 5.9) und dem maximalen Zeitlimit wird eine Dauer von 6.146 Sekunden (ca. 102 Minuten) zugewiesen (vgl. Szenario 101 in Tabelle 5.9).

Wie beim MLS-Algorithmus ist auch an dieser Stelle anzumerken, dass dieses Intervall lediglich auf Basis der Langzeittests von fünf Szenarien bestimmt wurde und dieses durch Langzeittests weiterer Szenarien

genauer bestimmt werden kann. Da die in den Langzeittests untersuchten Szenarien sehr gut die weiteren simulierten Szenarien repräsentieren und lange Rechendauern bei der Untersuchung weiterer Szenarien vermieden werden sollen, wird auf weitere Untersuchungen verzichtet.

Tabelle 5.9: Intervallgrenzen und relative optimality gaps der übergebenen Startlösung für den ALNS-Algorithmus der Szenarien 101 bis 105 des Referenzprojekts des Rückbaus einer gesamten Anlage (bestimmt in Langzeittests mit 28.800 Sekunden Rechendauer (480 Minuten = 8 Stunden), wovon dem MLS-Algorithmus 2.806 Sekunden und dem ALNS-Algorithmus 25.994 Sekunden Rechendauer zugeteilt wird)

	Untere Grenze [Sekunden (Minuten)]	Obere Grenze [Sekunden (Minuten)]	relative optima- lity gap der Startlösung
Szenario 101	2.737 (46)	6.146 (102)	4,68%
Szenario 102	361 (6)	982 (16)	4,02%
Szenario 103	3.464 (58)	4.421 (74)	3,98%
Szenario 104	19.746 (329)	23.051 (384)	6,65%
Szenario 105	1.540 (26)	2.405 (40)	3,91%

In Tabelle 5.10 sind die Rechendauern dargestellt, nach denen in den Langzeittests keine bessere Lösung gefunden wird.

Tabelle 5.10: Langzeittests des ALNS-Algorithmus mit einem Zeitlimit $T=28.800$ Sekunden (480 Minuten = 8 Stunden; wovon dem MLS-Algorithmus 2.806 Sekunden und dem ALNS-Algorithmus 25.994 Sekunden Rechendauer zugeteilt wird) mit den Angaben der Rechendauern bis keine Verbesserung des Zielfunktionswertes innerhalb des Zeitlimits mehr gefunden wird (angewendet auf die Szenarien 101 bis 105 des Referenzprojekts des Rückbaus einer Gesamtanlage)

	Rechendauer nach der inner- halb des vorgeg. Zeitlimits keine Verbesserung Eintritt [Sekun- den (Minuten)]	Mit dem Lö- sungsverfahren berechneter mi- nimaler Zielfunk- tionswert [€]	relative opti- mality gap
Szenario 101	6.146 (102)	475.112.537	4,38%
Szenario 102	982 (16)	472.134.900	3,80%
Szenario 103	4.421 (74)	472.683.874	3,58%
Szenario 104	23.051 (384)	478.978.165	4,44%
Szenario 105	3.294 (55)	471.018.712	3,64%

In den Langzeittests wurden die Zeitlimits des MLS- und des ALNS-Algorithmus bestimmt, die bei der Verwendung der in Kapitel 5.2.1 kalibrierten Parameter zu den besten Ergebnissen führen. Mit dem minimalen Zeitlimit des MLS-Algorithmus von $T = 2.806$ Sekunden und dem minimalen Zeitlimit des ALNS-Algorithmus von 3.464 Sekunden ist somit für die Optimierung eines Szenarios eine Rechendauer von mindestens 6.270 Sekunden (ca. 104 Minuten = ca. 1,7 Stunden) einzuplanen. Sofern ein Anwender die gesamte Rechendauer zur Optimierung eines Szenarios begrenzen möchte, z. B. um die gesamte Rechendauer zur Optimierung mehrerer Szenarien festzusetzen, kann ein kumuliertes Zeitlimit für die Anwendung beider Algorithmen vorgegeben werden. Hierbei stellt sich allerdings die Frage, wie dieses kumulierte Zeitlimit auf den MLS- und den ALNS-Algorithmus aufgeteilt wird. Auf diese

Weise wird das Verhalten des gesamten Algorithmus (MLS- und ALNS-Algorithmus) getestet. Im Folgenden wird exemplarisch die Aufteilung des kumulierten Zeitlimits von 3.600 Sekunden auf den MLS- und den ALNS-Algorithmus aufgezeigt.

Wie bereits in Kapitel 5.2.1 gezeigt wurde, konnten für alle Szenarien des Referenzprojekts des DWR in kurzer Zeit mit Hilfe des MLS-Algorithmus optimale Schedules berechnet werden. Aus diesem Grund wird im Folgenden nicht näher auf das Finden einer optimierten Lösung für dieses Referenzprojekt eingegangen. Für die folgenden Tests werden jeweils 100 Szenarien der Referenzprojekte SWR und „Gesamter Rückbau“ (die jeweils 100 Szenarien zum Testen) und die in Kapitel 5.2.1 kalibrierten Parameter verwendet.

Das kumulierte Zeitlimit von 3.600 Sekunden wird zu unterschiedlichen Teilen auf die beiden Algorithmen aufgeteilt. Dies wird durch folgende Formulierung angegeben: MLS_xALNS_y , wobei dem MLS-Algorithmus x Sekunden und dem ALNS-Algorithmus y Sekunden Rechenzeit zugeordnet wird. Des Weiteren gilt: $x + y = 3600$.

Die Ergebnisse der Experimente sind in Tabelle 5.11 aufgeführt.

Tabelle 5.11: average gap nach der Anwendung des MLS- sowie des ALNS-Algorithmus bei unterschiedlicher Aufteilung der Gesamtrechendauer von 3.600 Sekunden auf die beiden Algorithmen. Aufsteigend sortiert nach dem Zeitlimit x des MLS-Algorithmus

Aufteilung der Rechendauer	SWR	Gesamter Rückbau	Durchschnitt (average gap)
$MLS_{360}ALNS_{3240}$	5,680 %	5,439 %	5,560 %
$MLS_{900}ALNS_{2700}$	5,679 %	4,425 %	5,052 %
$MLS_{1800}ALNS_{1800}$	5,679 %	3,982 %	4,831 %
$MLS_{2700}ALNS_{900}$	5,679 %	3,845 %	4,762 %
$MLS_{3600}ALNS_0$	5,693 %	3,917 %	4,805 %

Es ist zu sehen, dass die alleinige Verwendung des MLS-Algorithmus ($MLS_{3600}ALNS_0$) beim Referenzprojekt „Gesamter Rückbau“ zu einer geringeren average gap führt als bei drei der anderen MLS-ALNS-Kombinationen. Nichtsdestotrotz werden im Durchschnitt die besten Ergebnisse bei der Aufteilung der Rechendauer $MLS_{2700}ALNS_{900}$ erreicht. Hierbei berechnet der MLS-Algorithmus bereits eine sehr gute initiale Lösung, welche durch den ALNS-Algorithmus nochmals minimal verbessert werden kann.

In Tabelle 5.11 ist des Weiteren zu sehen, dass der ALNS-Algorithmus das vom MLS-Algorithmus berechnete Ergebnis für den SWR im Durchschnitt nur sehr geringfügig verbessert. Dies kann daran liegen, dass die berechneten Schedules zwar bereits (fast) optimal sind, die Optimalität aufgrund der schlechten LB allerdings nicht bewiesen werden kann.

Da es sich bei der LB lediglich um eine Annahme handelt und evtl. kein Schedule existiert, der diese LB erreichen kann, ist es möglich, dass trotz einer *average gap* > 0 (oder einer *relative optimality gap* > 0) bereits ein optimaler Schedule gefunden ist. Nur wenn der Gap wirklich bei 0 % liegt (obere Schranke = untere Schranke), ist es sicher, dass die Lösung optimal ist.

Um bessere Aussagen über die Optimalität der gefundenen Lösung treffen zu können, bestünden prinzipiell zwei Möglichkeiten. Zum einen wäre es möglich, die untere Schranke genauer zu berechnen, z. B. durch die LP-Relaxierung des Integer Programms, bei der die Ganzzahligkeitsbedingungen der Variablen aufgehoben werden. Mit einer genaueren unteren Schranke wären die Ergebnisse bzgl. der Optimalität aussagekräftiger. Allerdings ist die Berechnung einer unteren Schranke, z. B. mit der LP-Relaxierung des Integer Programms, bereits sehr zeitaufwendig, weshalb in dieser Arbeit darauf verzichtet wird. Zum anderen könnte durch aufwendige Rechenverfahren die Optimalität der gefundenen Lösung bewiesen werden. Da dieser Beweis nicht immer einfach auszuführen ist und teilweise viel Zeit in Anspruch nimmt, wird auch hierauf in dieser Arbeit verzichtet.

Ziel dieser Arbeit ist es vielmehr, eine hinreichend gute Lösung in praktikabler Rechenzeit für das beschriebene Planungsproblem von Großprojekten und insbesondere der Planung des Rückbaus von kern-technischen Anlagen zu finden. Der Beweis der Optimalität ist hierbei gegenüber der gefundenen und verbesserten Lösung zweitrangig, d. h. die verfügbare Zeit zur Berechnung eines optimierten Schedules soll für die Suche nach einer besseren Lösung anstatt für den Beweis der Optimalität aufgewendet werden

Da im Rahmen dieser Arbeit insbesondere die Berechnung von kostenoptimierten Schedules für Projekte mit vielen Vorgängen, wie das Referenzprojekt des Rückbaus einer Gesamtanlage (vgl. Kapitel 5.1.3), von

besonderem Interesse ist, wird dieses Projekt im Folgenden sowie in den Kapiteln 5.2.5 und 5.3 näher untersucht.

Um die Zufälligkeit der Auswahl von sequences zum Finden einer initialen Lösung mit geringen Projektgesamtkosten im MLS-Schritt sowie die zufällige Wahl der destroy Operatoren im ALNS-Algorithmus im Folgenden besser zu nutzen, werden die Berechnungen mehrfach hintereinander ausgeführt. Damit kann insbesondere eine zufällig schlechtere Wahl einer sequence im MLS-Algorithmus überwunden werden. Daher wird jedes der 100 Test-Szenarien¹⁴¹ des Referenzprojekts des Rückbaus einer gesamten Anlage fünf Mal optimiert. Zur Optimierung werden die in Kapitel 5.2.1 kalibrierten Parameter verwendet. Die Optimierung von 500 Szenarien mit einem Zeitlimit von $T = 2.806$ Sekunden für den MLS-Algorithmus und einem Zeitlimit von 3.464 Sekunden für den ALNS-Algorithmus würde eine gesamte Rechendauer von 3.135.000 Sekunden (ca. 870 Stunden = ca. 36 Tagen) bedeuten. Um eine kürzere Rechendauer zu erhalten, wird das kumulierte Zeitlimit je Szenario auf 1.860 Sekunden gesetzt. Gleichzeitig soll das Langzeitverhalten des ALNS-Algorithmus bei der Übergabe einer Startlösung mit höherer relative optimality gap getestet werden. Dies leitet sich aus der Erkenntnis ab, dass bei den Langzeittests zur Bestimmung des Intervalls der Zeitlimits des ALNS-Algorithmus jeweils bereits Schedules mit einer geringen relative optimality gap übergeben wurden. Dadurch konnte der ALNS-Algorithmus die übergebene Startlösung nur noch wenig verbessern. Daher wird im Folgenden für den MLS-Algorithmus lediglich ein Zeitlimit von $T = 60$ Sekunden und für den ALNS-Algorithmus ein Zeitlimit von 1.800 Sekunden (30 Minuten) vorgegeben. Mit Hilfe dieser Vorgabe kann in vertretbarer Zeit (ca. 2,5 Stunden) für jedes Szenario fünf Mal ein

¹⁴¹ Die Eigenschaften der 100 simulierten Szenarien des Referenzprojekts des Rückbaus einer Gesamtanlage zum Testen sind in Anhang A.7 aufgeführt. Aus Platzgründen sind im Anhang weder die Eigenschaften der 100 Szenarien zur Kalibrierung je Referenzprojekt noch die Eigenschaften der 100 Szenarien zum Testen der Referenzprojekte DWR und SWR aufgeführt.

optimierter Schedule berechnet werden. Für alle 100 Szenarien, die jeweils fünf Mal optimiert werden, ergibt sich somit eine Gesamtrechendauer von ca. 10,4 Tagen (ca. 250 Stunden).

Mit Hilfe der auf diese Weise optimierten Szenarien wird im Folgenden exemplarisch das Vorgehen zur Bestimmung optimierter Schedules mehrerer Szenarien und die Wahl robuster Schedules in Kapitel 5.2.5 sowie die Durchführung einer Sensitivitätsanalyse in Kapitel 5.3 aufgezeigt.

Die 500 optimierten Schedules besitzen Projektgesamtkosten zwischen 472.932.856 Euro und 490.463.854 Euro und eine relative optimality gap zwischen 4,52 % und 7,46 % (vgl. Tabelle 5.12). Die Berechnungsergebnisse aller Schedules sind in Anhang A.8 aufgeführt. Im Vergleich zu den berechneten Ergebnissen in Tabelle 5.8 ist zu erkennen, dass eine längere Rechendauer insbesondere im MLS-Schritt zu besseren Ergebnissen führt, d.h. zu Schedules mit geringeren Projektgesamtkosten und einer geringeren relative optimality gap. Die Untersuchung der Kombination des MLS- und des ALNS-Algorithmus mit einem kumulierten Zeitlimit von 3.600 Sekunden zeigt darüber hinaus, dass bereits der MLS-Algorithmus eine sehr gute initiale Lösung berechnen kann und dass im Verhältnis zum ALNS-Algorithmus mehr Rechenzeit für den MLS-Algorithmus aufgewendet werden sollte. Des Weiteren ist die Berechnung von Schedules mit noch geringeren Projektgesamtkosten möglich, sofern aus Sicht des Anwenders eine längere kumulierte Rechendauer aufgewendet werden kann.

Trotz dieser Verbesserungspotentiale werden die optimierten Ergebnisse im Folgenden exemplarisch für die Wahl robuster Schedules (Kapitel 5.2.5) und für die Sensitivitätsanalysen (Kapitel 5.3) verwendet. Auf diese Weise wird das Vorgehen aus Sicht des Anwenders aufgezeigt.

Tabelle 5.12: Auswahl an optimierten Schedules und deren Eigenschaften des Referenzprojekts des Rückbaus einer Gesamtanlage sortiert nach der relative optimality gap

Rang (sortiert nach der relative optimality gap)	Szenario	Kosten [€]	LB [€]	Relative optimality gap
1	157	474.384.236	453.848.691	4,52%
2	181	475.962.579	455.086.820	4,59%
3	165	480.994.726	459.192.345	4,75%
4	186	482.933.695	460.601.840	4,85%
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
160	129	478.303.954	452.790.812	5,63%
161	168	472.932.856	447.673.521	5,64%
162	19	478.013.250	452.467.408	5,65%
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
482	197	488.347.156	458.803.509	6,44%
483	198	490.463.854	460.779.097	6,44%
484	157	483.144.487	453.848.691	6,45%
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
497	168	478.016.033	447.673.521	6,78%
498	18	484.185.219	452.927.062	6,90%
499	169	490.324.192	458.551.564	6,93%
500	148	484.285.792	450.680.740	7,46%

5.2.3 Validierung der optimierten Schedules

Die in Kapitel 5.2.2 berechneten, kostenoptimierten Schedules können aufgrund der fehlenden realen Daten nicht mit einem realen kerntechnischen Rückbauprojekt validiert werden. Um dennoch eine Validierung der berechneten Projekteigenschaften durchzuführen, werden diese mit aus der Literatur entnommenen Daten realer kerntechnischer Rückbauprojekte verglichen.

Der Ablauf der Vorgänge in den kostenoptimierten Schedules entspricht der logischen Reihenfolge realer kerntechnischer Rückbauprojekte. Die Projektgesamtkosten des Referenzprojekts „Rückbau einer Gesamtanlage“ liegen in der von der Europäischen Kommission genannten Spanne zwischen 300 Millionen und 1,1 Milliarden Euro (Europäische Kommission, 2016b, S. 33)¹⁴² (vgl. Kapitel 2.6.4). Des Weiteren ist auch die berechnete Rückbaudauer zwischen 12 und 14 Jahren realistisch¹⁴³.

Eine Ausweitung der Validierung des in dieser Arbeit entwickelten Planungswerkzeugs ist bei der Verfügbarkeit realer Daten möglich.

5.2.4 Güte des Lösungsverfahrens

Wie in Kapitel 4.4.5 beschrieben, musste für die Berechnung optimierter Schedules für die in dieser Arbeit betrachteten Projekte (vgl. Kapitel 5.1) ein neues Lösungsverfahren entwickelt werden. Diese Aussage wird im Folgenden begründet, indem die Ergebnisse der Optimierung des

¹⁴² Bei der Kostenberechnung in dieser Arbeit werden keine Zuschläge beispielweise für Schichtarbeit, Wochenendarbeit oder Arbeit an Feiertagen berücksichtigt, da von einem Ein-Schicht-Betrieb und Arbeitstagen an Werktagen ausgegangen wird. Beim Einbezug dieser zusätzlichen Kosten, können die Projektgesamtkosten höher ausfallen.

¹⁴³ Die Berechnungsergebnisse geben die Arbeitstage an, die zur Projektausführung benötigt werden. Bei der Annahme von 250 Arbeitstagen pro Jahr ergeben sich Projektdauern von 12 bis 14 Jahren.

angepassten Mixed Integer Problems (MIP) aus Kapitel 4.4.3 mit Hilfe des CPLEX-Solvers den Ergebnissen des in dieser Arbeit entwickelten Lösungsverfahrens (vgl. Kapitel 4.4.5) gegenüber gestellt werden. Insgesamt werden im Folgenden drei Optimierverfahren gegenüber gestellt:

- Optimierung mit Hilfe des angepassten Mixed Integer Problem (MIP) aus Kapitel 4.4.3 und dem CPLEX-Solver ohne Warmstartlösung (im Folgenden als „ausschließliche Optimierung“ bezeichnet),
- Optimierung mit Hilfe des angepassten MIP und dem CPLEX-Solver mit Warmstartlösung (im Folgenden als „Optimierung mit Warmstartlösung“ bezeichnet),
- Optimierung mit Hilfe des in dieser Arbeit entwickelten Lösungsverfahrens (im Folgenden als „Optimierung mit dem Lösungsverfahren“ bezeichnet).

Die drei Optimierverfahren werden anhand der Szenarien der drei Referenzprojekte (vgl. Kapitel 5.1) getestet. Hierbei wird für jedes Referenzprojekt jeweils exemplarisch Szenario 101 getestet (d. h. das erste Szenario der simulierten Test-Szenarien), da dieses einerseits ein repräsentatives Beispiel aller simulierten Szenarien je Referenzprojekt darstellt. Andererseits sind die ausschließliche Optimierung sowie die Optimierung mit Warmstart sehr zeitintensiv, sodass die benötigte Dauer zur Überprüfung mehrerer Szenarien in Langzeittests nicht im Verhältnis zu dem dadurch gewonnenen Nutzen steht.

Zur ausschließlichen Optimierung wird das MIP aus Kapitel 4.4.3 im IBM ILOG Optimization Studio 12.8.0 (CPLEX Studio IDE) implementiert und mit Hilfe des CPLEX-Solvers (Version 12.8.0) gelöst.

Die Optimierung mit Warmstartlösung wird ebenfalls mit Hilfe des im IBM ILOG Optimization Studio 12.8.0 implementierten MIP und mit dem CPLEX-Solver 12.8.0 durchgeführt. Je Referenzprojekt wird dem Solver der

berechnete Schedule mit den geringsten Projektgesamtkosten des MLS-Schritts als Startlösung übergeben. Auf diese Weise wird insbesondere die Güte des ALNS-Schritts des Lösungsverfahrens getestet.

Für das Lösungsverfahren wird die Parameterkombination der Kalibrierungsergebnisse aus Kapitel 5.2.1 verwendet. Als Zeitlimits für den MLS- und den ALNS-Algorithmus wird ein kumuliertes Zeitlimit von 3.600 Sekunden und die Aufteilung dieses Limits gemäß der in Tabelle 5.11 in Kapitel 5.2.2 dargestellten Evaluation $MLS_{2700}ALNS_{900}$ gewählt, da diese bei einem kumulierten Zeitlimit von 3.600 Sekunden zu den besten Lösungen führt.

Sowohl das Lösungsverfahren als auch die Optimierung im IBM ILOG Optimization Studio (mit und ohne Warmstartlösung) werden auf einem Computer mit 12 Prozessoren mit jeweils 3,4 GHz (Intel® Core™ i7-4930K) und einem Arbeitsspeicher mit einer Kapazität von 64 GB unter Windows Server 2012 (64 bit) ausgeführt.

5.2.4.1 Referenzprojekt DWR

Für das Referenzprojekt des DWR berechnen alle drei Lösungsverfahren denselben optimalen Schedule und Zielfunktionswert¹⁴⁴. Allerdings benötigt die ausschließliche Optimierung im Gegensatz zum entwickelten Lösungsverfahren 388 Mal und die Optimierung mit Warmstartlösung 163 Mal so lange, um eine optimale Lösung zu finden und um die Optimalität zu beweisen (vgl. Tabelle 5.13).

Insgesamt werden zur ausschließlichen Optimierung 23.362 Entscheidungsvariablen (davon 23.320 Binär- und 42^{145} andere

¹⁴⁴ Der Zielfunktionswert der Optimierung entspricht den Projektgesamtkosten des jeweils berechneten Schedules.

¹⁴⁵ Es wurden 41 erneuerbare und eine nicht-erneuerbare Ressource übergeben, wobei lediglich 36 erneuerbare Ressourcen benötigt werden (vgl. Tabelle 5.1).

Entscheidungsvariablen) und 37.942 Nebenbedingungen verwendet. Der CPLEX-Solver findet nach ca. 229 Sekunden einen Schedule, dessen Projektgesamtkosten lediglich 50 Euro von den minimalen Projektgesamtkosten abweichen. Nach 514 Sekunden wird der optimale Schedule gefunden. In der Zeitspanne zwischen 229 und 514 Sekunden wird insbesondere die untere Schranke verbessert, was an einer sinkenden relative optimality gap (vgl. rote Kurve in Abbildung 5.11) bei gleichbleibenden Projektgesamtkosten (vgl. blaue Kurve in Abbildung 5.11) zu sehen ist.

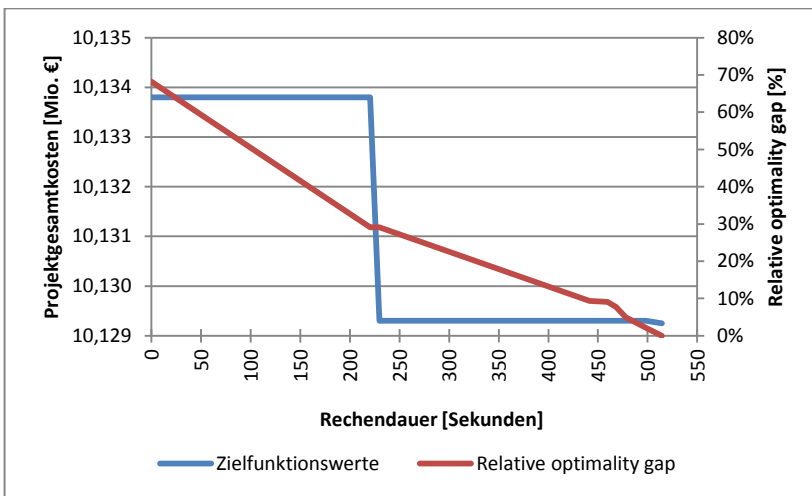


Abbildung 5.11: Projektgesamtkosten und relative optimality gap von Szenario 101 des DWR-Referenzprojekts bei der ausschließlichen Optimierung

Mit einer übergebenen Startlösung wird das Referenzprojekt DWR anstatt in 514 Sekunden bereits nach 215 Sekunden optimal gelöst, wobei die Optimalität bewiesen werden kann. Ein Schedule mit minimalen Kosten wird bereits nach etwa 160 Sekunden gefunden (vgl. blaue Linie in Abbildung 5.12). In der Rechendauer zwischen 160 Sekunden und 215

Sekunden wird die untere Schranke verbessert, was an einer sinkenden relative optimality gap zu erkennen ist (vgl. rote Kurve in Abbildung 5.12).

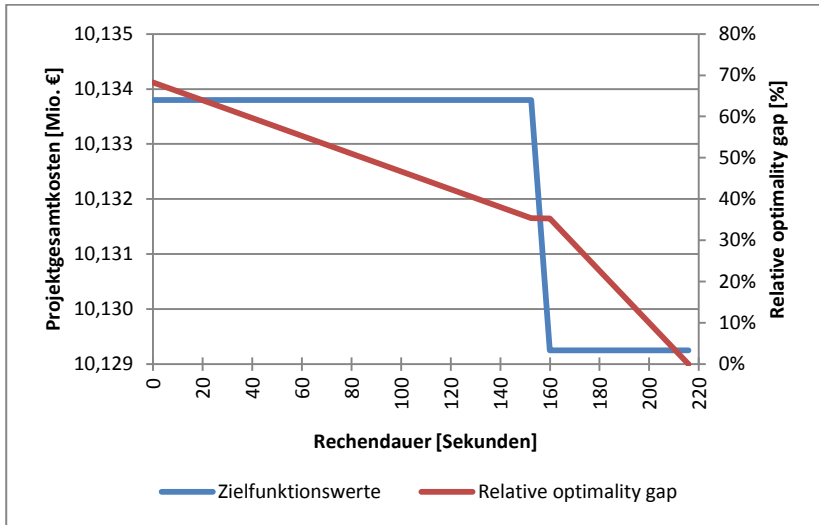


Abbildung 5.12: Projektgesamt-kosten und relative optimality gap von Szenario 101 des DWR-Referenzprojekts bei der Optimierung mit Warmstartlösung

Das in dieser Arbeit entwickelte Lösungsverfahren berechnet bereits in der ersten Iteration des MLS-Schritts einen Schedule mit annähernd optimalen Projektgesamt-kosten. Mit einer relative optimality gap von 0,05 % ist die gefundene Lösung lediglich 5.250 € von der optimalen Lösung entfernt. Bereits nach 1,33 Sekunden findet der MLS-Algorithmus die optimale Lösung (vgl. Abbildung 5.13).

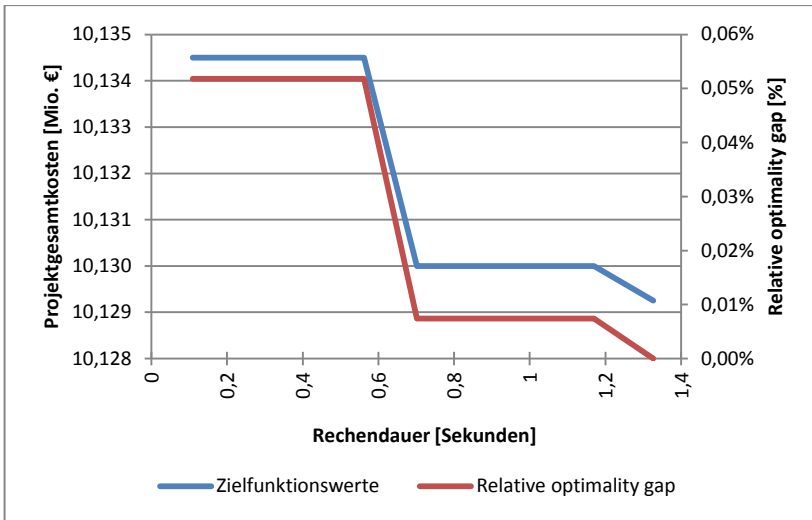


Abbildung 5.13: Projektgesamtkosten und relative optimality gap von Szenario 101 des DWR-Referenzprojekts bei der Optimierung mit dem in dieser Arbeit entwickelten Lösungsverfahren

5.2.4.2 Referenzprojekt SWR

Bei der ausschließlichen Optimierung des Referenzprojekts des SWR wird die Berechnung nach etwa 137 Stunden (ca. 5,7 Tage) abgebrochen. Der Grund für den Abbruch liegt laut der Firma IBM an einem Kommunikationsfehler zwischen dem angestoßenen Optimierungsprozess und dem CPLEX Studio IDE. Allerdings sind, wie im Folgenden gezeigt wird, die Berechnungsergebnisse bis zu diesem Zeitpunkt für die Bewertung der Güte des entwickelten Lösungsverfahrens ausreichend.

Der bis zum Abbruch der Optimierung gefundene Schedule mit den geringsten Projektgesamtkosten weist minimal höhere Kosten auf als der Schedule, welcher vom Lösungsverfahren in etwa 3.600 Sekunden (60 Minuten = 1 Stunde) berechnet wird (vgl. Tabelle 5.13). Bis zum Absturz

des Optimierprogramms werden 77.944 Entscheidungsvariablen (davon 77.902 Binär- und 42¹⁴⁶ andere Entscheidungsvariablen) und 61.028 Nebenbedingungen verwendet.

Nach ca. 34.849 Sekunden (ca. 9,6 Stunden) wird bei der ausschließlichen Optimierung ein Schedule gefunden, dessen Zielfunktionswert nur gering (ca. 0,1 %) vom letzten gefundenen Zielfunktionswert abweicht. In der Zeitspanne von 34.849 Sekunden bis 37.150 Sekunden wird insbesondere die untere Schranke verbessert, sodass die relative optimality gap sinkt (vgl. rote Linie in Abbildung 5.14). Zum Zeitpunkt von 38.278 Sekunden wird ein Schedule mit den bis zuletzt geringsten Projektgesamtkosten gefunden. Im Anschluss wird bis zur Rechendauer von 290.199 Sekunden (80,6 Stunden = 3,36 Tage) die relative optimality gap minimal verbessert. Ab der Rechendauer von 290.199 Sekunden bis zum Programmabsturz wird weder ein Schedule mit geringeren Projektgesamtkosten noch eine bessere untere Schranke gefunden.

Auf einen Praxisfall übertragen zeigt sich, dass die Berechnungsergebnisse bereits nach 38.278 Sekunden (ca. 10,63 Stunden) ausreichend gut sind, da ein Schedule mit einem Zielfunktionswert gefunden wird, der eine relative optimality gap von 0,37 % besitzt.

¹⁴⁶ Es wurden 41 erneuerbare und eine nicht-erneuerbare Ressource übergeben, wobei lediglich 37 erneuerbare Ressourcen benötigt werden (vgl. Tabelle 5.3).

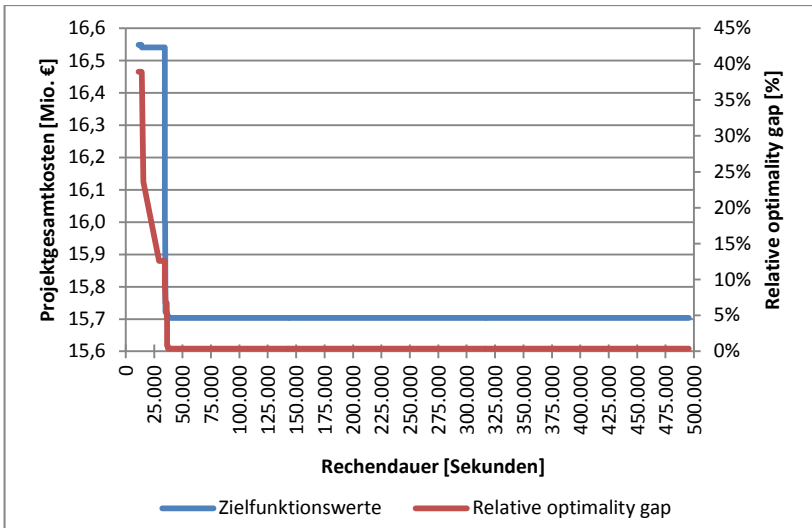


Abbildung 5.14: Projektgesamtkosten und relative optimality gap von Szenario 101 des SWR-Referenzprojekts bei der ausschließlichen Optimierung

Auch für das Referenzprojekt SWR wird bei der Optimierung mit Warmstartlösung schneller eine optimierte Lösung gefunden (vgl. Tabelle 5.13). Nach einer Rechendauer von etwa 70,5 Stunden (2,9 Tagen) wurde die Optimierung mit Warmstartlösung manuell abgebrochen, da die relative optimality gap von 0,35%¹⁴⁷ für den Anwendungsfall ausreichend ist. Außerdem sollen im Planungswerkzeug mehrere Szenarien berechnet werden, sodass die in diesem Fall benötigte Rechendauer die akzeptable Wartedauer je Szenario bereits übersteigt.

¹⁴⁷ Dies entspricht einer Abweichung des gefundenen Zielfunktionswerts von der unteren Schranke LB von 55.400 €, wobei nicht bewiesen wurde, ob die LB erreicht werden kann. D. h. es ist möglich, dass die gefundene Lösung bereits optimal ist.

Nach etwa 168.000 Sekunden (ca. 46,8 Stunden) wird die bis zum manuellen Programmabbruch beste untere Schranke (LB) gefunden. Der gefundene Schedule mit den bis zum Abbruch geringsten Projektgesamtkosten wird nach etwa 170.000 Sekunden (ca. 47,2 Stunden) identifiziert (vgl. blaue Linie in Abbildung 5.15).

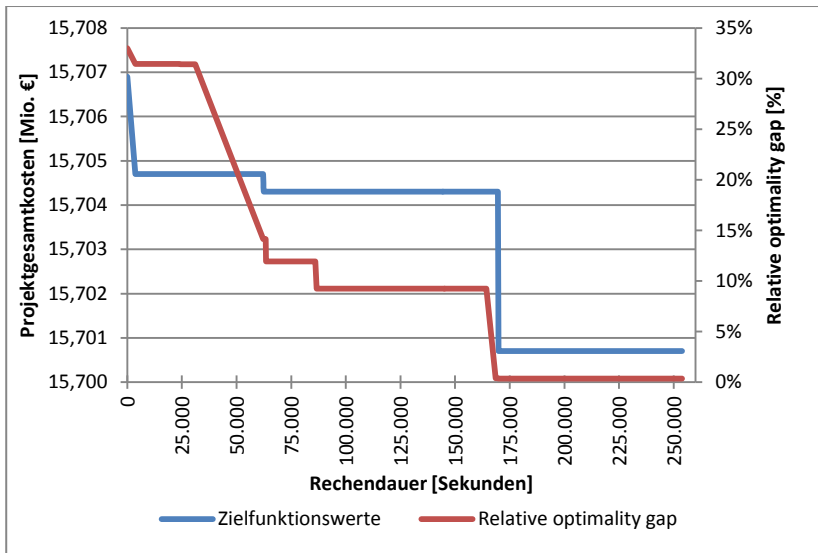


Abbildung 5.15: Projektgesamtkosten und relative optimality gap von Szenario 101 des SWR-Referenzprojekts bei der Optimierung mit Warmstartlösung

Der MLS-Schritt des Lösungsverfahrens findet bereits nach ca. 3,5 Sekunden einen Schedule mit einer relative optimality gap von 5,65 % (vgl. rote Linie in Abbildung 5.16). In der Rechendauer zwischen 3,5 und 2.700 Sekunden (45 Minuten) verbessert der MLS-Algorithmus den Zielfunktionswert um 16.550 € und die relative optimality gap auf 5,53 %. Im ALNS-Schritt (ab einer Rechendauer von 2.700 Sekunden bis 3.600 Sekunden) werden der Zielfunktionswert um 3.600 Euro und die relative

optimality gap von 5,53 % auf 5,51 % verringert. Da das in dieser Arbeit entwickelte Lösungsverfahren eine theoretische untere Schranke verwendet, die nicht angepasst wird, kann die Optimalität nicht immer bewiesen werden. Des Weiteren besitzt der nach Ablauf des vorgegebenen Zeitlimits von 3.600 Sekunden (60 Minuten) berechnete Zielfunktionswert eine relative optimality gap von 5,51 %, was eine theoretische Verbesserung des Zielfunktionswertes um 5,22 % (relative tolerance gap) angibt.

Um die Güte des berechneten Zielfunktionswertes (und dessen Schedule) genauer bestimmen zu können, wird der in jeder Iteration berechnete Zielfunktionswert mit der bei der ausschließlichen Optimierung geringsten vom CPLEX gefundenen unteren Schranke verglichen (vgl. grüne Linie in Abbildung 5.16). Hierbei wird deutlich, dass der Zielfunktionswert des im MLS-Schritt nach ca. 3,5 Sekunden berechneten Schedules bereits eine relative optimality gap von 0,48 % aufweist. Somit ist festzuhalten, dass das entwickelte Lösungsverfahren zwar nicht immer eine „gute“ untere Schranke berechnet, dass allerdings die berechneten Schedules nach wenigen Sekunden bereits sehr nahe an Schedules mit minimalem/optimalem Zielfunktionswert liegen.

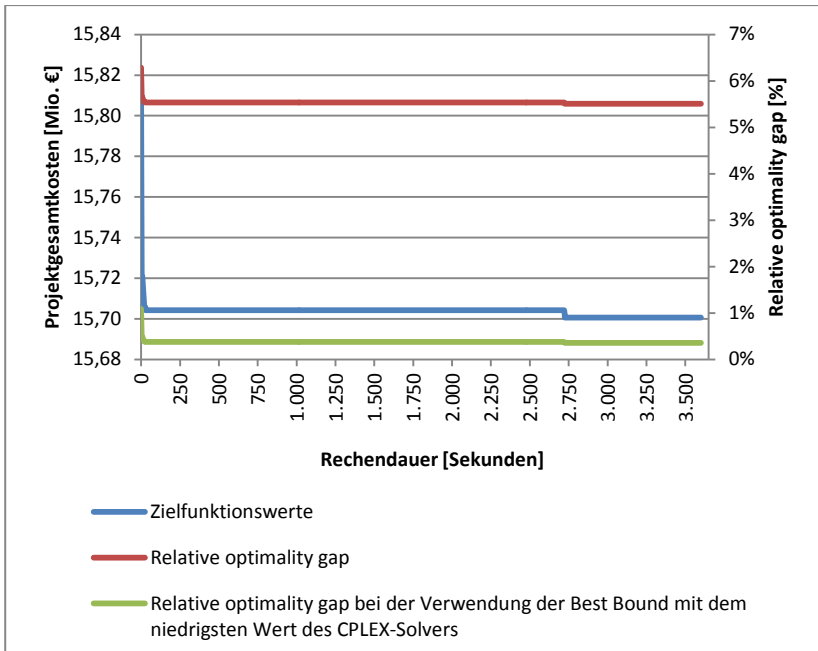


Abbildung 5.16: Projektgesamtkosten und relative optimality gap von Szenario 101 des SWR-Referenzprojekts bei der Optimierung mit dem in dieser Arbeit entwickelten Lösungsverfahren

Die Berechnungen des Referenzprojekts des SWR zeigen, dass alle drei Optimierverfahren vor dem Erreichen des vorgegebenen Zeitlimits bzw. vor dem Abbruch Lösungen berechnen, die dem globalen Optimum des Zielfunktionswerts sehr nahe sind. Allerdings unterscheiden sich die Rechendauern zwischen den angewendeten Rechenverfahren. Während das Lösungsverfahren bereits nach ca. 3,5 Sekunden eine Lösung nahe dem globalen Optimum findet, benötigt die ausschließliche Optimierung hierzu ca. 9,6 Stunden. Der Optimierung mit Warmstartlösung wird bereits eine Lösung nahe dem globalen Optimum aus dem MLS-Schritt übergeben.

5.2.4.3 Referenzprojekt „Rückbau einer Gesamtanlage“

Die ausschließliche Optimierung des Referenzprojekts „Gesamter Rückbau“ wurde nach etwa 234 Stunden (ca. 9,8 Tage) manuell abgebrochen, da bis zu diesem Zeitpunkt kein zulässiger Schedule gefunden werden konnte. Ein möglicher Grund hierfür könnte die Problemkomplexität sein, welche durch die 892.564 Entscheidungsvariablen (davon 892.541 Binär- und 23¹⁴⁸ andere Entscheidungsvariablen) und die 98.221 Nebenbedingungen verdeutlicht wird¹⁴⁹. Ein weiterer möglicher Grund könnte sein, dass sich der CPLEX-Solver in einem lokalen Minimum „verfangen“ hat. Sowohl die Problemkomplexität als auch das „Verfangen“ in lokalen Minima sind durch das entwickelte Lösungsverfahren handhabbar.

Bei der Optimierung mit einer Warmstartlösung wird die Berechnung aus dem gleichen Grund wie bei der ausschließlichen Optimierung des Referenzprojekts des SWR (vgl. Kapitel 5.2.4.2) nach etwa 145 Stunden (ca. 6 Tage) abgebrochen. Bis zum Programmabbruch konnten eine untere Schranke und ein im Vergleich zur Warmstartlösung um 166.936 Euro (0,03 %) verbesserter Zielfunktionswert gefunden werden. Die Projektgesamtkosten des berechneten Schedules weisen eine relative optimality gap von 5,40 % auf. D.h. dass maximal ein Schedule mit um 25.545.000 Euro geringeren Projektgesamtkosten (maximale Verbesserung um 5,12 %) berechnet werden kann (wobei auch hier die untere Schranke LB nur einen theoretisch erreichbaren Wert darstellt).

Das in dieser Arbeit entwickelte Lösungsverfahren findet in dem berechneten Szenario nach ca. 1.515 Sekunden (ca. 25 Minuten) eine Lösung, die bereits nah an der Lösung liegt, die bis zum Ende des vorgegebenen

¹⁴⁸ Es wurden 22 erneuerbare und eine nicht-erneuerbare Ressource übergeben (vgl. Tabelle 5.4).

¹⁴⁹ Einige Szenarien des Referenzprojekts des Rückbaus einer Gesamtanlage weisen über eine Million Entscheidungsvariablen auf, wobei davon lediglich 23 Entscheidungsvariablen nicht binär sind.

Zeitlimits von 3.600 Sekunden (60 Minuten) gefunden wird (vgl. Abbildung 5.17). Ab der Rechendauer von 1.515 Sekunden bis zum Zeitlimit von 3.600 Sekunden wird der Zielfunktionswert um 96.660 € reduziert.

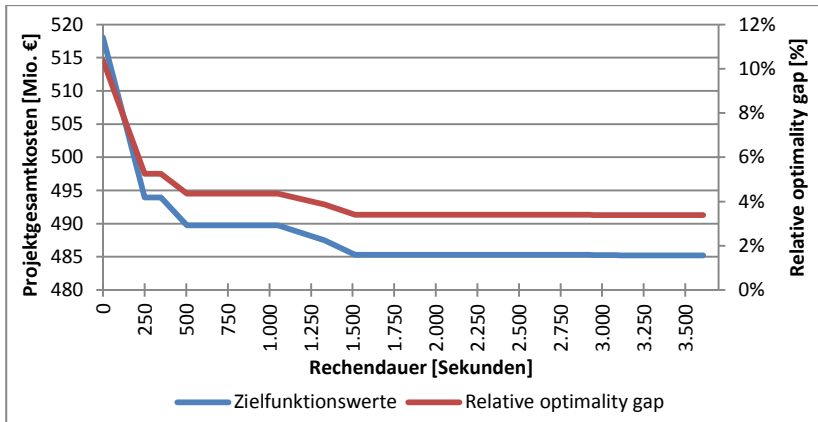


Abbildung 5.17: Projektgesamtkosten und relative optimality gap von Szenario 101 des Referenzprojekts „Gesamter Rückbau“ bei der Optimierung mit dem in dieser Arbeit entwickelten Lösungsverfahren

Der durch das Lösungsverfahren zuletzt berechnete Schedule besitzt Projektgesamtkosten, die um 13.730.862 Euro (2,75 %) geringer sind als die Projektgesamtkosten des Schedules, der mit Hilfe der Optimierung mit Warmstartlösung berechnet wurde (vgl. Tabelle 5.13). Zur Berechnung der aufgeführten Werte benötigte die Optimierung mit Warmstartlösung ca. 145 Mal so lange wie das Lösungsverfahren.

5.2.4.4 Zusammenfassung der Ergebnisse

Es zeigt sich, dass das entwickelte Lösungsverfahren schneller einen Schedule berechnet, der einen geringeren Zielfunktionswert besitzt, als die Optimierung im CPLEX Studio IDE (sowohl die ausschließliche Optimierung als auch die Optimierung mit Warmstartlösung) (vgl. Tabelle 5.13).

Tabelle 5.13: Gegenüberstellung der Rechendauern, der berechneten Zielfunktionswerte und der relative optimality gaps. Ergebnisse der Optimierung mit Hilfe des entwickelten Lösungsverfahrens, der ausschließlichen Optimierung und der Optimierung mit Warmstartlösung. Je Referenzprojekt auf Szenario 101 angewendet.

		Optimierung m.H. des entwickelten Lösungs- verfahrens¹⁵⁰	Ausschließliche Optimierung	Optimierung mit Warmstart- lösung
DWR	Rechendauer [Sekunden (Minuten)]	1,33 (0,02)	514 (8,57)	215 (3,58)
	Zielfunktionswert [€]	10.129.250	10.129.250	10.129.250
	Relative optimality gap [%]	0,00	0,00	0,00
SWR	Rechendauer [Sekunden (Stunden)]	3.600 (1)	495.509 (137,64)*	253.753 (70,49)***
	Zielfunktionswert [€]	15.700.650	15.703.700*	15.700.700***
	Relative optimality gap [%]	5,51	0,37*	0,35***

¹⁵⁰ Bei der Verwendung der Parameterkombination der Kalibrierungsergebnisse aus Kapitel 5.2.1, einem kumulierten Zeitlimit von 3.600 Sekunden (60 Minuten) und der Aufteilung des kumulierten Zeitlimits gemäß $MLS_{2700}ALNS_{900}$ (vgl. Kapitel 5.2.2).

Gesamter Rückbau	Rechendauer [Sekunden (Stunden)]	3.607 (1)	844.820 (234,67)	522.959 (145,27)*
	Zielfunktionswert [€]	485.225.138	**	498.956.000*
	Relative optimality gap [%]	3,39	**	5,40*

* Die Berechnung ist nach der Ausgabe dieser Werte abgestürzt.

** Es wurde kein Wert gefunden.

*** Die Berechnung wurde manuell abgebrochen.

Der Verlauf der gefundenen Schedules mit geringeren Projektgesamtkosten in Abhängigkeit der Rechendauer (im Folgenden als *Kostenverlauf in Abhängigkeit der Rechendauer* bezeichnet) zeigt, dass das entwickelte Lösungsverfahren bei den untersuchten Szenarien immer schneller eine Lösung findet als die Optimierung ohne Heuristik (sowohl mit als auch ohne Startlösung). Allerdings kann die Optimalität lediglich beim DWR-Referenzprojekt bewiesen werden (vgl. Abbildung 5.18). Im Vergleich zur ausschließlichen Optimierung und zur Optimierung mit Warmstartlösung findet das Lösungsverfahren so schnell eine optimale Lösung, dass die Verbesserung des Zielfunktionswertes in Abbildung 5.18 lediglich als senkrechter (blauer) Strich zu erkennen ist. Da die relative optimality gap des Lösungsverfahrens bereits im ersten MLS-Schritt mit 0,052 % einen Wert nahe von 0 % erreicht, ist diese in Abbildung 5.18 lediglich als Punkt zu erkennen.

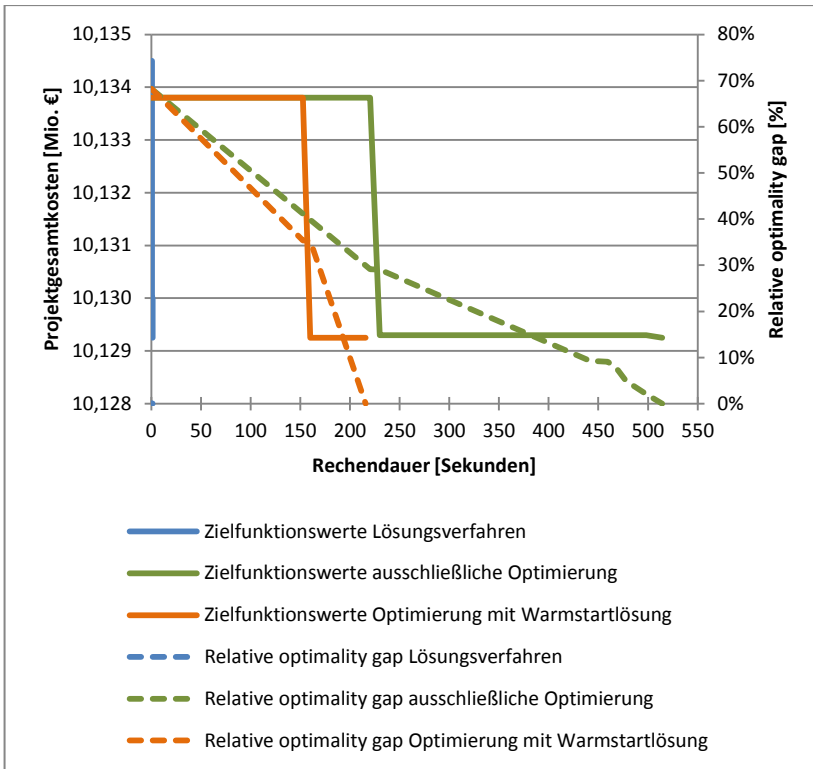


Abbildung 5.18: Kostenverlauf in Abhängigkeit der Rechendauer der Zielfunktionswerte sowie der relative optimality gaps des Lösungsverfahrens, der ausschließlichen Optimierung und der Optimierung mit Warmstartlösung für Szenario 101 des DWR-Referenzprojekts

Beim DWR-Referenzprojekt findet die Optimierung mit Warmstartlösung sowohl schneller den Schedule mit minimalen Projektgesamtkosten als auch eine relative optimality gap von 0 % (durchgezogene und gestrichelte orange Linien in Abbildung 5.18) im Vergleich zur ausschließlichen Optimierung (durchgezogene und gestrichelte grüne Linien in Abbildung 5.18).

Dagegen findet der CPLEX-Solver mit Startlösung beim SWR-Projekt zwar schneller einen Schedule mit geringen Projektgesamtkosten (durchgezogene orange Linie in Abbildung 5.19) im Vergleich zur ausschließlichen Optimierung (durchgezogene grüne Linie in Abbildung 5.19), aber die Optimierung mit Startlösung benötigt länger, um die relative optimality gap zu reduzieren (gestrichelte orange Linie in Abbildung 5.19), als die ausschließliche Optimierung (gestrichelte grüne Linie in Abbildung 5.19).

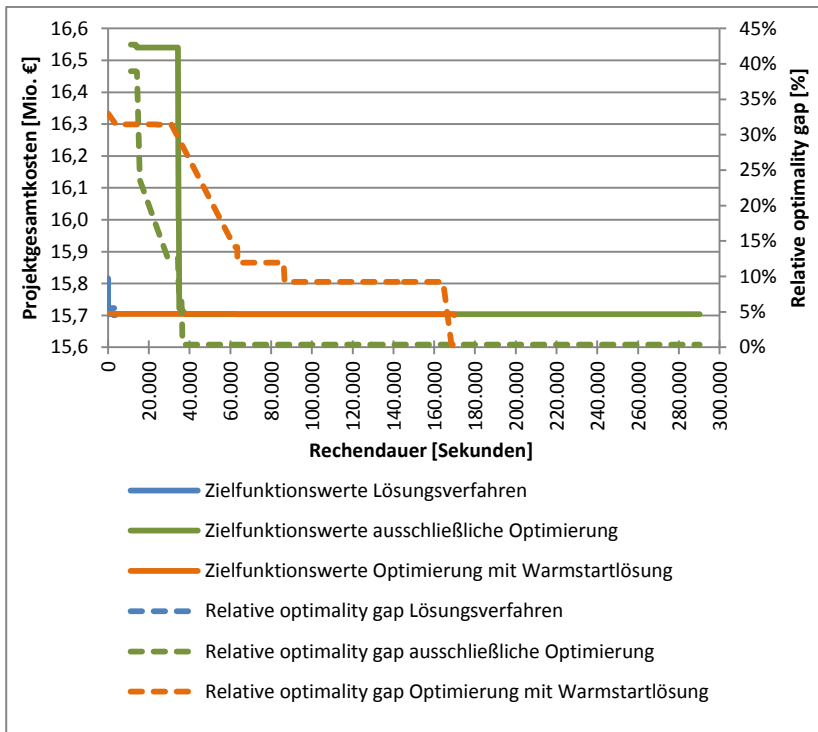


Abbildung 5.19: Kostenverlauf in Abhängigkeit der Rechendauer der Zielfunktionswerte sowie der relative optimality gaps des Lösungsverfahrens, der ausschließlichen Optimierung und der Optimierung mit Warmstartlösung für Szenario 101 des SWR-Referenzprojekts. Verlauf bis keine Verbesserung mehr gefunden wurde.

Da beim SWR-Referenzprojekt mit der Optimierung mit Warmstartlösung im Vergleich zur ausschließlichen Optimierung zwar viel schneller ein Schedule mit geringen Projektgesamtkosten gefunden, allerdings mehr Zeit benötigt wird, um die Güte mit Hilfe der relative optimality gap zu zeigen (vgl. Abbildung 5.19), ist vom Entscheider abzuwägen, ob das Aufzeigen der Güte der gefundenen Lösung notwendig ist. Wenn dies der Fall ist, dann ist die Verwendung der ausschließlichen Optimierung der Optimierung mit Warmstartlösung vorzuziehen. Wenn dies nicht der Fall ist, dann ist die Optimierung mit Warmstartlösung der ausschließlichen Optimierung vorzuziehen.

In Abbildung 5.19 ist wie in Abbildung 5.18 die viel kürzere Rechendauer des Lösungsverfahrens im Vergleich zur ausschließlichen Optimierung und zur Optimierung mit Warmstartlösung zu erkennen. Gleichzeitig sind die durch das Lösungsverfahren berechneten Projektgesamtkosten geringer als die durch die ausschließliche Optimierung und die Optimierung mit Warmstartlösung berechneten Projektgesamtkosten.

Für das Referenzprojekt „Rückbau einer Gesamtanlage“ konnte mit der ausschließlichen Optimierung bis zum manuellen Programmabbruch kein Schedule identifiziert werden. Der bis zum Programmabbruch mit der Optimierung mit Warmstartlösung berechnete Schedule besitzt höhere Projektgesamtkosten als der vom Lösungsverfahren berechnete Schedule und benötigt eine ca. 145 Mal so lange Rechendauer (vgl. Tabelle 5.13 und Kapitel 5.2.4.3).

Zusammenfassend kann festgehalten werden, dass bei der Verwendung des in dieser Arbeit entwickelten Lösungsverfahrens zur Berechnung optimierter Schedules zwar die relative optimality gap aufgrund der schlechten unteren Schranke höher ausfallen kann als bei der ausschließlichen Optimierung bzw. der Optimierung mit Warmstartlösung (und damit die Optimalität der berechneten Lösung nicht immer bewiesen werden kann), dass allerdings das entwickelte Lösungsverfahren sowohl im

Gegensatz zur ausschließlichen Optimierung als auch zur Optimierung mit Warmstartlösung in kürzerer Zeit mindestens so gute Schedules, d. h. Schedules mit mindestens so geringen Projektgesamtkosten, berechnet. Die kurzen Rechendauern je Szenario sind insbesondere wichtig, da in einer vertretbaren Dauer für mehrere simulierte Szenarien optimierte Schedules berechnet werden können.

5.2.5 Wahl eines robusten Schedules

Die in Kapitel 5.2.2 berechneten und optimierten Schedules des Referenzprojekts des Rückbaus einer Gesamtanlage (vgl. Kapitel 5.1.3) werden im Folgenden hinsichtlich ihrer Robustheit untersucht, um aus allen berechneten Schedules einen robusten Schedule zu identifizieren.

Für dieses Projekt und dessen optimierte Schedules werden zur Bewertung der Robustheit die gewählten Robustheitsmaße aus Kapitel 4.5.5.1 (vgl. Tabelle 4.6) und die Gewichtungsfaktoren aus Tabelle 4.7 verwendet.

Für das Referenzprojekt des Rückbaus einer Gesamtanlage erhalten die 500 Schedules (für jedes der 100 Szenarien zum Testen wurden fünf optimierte Schedules berechnet) gewichtete Summen der Robustheitsbewertung zwischen ca. 0,23 und ca. 0,86 (vgl. Tabelle 5.14). Der robusteste Schedule (die gewichtete Summe der Robustheitsmaße beträgt ca. 0,86) ist mit Kosten in Höhe von 484.609.296 Euro um 11.676.440 Euro (ca. 2,4 %) teurer als der günstigste Schedule (mit Kosten von 472.932.856 Euro und einer gewichtete Summe der Robustheitsmaße von ca. 0,54).

In Tabelle 5.14 sind insbesondere die Eigenschaften des robustesten und des am wenigsten robusten sowie des günstigsten und teuersten Schedules fett markiert. Die Eigenschaften aller optimierten Schedules des Referenzprojekts des Rückbaus einer Gesamtanlage sind in Anhang A.9 aufgeführt. Die in Tabelle 5.14 und in Anhang A.9 angegebenen Plannummern geben die Reihenfolge an, in der die Pläne hinsichtlich ihrer

Robustheit untersucht werden. Diese Nummer beinhaltet keine Aussage über die Robustheit und dient im Folgenden lediglich zur Identifikation der Schedules.

Tabelle 5.14: Optimierte Schedules und deren Eigenschaften des Referenzprojekts des Rückbaus einer Gesamtanlage sortiert nach der gewichteten Summe der Robustheit (Rang)

Rang (sortiert nach gewichteter Summe der Robustheitsmaße)	Plannummer	Gewichtete Summe der Robustheitsmaße	Szenario	Kosten [€]	LB [€]	Relative optimality gap
1	460	0,864084254	191	484.609.296	455.490.451	0,063928552
2	459	0,861648645	191	483.920.099	455.490.451	0,062415464
3	9	0,853100803	200	481.969.208	454.042.301	0,06150728
4	214	0,852166386	147	483.821.590	456.384.184	0,060119099
5	458	0,84895152	191	483.355.258	455.490.451	0,061175392
:	:	:	:	:	:	:
286	442	0,676655501	107	479.626.504	455.608.785	0,052715663
287	495	0,676278842	198	490.463.854	460.779.097	0,064422968
288	418	0,675968259	184	487.937.509	460.783.337	0,058930456
:	:	:	:	:	:	:
410	401	0,544488573	181	475.962.579	455.086.820	0,045872036
411	326	0,544230969	168	472.932.856	447.673.521	0,056423563
412	327	0,539164975	168	473.257.890	447.673.521	0,057149614
:	:	:	:	:	:	:
498	92	0,329395456	125	478.417.735	451.735.218	0,059066719
499	26	0,317503917	112	477.534.871	452.898.695	0,054396659
500	241	0,229709156	152	475.464.350	452.120.580	0,051631735

Ein funktioneller Zusammenhang zwischen der Robustheit und den Projektkosten verschiedener Szenarien ist nicht zu erkennen (vgl. Abbildung 5.20). Die blauen Punkte in Abbildung 5.20 repräsentieren jeweils einen Schedule. Des Weiteren sind der robusteste und der günstigste Schedule durch einen roten bzw. violetten Punkt und eine Beschriftung hervorgehoben.

Vom robustesten Schedule zeigt eine horizontale Linie an, dass lediglich darunter liegende Schedules gewählt werden sollten, da diese zwar weniger robust, dafür aber günstiger sind. Im Gegensatz dazu sind alle Schedules oberhalb der horizontalen Linie weniger robust und gleichzeitig teurer, was aus Sicht eines Planers nicht sinnvoll erscheint.

Ausgehend vom günstigsten Schedule zeigt die vertikale Linie an, welche Schedules weniger robust (links von der vertikalen Linie) oder robuster (rechts von der vertikalen Linie) sind.

Für den Entscheider sind insbesondere die im sich von den beiden Linien aufgespannten unteren rechten Quadranten befindlichen Schedules von Interesse, da diese einen Trade-off zwischen den Projektgesamtkosten und der Robustheit aufweisen. Im Besonderen sind die Schedules zu vergleichen, die sich weitest möglich unten rechts befinden. Neben dem robustesten und dem günstigsten Schedule sind somit insbesondere die Schedules entlang der grünen Linie von Interesse (vgl. Abbildung 5.20). In Abbildung 5.20 werden die Plannummern ausgewählter Schedules angegeben, die für die Sensitivitätsanalyse relevant sind (vgl. Kapitel 5.3).

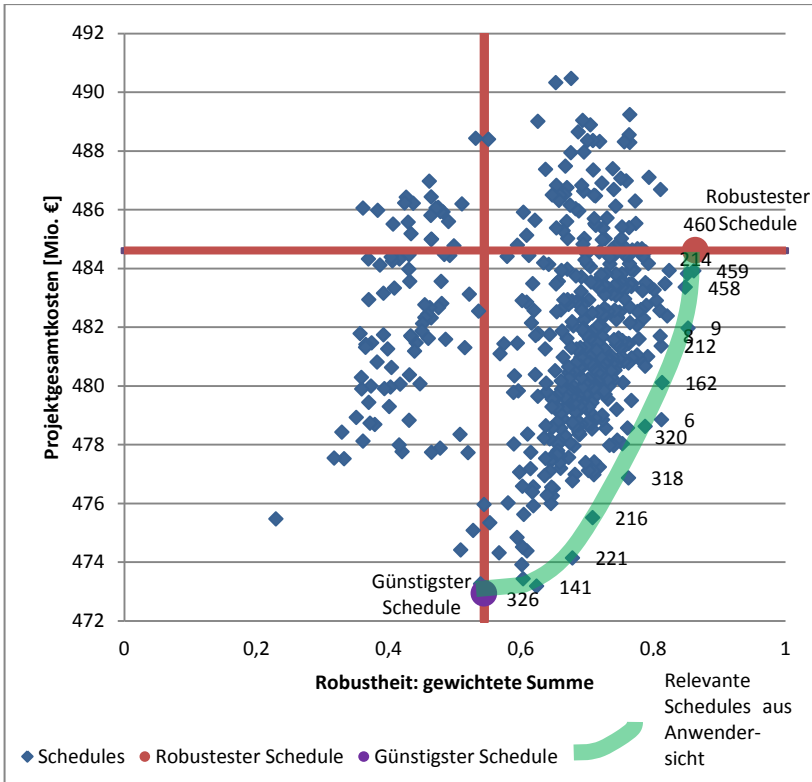


Abbildung 5.20: Zusammenhang zwischen gewichteter Summe und Kosten der optimierten Schedules des Referenzprojekts des Rückbaus einer Gesamtanlage

Für das Referenzprojekt des Rückbaus einer Gesamtanlage sind neben dem robustesten und dem günstigsten Schedule viele weitere Schedules von Bedeutung (vgl. grüne Präferenzkurve im rechten unteren Quadranten in Abbildung 5.20). Die Eigenschaften einiger dieser potentiell interessanten Schedules sind in Tabelle 5.15 aufgeführt. Auch hierbei dient die Plannummer lediglich zur Identifikation der Schedules und beinhaltet keine Aussage über die Robustheit der untersuchten Schedules.

Tabelle 5.15: Eigenschaften des günstigsten und robustesten Schedules sowie einiger der potentiell interessanten Schedules des Referenzprojekts des Rückbaus einer Gesamtanlage auf der grünen Linie aus Abbildung 5.20, sortiert nach der gewichteten Summe der Robustheitsmaße

Plannummer	Szenario	Kosten[€]	LB [€]	Projektdauer [Tage]	Robustheit: gewichtete Summe	Relative optimality gap
460	191	484.609.296	455.490.451	3048	0,864084254	0,063928552
459	191	483.920.099	455.490.451	3088	0,861648645	0,062415464
214	147	483.821.590	456.384.184	3075	0,852166386	0,060119099
458	191	483.355.258	455.490.451	3120	0,84895152	0,061175392
9	200	481.969.208	454.042.301	3073	0,853100803	0,06150728
8	200	481.692.774	454.042.301	3071	0,811174093	0,060898451
212	147	481.351.985	456.384.184	3066	0,812417308	0,054707858
162	138	480.108.512	456.117.413	3077	0,814049835	0,052598516
6	200	478.848.775	454.042.301	3092	0,812784371	0,05463472
320	166	478.619.432	451.206.690	3115	0,788417266	0,06075429
318	166	476.868.102	451.206.690	3111	0,762789024	0,056872854
216	148	475.512.744	450.680.740	3060	0,708675189	0,05509888
221	103	474.140.409	449.834.873	3082	0,678371292	0,054032129
141	134	473.179.046	448.704.223	3047	0,62383233	0,05454556
326	168	472.932.856	447.673.521	3017	0,544230969	0,056423563

Es fällt auf, dass alle in Tabelle 5.15 aufgeführten Schedules den Verkauf des Generators wählen, was im Netzplan unter der Annahme mit einer Wahrscheinlichkeit von 80 % wahrscheinlicher als eine Verschrottung ist (20 %). Somit besitzen diese Schedules die gleichen

Vorgänger-Nachfolger-Beziehungen. Eine detailliertere Betrachtung der aufgeführten Schedules bzgl. abweichender Startzeitpunkte einzelner Vorgänge etc. wird im Rahmen dieser Arbeit nicht ausgeführt, da die Betrachtung aller Unterschiede der Schedules zu umfangreich wäre.

5.3 Sensitivitätsanalysen bei der Variation der Gewichtungen der Robustheitsmaße

Da keine realen Daten, sondern lediglich Referenzdaten, für die Berechnungen verwendet werden konnten, ist eine Gegenüberstellung der berechneten Schedules mit händisch erstellten Plänen nicht möglich. Im Folgenden werden daher lediglich die aus Sicht eines Planers interessanten Schedules (vgl. Kapitel 5.2.5) detaillierter untersucht. Hierbei wird allerdings lediglich auf die wesentlichen Eigenschaften bestimmter Schedules eingegangen, weil eine detailliertere Betrachtung im Rahmen dieser Arbeit zu umfangreich wäre.

Da zur Auswahl eines geeigneten Schedules die gewichtete Summe der Robustheitsbewertung von den je Robustheitsmaß gewählten Gewichtungen abhängt, wird im Folgenden eine exemplarische Variation der Gewichtungen aus Tabelle 4.7 durchgeführt (vgl. Tabelle 5.16). Ein Anwender des Planungswerkzeugs sollte ausreichend viele Variationen der Gewichtungen und deren Auswirkungen auf die gewichtete Summe der Robustheitsmaße, d. h. ausreichend viele Sensitivitäten, prüfen, um sein Verständnis bzgl. der Sensitivitäten zu stärken. Im Folgenden wird lediglich exemplarisch eine Variation der Gewichtungen der Robustheitsmaße untersucht, um deren Auswirkungen aufzuzeigen.

Im Rahmen der in dieser Arbeit durchgeführten Sensitivitätsanalyse werden die folgenden Robustheitsmaße aus folgenden Gründen (nicht) verwendet:

- M1: Da die Startzeitpunkte der Vorgänge eingehalten werden sollen, bietet sich die Verwendung dieses Maßes zum Vergleich der Startzeitpunkte in verschiedenen Schedules an.
- M2: Auch bei diesem Maß bietet sich die Verwendung aufgrund des Vergleichs der Startzeitpunkte in verschiedenen Schedules an.
- M3: Dieses Maß wird verwendet, weil dieses gemäß Khemakhem und Chtourou (2013) die höchste positive Korrelation mit der Solution und Quality Robustness eines Plans aufweist.
- M4: Da in jedem Schedule a mindestens ein Vorgang i mit $FP_i^a = 0$ existiert, erhalten alle Schedules die gleiche Bewertung durch dieses Maß. Aus diesem Grund bietet sich die Verwendung des Kombinierten Pufferanspruchs für die beiden Projektbeispiele nicht an.
- M5: Die Auswertung der Robustheit dieses Maßes hat gezeigt, dass wenige Unterschiede bzgl. dieses Maßes zwischen den einzelnen Schedules bestehen, sodass sich eine Verwendung im Folgenden nicht anbietet.
- M6: Die Kombination aus einem zeitlichen Puffer und der Ressourceninanspruchnahme ist ein praktikables Maß, um die Möglichkeit einer Unsicherheitsbewältigung während der Projektausführung zu bewerten. Somit wird dieses Maß im Folgenden berücksichtigt.
- M7: Da der Vergleich der Projektdauern verschiedener Schedules wenig über die Gleichheit oder Unterschiede dieser Schedules aussagt, wird dieses Maß im Folgenden nicht berücksichtigt.

- M8: Die beiden im Rahmen dieser Arbeit berücksichtigten Projekte beinhalten lediglich einen Entscheidungspunkt mit unterschiedlichen Pfaden. Aus diesem Grund weisen verschiedene Schedules diesbezüglich nur wenige oder keine Unterschiede auf. Die Verwendung dieses Maßes bietet sich somit für die Evaluation der vorliegenden Projektbeispiele im Folgenden nicht an. Es sei aber angemerkt, dass bei Plänen mit mehr Entscheidungspunkten im Netzplan dieses Maß verwendet werden sollte, um Ähnlichkeiten und Unterschiede verschiedener Schedules mit unterschiedlichen Vorgängen zu identifizieren.
- M9: Da die Robustheitsbewertung bei diesem Maß stark vom gewählten Intervall abhängt und dieses Intervall beliebig bestimmt werden kann, wird dieses Maß im Rahmen der Sensitivitätsanalyse dieser Arbeit nicht verwendet.
- M10: Sofern verschiedene Schedules gleiche Vorgänger-Nachfolger-Beziehungen besitzen, sagt dies sehr viel über die Ähnlichkeit dieser Schedules bzgl. der Vorgangsstruktur aus. Aus diesem Grund wird dieses Maß im Folgenden angewendet.

Die im Folgenden für die Sensitivitätsanalyse verwendeten fünf Robustheitsmaße werden jeweils gleich mit 0,2 gewichtet (vgl. Tabelle 5.16).

Tabelle 5.16: Angepasste Gewichtungsfaktoren der verwendeten Robustheitsmaße zur Durchführung einer Sensitivitätsanalyse

G1	G2	G3	G4	G5	G6	G7	G8	G9	G10
0,2	0,2	0,2	0	0	0,2	0	0	0	0,2

Die Sensitivitätsanalyse mit den in Tabelle 5.16 aufgeführten Gewichtungen führt zu einer Verschiebung der Schedules bzgl. ihrer Robustheitsbewertung (gewichtete Summe der Robustheitsmaße). In Abbildung 5.21 werden die ursprünglichen und die verschobenen Schedules für alle 500 simulierten und kostenoptimierten Schedules (100 Szenarien, die jeweils fünf Mal optimiert wurden) im Robustheits-Kosten-Diagramm aufgezeigt. Durch die veränderte Gewichtung der Robustheitsmaße verschiebt sich auch die Linie potentiell interessanter Schedules.

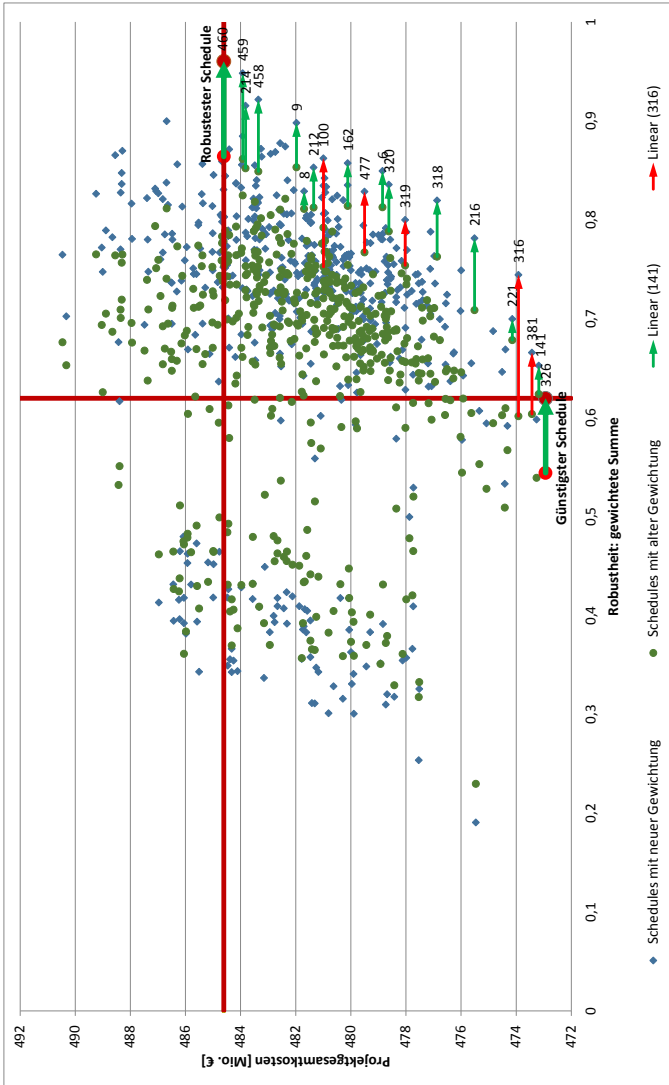


Abbildung 5.21: Verschiebung der Schedule-Bewertungen bei geänderten Gewichtungen der Robustheitsmaße im Robustheits-Kosten-Diagramm im Vergleich zu Abbildung 5.20 für das Referenzprojekt des Rückbaus einer Gesamtanlage

Ein Planer erhält mit Hilfe der Kennzahl der Projektgesamtkosten der kostenoptimierten Schedules, der Robustheitsbewertungen und der Sensitivitätsanalyse in kurzer Zeit ein übersichtliches Bild über alternativ ausführbare und kostenoptimierte bzw. besonders robuste Pläne. Diese Pläne sollte ein Planer jedoch detaillierter untersuchen. Der Vorteil des Planungswerkzeugs liegt insbesondere darin, dass dem Planer mögliche Szenarien und je Szenario kostenoptimierte und robuste Schedules berechnet werden, aus denen der Planer einen nach seinen Präferenzen zu genehmigenden Schedule aussuchen kann. Die Dauer zur Erstellung und Identifikation eines Schedules, welcher der Genehmigungsbehörde vorgelegt werden kann, wird mit Hilfe des Planungswerkzeugs im Vergleich zur bisherigen „händischen Planung“ erheblich reduziert.

6 Schlussfolgerungen und Ausblick

Im Folgenden werden die vorliegende Arbeit und deren Ergebnisse in Kapitel 6.1 zusammengefasst. Mit Hilfe des entwickelten Planungswerkzeugs kann die Forschungsfrage dieser Arbeit beantwortet werden. Abschließend wird in Kapitel 6.2 die Arbeit kritisch gewürdigt und es wird ein Ausblick auf zukünftige Forschungsarbeiten gegeben.

6.1 Zusammenfassung und Beantwortung der Forschungsfrage

Großprojekte mit Kosten von teilweise über einer Milliarde Euro, langen Ausführungsdauern sowie vielen unterschiedlichen privaten und öffentlichen Stakeholdern stellen gemäß Flyvbjerg, (2014, S. 6) den größten „Investment Boom“ der Menschheitsgeschichte dar. Viele abgeschlossene und laufende Großprojekte weisen Kostenüberschreitungen und eine länger als geplante Ausführungsdauer auf. Neben Problemen des Managements und der Steuerung dieser Projekte liegt der Grund für diese Abweichungen insbesondere in einer unzureichenden Planung.

Der Rückbau kerntechnischer Anlagen stellt ebenfalls ein Großprojekt dar, welches häufig Kosten- und Projektdauerüberschreitungen der ursprünglichen Planung aufweist. Aufgrund politischer, technischer oder ökonomischer Gründe werden in den kommenden Jahrzehnten viele Großprojekte des Rückbaus kerntechnischer Anlagen anstehen. Aus diesem Grund wurde die Planung des Rückbaus kerntechnischer Anlagen in dieser Arbeit als Fallbeispiel exemplarisch untersucht und optimiert.

Aufgrund weniger Erfahrungswerte im kerntechnischen Rückbau ist die Planung unter der Berücksichtigung von Unsicherheiten durchzuführen. Gleichzeitig sind insbesondere aufgrund der Gefahren durch die in kerntechnischen Anlagen vorherrschende Radioaktivität und der gesundheitschädigenden ionisierenden Strahlung viele Sicherheitsmaßnahmen in der Planung und während des Rückbaus zu berücksichtigen. Aufgrund der potentiellen Gesundheitsgefährdungen werden spezielle Technologien zum Trennen von Bauteilen und zur Dekontamination eingesetzt. Zur Sicherstellung der Schutzmaßnahmen für Mitarbeiter und die Umwelt sowie zur Regelung des kerntechnischen Rückbaus existiert eine umfangreiche Rechtsgrundlage, die während des Rückbaus und somit bereits bei der Planung berücksichtigt werden muss. Insbesondere sind alle Rückbauarbeiten und die einzusetzenden Ressourcen, wie beispielsweise Technologien und Mitarbeiter, genau einzuplanen und vor der Ausführung behördlich zu genehmigen. Aufgrund der für den kerntechnischen Rückbau notwendigen Genehmigungen ist die Planung des kerntechnischen Rückbaus nicht nur unter der Berücksichtigung von Unsicherheiten und alternativer Technologien, sondern auch über einen langen Zeitraum und in einer ausreichenden Detailtiefe auszuführen. Da ein Genehmigungsverfahren mehrere Jahre in Anspruch nimmt, sollte eine Überarbeitung bereits genehmigter Pläne aus Kosten- und Zeitgründen vermieden werden. Insbesondere aus Sicht der Betreiber, die für die Kosten des Rückbaus der kerntechnischen Anlagen gemäß dem Verursacherprinzip aufkommen müssen, ist die Identifikation eines kostenminimalen Plans von Interesse. Insgesamt sollte somit ein integrierter und operativer Termin- und Ablauf-, Ressourcen- und Kostenplan erstellt werden, der den Rückbau mit minimalen Kosten realisieren kann und der unter der Berücksichtigung von Unsicherheiten während der Projektausführung möglichst planmäßig ausführbar ist.

Bisher wurden Pläne für kerntechnische Rückbauprojekte zumeist händisch erstellt und mit Hilfe von Software visualisiert. Da eine integrierte

Termin- und Ablauf-, Ressourcen- und Kostenplanung unter der Berücksichtigung von Unsicherheiten und auf einer hinreichend detaillierten Ebene aufgrund der hohen Anzahl an Vorgängen, Abhängigkeiten, Alternativen, möglichen Ressourcen und Restriktionen durch Nachdenken sehr schwer optimiert werden kann, bietet sich die Verwendung von optimierenden Verfahren an. Entsprechende Planungswerkzeuge zur computergestützten Optimierung für kerntechnische Rückbauprojekte existieren bisher allerdings nicht.

In einer ausführlichen Literaturrecherche konnte keine optimierende Methode zur Projektplanung kerntechnischer Rückbauprojekte identifiziert werden, welche die speziellen Anforderungen des Anwendungsfalls erfüllt. Aus diesem Grund wurde in dieser Arbeit ein Planungswerkzeug für den Anwendungsfall des Rückbaus kerntechnischer Anlagen entwickelt, welches unter der Berücksichtigung von Unsicherheiten einen integrierten und operativen Termin- und Ablauf-, Ressourcen- und Kostenplan berechnet, der mit minimalen Kosten ausgeführt werden kann.

Das in dieser Arbeit entwickelte Planungswerkzeug besteht aus insgesamt drei Modulen. Im ersten Modul (Modul A) können aus einer Datenbank mit gespeicherten Erfahrungswerten mit Hilfe von regelbasierten Abfragen relevante Daten für ein neu zu planendes Projekt extrahiert werden. Dieses sogenannte **Expertensystem** wurde im Rahmen dieser Arbeit entworfen und als relationale Datenbank in Microsoft Access implementiert. Einem Anwender ist es möglich, durch vorgefertigte Formulare und Benutzeroberflächen Daten in die Datenbank einzutragen oder gespeicherte Daten zu bearbeiten und abzufragen. Zur Abfrage von Daten muss der Anwender Angaben zum neu zu planenden Projekt machen, sodass basierend auf diesen Angaben relevante Daten regelbasiert identifiziert und ausgegeben werden. Diese Daten kann der Anwender übernehmen oder anpassen. Das Expertensystem dient dazu, dass durch die Identifikation relevanter Erfahrungswerte Unsicherheiten in der Planung reduziert werden.

Da trotz bestehender Erfahrungswerte Unsicherheiten in der Planung existieren, wird in einem zweiten Modul im ersten Schritt ((1) in Modul B) basierend auf den Daten des zu planenden Projekts eine vom Nutzer definierbare Anzahl an **Szenarien simuliert**. Zur Simulation verschiedener Szenarien sind Daten mit Unsicherheiten bezüglich der Vorgangsdauern (durch die Angabe der minimalen, maximalen und wahrscheinlichsten Dauer) sowie bezüglich der Ausführungswahrscheinlichkeit der Vorgänge anzugeben. Während der Simulation eines Szenarios wird zunächst eine mögliche Abfolge von Vorgängen und anschließend werden die Vorgangsdauern dieser Vorgänge bestimmt. Hierzu werden die Angaben zur Ausführungswahrscheinlichkeit sowie die aus den Angaben der minimalen, maximalen und wahrscheinlichsten Dauern erstellte Beta-Verteilung verwendet.

Jedes simulierte Szenario stellt eine deterministische Ausführungsmöglichkeit dar und wird im zweiten Schritt von Modul B ((2) in Modul B) mit Hilfe einer **Scheduling Methode** hinsichtlich der Kosten optimiert. Sofern keine Daten aus dem Expertensystem extrahiert werden können oder wenn ein Anwender lediglich deterministische Daten (ohne Unsicherheiten) des zu planenden Projekts vorliegen hat, können diese direkt der Scheduling Methode übergeben werden. Die Scheduling Methode stellt eine geeignete Erweiterung des sogenannten Multi-Mode Resource Investment Problems (MRIP) mit entsprechenden Lösungsalgorithmen dar. Da keine mathematische Formulierung aus der Literatur die speziellen Anforderungen des Großprojekts Rückbau einer kerntechnischen Anlage abbilden kann, wurden diese Anforderungen mathematisch als Mixed Integer Problem (MIP) formuliert. Das Lösen dieses MIP mit Hilfe eines Solvers, z. B. CPLEX, ist aufgrund der Problemkomplexität und des Umfangs der zu optimierenden Projekte (in angemessener Rechendauer) nicht möglich. Aus diesem Grund wurde ein **neues Lösungsverfahren** entwickelt. Zur Lösung des mathematischen Problems werden zunächst mit Hilfe des sogenannten Parallel Schedule Generation Scheme (PSGS) zulässige

Schedules der Vorgänge je Szenario erstellt. In einem Multi-Start Local Search (MLS) Algorithmus wird das PSGS mehrfach ausgeführt, wobei jeweils eine Variation der Modi der einzuplanenden Vorgänge und eine Variation der Reihenfolge der Einplanung von Vorgangsverbänden untersucht werden. Jeder durch einen PSGS-Durchlauf erstellte Schedule wird durch eine lokale Suche im MLS-Algorithmus nochmals optimiert. Die dabei jeweils durch den PSGS erzeugten und durch die lokale Suche verbesserten Schedules werden hinsichtlich ihrer Projektgesamtkosten verglichen, um den Schedule mit den geringsten Projektgesamtkosten zu identifizieren. Der MLS-Algorithmus wird ausgeführt, bis ein vom Anwender vorgegebenes Zeitlimit erreicht ist. Nach dem Erreichen des Zeitlimits wird der bis dahin identifizierte Schedule mit den geringsten Projektgesamtkosten als Startlösung dem sogenannten Adaptive Large Neighbourhood Search (ALNS) Algorithmus übergeben. Im ALNS-Algorithmus werden nacheinander Subprobleme erstellt und mit Hilfe der mathematischen Formulierung (MIP) und dem CPLEX-Solver optimiert. Zur Erstellung der Subprobleme wird zunächst jeweils die zulässige Ausgangslösung aus dem MLS-Algorithmus mit festgelegten Entscheidungsvariablen (ohne Freiheitsgrade) verwendet. Mit Hilfe von sogenannten destroy Operatoren werden nach bestimmten Regeln Teile der Ausgangslösung, d. h. bestimmte Vorgänge, identifiziert, für die eine vom Anwender vorgegebene Anzahl an Entscheidungsvariablen für eine lokale Optimierung freigegeben wird. Die Startlösung mit freien Entscheidungsvariablen wird im Anschluss mit Hilfe des MIP und dem CPLEX-Solver optimiert. Die Schritte des Freigebens bestimmter Entscheidungsvariablen und des Lösen des jeweiligen Subproblems im ALNS-Algorithmus werden bis zum Erreichen des vom Anwender vorgegebenen Zeitlimits wiederholt. Hierbei wird je Iteration das jeweils optimierte Subproblem als Startlösung für die nächste Iteration verwendet.

Nachdem für jedes Szenario ein kostenoptimierter Schedule berechnet wurde, werden diese Schedules im dritten Schritt von Modul B ((3) in

Modul B) **hinsichtlich ihrer Robustheit** verglichen. Das Ziel der Robustheitsbewertung ist es, die Schedules hinsichtlich ihrer Ausführbarkeit in anderen Szenarien zu bewerten. Hierzu sind einerseits Robustheitsmaße der Solution Robustness und andererseits Robustheitsmaße der Sequence Robustness relevant. Die Solution Robustness bewertet die Möglichkeit der Einhaltung der Vorgangsstartzeitpunkte eines Schedules in verschiedenen Szenarien. Die Sequence Robustness untersucht die Gleichheit der auszuführenden Vorgänge in verschiedenen optimierten Schedules sowie deren Reihenfolge und zeitliche Anordnung. Zur Bewertung der Solution Robustness werden aus der Literatur anwendbare Robustheitsmaße identifiziert und teilweise angepasst. Die Sequence Robustness und potentielle Robustheitsmaße der Sequence Robustness wurden für diese Arbeit entwickelt. Um die optimierten Schedules hinsichtlich ihrer Anwendbarkeit in anderen Szenarien zu bewerten, werden aufgrund der verschiedenen Vorteile insgesamt zehn Robustheitsmaße der Solution und der Sequence Robustness ausgewählt. Zur kombinierten Verwendung der ausgewählten Robustheitsmaße werden diese jeweils gewichtet und normiert, sodass eine gewichtete Summe der gewählten Robustheitsmaße je optimiertem Schedule dessen Robustheit angibt.

Im dritten Modul (Modul C) wird eine **Sensitivitätsanalyse** der gewählten Gewichtungen der Robustheitsmaße durchgeführt. Durch die Variation der Gewichtungen der einzelnen Robustheitsmaße erhält der Anwender ein besseres Verständnis über die Robustheit der optimierten Schedules. Abhängig von der Risikoneigung des Anwenders kann dieser einen der bewerteten, alternativen Schedules auswählen. Bei der Wahl helfen ihm die Kennzahlen der Projektgesamtkosten, die Bewertung der Schedules hinsichtlich ihrer Robustheit und deren Sensitivität bei der Variation der Gewichtungen.

Um das Planungswerkzeug anwenden zu können, wurden zunächst die Parameter des MLS- sowie des ALNS-Algorithmus anhand von

Referenzprojekten kerntechnischer Rückbauprojekte kalibriert. Anschließend wurden die kalibrierten Algorithmen auf eines der Referenzprojekte angewendet, welches den Rückbau einer gesamten kerntechnischen Anlage bis zur Grünen Wiese beinhaltet. In einer exemplarischen Sensitivitätsanalyse wurden die Robustheitsbewertungen der optimierten Schedules variiert. Die aus Sicht eines Planers interessanten Schedules wurden detailliert untersucht.

Zusammenfassend ist festzustellen, dass es einem Anwender mit Hilfe des entwickelten Planungswerkzeugs möglich ist, einen integrierten und operativen Termin- und Ablauf-, Ressourcen- und Kostenplan zu erstellen, der den Rückbau mit minimalen Kosten realisieren kann und der unter der Berücksichtigung von Unsicherheiten während der Projektausführung möglichst planmäßig ausführbar ist. Mit der Anwendung des Planungswerkzeugs kann die Forschungsfrage dieser Arbeit nach einer Möglichkeit zur *Bestimmung eines ex ante stabilen Projektplans für ein komplexes Großprojekt unter der Berücksichtigung von Unsicherheiten und unter Berücksichtigung relevanter Rahmenbedingungen* beantwortet werden. Das entwickelte Planungswerkzeug wurde im Rahmen dieser Arbeit exemplarisch anhand des Beispiels des Rückbaus kerntechnischer Anlagen entwickelt, ist aber aufgrund seines übertragbaren Ansatzes mit geringen Anpassungen zur Planung von Großprojekten anderer Art einsetzbar.

6.2 Kritische Würdigung des Planungswerkzeugs und Ausblick auf zukünftige Forschungsarbeiten

Gemäß dem Verursacherprinzip stellt die Minimierung der Kosten ein realistisches Zielkriterium der Optimierung dar. Einflussfaktoren auf die Kosten könnten allerdings im entwickelten Planungswerkzeug detaillierter betrachtet werden. Beispielsweise werden Finanzierungen, Abschreibungen, die Inflation oder Wechselkurse im Rahmen dieser Arbeit nicht berücksichtigt. Da diese Einflussfaktoren aufgrund der großen Summen einen signifikanten Beitrag zu den Projektgesamtkosten leisten können, könnte in zukünftigen Arbeiten detaillierter auf diese eingegangen werden.

Ebenso könnten die Restbetriebskosten in zukünftigen Arbeiten detaillierter modelliert werden. In der vorliegenden Arbeit wird angenommen, dass die Restbetriebskosten je Zeiteinheit zum Projektende des betrachteten (Teil-)Projekts null sind. Diese Annahme ist notwendig, damit im vorliegenden MIP alle Restbetriebskosten (durch die Multiplikation der Änderungen der Restbetriebskosten je Zeiteinheit jedes Vorgangs mit dem Fertigstellungszeitpunkt des jeweiligen Vorgangs) berücksichtigt werden. Allerdings könnten in (Teil-)Projekten die Kosten für den Restbetrieb zum (Teil-)Projektende größer null sein, beispielsweise wenn der Zielzustand ein konventioneller Weiterbetrieb der Anlage oder Teilen der Anlage ist.

Einen weiteren Kostenfaktor bei kerntechnischen Rückbauprojekten stellen die Kosten für die Endlagerung radioaktiver Stoffe dar. Eine Minimierung des Abfallaufkommens kann zu einer Kosteneinsparung bei der Endlagerung führen. Nicht nur das Abfallmanagement, sondern bereits die Stoffströme während des Rückbaus können einen erheblichen Einfluss auf die Kosten des Rückbaus nehmen. Durch die Integration von entstehenden Stoffströmen in die Planung könnten die im Rückbau benötigten

Ressourcen besser ausgenutzt bzw. eingesetzt und so der Zeitaufwand und die Kosten eines Rückbauvorhabens deutlich verringert werden. Außerdem könnten durch eine Integration der Stoffströme in die Planung vermeidbare Handhabungsschritte und Zwischenlagerungen vermieden und damit radiologische Expositionszeiten und radioaktive Sekundärabfälle minimiert werden. Aus diesem Grund bietet die Berücksichtigung von Stoffströmen in der Planung eine Weiterentwicklungsmöglichkeit des bestehenden Planungswerkzeugs.

Die beim Rückbau anfallenden Stoffe müssen innerhalb der Anlage in Pufferlagern zwischengelagert werden. Um Pufferlager auch im Planungswerkzeug abzubilden, können in einer Weiterentwicklung kumulative Ressourcen in der Scheduling Methode modelliert und implementiert werden. Da die Berücksichtigung von kumulativen Ressourcen mit einem erheblichen Rechenaufwand einhergeht, wäre bei der Berücksichtigung von Pufferlagern die Entwicklung eines effizienten Lösungsalgorithmus oder die Erweiterung des bestehenden Lösungsalgorithmus notwendig.

Methodisch berücksichtigt das Planungswerkzeug lediglich Ende-Anfang-Beziehungen zwischen den Vorgängen. Weitere Beziehungstypen, wie Anfang-Anfang-, Anfang-Ende- und Ende-Ende-Beziehungen können in einer Weiterentwicklung des Planungswerkzeugs berücksichtigt werden.

Zur Ressourcenplanung werden keine Betriebskalender, Wochenenden, Feiertage oder Schichtmodelle berücksichtigt. Diese sollten bei der Übertragung der Schedules in ausführbare Terminpläne berücksichtigt werden. Insbesondere die zusätzlichen Kosten bei Arbeiten an Wochenenden oder an Feiertagen sowie die sich ändernden Ressourcenverfügbarkeiten bei Schichtmodellen oder Betriebskalendern sind bei der Planung zu berücksichtigen.

Die Ressource des Eigenpersonals wird im Planungswerkzeug dieser Arbeit als eine erneuerbare Ressource modelliert, die zeitlich gleichbleibend beschränkt ist. Allerdings reduziert sich die Anzahl an Eigenpersonal in kerntechnischen Rückbauprojekten im Zeitverlauf, da das Eigenpersonal beispielsweise schrittweise in den Ruhestand geht. Eine sich im Zeitverlauf ändernde beschränkte erneuerbare Ressource stellt somit eine Weiterentwicklung der Scheduling Methode dar.

Zur realistischeren Berücksichtigung von Unsicherheiten in der Planung könnten zusätzliche Puffer in den Plan integriert werden. Beispielsweise werden gemäß des sog. „Deliberate Padding“ die Vorgangsdauern häufig länger als geplant eingeschätzt (Steyn, 2001). Die Schätzung realistischer Vorgangsdauern könnte Forschungsgegenstand zukünftiger Arbeiten sein. Hierzu könnte unter anderem die Anwendung der Critical Chain Project Management Methode (CCPM) bzw. der Einsatz von Teilen von CCPM zur Planung und vor allem zur Ausführung des Rückbaus kerntechnischer Anlagen untersucht werden (vgl. Goldratt, 1997). Beispielsweise sind das Einfügen von Puffern an strategisch relevanten Stellen im Projektablauf oder die Konzentration auf die in einem Projekt auftretenden Engpässe Möglichkeiten, die im Umgang mit Unsicherheiten in einem Großprojekt überprüft werden könnten. Allerdings ist der Einsatz von CCPM für die Planung von Großprojekten mit einzuhaltenden Plänen auch kritisch zu betrachten. Beispielsweise widerspricht das von Goldratt (1997) als auch von Newbold (1998) im Rahmen der CCPM als wichtig angesehene Staffelläuferprinzip, bei dem die Start- und Endtermine einzelner Vorgänge keine wichtige Rolle spielen und stattdessen jeder Vorgang nach der Beendigung seines Vorgängers beginnt, den Bedingungen einer strikten Einhaltung der geplanten Startzeitpunkte von Vorgängen. Insbesondere wenn Genehmigungen vorliegen müssen oder wenn gemäß der Genehmigungen gearbeitet werden soll, ist das Staffelläuferprinzip nur sehr eingeschränkt oder gar nicht anwendbar.

Im Zusammenhang mit den Unsicherheiten und der Robustheitsbewertung von verschiedenen Schedules ist anzumerken, dass im entwickelten Lösungsverfahren lediglich ein Schedule identifiziert wird, dessen Projektgesamtkosten am geringsten sind. Selbst wenn mehrere Lösungen mit den gleichen Projektgesamtkosten aber unterschiedlichen Schedules existieren, wird lediglich einer dieser Schedules gespeichert (der erste, der gefunden wurde). Für die Robustheitsbewertung wäre es sinnvoll, alle Schedules mit minimalen Projektgesamtkosten zu analysieren und zu vergleichen, da Schedules mit den gleichen Projektgesamtkosten eine unterschiedliche Schedule- und Ressourcennutzungsstruktur sowie andere Robustheitsbewertungen aufweisen können.

Da Betreiber kerntechnischer Anlagen gleichzeitig mehrere Anlagen zurückbauen müssen, können zukünftig Erweiterungen des Planungswerkzeugs auf das Multi-Projektmanagement vorgenommen werden. Beispielsweise könnten verschiedene Rückbauprojekte integriert betrachtet werden, sodass eine optimierte Aufteilung der Ressourcen auf verschiedene Projekte betrachtet wird.

Das in dieser Arbeit entwickelte Planungswerkzeug wurde anhand eines Referenzprojekts angewendet. Allerdings handelt es sich bei diesem Projekt nicht um die Daten eines realen kerntechnischen Rückbauprojekts. Eine Validierung des Planungswerkzeugs mit Daten eines real ausgeführten Rückbauprojekts wäre wünschenswert. Insbesondere die Validierung mit Hilfe von Daten eines bereits abgeschlossenen kerntechnischen Rückbauprojekts würde es ermöglichen, einen realen Plan mit einem durch das Planungswerkzeug erstellten Plan zu vergleichen. Durch dieses Vorgehen könnte die Nützlichkeit des Planungswerkzeugs untersucht werden.

Bei der Erstellung dieser Arbeit wurden Besonderheiten kerntechnischer Rückbauprojekte identifiziert. Daraus können allgemeine Handlungsempfehlungen und Verbesserungspotentiale für den Rückbau

kerntechnischer Anlagen abgeleitet werden. Drei relevante Handlungsempfehlungen werden im Folgenden beschrieben.

Anknüpfend an die fehlenden Daten zur Validierung des Planungswerkzeugs ist aufgefallen, dass unternehmensintern Erfahrungswerte sowohl nicht strukturiert als auch selten elektronisch vorliegen. Entsprechende Werkzeuge zur Datenerhebung sollten in einer zukünftigen Arbeit untersucht, getestet und implementiert werden. Darüber hinaus sollten Betreiber und Rückbauunternehmen Erfahrungswerte strukturiert und elektronisch erheben, sammeln und speichern, sodass diese für zukünftige Planungen besser nutzbar sind. Zwischen den Unternehmen herrscht aktuell kein Erfahrungsaustausch, obwohl ein Austausch an Erfahrungen Unsicherheiten reduzieren würde und somit Kosten eingespart werden könnten.

Eine wesentliche Herausforderung der Planung kerntechnischer Rückbauprojekte stellt die Genehmigung dar. Aufgrund der lang andauernden Genehmigungsverfahren sollte eine Um- oder Neuplanung vermieden werden. Dies führt dazu, dass beim Rückbau wenig Flexibilität für Plananpassungen besteht, obwohl diese evtl. aus technischen und strahlenschutztechnischen Gesichtspunkten sinnvoll wären. Eine Beschleunigung der Genehmigungsverfahren würde zu einer höheren Flexibilität und zu geringeren Kosten des Rückbaus führen.

Des Weiteren würde eine Vereinheitlichung der Genehmigungsverfahren sowohl die Betreiber als auch die Genehmigungsbehörden entlasten. Durch bundesweit einheitliche Regelungen könnten Genehmigungsverfahren transparenter und einfacher gestaltet werden. Dies würde mit Kosteneinsparungen und kürzeren Verfahren einhergehen.

A. Anhang

A.1 State of the art Trennverfahren¹⁵¹

Eigenschaften verbreiteter mechanischer Trennverfahren

Art und Bezeichnung des Verfahrens	Name des Verfahrens	Material, das bearbeitet werden kann	Urteild, in dem Technologie anwendbar	Ferhanterer Einsatz möglich?	Eigenschaften	Vorteile	Nachteile	Quelle
Mit definiertem Schneidwinkel	Bandäge	Metall, Beton	Luft, Wasser	Ja	<ul style="list-style-type: none"> Schnitttiefe wird durch die Länge des Sägeblattes begrenzt Bei stark kontaminierten Teilen wird trocken gesägt Schnittgeschwindigkeit: 25-30mm/min 	<ul style="list-style-type: none"> Sandwich- und komplexe Strukturen gut schnellbar Keine Aerosolbildung Steuerung aus der Distanz möglich Sehr zuverlässig 	<ul style="list-style-type: none"> Eingeschränkte Schnittführung Geringe Schneidgeschwindigkeit Hoher Anteil an Sekundärabfall (Sägeblätter) Benötigen in manchen Fällen viel Platz 	(Bienia, 2015) (Kaulard et al., 2010, S. 34) (Jeong et al., 2014)
	Schersmaschine	Metall	Luft, Wasser	Ja	<ul style="list-style-type: none"> Werden vornehmlich zur Zerlegung von Stäben, Rohren und Blechen eingesetzt Keine Aerosolbildung 	<ul style="list-style-type: none"> Keine Rückstellkräfte Es entstehen keine Späne oder Stäube 	<ul style="list-style-type: none"> Eingeschränkte Anwendung 	(Kaulard et al., 2010, S. 35)
	Fräsen	Metall	Luft, Wasser	Ja	<ul style="list-style-type: none"> Schneidtiefe ist beschränkt durch die Dimensionen der Fräschneibe 	<ul style="list-style-type: none"> Präzise Schnittkante Flexible Schnittfugen möglich Keine Aerosolbildung Steuerung aus der Distanz möglich Große Späne, die gut handhabbar sind Universell einsetzbar 	<ul style="list-style-type: none"> Kühlung notwendig Mittlere Schneidgeschwindigkeit Hohe Rückstellkräfte welche mit entsprechenden Konstruktionen aufgeflogen werden müssen Auf Funkenflug ist zu achten 	(Bienia, 2015) (Kaulard et al., 2010, S. 34)
	Kreissäge	Metall, Beton	Luft, Wasser	Ja	<ul style="list-style-type: none"> Schnitttiefe ist abhängig vom Scheibendurchmesser Schnittgeschwindigkeit: 25-30mm/min 	<ul style="list-style-type: none"> Keine Vibration Präzise und glatte Schnitte 	<ul style="list-style-type: none"> Schnitttiefe ist beschränkt Erzeugt Staub/Schlamm als Abfall Benötigt viel Platz 	(Kaulard et al., 2010, S. 34) (Jeong et al., 2014) (INEA, 2011, S. 31)

¹⁵¹ Teile dieses Kapitels sind aus Hübner et al. (2017c) entnommen.

Ohne definiertem Schneidwinkel	Diamant-seißäge	Metall, Beton	Luft, Wasser	Ja	<ul style="list-style-type: none"> Einsatz meist nass Bei stark kontaminierten Teilen wird trocken gesägt 	<ul style="list-style-type: none"> Sandwich- und komplexe Strukturen gut schneidbar Steuerung aus der Distanz möglich Geeignet für besonders große Strukturen Wartungs- und Reparaturzeiten sind relativ kurz 	<ul style="list-style-type: none"> Eingeschränkte Schnittführung Aufwendige Seilführung Sehr geringe Schneidgeschwindigkeit Hohe Kosten für Diamantseile Erzeugt Staub/Schlamm als Abfall Hohe Temperaturen und Funkenflug, sodass Schnittflächen nachbehandelt werden müssen 200-mal mehr Stäube und Aerosole als beim Sägen Hohe Rückstellkräfte und Schwingungen, die bei Fernhandlung aufgefangen werden müssen 	(Blenia, 2015) (Kaulard et al., 2010, S. 34) (NEA, 2011, S. 28-31)
	Trennschleifer	Metall, Beton	Luft, Wasser	Ja	<ul style="list-style-type: none"> Universell einsetzbar bei geringeren Wanddicken Wird praktisch in allen Rückbauprojekten eingesetzt 	<ul style="list-style-type: none"> Präzise Schnittführung Großes Angebot an konventionellen Werkzeugen 	<ul style="list-style-type: none"> (Kaulard et al., 2010, S. 35) (Thierfeldt und Scharmann, 2012, S. 135-136) 	
	Wasser-Abrasive-Injektionsstrahlen (WAIS)	Metall	Luft, Wasser	Ja	<ul style="list-style-type: none"> Verschiedene Abrasivmittel mit verschiedenen Eigenschaften Durch Recyceln des Strahlmittels lässt sich die Menge an Sekundärabfällen verringern Trennstrahl besteht aus Luft, Wasser und Strahlmittel 	<ul style="list-style-type: none"> Sehr kompakter Schneidkopf Kleine Schnittfuge Schneiden komplexer Geometrien möglich Keine Aerosolbildung 	(Blenia, 2015) (Europäische Kommission, 2009, S. 50-54)	
Abrasive Verfahren	Wasser-Suspensionsstrahlen (WASS)	Metall	Luft, Wasser	Ja	<ul style="list-style-type: none"> Verschiedene Abrasivmittel mit verschiedenen Eigenschaften Durch Recyceln des Strahlmittels lässt sich die Menge an Sekundärabfällen verringern Trennstrahl besteht aus Wasser und Strahlmittel 	<ul style="list-style-type: none"> Geringer Platzbedarf Kleine Schnittfuge erzeugt geringen Abfallmengen Schneiden komplexer Geometrien möglich Geringe Rückstellkräfte Höhere Effizienz als WAIS Keine Aerosolbildung Größere Schnitttiefe als WAIS 	(Blenia, 2015) (Europäische Kommission, 2009, S. 50-54)	

Eigenschaften verbreiteter thermischer Trennverfahren

Art und Bezeichnung des Verfahrens	Name des Verfahrens	Material, das bearbeitet werden kann	Umfeld, in dem Technologie anwendbar	Fernanfertiger Einsatz möglich?	Eigenschaften	Vorteile	Nachteile	Quelle
Mit chemischer Energiequelle	Autogenes Brennschneiden	Metall, Beton	Luft, Wasser	Ja	<ul style="list-style-type: none"> Keine Rückstellkräfte Material wird verbrannt Insbesondere für große Wandstärken (>30mm) 	<ul style="list-style-type: none"> Einfach zu handhaben Keine Vibrationen Geringer Energieverbrauch Steuerung aus der Distanz möglich Hohe Schnittgeschwindigkeit 	<ul style="list-style-type: none"> Für hochlegierte Metalle nicht geeignet Langsam beim Schneiden von Beton Erzeugt viele Aerosole und Brenngase Sandwich- und Komplexe Konturen schwer schneidbar 	(IAEA, 2001, S. 96-100) (Gentes et al., 2015, S. 61-62) (Noynaert, 2012, S. 294-296) (Bienia, 2015) (Thierfeldt und Scharfmann, 2012)
	Pulver-Brennschneiden	Metall, Beton	Luft	Ja	<ul style="list-style-type: none"> Effizienzsteigerung des autogenen Brennschneidens durch Zugabe von Metallpulver 	<ul style="list-style-type: none"> Bei sehr vielen Materialien einsetzbar 	<ul style="list-style-type: none"> Erzeugt viele Aerosole und Sekundärabfälle Benötigt aufwendiges Filtersystem Wird beim Rückbau selten eingesetzt 	(Noynaert, 2012, S. 296-297) (Gentes et al., 2015, S. 62) (Europäische Kommission, 2009, S. 40)
	Sauerstoff-Lanze	Metall, Beton	Luft, Wasser	Nein	<ul style="list-style-type: none"> Schlacke wird durch Handbewegungen und Sauerstoff aus der Fuge entfernt 	<ul style="list-style-type: none"> Geringer Verschleiß Hohe Prozesssicherheit Hiermit lassen sich alle gängigen Materialien zerlegen Ausgereifte Technologie 	<ul style="list-style-type: none"> Lediglich zum Bohren von Löchern Beim Rückbau sind die Einsatzmöglichkeiten begrenzt Erzeugt starke Verschmutzung 	(Noynaert, 2012, S. 297) (Europäische Kommission, 2009, S. 40-41)

		Plasma-schneiden	Metall	Luft, Wasser	Ja	<ul style="list-style-type: none"> • Einsatz bei Edelstählen • Schlacke wird durch das Plasma gas aus der Fuge geblasen • Unter Wasser sinkt die Schneidleistung mit zunehmender Tiefe • Am häufigsten eingesetzte Technik im Bereich des Rückbaus kerntechnischer Anlagen 	<ul style="list-style-type: none"> • Sehr hohe Schnittgeschwindigkeit (bis zu 500mm/min) und Qualität • Geringer Verschleiß • Hohe Prozesssicherheit • Geringe Prozesskosten • Steuerung aus der Distanz möglich • Wird auch beim Bohren von Löchern eingesetzt • Schmale Schnittflüge 	<ul style="list-style-type: none"> • Ist nur in der Lage, elektrisch leitende Werkstücke zu zerlegen • Sandwich- und Komplexe Konturen sind schwer schneidbar • Erzeugt große Mengen an Aerosolen(bzw. Hydrosolen) 	(Europäische Kommission, 2009, S. 41) (Genes et al., 2015, S. 64-66) (Bienia, 2015) (Thierfeldt und Schartmann, 2012)
						<ul style="list-style-type: none"> • Wird nur eingesetzt, wenn eine hohe Präzision gefragt ist • Der Trenprozess ist stark von der Qualität des Dielektrikums abhängig • Grundlagentechnologie der CAMX-Verfahren 	<ul style="list-style-type: none"> • Die Geometrie der Elektrode kann jede Form annehmen 	<ul style="list-style-type: none"> • Geringe Prozessgeschwindigkeit 	(Thierfeldt und Schartmann, 2012)
		CAMC (Contact Arc Metal Cutting)	Metall	Wasser	Ja	<ul style="list-style-type: none"> • Zerlegt alle elektrisch leitfähigen Materialien • Schlacke wird durch eine Wasserdüse aus der Fuge entfernt • Elektrode wird verbraucht • Schneidgeschwindigkeit: 1500mm/min 	<ul style="list-style-type: none"> • Keine Einschränkung hinsichtlich der Werkstückgeometrie • Keine Rückstellkräfte • Große Wandstärken schneidbar 	<ul style="list-style-type: none"> • In der Entwicklung • Erzeugt viele Hydrosole • Einsatz nur unter Wasser 	(Europäische Kommission, 2009, S. 43-44) (Bienia, 2015) (Kaulard et al., 2010, S. 32-33) (Thierfeldt und Schartmann, 2012)
						<ul style="list-style-type: none"> • Zerlegt alle elektrisch leitfähigen Materialien • Elektrode wird nicht verbraucht • Schneidgeschwindigkeit: 4000mm/min 	<ul style="list-style-type: none"> • Extrem hohe Schnittgeschwindigkeit • Keine Einschränkung hinsichtlich der Werkstückgeometrie • Keine Rückstellkräfte • Scheibendurchmesser limitiert Schnitttiefe 	<ul style="list-style-type: none"> • In der Entwicklung 	(Europäische Kommission, 2009, S. 43-44) (Kaulard et al., 2010, S. 32-33)
		CAMD (Contact Arc Metal Drilling)	Metall	Wasser	Ja	<ul style="list-style-type: none"> • Bohrt Löcher in alle elektrisch leitfähigen Materialien • Elektrode wird verbraucht • Schneidgeschwindigkeit: 1000mm/min 	<ul style="list-style-type: none"> • Geringe Rückstellkräfte • Geringer Platzbedarf 	<ul style="list-style-type: none"> • In der Entwicklung 	(Europäische Kommission, 2009, S. 43-44) (Kaulard et al., 2010, S. 32-33) (Jeong et al., 2014)
						<ul style="list-style-type: none"> • Bohrt Löcher in alle elektrisch leitfähigen Materialien • Elektrode wird verbraucht • Schneidgeschwindigkeit: 1000mm/min 	<ul style="list-style-type: none"> • Geringe Rückstellkräfte • Geringer Platzbedarf 	<ul style="list-style-type: none"> • In der Entwicklung 	(Europäische Kommission, 2009, S. 43-44) (Kaulard et al., 2010, S. 32-33) (Jeong et al., 2014)
Mit elektrischer Energiequelle									

Mit elektrischer Energiequelle	Lichtbogen- wasser- schneiden	Metal	Luft, Wasser	Ja	<ul style="list-style-type: none"> • Elektrode wird verbraucht • Schlacke wird durch Wasserstrahl entfernt • Für das Zerlegen von Werkstücken mittlerer Dicke • Schneidgeschwindigkeit: 2700mm/min (bei 2400A) • Handgeführter Einsatz bei kleineren Aufgaben • Schlacke wird mittels Sauerstoff ausgeblasen • Elektrode wird unter Wasser • Elektrode wird verbraucht • Schneidgeschwindigkeit: 100-500mm/min 	<ul style="list-style-type: none"> • Geringe Rückstellkräfte • Geringer Aufwand für Fernhandlung 	<ul style="list-style-type: none"> • Gerätegewicht wegen der mitgeführten Drahtrolle relativ hoch 	(Kaulard et al., 2010, S. 32-33) (Europäische Kommission, 2009, S. 42) (Thierfeldt und Scharfmann, 2012)
	Lichtbogen- Sauerstoff- schneiden	Metal	Luft, Wasser	Nein	<ul style="list-style-type: none"> • Die Fuge wird mit Druckluft von der Schmelze befreit 	<ul style="list-style-type: none"> • Vielseitig einsetzbar 	<ul style="list-style-type: none"> • Verbreitung im Rückbau ist zurzeit beschränkt • Geringe Präzision 	(Kaulard et al., 2010, S. 32-33) (Europäische Kommission, 2009, S. 42) (Thierfeldt und Scharfmann, 2012)
	Lichtbogen- Luft- schneiden							
Laserschneidenden	Laserstrahl- schmelz- schneiden	Metal, Beton	Luft, Wasser	Ja	<ul style="list-style-type: none"> • Schlacke wird durch ein Inertgas (z.B. Stickstoff oder Argon) aus der Fuge getrieben 	<ul style="list-style-type: none"> • Keine Oxidation an der Schnittkante 	<ul style="list-style-type: none"> • Es bilden sich Schmelztropfen • Schmelzprozess ist von Gastrom abhängig • Hohe Anlagenkosten • Geringere Schnittgeschwindigkeit als das Laserstrahlbrennschneiden • Hoher Gasdruck notwendig um die Schlacke aus der Fuge zu treiben 	(Europäische Kommission, 2009, S. 44-46)
	Laserstrahl- brenn- schneiden	Metal, Beton	Luft, Wasser	Ja	<ul style="list-style-type: none"> • Als Schneidgas wird Sauerstoff eingesetzt, welches mit dem Material exotherm reagiert 	<ul style="list-style-type: none"> • Das Schneiden größerer Blechdicken ist möglich • Hohe Schnittgeschwindigkeit möglich 	<ul style="list-style-type: none"> • Oxidation an den Schnittkanten (kann bei anschließendem Schweißen zu Schwierigkeiten führen) • Hohe Anlagenkosten 	(Europäische Kommission, 2009, S. 44-46)
	Laserstrahl- sublima- tions- schneiden	Kunststoff, organische Materialien	Luft, Wasser	Ja	<ul style="list-style-type: none"> • Schutzgas sorgt dafür, dass der Werkstoff nicht verbrennt 	<ul style="list-style-type: none"> • Glatte Schnittkanten 	<ul style="list-style-type: none"> • Hohe Lasermittelsität erforderlich • Geringe Schnittgeschwindigkeit • Wird selten bei Metallen eingesetzt • Hohe Anlagenkosten 	(Europäische Kommission, 2009, S. 44-46)

A.2 State of the art Dekontaminationsverfahren¹⁵²

Eigenschaften verbreiteter chemischer Dekontaminationsverfahren

Art und Bezeichnung des Verfahrens	Name des Verfahrens	Material, das bearbeitet werden kann	Fernanfertiger Einsatz möglich?	Eigenschaften	Vorteile	Nachteile	Quelle
Flüssig-chemische Verfahren (Multi-Step, wetch)	CORD (Chemical Oxidizing Reducing Decontamination)	Metall	Nein	<ul style="list-style-type: none"> • Dekontamination in 3 Schritten • Primärkreislauf-Dekontamination • Originalsystem werden im Anschluss durch UV-Licht zu CO₂ und Wasser zersetzt • Typische Prozesstemperatur: ca. 95°C 	<ul style="list-style-type: none"> • Verfahren ist weit verbreitet • Große Palette an Verunreinigen CORD • Hohe Materialkompatibilität • Hoher Diskontfaktor • Relativ geringe Abfallmengen 	<ul style="list-style-type: none"> • Ineffektiv bei porösen Oberflächen • Erhöhte interkristalline Korrosion bei einigen Materialfällen nach CORD-Anwendung 	(Noyvaert, 2012) (IAEA, 1999, S. 41-42) (Kinnunen, 2008, S. 16-22)
	LOMI (Low Oxidation State Metal Ion)	Metall	Nein	<ul style="list-style-type: none"> • Primärkreislauf-Dekontamination • Wird insbesondere bei Baustählen und rostfreien Stählen eingesetzt • Insbesondere für Chromfreie Stähle • Entwickelt in Großbritannien 	<ul style="list-style-type: none"> • Besonders für SWR geeignet • Hohe Diskontfaktoren bei Fe₂O₃ Oberflächen 	<ul style="list-style-type: none"> • DF ist wegen der geringen Aggressivität des Verfahrens beschränkt • Relativ große Menge an Sekundärabfall • Ineffektiv bei porösen Oberflächen 	(Noyvaert, 2012, S. 225-236) (IAEA, 1999, S. 41-42) (Kinnunen, 2008, S. 16-22)
	CANDEREM (Canadian Decontamination and Remediation Process)	Metall	Nein	<ul style="list-style-type: none"> • Oxidationsfreie Variante von LOMI mit besserer Materialverträglichkeit • Typische Prozesstemperatur: 85-125°C 	<ul style="list-style-type: none"> • Keine erhöhte Korrosion der Systemkomponenten nach der CANDEREM-Anwendung 	<ul style="list-style-type: none"> • DF ist wegen der geringen Aggressivität des Verfahrens beschränkt • Ineffektiv bei porösen Oberflächen 	(Noyvaert, 2012, S. 325-326) (IAEA, 1999, S. 41-42) (Kinnunen, 2008, S. 16-22)

¹⁵² Teile dieses Kapitels sind aus Hübner et al. (2017c) entnommen.

Flüssig-chemische Verfahren (Single-Step, hart)		REDOX (Reducing Oxidation)	Metal	Nein	<ul style="list-style-type: none"> • Dekontamination findet durch das Eintauchen des Bauteils in ein Bad statt • Löst die Kontamination durch Zersetzen der Oberfläche • Prozesstemperatur: 60-80°C • Elektrochemische Regenerierung des Reaktionsmittels • Kontinuierliche Regeneration der Cerium-Lösung mittels Ozon-Gas auf Dekon-Temperatur • Einsatz bei der Dekontamination von segmentierten Teilen aus rostfreiem Stahl • Kann auch bei der Dekontamination des Primärkreislaufs eingesetzt werden 	<ul style="list-style-type: none"> • Hoher Diskontraktor • Geringe Mengen an sekundärem Abfall • Einsetzbar bei geometrisch-komplexen Bauteilen 	(Fujita et al., 1988) (Europäische Kommission, 2009, S. 17)
		MEDOC (Metal Decontamination by Oxidation with Cerium)	Metal	Nein	<ul style="list-style-type: none"> • Durch die Regenerierung entsteht eine geringe Menge an Abfällen • Steigerung der Aggressivität durch erhöhte Prozesstemperatur 	<ul style="list-style-type: none"> • Zerstört die Oberfläche des Metalls 	(Europäische Kommission, 2009, S. 17)
Elektrochemische Verfahren		HNO3/ HF	Metal	Nein	<ul style="list-style-type: none"> • Insbesondere zum Ätzen rostfreier Stähle • Entfernt Oxid-Schichten durch Reduktion 	<ul style="list-style-type: none"> • Der Einsatz durch Pulverisierung der Lösung ist wegen geringerer Sicherheitsbedenken und Abwasservolumina besonders vorteilhaft 	(Europäische Kommission, 2009, S. 18) (Noyvaert, 2012, S. 326)
		mit Phosphorsäure	Metal	Ja	<ul style="list-style-type: none"> • Einsatz nur bei leitenden Metallen • Insbesondere bei Bau- & rostfreien Stählen • Effizienz sinkt ab einer bestimmten Eisenkonzentration im Elektrolyt • DF bis 100 • Benötigt zusätzliche Installationen 	<ul style="list-style-type: none"> • Schneller Dekon-Prozess (ca. 2h) • Geringe Menge an Sekundärabfall • Hohe Zuverlässigkeit & Effizienz • Stabiles und sicheres Elektrolyt • Einsetzbar bei verschiedenen Legierungen 	(Noyvaert, 2012, S. 329-332) (Europäische Kommission, 2009, S. 20-23) (NEA, 1999)
Elektrochemische Verfahren		mit Salpetersäure	Metal	Ja	<ul style="list-style-type: none"> • Einsatz nur bei leitenden Metallen • Insbesondere bei rostfreien Stählen • Effizienz sinkt ab einer bestimmten Eisenkonzentration im Elektrolyt • DF bis 100 • Benötigt zusätzliche Installationen 	<ul style="list-style-type: none"> • Schneller Dekon-Prozess (ca. 2h) • Geringe Menge an Sekundärabfall • Hohe Zuverlässigkeit & Effizienz • Hohe Penetrationsfähigkeit 	(Noyvaert, 2012, S. 329-332) (Europäische Kommission, 2009, S. 20-23) (NEA, 1999)

Sonstige	Dekon-Schaum	Metall	Ja	<ul style="list-style-type: none"> • Effizienz steigt mit der Kontaktzeit • In-Situ Anwendung zur Beseitigung von loser Oberflächenkontamination 	<ul style="list-style-type: none"> • Einsatz ist unabhängig von der Ausrichtung der Fläche (z.B. Decken & Wände) • Effektiv bei großen Komponenten mit komplexer Geometrie • Geringe Abfallmengen • Schlichte und günstige Anlage 	<ul style="list-style-type: none"> • Geringer Diskontfaktor bei einmaligem Einsatz • Ungeeignet bei rissiger Oberfläche 	(Europäische Kommission, 2009, S. 23-24) (IAEA, 1999, S. 43) (Noyvaert, 2012, S. 337)
	Dekon-Gel	Metall	Ja	<ul style="list-style-type: none"> • Effektiv bei Beta/Gamma-Strahlern • Erfolgreicher Einsatz bei ferritischen Rohrleitungen mit einfacher Geometrie • In-Situ Anwendung zur Beseitigung von loser Oberflächenkontamination • DF bis 100 	<ul style="list-style-type: none"> • Effektiv bei langer Kontaktzeit • Generiert geringe Mengen an sekundären Abfällen • Effektiv beim Entfernen großflächiger loser Kontaminationen 	<ul style="list-style-type: none"> • Geringer DF bei einmaligem Einsatz • Komponenten benötigen anschließend weitere Nachbehandlungen 	(Europäische Kommission, 2009, S. 24) (IAEA, 1999, S. 44) (Noyvaert, 2012, S. 337)
	Dekon-Pasten	Metall	Ja	<ul style="list-style-type: none"> • Insbesondere bei rostfreien Stählen • Abrasivmittelhaltige Paste, die Beschichtungen entfernen kann 	<ul style="list-style-type: none"> • Relativ geringe Abfallmengen 		(Europäische Kommission, 2009, S. 25) (IAEA, 1999, S. 44) (Noyvaert, 2012, S. 337)
	Abziehbare Folie	Metall, Beton	Ja	<ul style="list-style-type: none"> • Beste Ergebnisse bei nichtporösen Oberflächen • Kontaktzeit: 4-12h (bei Bedarf bis zu einigen Tagen) • DF zwischen 20 und 50 (unter speziellen Bedingungen bis 1000) 	<ul style="list-style-type: none"> • Keine flüssigen Abfallprodukte • Kapsel und bindet lose Kontamination 	<ul style="list-style-type: none"> • Oberflächen müssen zugänglich sein • Manuelles Entfernen der ausgehärteten Beschichtung 	(Europäische Kommission, 2009, S. 30-31) (IAEA, 1999, S. 46-48)

Eigenschaften verbreiteter mechanischer Dekontaminationsverfahren

Art und Bezeichnung des Verfahrens	Name des Verfahrens	Material, das bearbeitet werden kann	Fernhandlerters Einsatz möglich?	Eigenschaften	Vorteile	Nachteile	Quelle
Unterfrierer	Wischen Schrubben	Metall, Beton	Nein	<ul style="list-style-type: none"> • Einfachste Form der Dekontamination • Kann mit Reinigungsmittel eingesetzt werden 	<ul style="list-style-type: none"> • Günstig und einfach einzusetzen 	<ul style="list-style-type: none"> • Entfernt lediglich Stäube und Aerosole • Hoher personeller Aufwand 	(IAEA, 2001, S. 92-93)
	Schleifen Polieren Bürsten	Metall	Ja	<ul style="list-style-type: none"> • Erzeugt feine Aerosole 	<ul style="list-style-type: none"> • Es existiert eine große Auswahl an konventionellen Anlagen 	<ul style="list-style-type: none"> • Wegen feiner Aerosole sind besondere Sicherheitsbestimmungen notwendig • Geringe DF 	(Noyvaert, 2012, S. 336)
Definierter Schneidwinkel	Beton fräsen	Beton	Ja	<ul style="list-style-type: none"> • Die oberen Millimeter des Materials werden abgetragen • Geeignet für weiträumige Flächen • Durch Staubaufnahmesysteme lässt sich die Staubgenerierung verringern 	<ul style="list-style-type: none"> • Können Bolzen und andere Metallobjekte durchtrennen • Hohe Dekon-Geschwindigkeit • Geringe Abfallerzeugung, keine Sekundärabfälle • Arbeitervibrationsfrei, eignet sich gut für den fernhandlerten Einsatz • Kostengünstig 	<ul style="list-style-type: none"> • Bei kleinen Räumen mit ungleichmäßigen Formen nicht geeignet • Erzeugt feine Staubpartikel • Hohe Personendosis möglich • Der Aufbau der Ausrüstung ist zeitaufwendig und schwierig 	(Europäische Kommission, 2009) (Europäische Kommission, 2009, S. 34-35) (Noyvaert, 2012, S. 340) (NEA, 1999, S. 32-33) (IAEA, 2001, S. 92-93)
	Hämmern	Beton	Ja	<ul style="list-style-type: none"> • Arbeitsgeschwindigkeit ist abhängig von der Betonart, etc. • Es existieren verschiedene Werkzeuge • Einsatz bei beschränkten Räumlichkeiten 	<ul style="list-style-type: none"> • Für den Abtrag dümmer Betonschichten (bis 25mm) • Geeignet für spröde Materialien • Ausgereifte Technologie • Effektiv zur Dekontamination von Böden • Keine Sekundärabfälle 	<ul style="list-style-type: none"> • Hohe körperliche Belastung • Hohe Geräuschlücke • Geringe Abtragleistung • Absaugvorrichtung notwendig 	(NEA, 1999, S. 31-32) (Noyvaert, 2012, S. 338-339) (Europäische Kommission, 2009, S. 34)
	Nadeln	Beton	Nein	<ul style="list-style-type: none"> • Nadelpistole wird von Hand geführt • Besonders leichte Geräte 	<ul style="list-style-type: none"> • Für die Bearbeitung unterschiedlicher Oberflächenformen (Ecken, Kanten, Vertiefungen) • Geeignet für den Einsatz bei beengten Platzbedingungen 	<ul style="list-style-type: none"> • Geringe Abtraggeschwindigkeit 	(Gentes et al., 2015, S. 48)

	<ul style="list-style-type: none"> Entfernt tiefe Kontaminationen Sehr effizient Schutt lässt sich einfach einsammeln Ausgereifte Technologie, vielen Anbietern Relativ günstig Low-pressure Jetting zur Vordekontamination Medium-pressure Jetting zur Reduzierung der Strahlendosis High-pressure Jetting zur vollständigen Dekontamination Es lassen sich schwer erreichbare Flächen dekontaminieren Am effektivsten auf flachen Oberflächen Ausgereifte Technologie Stehigehäut ist sehr effizient bei der Entfernung von dünnen Betonschichten 	<ul style="list-style-type: none"> Einsatz für tiefere Kontaminationen (bis zu einigen 10cm) Arbeitsgeschwindigkeit ist abhängig von der Betonart, etc. Effizienzsteigerung durch Additive und Erhöhung der Temperaturen Unterscheidung zwischen Low-pressure (> 15MPa), Medium-pressure (15MPa bis 70MPa) und High-pressure Jetting (< 70MPa) Verschiedene Strahlmittel mit unterschiedlichen Eigenschaften Recyceln des Strahlmittels minimiert die sekundäre Abfallmenge Etwas effizienter als nasse Verfahren Einsatz meist in Einhausung 	<ul style="list-style-type: none"> Entfernt sowohl abwaschbare als auch feste Kontaminationen Verschiedene Strahlmittel mit unterschiedlichen Eigenschaften Recyceln des Strahlmittels minimiert die Menge an Sekundärabfällen Einsatz meist in Einhausung Mit Abrasivmittel imprägnierte Urethan-Schwämme Scheuereffekt Einsatz bei schwachkontaminierten Komponenten Findet in der Regel in einer Glovebox statt Strahl wird mit 15MPa projiziert Wegen der niedrigen Viskosität und Oberflächenspannung dringt die Lösung in kleine Risse ein 	<ul style="list-style-type: none"> Geringe Menge an Stäuben und Aerosolen Geringe Abfallmengen Schwämme können unkompliziert recycelt werden Entfernt auch Beschichtungen 	<ul style="list-style-type: none"> Der Einsatz von Freon-Jetting ist wegen der rechtlichen Auflagen limitiert Das Dekon-Mittel ist umwelt- und gesundheitschädlich 	<p>(NEA, 2011, S. 31-33) (Noyneert, 2012, S. 340-341) (IAEA, 2001, S. 92-93)</p> <p>(Noyneert, 2012, S. 334) (Europäische Kommission, 2009, S. 27-28 & 55) (NEA, 2011, S. 23)</p> <p>(NEA, 1999, S. 23-26) (Europäische Kommission, 2009, S. 28-30) (Gentes et al., 2015, S. 49-50) (Noyneert, 2012, S. 334-336) (NEA, 2011, S. 18-19)</p> <p>(NEA, 1999, S. 23-26) (Europäische Kommission, 2009, S. 28-30) (Gentes et al., 2015, S. 49-50) (Noyneert, 2012, S. 334-336)</p>
<p style="text-align: center;">Aufprallwirkung</p>	<ul style="list-style-type: none"> Hohe Stauberzeugung Ungeeignet für große Flächen Hohe Personendosis möglich 	<ul style="list-style-type: none"> Während des Vorgangs entstehen kontaminierte Aerosole und Hydrosole Hoher Wasserverbrauch, wenn das Abwasser nicht recycelt und gefiltert wird 	<ul style="list-style-type: none"> Es besteht die Gefahr, die Kontamination tiefer ins Material einzubringen Fett- und Ölschichten müssen zuvor entfernt werden Es müssen Maßnahmen zur Staubbesitzung ergriffen werden Erzeugt große Abfallmengen 	<ul style="list-style-type: none"> Es besteht die Gefahr, die Kontamination tiefer ins Material einzubringen Es müssen Maßnahmen zur Abwasserbehandlung ergriffen werden Erzeugt große Abfallmengen 	<ul style="list-style-type: none"> Geringe DF (zwischen 3 und 10) 	<p>(IAEA, 1999, S. 48) (NEA, 2011, S. 19-20)</p>
<p>Sponge-Jetting</p>	<ul style="list-style-type: none"> Metall, Beton 	<ul style="list-style-type: none"> Metall, Beton 	<ul style="list-style-type: none"> Metall, Beton 	<ul style="list-style-type: none"> Metall, Beton 	<ul style="list-style-type: none"> Metall 	<p>(IAEA, 1999, S. 48) (NEA, 2011, S. 19-20)</p>
<p>Freon-Jetting</p>	<ul style="list-style-type: none"> Metall 	<ul style="list-style-type: none"> Metall 	<ul style="list-style-type: none"> Metall 	<ul style="list-style-type: none"> Metall 	<ul style="list-style-type: none"> Metall 	<p>(IAEA, 1999, S. 48) (NEA, 2011, S. 19-20)</p>

Eigenschaften verbreiteter thermischer Dekontaminationsverfahren

Art und Bezeichnung des Verfahrens	Name des Verfahrens	Material, das bearbeitet werden kann	Fernhafterer Einsatz möglich?	Eigenschaften	Vorteile	Nachteile	Quelle
Hybride Verfahren (Strahlverfahren)	Eis-Strahlen	Metall	Ja	<ul style="list-style-type: none"> • Ähnlich dem CO₂-Strahlen geeignet für lose oberflächen-dekontaminationen • Einsatz bei leicht kontaminierten Komponenten 	<ul style="list-style-type: none"> • Einfacher als Trockeneisstrahlen 	<ul style="list-style-type: none"> • Schmelzwasser nimmt die Kontamination auf und muss als Sekundärabfall entsorgt werden 	(Europäische Kommission, 2009, S. 26)
	Trockeneis-Strahlen	Metall, Beton	Ja	<ul style="list-style-type: none"> • Dekontamination durch Sublimationsstoß der CO₂-Pellets • Einsatz in abgeschirmter Kabine • Abrasionsstiefe bei Beton beträgt 5mm 	<ul style="list-style-type: none"> • Flexibel einsetzbar • Nicht abrasiv • Keine Strahlmittelrückstände • Keine Sekundärabfälle 	<ul style="list-style-type: none"> • Nicht für harte Materialien geeignet • Gefahr des Sauerstoffmangels • Hohe Belüftungs- und Sicherheitsanforderungen 	(Noyvaert, 2012, S. 333) (Europäische Kommission, 2009, S. 26) (NEA, 2011, S.23)
	Trockeneis-Laserstrahlen	Metall, Beton	Ja	<ul style="list-style-type: none"> • Steigerung der thermischen Belastung durch Laser 	<ul style="list-style-type: none"> • Reduktion des Abfallvolumens • Keine Rückkontamination • Höhere Abtragleistung 	<ul style="list-style-type: none"> • Hohe Beschaffungskosten 	
Rein thermische Verfahren (Laser)	Laser-Dekontamination	Metall, Beton	Ja	<ul style="list-style-type: none"> • Einsatz mittels Manipulator • Oberfläche wird geschmolzen 	<ul style="list-style-type: none"> • Keine Sekundärabfälle • Hohe Genauigkeit • Einfach zu automatisieren • Arbeitet berührungslos und staubfrei 	<ul style="list-style-type: none"> • Neue Technologie • Wenige Erfahrungswerte 	(IAEA, 1999, S. 57) (Anthofer et al., 2013, S. 2-9)
	Laser-Ablation	Metall, Beton	Ja	<ul style="list-style-type: none"> • Oberfläche platzt ab • Laser mit geringer Energiedichte • Gut geeignet bei der Entfernung von Beschichtungen 	<ul style="list-style-type: none"> • Gezierter Abtrag dünner Verunreinigungen • Keine Sekundärabfälle • Geringes Gewicht 	<ul style="list-style-type: none"> • In der Entwicklung • Geringe Leistung da nur kleine Oberfläche bearbeitet wird 	(NEA, 2011, S.24-26)

Eigenschaften sonstiger Dekontaminationsverfahren

Art und Bezeichnung	Name des Verfahrens	Material, das bearbeitet werden kann	Fernhandlert? Einsatz möglich?	Eigenschaften	Vorteile	Nachteile	Quelle
	Ultraschall-Bad	Metall	Nein	<ul style="list-style-type: none"> • Einsatz bei loser Kontamination • Wird oft zur Folgebehandlung von chemisch dekontaminierten Komponenten eingesetzt 	<ul style="list-style-type: none"> • Synergie-Effekt mit chemischer Dekontamination 	<ul style="list-style-type: none"> • Ungeeignete für starke Kontaminationen • DF ist kleiner 2 	(Noyvaert, S. 332-333) (Europäische Kommission, 2009, S. 26) (IAEA, 1999, S. 56)
	Ein-schmelzen	Metall	Nein	<ul style="list-style-type: none"> • Radionuklide werden über Dämpfe und Schmelze ausgestoßen • Andere Radionuklide (Co-60) werden gleichmäßig über das gesamte Volumen verteilt 	<ul style="list-style-type: none"> • Metallbarren können nach kurzer Abklingzeit recycelt werden • Geometrie und Größe der Komponenten spielen keine Rolle • Große Volumenreduktion • Kommerzielle Anwendung 		(NEA, 1999, S. 26-28) (Europäische Kommission, 2009, S. 31-32) (Noyvaert, S. 337-338)

A.3 Vorgänge des Referenzprojekts Rückbau eines SWR

Nr.	Vorgangsname
1	Errichtung eines Zwischenlagers
2	Vorbereitung zum Rückbau des RDB
3	Öffnen des Ladedeckels am Boden des Flutbeckens
4	Entfernen der Deckelschrauben und Heben des RDB-Deckels auf den Reaktorbedienungsflur
5	Vorbereitung zum Rückbau des Maschinenhauses
6	Anschluss einer Baustromversorgung (öffentliches Netz oder mobile Stromerzeugungsanlage) und verlegen von Elektrizitätsanschlüssen
7	Demontage, Zerlegung und Abtransport der Notstromaggregate
8	Irreversibles Freischalten (Strom) der Generatoren, Turbine(n), Kondensatoren, Speisewasserpumpen, Speisewasservorwärmer
9	Errichtung von Einhausungen um Generatoren, Turbine(n), Kondensatoren, Speisewasserpumpen, Speisewasservorwärmer
10	Abbau und Verpacken von Asbest an den Turbinen und am Generator
11	Trockenlegung und Trocknung der Systeme des Sekundärkreislaufs
12	Entfernen von Schlamm und Produkten der trockengelegten Systeme sowie einfache Oberflächen-Dekontamination der trockengelegten Oberflächen
13	Dekontamination des Sekundärkreislaufs
14	Demontage des Generators
15	Verkauf des Generators
16	Zerlegung des Generators in Einzelteile und Nachbehandlung inkl. Verpackung
17	Demontage und Verpackung der Generator-Anschlüsse
18	Demontage, Zerlegung der Kondensatoren in Einzelteile und Nachbehandlung inkl. Verpackung
19	Demontage, Zerlegung der Turbine in Einzelteile und Nachbehandlung inkl. Verpackung
20	Demontage, Zerlegung der Speisewasserpumpe in Einzelteile und Nachbehandlung inkl. Verpackung
21	Demontage, Zerlegung der Speisewasservorwärmer in Einzelteile und Nachbehandlung inkl. Verpackung
22	Abbau des Sekundärkreislaufs (Rohrleitungen)
23	Freimessung aller Komponenten mit Speisewasser (Speisewasserpumpen, Speisewasservorwärmer, Sekundärkreislauf)
24	Freimessung des Maschinenhauses
25	Ziehen, zerlegen und verpacken der BE-Kästen in Primärbehälter
26	Vorbereitung: Lagerung der Primärbehälter mit den zerlegten BE-Kästen im Brennelementlagerbecken
27	Lagerung der Primärbehälter mit den zerlegten BE-Kästen im Brennelementlagerbecken

28	Vordekontamination des RDB-Deckels
29	Zerlegung des RDB-Deckels
30	Transport des RDB-Deckels zur Nachdekontamination und Nachzerlegung
31	Nachdekontamination des RDB-Deckels
32	Freimessung (inkl. Dokumentation) und Lagerung bis zum Abtransport oder Einbringung in das Zwischenlager
33	Verbinden des Flutbeckens mit dem RDB
34	Einbau eines Beckenbodenschutzes und Einzug einer Arbeitsbühne im Brennelementlagerbecken und im Reaktorbecken
35	Installation Zerlegemaschinen und Vorbereitung Zerlegeplätze
36	Einbringen eines Wassertopfes/Abschirmbehälters zur Vermeidung der Abrasiv-Ausbreitung beim WASS-Verfahren
37	Vorbereitung: Installation einer Anlage zur Dekontamination abgebauter Teile inkl. Luftabsaugung/Filtertechnik
38	Installation einer Anlage zur Dekontamination abgebauter Teile inkl. Luftabsaugung/Filtertechnik
39	Fluten von Flut- und Brennelementlagerbecken und Reaktorbecken
40	Ausheben Dampftrockner und abstellen auf Zerlegeplatz
41	Abtrennen der Störkanten und Trocknerpakete
42	Zerlegen der DT-Schürze
43	Nachzerlegen der Trocknerpakete
44	Abbau Zerlegebereich
45	Zerlegung Speisewasserverteiler im RDB
46	Innere Struktur des oberen Kerngitters heraustrennen
47	HK-Sicherung des OKG lösen
48	HK-Sicherung des unteren Kerngitters lösen und auf Drehteller heben
49	Führungsschienen trennen
50	DWA ziehen und auf Drehteller setzen, Hydraulische Trennung setzen
51	Demontage, Vorzerlegung und Transport zur Nachbehandlung der nuklearen Messtechnik (Sonden, Messköpfe)
52	Demontage, Vorzerlegung und Transport zur Nachbehandlung der Instrumentierungslanzen
53	Zerlegung der Instrumentierungslanzen in Einzelteile
54	Identifikation und Beseitigung festsitzender Kontamination
55	Nacharbeiten für Dekontamination
56	Freimessung (inkl. Dokumentation) und verpacken der Einzelteile der Instrumentierungslanzen
57	Lagerung bis zum Abtransport der Instrumentierungslanzen
58	Abbau und Zerlegung Hammerkopfschrauben
59	Tragstangen und oberen Tragring trennen
60	Oberen Stegverband trennen
61	Zyklone abtrennen
62	Abbau Kern-Not-Kühlung
63	Unteren Tragring trennen

64	Unteren Stegverband auftrennen
65	Standrohre oberhalb Kerndeckel trennen
66	Standrohre auf DT-Stellplatz nachzerlegen
67	Kerdeckel: Streifen heraustrennen und nachzerlegen
68	Verliebener Deckelring zerlegen
69	Äußeren Ring des OKG auf Drehteller heben und zerlegen
70	Ausbau und Ablängen der SSFR
71	Zerlegen der inneren Struktur des UKG, nachzerlegen und verpacken
72	Zerlegen des restlichen Rings und restl. Struktur mit anschließendem Verpacken
73	Trennen des KFMGR-Verbands von Kalotte und ausheben auf Drehteller
74	KFMGR-Verband zerlegen und verpacken
75	Trennen des oberen Kernmantels im RDB, ausheben auf Drehteller
76	Zerlegung des ausgehobenen Kernmantels auf Drehteller
77	Zerlegung des restlichen Kernmantels
78	Ausräumen und Reinigung des Reaktorbeckens
79	Schrittweise Trockenlegung und Trocknung des RDB & Zerlegung des RDB: Der Füllstand wird bis zur jeweiligen Schnitthöhe abgesenkt
80	Probemessung der Kalotte
81	Zerlegen der Kalotte (wenn keine Alpha-Strahler gefunden wurden)
82	Dekontamination der Einzelteile der Kalotte
83	Freimessung (inkl. Dokumentation)
84	Errichtung einer Einhausung um die Kalotte (wenn Alpha-Strahler gefunden wurden)
85	Vordekontamination der Kalotte
86	Zerlegung der Kalotte in Einzelteile
87	Verpacken der Einzelteile
88	Transport zur Dekontaminations-nachbehandlung
89	Dekontamination der Einzelteile
90	Freimessung (inkl. Dokumentation)
91	Verpacken der Einzelteile der Kalotte
92	Errichten Grüne Wiese

A.4 Vorgänge des Referenzprojekts Rückbau einer Gesamtanlage

Nr.	Vorgangsname
1	Anpassung Zugangskontrolle
2	Anpassung Kommunikationstechnik
3	Anpassung Brandmeldeanlage
4	Anpassung Überwachungssysteme (Kameras etc.)
5	Installation der Transportmedien
6	Installation der Freimessanlage (FMA)
7	Installation der Ausstattung zur Dekontamination von Personen und Geräten sowie Ausstattung zum Schutz von Personen und Geräten vor radioaktiver Strahlung
8	Installation einer Anlage zur Dekontamination abgebauter Teile inkl. Luftabsaugung/Filtertechnik
9	Aufbau von Einheiten zum kontrollierten Zerlegen kontaminierter Teile inkl. Luftabsaugung/Filtertechnik
10	Installation Spezialgeräte zum Abbau
11	Installation Spezialgeräte zur Dekontamination
12	Installation von Baustellencontainern inkl. Sanitäranlagen
13	Ausräumen gelagerter Materialien etc. in bestimmten Gebäudeteilen
14	Radiologische Charakterisierung (inkl. evtl. Probenahmen) während des Ausräumens
15	Statische und bautechnische Ertüchtigung für geplante Umbaumaßnahmen (Deckenstütze, Schleusen, Lüftungskonzept, Abbrüche, Rampen, Podeste, Luken, Trennwände etc.)
16	Umfunktionierung/Umbau des Lüftungssystems inkl. nachgeschalteter Filtertechnik und Heizung
17	Errichten kurzfristiger Lagerplätze für freigemessene Teile
18	Demontage der Notstromaggregate
19	Kurzfristige Lagerung der Notstromaggregate bis zur Nachbehandlung
20	Zerlegen der Notstromaggregate und Dekontamination
21	Freimessung inkl. Dokumentation der Notstromaggregate
22	Lagerung bis zum Abtransport der zerlegten Notstromaggregate
23	Errichten eines Zwischenlagers für kontaminierte/aktivierte Teile außerhalb der Reaktoranlage
24	Einrichten von Transport-Routen inkl. Schleusen innerhalb der Anlage
25	Anschluss einer Baustromversorgung (öffentliches Netz oder mobile Stromerzeugungsanlage) und verlegen von Elektrizitätsanschlüssen
26	Anpassung des Beleuchtungssystems
27	Einrichten einer Konditionierungsstraße inkl. Abschirmbehälter

28	Umbau der äußeren Materialschleuse des RDB für große Bauteile und Aufbau von Spezialtraversen
29	Errichtung neue Personenschleuse inkl. Instrumentierung zur Strahlenschutzmesstechnik
30	Verpacken, Freimessen (inkl. Dokumentation) oder zwischenlagern brennbaren Materials
31	Verpacken, Freimessen (inkl. Dokumentation) oder zwischenlagern nicht mehr benötigter System-Flüssigkeiten (Wasser, Öl, Natrium, Schwerwasser, etc.)
32	Entrümpelung abgeschlossen
33	Verpacken, Freimessen (inkl. Dokumentation) oder zwischenlagern von Regel-/Abschaltstoffen, wie z. B. Bor und Deionat
34	Verpacken, Freimessen (inkl. Dokumentation) oder zwischenlagern von angesammeltem betrieblichen Abfall (z. B. während der Betriebszeit angesammelte Schwermetalle oder verbrauchten Harz)
35	Verpacken, Freimessen (inkl. Dokumentation) oder zwischenlagern von überflüssigem/ nicht mehr benötigtem Equipment und Material
36	Trockenlegung und Trocknung der Systeme des Sekundärkreislaufs
37	Abbau und Verpacken von Asbest
38	Freimessung (inkl. Dokumentation) oder zwischenlagern von Asbest
39	Abbau und Verpacken weiterer Stoffe (wie Quecksilber, Blei, PCB, Stickstoff aus dem UNS-Gebäude, Neon-Licht)
40	Freimessen (inkl. Dokumentation) oder zwischenlagern weiterer Stoffe (wie Quecksilber, Blei, PCB, Stickstoff aus dem UNS-Gebäude, Neon-Licht)
41	Irreversibles Freischalten (Strom) der Generatoren, Turbine(n), Kondensatoren, Speisewasserpumpen, Speisewasservorwärmer
42	Anpassung Kommunikationstechnik
43	Anpassung unterbrechungsfreie Stromversorgung
44	Installation Geräte/ Gerüste etc.
45	Abbau oder Anpassung stationäre Strahlenschutzmesstechnik und evtl. ersetzen durch mobile Messgeräte
46	Erweiterung Raumluftaktivitätsüberwachung
47	Errichtung von Einhausungen um Generatoren, Turbine(n), Kondensatoren, Speisewasserpumpen, Speisewasservorwärmer
48	Demontage, Zerlegung der Turbine in Einzelteile und Transport zur Nachbehandlung
49	Lagerung der Turbineneinzelteile bis zur Nachbehandlung
50	Identifikation und Beseitigung festsitzender Kontamination, Freimessung (inkl. Dokumentation) und Verpacken der Einzelteile der Turbine inkl. Hilfssysteme
51	Lagerung der Turbineneinzelteile bis zum Abtransport
52	Demontage und Transport der Einzelteile der Kondensatoren und Verweilbehälter zur Nachbehandlung
53	Lagerung bis zur Nachbehandlung der Kondensatoren und Verweilbehälter
54	Zerlegung der Kondensatoren und Verweilbehälter in kleinere Einzelteile

55	Identifikation und Beseitigung feststehender Kontamination, Freimessung (inkl. Dokumentation) und Verpacken der Einzelteile der Kondensatoren und Verweilbehälter
56	Lagerung der Einzelteile der Kondensatoren und Verweilbehälter bis zum Abtransport
57	Demontage und Transport der Speisewasserpumpe zur Nachbehandlung
58	Lagerung der Speisewasserpumpe bis zur Nachbehandlung
59	Zerlegung der Speisewasserpumpe in Einzelteile
60	Identifikation und Beseitigung feststehender Kontamination, Freimessung (inkl. Dokumentation) und Verpacken der Einzelteile der Speisewasserpumpe
61	Lagerung der Einzelteile der Speisewasserpumpe bis zum Abtransport
62	Demontage und Transport des Speisewasservorwärmers zur Nachbehandlung
63	Lagerung bis zur Nachbehandlung des Speisewasservorwärmers
64	Zerlegung des Speisewasservorwärmers in Einzelteile
65	Identifikation und Beseitigung feststehender Kontamination, Freimessung (inkl. Dokumentation) und Verpacken der Einzelteile des Speisewasservorwärmers
66	Lagerung der Einzelteile des Speisewasservorwärmers bis zum Abtransport
67	Prüfung, ob der Generator verkauft oder verschrottet wird
68	Demontage, Zerlegung des Generator-Läufers in große transportable Einzelteile und Transport zum Nachbehandlungsplatz
69	Lagerung der Einzelteile des Generator-Läufers am Nachbehandlungsplatz bis zur Nachbehandlung
70	Identifikation und Beseitigung von möglicher Kontamination und Freimessung (inkl. Dokumentation) des Generator-Läufers
71	Weitere Zerlegung in kleinere transportable Einzelteile und Verpacken der Einzelteile des Generator-Läufers
72	Lagerung der Einzelteile des Generator-Läufers bis zum Abtransport
73	Demontage, Zerlegung des Generator-Stators in große transportable Einzelteile und Transport zum Nachbehandlungsplatz
74	Zwischenlagerung am Nachbehandlungsplatz bis zur Nachbehandlung der Einzelteile des Generator-Stators
75	Identifikation und Beseitigung von möglicher Kontamination und Freimessung (inkl. Dokumentation)
76	Weitere Zerlegung in kleinere transportable Einzelteile und Verpacken der Einzelteile des Generator-Stators
77	Lagerung der Einzelteile des Generator-Stators bis zum Abtransport
78	Demontage des Generator-Läufers
79	Identifikation und Beseitigung von möglicher Kontamination und Freimessung (inkl. Dokumentation) des Generator-Läufers
80	Lagerung des Generator-Läufers bis zum Abtransport
81	Demontage des Generator-Stators
82	Identifikation und Beseitigung von möglicher Kontamination und Freimessung (inkl. Dokumentation) des Generator-Stators
83	Lagerung des Generator-Stators bis zum Abtransport

84	Demontage, Zerlegung der Abgasanlage in Einzelteile und Transport zur Nachbehandlung
85	Lagerung bis zur Nachbehandlung der Einzelteile der Abgasanlage
86	Identifikation und Beseitigung festsitzender Kontamination, Freimessung (inkl. Dokumentation) und Verpacken der Einzelteile der Abgasanlage oder Einbringung in Zwischenlager
87	Lagerung der freigemessenen Teile bis zum Abtransport
88	Abbau Stromleitungen des Kühlkreislaufs/ Sekundärkreislaufs
89	Abbau und Freimessung (inkl. Dokumentation) Medienleitungen
90	Abbau und Freimessung (inkl. Dokumentation) Deaerator
91	Abbau Kühltürme
92	Freimessung (inkl. Dokumentation) der Kühltürme
93	Konfiguration der Brandmeldeanlage im Maschinenhaus
94	Konfiguration der Lüftungsanlage inkl. Filteranlagen im Maschinenhaus
95	Konfiguration der Brandmeldeanlage im Reaktorgebäude
96	Konfiguration der Lüftungsanlage inkl. Filteranlagen im Reaktorgebäude
97	Irreversibles Freischalten (Strom) aller Komponenten im Reaktorgebäude
98	Anpassung Kommunikationstechnik im Reaktorgebäude
99	Anpassung unterbrechungsfreie Stromversorgung
100	Anpassung Beleuchtung
101	Installation Geräte/ Gerüste etc.
102	Abbau oder Anpassung Stationäre Strahlenschutzmesstechnik und evtl. ersetzen durch mobile Messgeräte
103	Erweiterung Raumluftaktivitätsüberwachung
104	Abbau äußere Anbauten Reaktor
105	Errichten einer Einhausung um den Reaktor inkl. Schleuszelle
106	Ausräumen & Abbau der Resteinbauten und der Innenauskleidung Heiße Zellen
107	Entfernen Abluftkanäle
108	Dekontamination und Freimessen (inkl. Dokumentation) Heiße Zellen
109	Trockenlegung und Trocknung der Rohrleitungen (geschlossenes System) im Primärkreislauf
110	Trockenlegung und Trocknung der speziellen Kanalisation für kontaminationsverdächtige Abwässer im Primärkreislauf
111	Trockenlegung und Trocknung weiterer geschlossener, nicht mehr in Betrieb befindlicher Systeme, z. B. Dampftrockner, Kondensationskammern etc. im Primärkreislauf
112	Entfernen von Schlamm und Produkten der trockengelegten Systeme (z. B. Fragmente der verbrauchten Brennstäbe) sowie einfache Oberflächen-Dekontamination der trockengelegten Oberflächen im Primärkreislauf
113	Behandlung und Freimessung (inkl. Dokumentation) oder Zwischenlagerung der Flüssigkeiten/Gase im Primärkreislauf

114	Dekontamination der Rohrleitungen und Verpacken des Dekontaminations-Abfalls in Lager-/Transportbehälter
115	Dekontamination der speziellen Kanalisation und Verpacken des Dekontaminations-Abfalls in Lager-/Transportbehälter
116	Dekontamination weiterer geschlossener Systeme und Verpacken des Dekontaminations-Abfalls in Lager-/Transportbehälter
117	Radiologische Vor-Ort-Charakterisierung der trockengelegten Kraftwerksteile und der trockengelegten System-Komponenten
118	Bodenprobe und Grundwasser-Untersuchung
119	Abtragen und Dekontamination des Bodens und des Grundwassers
120	Demontage, Vorzerlegung und Transport zur Nachbehandlung der Rohrleitungen außerhalb des RDB (Kondensat- und Dampfsysteme inkl. Hilfssysteme, wie Kondensatreinigung etc.)
121	Abbau Armaturen
122	Abbau Gebäudetechnik (Schalt-/Steuerschränke)
123	Lagerung bis zur Nachbehandlung der Rohrleitungen, Gebäudetechnik und Armaturen
124	Zerlegung der Rohrleitungen, Gebäudetechnik und Armaturen in Einzelteile
125	Identifikation und Beseitigung festsitzender Kontamination, Freimessung (inkl. Dokumentation) und Verpacken der Einzelteile
126	Lagerung bis zum Abtransport oder Einbringung in Zwischenlager
127	Ziehen der Betonriegel aus der Verankerung über dem Flutbecken
128	Zerlegen der Betonriegel in transportable Stücke
129	Dekontamination der Betonriegel durch Abtragen der Oberflächen inkl. Entfernung von abstehenden Metallteilen
130	Freimessung (inkl. Dokumentation) der Betonriegel oder Einbringung in Zwischenlager
131	Lagerung der freigemessenen Betonriegel bis zum Abtransport
132	Reinigen/dekontaminieren des Beckenbodens sowie der Beckenwandung des Wasserstands-Kontrollbeckens und verpacken der Reinigungsrückstände in Primärbehälter
133	Lagerung der Primärbehälter im Brennelementlagerbecken
134	Absenkung des Füllstands des Wasserstands-Kontrollbeckens mit weiterführender Reinigung und Dekontamination
135	Sammeln der Kontamination des Wassers des Wasserstands-Kontrollbeckens im Wasserfilter im Beckenboden
136	Reinigung, entfernen von Schlamm/dekontaminieren des Beckenbodens des Wasserstands-Kontrollbeckens
137	Demontieren, zerlegen und verpacken der Beckenauskleidung des Wasserstands-Kontrollbeckens
138	Demontage, Zerlegung der Reaktorschnellabschaltung (inkl. Bor-Säure-Tank) in Einzelteile und Transport der Einzelteile zur Nachbehandlung

139	Lagerung der Einzelteile der Reaktorschnellabschaltung (inkl. Bor-Säure-Tank) bis zur Nachbehandlung
140	Identifikation und Beseitigung festsitzender Kontamination, Freimessung (inkl. Dokumentation) und Verpacken der Einzelteile oder Einbringung in Zwischenlager
141	Lagerung der freigemessenen Einzelteile bis zum Abtransport
142	Messungen für Feindekontamination
143	Dekontamination der Lager für neue Brennelemente (geschlossenes System) mit Hilfe spezieller Dekontaminationsverfahren (mechanische und chemische Verfahren)
144	Dekontamination von Teilen des Reaktorgebäudes/ Gebäudestrukturen und Gebäudeausstattung
145	Ziehen und Transport der Rohrleitungen des RDB in das Brennelementlagerbecken
146	Lagerung der Rohrleitungen des RDB im Brennelementlagerbecken
147	Zerlegung der Rohrleitungen des RDB und Verpacken in Primärbehälter
148	Zwischenlagerung der Primärbehälter im Brennelementlagerbecken
149	Demontage, Zerlegung in Einzelteile und Transport der Einzelteile der Wasserreinigung zur Nachbehandlung
150	Lagerung der Einzelteile der Wasserreinigung bis zur Nachbehandlung
151	Identifikation und Beseitigung festsitzender Kontamination, Freimessung (inkl. Dokumentation) und Verpacken der Einzelteile der Wasserreinigung oder Einbringung in das Zwischenlager
152	Lagerung der freigemessenen Einzelteile der Wasserreinigung bis zum Abtransport
153	Blindsetzung bzw. Verdeckelung aller Öffnungen der Dampferzeuger
154	Demontage der Betonriegel der Dampferzeugerhäuser, ausschleusen inkl. Freimessung (inkl. Dokumentation) und Transport zum Lagerplatz
155	Lagerung der Betonriegel der Dampferzeugerhäuser bis zum Abtransport
156	Ziehen und ausschleusen der Dampferzeuger inkl. Freimessung (inkl. Dokumentation)
157	Lagerung der Dampferzeuger bis zum Abtransport
158	Ziehen und ausschleusen der Druckhalter inkl. Freimessung (inkl. Dokumentation)
159	Lagerung der Druckhalter bis zum Abtransport
160	Ziehen und ausschleusen der Kühlmittelpumpen des Dampferzeugers inkl. Freimessung (inkl. Dokumentation)
161	Lagerung der Kühlmittelpumpen des Dampferzeugers bis zum Abtransport
162	Ziehen und ausschleusen der Abblasebehälter inkl. Freimessung (inkl. Dokumentation)
163	Lagerung der Abblasebehälter des Dampferzeugers bis zum Abtransport
164	Dekontamination der Kondensationskammern (geschlossenes System) mit Hilfe spezieller Dekontaminationsverfahren (mechanische und chemische Verfahren)
165	Zerlegen der Kondensationskammern in Einzelteile und Transport in den Gebäudebereich mit Zerlege- und Dekontaminationsvorrichtungen zur Nachzerlegung
166	Dekontamination und Nachzerlegung der Einzelteile der Kondensationskammern

167	Freimessung der Einzelteile oder Einbringung in das Zwischenlager
168	Lagerung der freigemessenen Einzelteile bis zum Abtransport
169	Ziehen und Transport der Umwälzpumpen/Strahlpumpen in das Brennelementlagerbecken oder in den gefluteten RDB
170	Lagerung der Umwälzpumpen/Strahlpumpen im Brennelementlagerbecken bzw. gefluteten RDB
171	Zerlegung der Umwälzpumpen/Strahlpumpen und Verpacken in Primärbehälter
172	Lagerung der Primärbehälter im Brennelementlagerbecken
173	Konstruktion von Dämmen, um Überschwemmungen bei Unterwasser-Arbeiten im RDB zu vermeiden
174	Installation von Geräten und Sicherheitssystemen (z. B. zur Absicherung von Personen)
175	Installation/ Konfiguration der Einhausung für Zerlege- und Dekontaminationseinheiten am RDB
176	Aufbau eines Transportwegs des Rückbaumaterials des Reaktors vom Flutbecken zur Zerlege- und Dekontaminationseinheit
177	Entfernen der Betonriegel im oberen Bereich der Druckkammer und Transport zur Zerlege- und Dekontaminationseinheit
178	Demontage des pilzförmigen Splitterschutzbetons in der Kuppel des Sicherheitsbehälters und Transport zur Zerlege- und Dekontaminationseinheit
179	Demontage der oberen Stahlkuppel des Sicherheitsbehälters und Transport zur Zerlege- und Dekontaminationseinheit
180	Trockenlegung und Trocknung von Flut- und Brennelementlagerbecken
181	Vergrößerung des Transportkanals zwischen Flut- und Brennelementlagerbecken
182	Einbau eines Beckenbodenschutzes und Einzug einer Arbeitsbühne im Brennelementlagerbecken
183	Öffnen des Ladedeckels am Boden des Flutbeckens
184	Entfernen der Deckelschrauben und Heben des RDB-Deckels auf den Reaktorbedienungsflur
185	Vordekontamination des RDB-Deckels
186	Zerlegung des RDB-Deckels
187	Transport des RDB-Deckels zur Nachdekontamination und Nachzerlegung
188	Nachdekontamination des RDB-Deckels
189	Freimessung (inkl. Dokumentation) und Lagerung bis zum Abtransport oder Einbringung in das Zwischenlager
190	Verbinden des Flutbeckens mit dem RDB
191	Fluten von Flut- und Brennelementlagerbecken
192	Installation Zerlegemaschinen
193	Einbringen eines Wassertopfes/Abschirmbehälters zur Vermeidung der Abrasiv-Ausbreitung beim WASS-Verfahren
194	Ziehen, zerlegen und Verpacken der BE-Kästen in Primärbehälter

195	Lagerung der Primärbehälter mit den zerlegten BE-Kästen im Brennelementlagerbecken
196	Demontage, Vorzerlegung und Transport zur Nachbehandlung der Steuerstabantriebe
197	Lagerung bis zur Nachbehandlung der Steuerstabantriebe
198	Zerlegung der Steuerstabantriebe in Einzelteile
199	Identifikation und Beseitigung festsitzender Kontamination, Freimessung (inkl. Dokumentation) und Verpacken der Einzelteile
200	Lagerung bis zum Abtransport der Steuerstabantriebe
201	Demontage, Vorzerlegung und Transport zur Nachbehandlung der nuklearen Messtechnik (Sonden, Messköpfe)
202	Demontage, Vorzerlegung und Transport zur Nachbehandlung der Instrumentierungsanzulen
203	Lagerung bis zur Nachbehandlung der Instrumentierungsanzulen
204	Zerlegung der Instrumentierungsanzulen in Einzelteile
205	Identifikation und Beseitigung festsitzender Kontamination, Freimessung (inkl. Dokumentation) und Verpacken der Einzelteile der Instrumentierungsanzulen
206	Lagerung bis zum Abtransport der Instrumentierungsanzulen
207	Entfernen, dekontaminieren, freimessen (inkl. Dokumentation) und Lagerung der Stutzen für Kerninstrumentierung bis zum Abtransport
208	Demontage, Vorzerlegung und Transport zur Nachbehandlung der Kerninstrumentierungsführungsrohre
209	Lagerung bis zur Nachbehandlung der Kerninstrumentierungsführungsrohre
210	Zerlegung der Kerninstrumentierungsführungsrohre in Einzelteile
211	Identifikation und Beseitigung festsitzender Kontamination, Freimessung (inkl. Dokumentation) und Verpacken der Einzelteile der Kerninstrumentierungsführungsrohre oder Einbringung in das Zwischenlager
212	Lagerung der freigemessenen Teile bis zum Abtransport
213	Abbau, dekontaminieren, Verpacken und freimessen (inkl. Dokumentation) der Thermischen Säule
214	Abbau, dekontaminieren, Verpacken und freimessen (inkl. Dokumentation) der Bestrahlungstechnik
215	Abbau, dekontaminieren, Verpacken und freimessen (inkl. Dokumentation) des Reflektors in das Brennelementlagerbecken oder Einbringung in das Zwischenlager
216	Abbau, dekontaminieren, Verpacken und freimessen (inkl. Dokumentation) der thermischen Isolierung oder Einbringung in das Zwischenlager
217	Ziehen und Transport der Strahlrohre/ Neutronenleitrohre in das Brennelementlagerbecken
218	Zwischenlagerung der Strahlrohre/ Neutronenleitrohre im Brennelementlagerbecken
219	Zerlegung der Strahlrohre/ Neutronenleitrohre und Verpacken in Primärbehälter
220	Lagerung der Primärbehälter im Brennelementlagerbecken
221	Ziehen, Zerlegen und Verpacken der Steuerstäbe in Primärbehälter

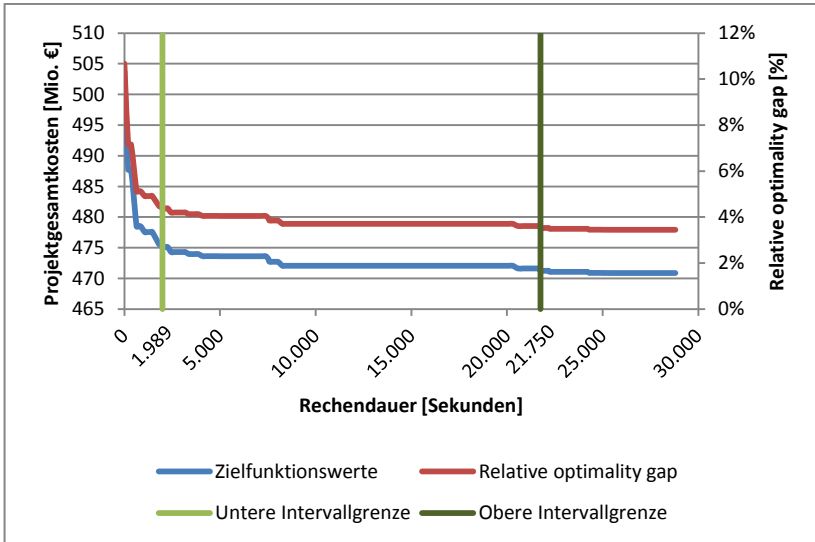
222	Lagerung der Primärbehälter mit den zerlegten Steuerstäben im Brennelementlagerbecken
223	Heben des zyklonartigen Dampftrockners auf den Reaktorbedienungsflur
224	Vordekontamination des zyklonartigen Dampftrockners
225	Zerlegung des zyklonartigen Dampftrockners
226	Transport zur Nachdekontamination und Nachzerlegung
227	Nachdekontamination des zyklonartigen Dampftrockners
228	Freimessung (inkl. Dokumentation) und Lagerung bis zum Abtransport oder Einbringung in das Zwischenlager
229	Heben des Dampf-Wasser-Abscheiders auf den Reaktorbedienungsflur
230	Vordekontamination des Dampf-Wasser-Abscheiders
231	Zerlegung des Dampf-Wasser-Abscheiders
232	Transport des Dampf-Wasser-Abscheiders zur Nachdekontamination und Nachzerlegung
233	Nachdekontamination des Dampf-Wasser-Abscheiders
234	Freimessung (inkl. Dokumentation) und Lagerung bis zum Abtransport des Dampf-Wasser-Abscheiders oder Einbringung in das Zwischenlager
235	Transport des OKG aus der Einbaulage ins Brennelementlagerbecken auf das Arbeitspodest Vorzerlegeplatz
236	Demontage, Zerlegung und Verpackung der Aufbauten der Deckplatte insbesondere der Steuerstabführungsrohre
237	Demontage und Zerlegung der Deckplatte
238	Abbau, Zerlegung, Dekontamination und Freimessung (inkl. Dokumentation) Oberer Rost mit Tragrings und Flanschteil
239	Abbau, Zerlegung, Dekontamination und Freimessung (inkl. Dokumentation) Tragstangen
240	Abbau, Zerlegung, Dekontamination und Freimessung (inkl. Dokumentation) OKG-Mantel
241	Abbau, Zerlegung, Dekontamination und Freimessung (inkl. Dokumentation) untere Gitterplatte mit Anbauteile
242	Transport UKG aus Einbaulage zur Abstellposition im Flutbecken
243	Demontage von Befestigungsmaterialien (Schrauben, Mast)
244	Trennung der Kernumfassungsbleche vom Kernmantel
245	Abbau, Zerlegung, Dekontamination und Freimessung (inkl. Dokumentation) der Kernumfassungsbleche
246	Ziehen der Kernumfassungsbleche aus dem UKG und Lagerung im Flutraum
247	Zerlegung Kernbehältermantel
248	Abbau, Zerlegung, Dekontamination und Freimessung (inkl. Dokumentation) unterer Rost mit Stauplatte
249	Demontage und Zerlegung Kernschemel
250	Verpackung der Einzelteile Lagerung bis zum Abtransport oder Einlagerung im Zwischenlager
251	Absaugen Abrasiv aus dem Wassertopf/Abschirmbehälter
252	Entfernen des Wassertopfs/Abschirmbehälters

253	Hochziehen und unter Wasser hochdruckreinigen der Lastverteillerrahmen des Beckenbodens
254	Reinigen/dekontaminieren des Beckenbodens sowie der Beckenwandung und verpacken der Reinigungsrückstände in Primärbehälter
255	Lagerung der Primärbehälter im Brennelementlagerbecken
256	Absenkung des Füllstands mit weiterführender Reinigung und Dekontamination
257	Sammeln der Kontamination des Wassers im Wasserfilter im Beckenboden
258	Reinigung, entfernen von Schlamm/dekontaminieren des Beckenbodens
259	Demontieren, zerlegen und verpacken der Beckenauskleidung
260	Demontieren, zerlegen und verpacken der Einrichtungen der Kernnotkühlung
261	Transport und Behandlung zwischengelagerter Primärbehälter in der Konditionierungsstraße und anschließende Einbringung in das Zwischenlager
262	Absaugen Abrasiv aus dem Wassertopf/Abschirmbehälter
263	Entfernen des Wassertopfs/Abschirmbehälters
264	Abbau und Dekontamination der Lagergestelle im Brennelementlagerbecken
265	Hochziehen und unter Wasser hochdruckreinigen der Lastverteillerrahmen des Beckenbodens
266	Reinigen/dekontaminieren des Beckenbodens sowie der Beckenwandung und verpacken der Reinigungsrückstände in Primärbehälter sowie anschließende Behandlung in der Konditionierungsstraße
267	Absenkung des Füllstands mit weiterführender Reinigung und Dekontamination
268	Sammeln der Kontamination des Wassers im Wasserfilter im Beckenboden
269	Reinigung, entfernen von Schlamm/dekontaminieren des Beckenbodens
270	Demontieren, zerlegen und verpacken der Beckenauskleidung inkl. restlicher Einbauten und Dekontamination
271	Ausräumen und Reinigung des Reaktorbeckens
272	Schrittweise Trockenlegung und Trocknung des RDB & Zerlegung des RDB: Der Füllstand wird bis zur jeweiligen Schnitthöhe abgesenkt
273	Abbau Biologischer Schild
274	Abbau, dekontaminieren, verpacken und freimessen (inkl. Dokumentation) des Sicherheitsbehälters/Containments oder Einbringung von nicht freigemessenen Teilen in das Zwischenlager
275	Abbau, dekontaminieren und freimessen (inkl. Dokumentation) eingebetteter Elemente (eingebettete Rohre, hermetische Türen, etc.)
276	Abbau, dekontaminieren und freimessen (inkl. Dokumentation) kontaminierter Strukturen
277	Dekontamination der Gebäude (mechanische und chemische Verfahren)
278	Abbau, dekontaminieren, zerlegen und freimessen (inkl. Dokumentation) Fortluftschornstein
279	Abbau, dekontaminieren und freimessen (inkl. Dokumentation) unterirdischer kontaminierter Leitungen und Strukturen

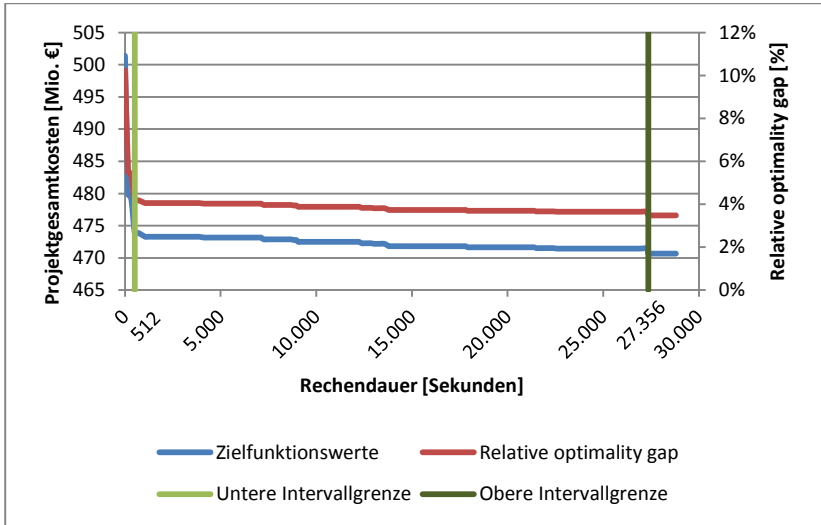
280	Abbau, dekontaminieren und freimessen (inkl. Dokumentation) spezieller Kanalisation
281	Entfernen, dekontaminieren und freimessen (inkl. Dokumentation) kontaminierter Erde und weiterer kontaminierter Teile
282	Abbau, dekontaminieren und freimessen (inkl. Dokumentation) von Hilfssystemen (Ventile, Motoren, Tanks, Aufhänger)
283	Abbau der Brandmeldeanlage
284	Abbau der Lüftungsanlage (inkl. Dokumentation)
285	Irreversibles Freischalten (Strom) aller verbliebenen Komponenten
286	Anpassung Kommunikationstechnik
287	Anpassung unterbrechungsfreie Stromversorgung
288	Anpassung Beleuchtung
289	Abbau oder Anpassung stationäre Strahlenschutzmesstechnik
290	Abbau, dekontaminieren und freimessen (inkl. Dokumentation) der Personenschleuse
291	Abbau und Beseitigung (Verpacken und Zwischenlagerung bis zum Abtransport) übrig gebliebener Komponenten und Geräte: Kabel, Hebesysteme, Gebäudekran, etc.)
292	Entkernung Kontrollbereiche (inkl. Dokumentation)
293	Freimessung (inkl. Dokumentation) der Gebäude
294	Baustromversorgung und Freischalten Gebäude
295	Rückbau und Anpassung Kommunikationstechnik
296	Ausbinden Medienleitungen
297	Bautechnische Maßnahmen
298	Abbruch Gebäude
299	Dekontaminieren, Freimessen (inkl. Dokumentation) Baugruben der abgebrochenen Gebäude
300	Verfüllen Baugruben Gebäude
301	Profilieren und Abdecken Baufelder mit Erdstoff
302	Gesamtabschlussbericht
303	Errichten Grüne Wiese (Oberboden, Rasen, Gehölze etc.)
304	Lagerung des Dampferzeugers und seiner Komponenten bis zum Abtransport
305	Abriss Maschinenhaus und anhängende Gebäude

A.5 Langzeittests des MLS-Algorithmus mit einem Zeitlimit von 28.800 Sekunden für das Referenzprojekt des Rückbaus einer Gesamtanlage

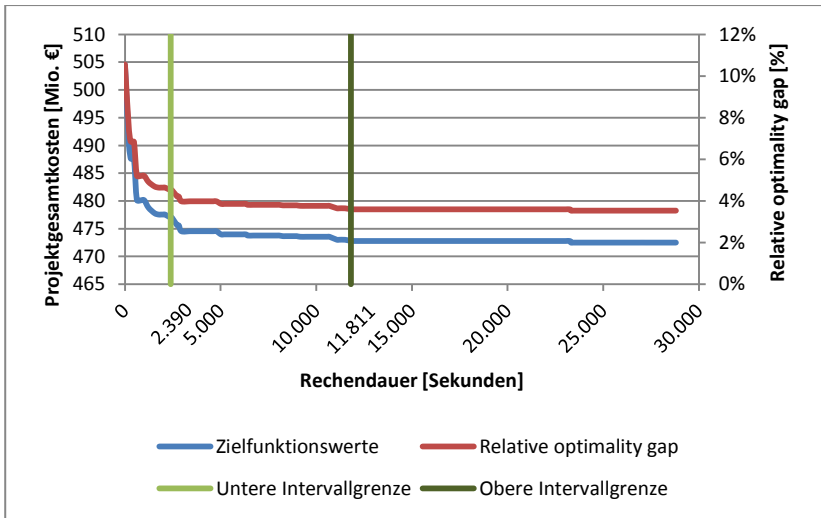
Szenario 101



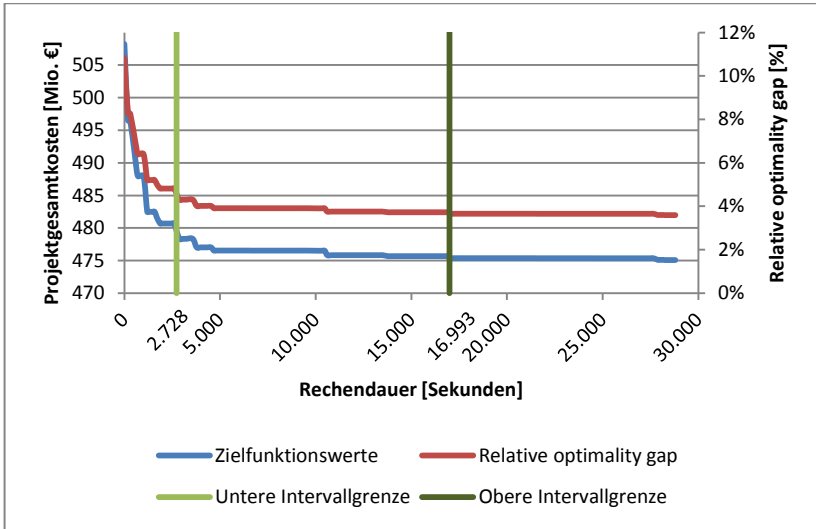
Szenario 102



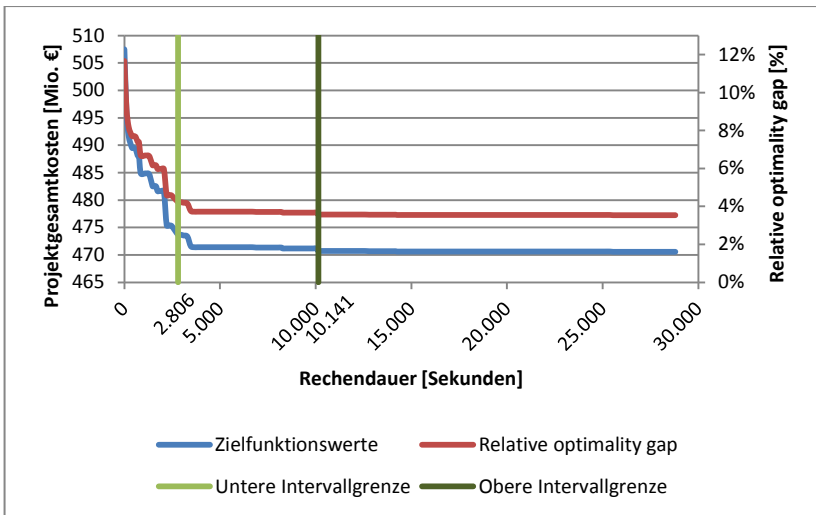
Szenario 103



Szenario 104

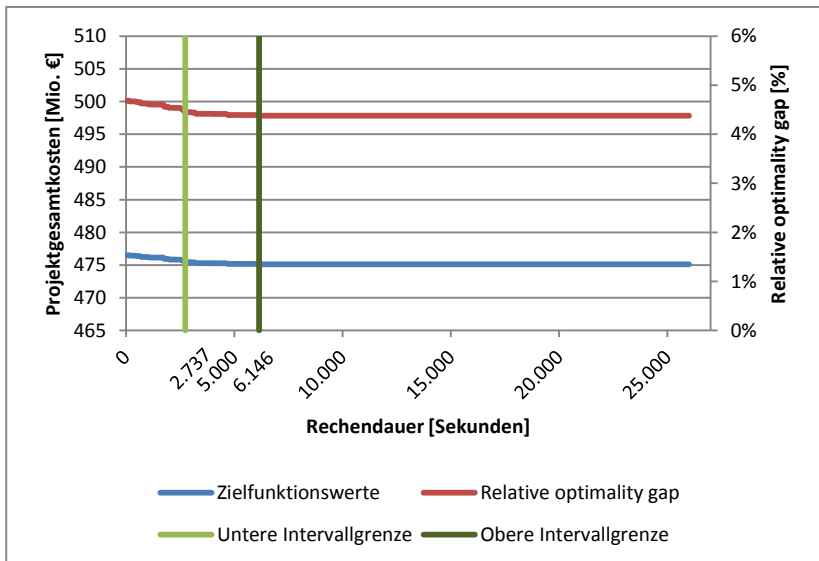


Szenario 105



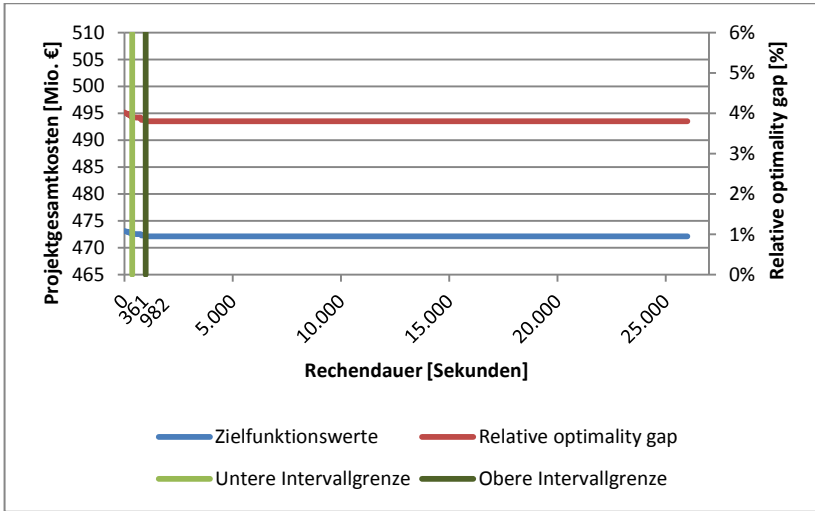
A.6 Langzeittests des ALNS-Algorithmus mit einem Zeitlimit von 28.800 Sekunden für das Referenzprojekt des Rückbaus einer Gesamtanlage¹⁵³

Szenario 101

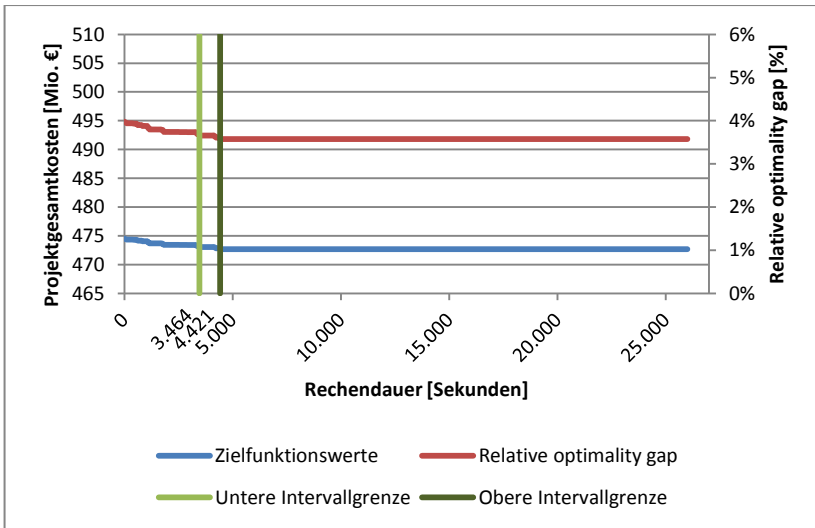


¹⁵³ In den Langzeittests ist zwar auch der MLS-Algorithmus ausgeführt worden, allerdings ist dessen Dauer durch den Parameter $T = 2.806$ Sekunden (minimales Zeitlimit des MLS-Algorithmus gemäß der Langzeittests des MLS-Algorithmus in Kapitel 5.2.2) zeitlich beschränkt. Die abgebildeten Grafiken zeigen lediglich die Ergebnisse der Langzeittests des ALNS-Algorithmus.

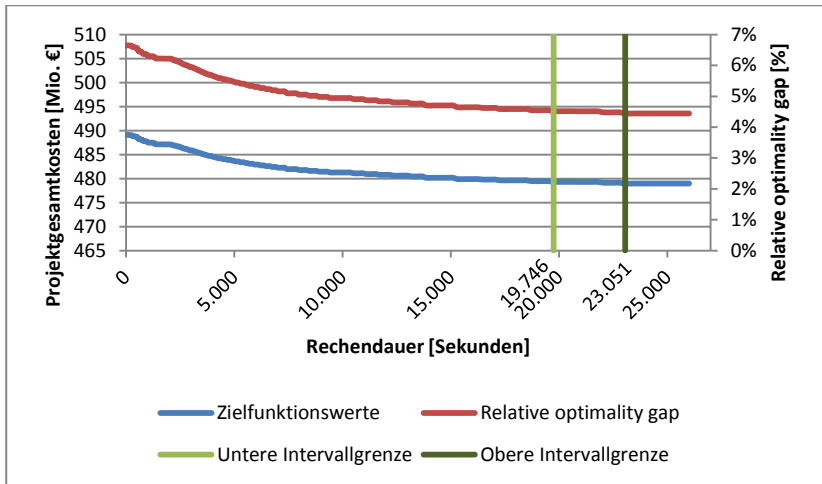
Szenario 102



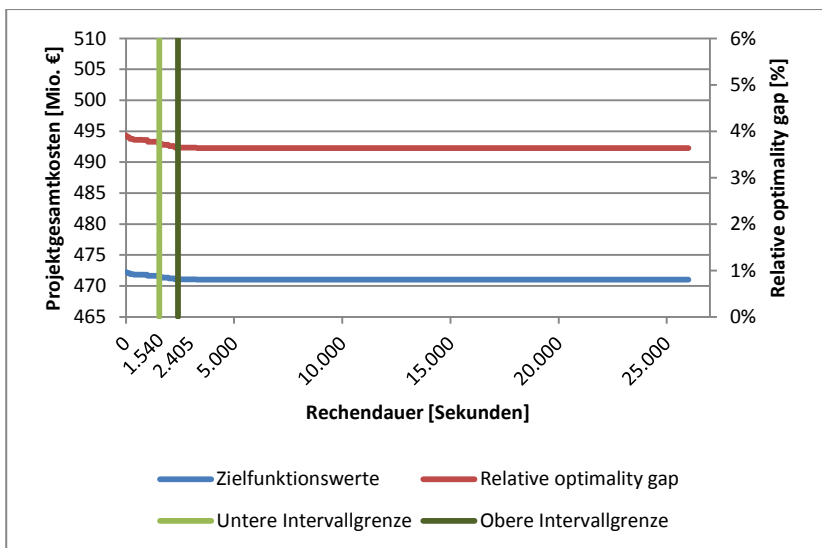
Szenario 103



Szenario 104



Szenario 105



A.7 Eigenschaften der simulierten Test-Szenarien für das Referenzprojekt des Rückbaus einer Gesamtanlage

Szenarien	Anzahl Vorgänge	Anzahl Vorgänge mit mehr als einem Modus	Anzahl Vorgänge mit einer Erhöhung der Restbetriebskosten	Anzahl Vorgänge mit einer Reduktion der Restbetriebskosten	Anzahl verwendete erneuerbare Ressourcen	Anzahl Vorgänge mit normalen Nachfolgerbeziehungen	Anzahl normale Nachfolgerbeziehungen	Anzahl Vorgänge mit no-wait Nachfolgerbeziehungen	Anzahl no-wait Nachfolgerbeziehungen
101	299	37	7	12	22	206	330	102	103
102	295	33	7	12	22	204	328	100	101
103	295	33	7	12	22	204	328	100	101
104	295	33	7	12	22	204	328	100	101
105	295	33	7	12	22	204	328	100	101
106	295	33	7	12	22	204	328	100	101
107	295	33	7	12	22	204	328	100	101
108	295	33	7	12	22	204	328	100	101
109	295	33	7	12	22	204	328	100	101
110	295	33	7	12	22	204	328	100	101
111	299	37	7	12	22	206	330	102	103
112	299	37	7	12	22	206	330	102	103
113	295	33	7	12	22	204	328	100	101
114	295	33	7	12	22	204	328	100	101
115	295	33	7	12	22	204	328	100	101
116	295	33	7	12	22	204	328	100	101
117	299	37	7	12	22	206	330	102	103
118	295	33	7	12	22	204	328	100	101
119	295	33	7	12	22	204	328	100	101

120	295	33	7	12	22	204	328	100	101
121	295	33	7	12	22	204	328	100	101
122	295	33	7	12	22	204	328	100	101
123	295	33	7	12	22	204	328	100	101
124	295	33	7	12	22	204	328	100	101
125	299	37	7	12	22	206	330	102	103
126	295	33	7	12	22	204	328	100	101
127	295	33	7	12	22	204	328	100	101
128	295	33	7	12	22	204	328	100	101
129	295	33	7	12	22	204	328	100	101
130	295	33	7	12	22	204	328	100	101
131	295	33	7	12	22	204	328	100	101
132	295	33	7	12	22	204	328	100	101
133	299	37	7	12	22	206	330	102	103
134	295	33	7	12	22	204	328	100	101
135	295	33	7	12	22	204	328	100	101
136	295	33	7	12	22	204	328	100	101
137	299	37	7	12	22	206	330	102	103
138	295	33	7	12	22	204	328	100	101
139	299	37	7	12	22	206	330	102	103
140	295	33	7	12	22	204	328	100	101
141	295	33	7	12	22	204	328	100	101
142	295	33	7	12	22	204	328	100	101
143	295	33	7	12	22	204	328	100	101
144	295	33	7	12	22	204	328	100	101
145	299	37	7	12	22	206	330	102	103
146	299	37	7	12	22	206	330	102	103
147	295	33	7	12	22	204	328	100	101
148	295	33	7	12	22	204	328	100	101
149	295	33	7	12	22	204	328	100	101
150	295	33	7	12	22	204	328	100	101
151	295	33	7	12	22	204	328	100	101
152	299	37	7	12	22	206	330	102	103
153	299	37	7	12	22	206	330	102	103
154	299	37	7	12	22	206	330	102	103
155	295	33	7	12	22	204	328	100	101
156	295	33	7	12	22	204	328	100	101
157	295	33	7	12	22	204	328	100	101
158	295	33	7	12	22	204	328	100	101

159	295	33	7	12	22	204	328	100	101
160	295	33	7	12	22	204	328	100	101
161	295	33	7	12	22	204	328	100	101
162	295	33	7	12	22	204	328	100	101
163	295	33	7	12	22	204	328	100	101
164	299	37	7	12	22	206	330	102	103
165	295	33	7	12	22	204	328	100	101
166	295	33	7	12	22	204	328	100	101
167	295	33	7	12	22	204	328	100	101
168	295	33	7	12	22	204	328	100	101
169	295	33	7	12	22	204	328	100	101
170	295	33	7	12	22	204	328	100	101
171	295	33	7	12	22	204	328	100	101
172	295	33	7	12	22	204	328	100	101
173	295	33	7	12	22	204	328	100	101
174	295	33	7	12	22	204	328	100	101
175	295	33	7	12	22	204	328	100	101
176	299	37	7	12	22	206	330	102	103
177	295	33	7	12	22	204	328	100	101
178	295	33	7	12	22	204	328	100	101
179	295	33	7	12	22	204	328	100	101
180	295	33	7	12	22	204	328	100	101
181	295	33	7	12	22	204	328	100	101
182	295	33	7	12	22	204	328	100	101
183	295	33	7	12	22	204	328	100	101
184	295	33	7	12	22	204	328	100	101
185	295	33	7	12	22	204	328	100	101
186	295	33	7	12	22	204	328	100	101
187	295	33	7	12	22	204	328	100	101
188	299	37	7	12	22	206	330	102	103
189	295	33	7	12	22	204	328	100	101
190	295	33	7	12	22	204	328	100	101
191	295	33	7	12	22	204	328	100	101
192	295	33	7	12	22	204	328	100	101
193	295	33	7	12	22	204	328	100	101
194	295	33	7	12	22	204	328	100	101
195	295	33	7	12	22	204	328	100	101
196	295	33	7	12	22	204	328	100	101
197	295	33	7	12	22	204	328	100	101

198	295	33	7	12	22	204	328	100	101
199	295	33	7	12	22	204	328	100	101
200	295	33	7	12	22	204	328	100	101

A.8 Eigenschaften optimierter Schedules des Referenzprojekts des Rückbaus einer Gesamtanlage

Szenario	Kosten	LB	Relative optimality gap
Szenario 101	482.661.892	454.792.786	0,06127869
Szenario 101	485.504.418	454.792.786	0,06752885
Szenario 101	482.760.659	454.792.786	0,06149586
Szenario 101	480.377.974	454.792.786	0,0562568
Szenario 101	482.328.011	454.792.786	0,06054455
Szenario 102	479.609.645	452.168.629	0,06068757
Szenario 102	479.941.939	452.168.629	0,06142246
Szenario 102	476.983.873	452.168.629	0,05488051
Szenario 102	479.198.777	452.168.629	0,05977891
Szenario 102	479.829.345	452.168.629	0,06117345
Szenario 103	478.566.415	449.834.873	0,06387131
Szenario 103	474.140.409	449.834.873	0,05403213
Szenario 103	478.661.278	449.834.873	0,06408219
Szenario 103	477.392.915	449.834.873	0,06126257
Szenario 103	477.105.775	449.834.873	0,06062425
Szenario 104	486.482.400	458.407.346	0,06124477
Szenario 104	483.531.194	458.407.346	0,05480682
Szenario 104	485.533.898	458.407.346	0,05917565
Szenario 104	485.520.778	458.407.346	0,05914703
Szenario 104	483.386.807	458.407.346	0,05449184
Szenario 105	478.705.356	451.564.284	0,06010456
Szenario 105	477.956.474	451.564.284	0,05844614
Szenario 105	476.504.504	451.564.284	0,05523072
Szenario 105	479.099.943	451.564.284	0,06097838
Szenario 105	478.753.676	451.564.284	0,06021156
Szenario 106	478.350.963	452.580.694	0,05694072
Szenario 106	479.644.432	452.580.694	0,0597987
Szenario 106	479.545.099	452.580.694	0,05957922
Szenario 106	479.789.499	452.580.694	0,06011923
Szenario 106	479.823.466	452.580.694	0,06019429
Szenario 107	479.287.770	455.608.785	0,05197219
Szenario 107	483.208.431	455.608.785	0,06057751
Szenario 107	483.074.471	455.608.785	0,06028349

Szenario 107	480.767.573	455.608.785	0,05522016
Szenario 107	479.626.504	455.608.785	0,05271566
Szenario 108	479.112.215	452.927.062	0,05781318
Szenario 108	480.512.631	452.927.062	0,0609051
Szenario 108	478.051.233	452.927.062	0,05547068
Szenario 108	477.387.445	452.927.062	0,05400513
Szenario 108	484.185.219	452.927.062	0,06901367
Szenario 109	480.157.721	452.467.408	0,06119847
Szenario 109	479.884.454	452.467.408	0,06059452
Szenario 109	478.013.250	452.467.408	0,05645897
Szenario 109	479.994.454	452.467.408	0,06083763
Szenario 109	480.143.921	452.467.408	0,06116797
Szenario 110	480.781.832	455.531.724	0,05542997
Szenario 110	483.378.904	455.531.724	0,06113115
Szenario 110	480.781.032	455.531.724	0,05542821
Szenario 110	478.195.560	455.531.724	0,04975249
Szenario 110	484.614.973	455.531.724	0,06384462
Szenario 111	481.735.219	457.659.694	0,05260574
Szenario 111	484.980.279	457.659.694	0,05969629
Szenario 111	485.174.526	457.659.694	0,06012072
Szenario 111	482.938.955	457.659.694	0,05523593
Szenario 111	484.319.491	457.659.694	0,05825245
Szenario 112	481.307.412	452.898.695	0,06272643
Szenario 112	478.679.940	452.898.695	0,05692497
Szenario 112	478.727.877	452.898.695	0,05703082
Szenario 112	481.252.162	452.898.695	0,06260444
Szenario 112	477.534.871	452.898.695	0,05439666
Szenario 113	479.207.896	453.368.237	0,05699486
Szenario 113	478.345.894	453.368.237	0,05509353
Szenario 113	479.727.417	453.368.237	0,05814077
Szenario 113	478.551.345	453.368.237	0,0555467
Szenario 113	480.662.299	453.368.237	0,06020285
Szenario 114	476.549.965	453.596.155	0,05060407
Szenario 114	480.214.426	453.596.155	0,05868275
Szenario 114	481.046.961	453.596.155	0,06051816
Szenario 114	478.438.689	453.596.155	0,05476796
Szenario 114	477.787.221	453.596.155	0,05333173
Szenario 115	480.050.516	452.222.376	0,06153641
Szenario 115	479.960.115	452.222.376	0,0613365

Szenario 115	479.709.982	452.222.376	0,06078338
Szenario 115	476.971.110	452.222.376	0,05472691
Szenario 115	479.543.315	452.222.376	0,06041483
Szenario 116	482.534.948	456.208.098	0,05770798
Szenario 116	482.738.115	456.208.098	0,05815332
Szenario 116	482.687.082	456.208.098	0,05804146
Szenario 116	485.407.501	456.208.098	0,06400457
Szenario 116	480.887.845	456.208.098	0,05409756
Szenario 117	482.801.156	457.135.638	0,05614421
Szenario 117	484.991.267	457.135.638	0,06093515
Szenario 117	485.592.835	457.135.638	0,0622511
Szenario 117	484.765.860	457.135.638	0,06044207
Szenario 117	483.116.530	457.135.638	0,0568341
Szenario 118	480.930.035	453.617.646	0,06021016
Szenario 118	480.867.308	453.617.646	0,06007187
Szenario 118	480.769.128	453.617.646	0,05985544
Szenario 118	480.091.550	453.617.646	0,05836172
Szenario 118	480.769.708	453.617.646	0,05985671
Szenario 119	481.452.460	454.038.071	0,06037905
Szenario 119	481.615.927	454.038.071	0,06073908
Szenario 119	481.870.294	454.038.071	0,06129932
Szenario 119	481.752.327	454.038.071	0,0610395
Szenario 119	481.777.794	454.038.071	0,06109559
Szenario 120	480.644.428	451.921.366	0,06355765
Szenario 120	479.285.225	451.921.366	0,06055004
Szenario 120	479.425.492	451.921.366	0,06086042
Szenario 120	477.650.555	451.921.366	0,05693289
Szenario 120	478.352.690	451.921.366	0,05848656
Szenario 121	481.540.043	455.327.940	0,05756753
Szenario 121	481.835.144	455.327.940	0,05821563
Szenario 121	482.019.411	455.327.940	0,05862032
Szenario 121	478.581.004	455.327.940	0,05106883
Szenario 121	483.816.748	455.327.940	0,06256767
Szenario 122	485.715.506	459.263.299	0,05759704
Szenario 122	488.354.245	459.263.299	0,06334263
Szenario 122	486.491.261	459.263.299	0,05928617
Szenario 122	487.343.796	459.263.299	0,06114248
Szenario 122	483.304.588	459.263.299	0,05234751
Szenario 123	480.588.848	456.290.382	0,0532522

Szenario 123	483.813.168	456.290.382	0,06031858
Szenario 123	480.526.548	456.290.382	0,05311566
Szenario 123	483.517.394	456.290.382	0,05967036
Szenario 123	483.973.155	456.290.382	0,0606692
Szenario 124	476.250.694	452.490.889	0,05250891
Szenario 124	477.231.496	452.490.889	0,05467648
Szenario 124	476.765.415	452.490.889	0,05364644
Szenario 124	480.024.035	452.490.889	0,06084796
Szenario 124	477.178.989	452.490.889	0,05456044
Szenario 125	479.297.990	451.735.218	0,06101533
Szenario 125	477.515.513	451.735.218	0,05706948
Szenario 125	478.417.735	451.735.218	0,05906672
Szenario 125	478.829.116	451.735.218	0,05997739
Szenario 125	479.435.050	451.735.218	0,06131873
Szenario 126	480.952.337	453.748.595	0,05995334
Szenario 126	480.978.737	453.748.595	0,06001152
Szenario 126	480.920.870	453.748.595	0,05988399
Szenario 126	480.492.436	453.748.595	0,05893978
Szenario 126	480.992.937	453.748.595	0,06004281
Szenario 127	481.712.935	455.129.391	0,05840876
Szenario 127	482.846.004	455.129.391	0,06089831
Szenario 127	480.387.199	455.129.391	0,05549588
Szenario 127	481.091.147	455.129.391	0,05704258
Szenario 127	482.525.483	455.129.391	0,06019407
Szenario 128	479.429.337	453.878.052	0,05629548
Szenario 128	481.277.241	453.878.052	0,06036685
Szenario 128	480.893.157	453.878.052	0,05952062
Szenario 128	484.555.298	453.878.052	0,06758918
Szenario 128	479.294.537	453.878.052	0,05599849
Szenario 129	479.621.510	452.790.812	0,05925628
Szenario 129	479.534.583	452.790.812	0,0590643
Szenario 129	482.538.456	452.790.812	0,06569843
Szenario 129	478.303.954	452.790.812	0,05634642
Szenario 129	475.337.508	452.790.812	0,04979495
Szenario 130	482.428.905	458.074.702	0,05316644
Szenario 130	481.434.663	458.074.702	0,05099596
Szenario 130	483.409.707	458.074.702	0,05530758
Szenario 130	485.019.890	458.074.702	0,05882269
Szenario 130	485.363.871	458.074.702	0,05957362

Szenario 131	480.453.694	456.035.241	0,0535451
Szenario 131	484.757.476	456.035.241	0,06298249
Szenario 131	479.286.825	456.035.241	0,05098638
Szenario 131	482.276.331	456.035.241	0,0575418
Szenario 131	483.400.100	456.035.241	0,06000602
Szenario 132	478.127.189	453.076.248	0,05529078
Szenario 132	477.739.255	453.076.248	0,05443456
Szenario 132	477.432.721	453.076.248	0,053758
Szenario 132	479.562.392	453.076.248	0,05845847
Szenario 132	478.764.557	453.076.248	0,05669754
Szenario 133	481.702.695	454.164.163	0,06063563
Szenario 133	478.923.889	454.164.163	0,05451713
Szenario 133	478.116.821	454.164.163	0,05274009
Szenario 133	481.866.682	454.164.163	0,06099671
Szenario 133	481.668.428	454.164.163	0,06056018
Szenario 134	475.921.251	448.704.223	0,06065695
Szenario 134	473.179.046	448.704.223	0,05454556
Szenario 134	474.312.895	448.704.223	0,0570725
Szenario 134	477.195.987	448.704.223	0,06349787
Szenario 134	476.274.732	448.704.223	0,06144473
Szenario 135	480.983.336	456.319.749	0,05404891
Szenario 135	484.690.910	456.319.749	0,06217386
Szenario 135	479.637.033	456.319.749	0,05109856
Szenario 135	481.318.270	456.319.749	0,0547829
Szenario 135	480.556.835	456.319.749	0,05311426
Szenario 136	485.011.364	457.848.792	0,05932651
Szenario 136	483.311.094	457.848.792	0,05561291
Szenario 136	487.062.735	457.848.792	0,06380697
Szenario 136	483.311.094	457.848.792	0,05561291
Szenario 136	486.746.941	457.848.792	0,06311723
Szenario 137	485.980.115	458.329.536	0,06032904
Szenario 137	483.326.043	458.329.536	0,05453829
Szenario 137	486.427.382	458.329.536	0,0613049
Szenario 137	486.209.615	458.329.536	0,06082977
Szenario 137	485.574.914	458.329.536	0,05944495
Szenario 138	480.082.245	456.117.413	0,05254093
Szenario 138	482.559.850	456.117.413	0,05797287
Szenario 138	481.594.975	456.117.413	0,05585746
Szenario 138	480.108.512	456.117.413	0,05259852

Szenario 138	483.483.052	456.117.413	0,05999692
Szenario 139	482.314.679	454.988.511	0,06005903
Szenario 139	482.430.326	454.988.511	0,0603132
Szenario 139	479.961.521	454.988.511	0,05488712
Szenario 139	483.554.248	454.988.511	0,06278342
Szenario 139	482.661.060	454.988.511	0,06082032
Szenario 140	484.619.690	456.786.807	0,06093189
Szenario 140	482.393.759	456.786.807	0,05605887
Szenario 140	481.511.164	456.786.807	0,05412669
Szenario 140	484.495.510	456.786.807	0,06066003
Szenario 140	481.282.937	456.786.807	0,05362705
Szenario 141	478.691.713	450.684.206	0,06214442
Szenario 141	478.878.660	450.684.206	0,06255922
Szenario 141	477.623.711	450.684.206	0,05977468
Szenario 141	476.382.975	450.684.206	0,05702168
Szenario 141	479.395.081	450.684.206	0,06370508
Szenario 142	480.672.943	454.230.089	0,05821467
Szenario 142	479.711.841	454.230.089	0,05609878
Szenario 142	478.224.688	454.230.089	0,05282477
Szenario 142	481.325.411	454.230.089	0,05965109
Szenario 142	481.303.991	454.230.089	0,05960394
Szenario 143	480.974.344	452.830.030	0,06215205
Szenario 143	479.798.341	452.830.030	0,05955504
Szenario 143	479.813.275	452.830.030	0,05958802
Szenario 143	477.531.937	452.830.030	0,05455006
Szenario 143	478.642.106	452.830.030	0,05700169
Szenario 144	486.468.764	460.682.728	0,05597352
Szenario 144	489.238.903	460.682.728	0,06198664
Szenario 144	484.496.760	460.682.728	0,05169291
Szenario 144	486.905.778	460.682.728	0,05692215
Szenario 144	484.443.893	460.682.728	0,05157815
Szenario 145	481.776.163	457.119.857	0,05393838
Szenario 145	483.149.566	457.119.857	0,05694285
Szenario 145	484.380.995	457.119.857	0,05963674
Szenario 145	484.252.168	457.119.857	0,05935492
Szenario 145	481.408.189	457.119.857	0,0531334
Szenario 146	486.068.468	458.209.212	0,0608003
Szenario 146	485.928.401	458.209.212	0,06049461
Szenario 146	485.922.601	458.209.212	0,06048196

Szenario 146	486.054.455	458.209.212	0,06076971
Szenario 146	486.231.135	458.209.212	0,0611553
Szenario 147	483.259.622	456.384.184	0,05888775
Szenario 147	483.921.950	456.384.184	0,060339
Szenario 147	479.988.235	456.384.184	0,0517197
Szenario 147	481.351.985	456.384.184	0,05470786
Szenario 147	483.821.590	456.384.184	0,0601191
Szenario 148	477.979.849	450.680.740	0,06057305
Szenario 148	484.285.792	450.680.740	0,07456509
Szenario 148	477.959.949	450.680.740	0,0605289
Szenario 148	479.285.671	450.680.740	0,0634705
Szenario 148	475.512.744	450.680.740	0,05509888
Szenario 149	481.303.213	452.755.922	0,06305228
Szenario 149	479.775.070	452.755.922	0,05967707
Szenario 149	477.723.986	452.755.922	0,05514685
Szenario 149	477.872.806	452.755.922	0,05547555
Szenario 149	480.340.738	452.755.922	0,06092646
Szenario 150	481.431.383	454.246.961	0,05984503
Szenario 150	480.680.715	454.246.961	0,05819247
Szenario 150	481.665.317	454.246.961	0,06036002
Szenario 150	480.786.415	454.246.961	0,05842517
Szenario 150	481.623.967	454.246.961	0,06026899
Szenario 151	482.583.100	452.239.835	0,06709552
Szenario 151	479.548.727	452.239.835	0,06038586
Szenario 151	480.972.730	452.239.835	0,06353464
Szenario 151	477.064.922	452.239.835	0,05489363
Szenario 151	480.739.263	452.239.835	0,06301839
Szenario 152	480.059.693	452.120.580	0,06179571
Szenario 152	475.464.350	452.120.580	0,05163174
Szenario 152	479.991.826	452.120.580	0,0616456
Szenario 152	479.900.326	452.120.580	0,06144322
Szenario 152	479.889.026	452.120.580	0,06141823
Szenario 153	480.068.908	453.704.845	0,0581084
Szenario 153	483.557.582	453.704.845	0,0657977
Szenario 153	477.987.304	453.704.845	0,05352039
Szenario 153	482.113.779	453.704.845	0,06261545
Szenario 153	480.285.042	453.704.845	0,05858478
Szenario 154	484.475.985	455.650.255	0,06326284
Szenario 154	483.971.385	455.650.255	0,06215541

Szenario 154	484.440.586	455.650.255	0,06318515
Szenario 154	481.579.040	455.650.255	0,05690502
Szenario 154	480.622.845	455.650.255	0,05480649
Szenario 155	485.009.351	457.135.844	0,06097423
Szenario 155	484.645.450	457.135.844	0,06017819
Szenario 155	482.348.545	457.135.844	0,05515363
Szenario 155	482.505.179	457.135.844	0,05549627
Szenario 155	484.487.083	457.135.844	0,05983175
Szenario 156	483.783.096	454.342.199	0,06479895
Szenario 156	482.746.380	454.342.199	0,06251715
Szenario 156	482.574.913	454.342.199	0,06213976
Szenario 156	483.969.623	454.342.199	0,06520949
Szenario 156	479.929.488	454.342.199	0,05631722
Szenario 157	480.751.349	453.848.691	0,05927671
Szenario 157	474.384.236	453.848.691	0,04524756
Szenario 157	481.439.824	453.848.691	0,06079368
Szenario 157	481.763.618	453.848.691	0,06150712
Szenario 157	483.144.487	453.848.691	0,0645497
Szenario 158	482.506.014	455.020.028	0,0604061
Szenario 158	479.220.514	455.020.028	0,05318554
Szenario 158	482.638.801	455.020.028	0,06069793
Szenario 158	480.499.350	455.020.028	0,05599605
Szenario 158	482.471.654	455.020.028	0,06033059
Szenario 159	482.055.612	456.950.531	0,05494048
Szenario 159	481.406.344	456.950.531	0,05351961
Szenario 159	484.669.617	456.950.531	0,06066102
Szenario 159	481.257.357	456.950.531	0,05319356
Szenario 159	481.955.812	456.950.531	0,05472207
Szenario 160	480.633.618	456.552.919	0,0527446
Szenario 160	482.897.356	456.552.919	0,05770292
Szenario 160	483.573.624	456.552.919	0,05918417
Szenario 160	483.426.637	456.552.919	0,05886222
Szenario 160	484.724.293	456.552.919	0,06170451
Szenario 161	486.679.843	458.685.646	0,06103133
Szenario 161	487.097.237	458.685.646	0,06194131
Szenario 161	484.976.906	458.685.646	0,05731869
Szenario 161	486.294.302	458.685.646	0,0601908
Szenario 161	487.393.104	458.685.646	0,06258634
Szenario 162	483.417.059	458.865.816	0,05350419

Szenario 162	481.257.195	458.865.816	0,04879723
Szenario 162	483.101.232	458.865.816	0,05281591
Szenario 162	482.239.597	458.865.816	0,05093816
Szenario 162	486.113.118	458.865.816	0,05937967
Szenario 163	483.461.134	455.664.594	0,06100219
Szenario 163	482.599.499	455.664.594	0,05911125
Szenario 163	483.481.634	455.664.594	0,06104718
Szenario 163	483.447.334	455.664.594	0,06097191
Szenario 163	482.958.533	455.664.594	0,05989919
Szenario 164	486.054.273	457.232.582	0,06303508
Szenario 164	486.964.115	457.232.582	0,06502497
Szenario 164	486.438.337	457.232.582	0,06387505
Szenario 164	486.196.173	457.232.582	0,06334542
Szenario 164	485.795.619	457.232.582	0,06246938
Szenario 165	480.994.726	459.192.345	0,04747984
Szenario 165	483.949.832	459.192.345	0,05391529
Szenario 165	486.688.071	459.192.345	0,05987845
Szenario 165	484.556.880	459.192.345	0,05523728
Szenario 165	484.410.853	459.192.345	0,05491927
Szenario 166	473.915.456	451.206.690	0,05032897
Szenario 166	478.619.432	451.206.690	0,06075429
Szenario 166	478.029.171	451.206.690	0,05944611
Szenario 166	476.868.102	451.206.690	0,05687285
Szenario 166	475.992.707	451.206.690	0,05493273
Szenario 167	484.824.719	457.427.060	0,05989514
Szenario 167	484.151.651	457.427.060	0,05842372
Szenario 167	483.929.117	457.427.060	0,05793723
Szenario 167	482.182.147	457.427.060	0,05411811
Szenario 167	486.493.036	457.427.060	0,06354232
Szenario 168	472.932.856	447.673.521	0,05642356
Szenario 168	474.408.859	447.673.521	0,05972062
Szenario 168	473.257.890	447.673.521	0,05714961
Szenario 168	478.016.033	447.673.521	0,06777821
Szenario 168	475.075.527	447.673.521	0,0612098
Szenario 169	485.950.903	458.551.564	0,05975193
Szenario 169	482.928.397	458.551.564	0,05316051
Szenario 169	485.598.369	458.551.564	0,05898313
Szenario 169	490.324.192	458.551.564	0,06928911
Szenario 169	484.146.739	458.551.564	0,05581744

Szenario 170	487.484.124	456.635.181	0,06755709
Szenario 170	480.960.264	456.635.181	0,05327028
Szenario 170	482.569.334	456.635.181	0,05679403
Szenario 170	482.258.533	456.635.181	0,0561134
Szenario 170	484.386.671	456.635.181	0,06077388
Szenario 171	478.839.559	454.527.073	0,05348963
Szenario 171	479.826.761	454.527.073	0,05566156
Szenario 171	480.113.495	454.527.073	0,0562924
Szenario 171	477.560.090	454.527.073	0,05067469
Szenario 171	478.344.998	454.527.073	0,05240155
Szenario 172	480.712.506	453.989.772	0,05886197
Szenario 172	480.271.529	453.989.772	0,05789064
Szenario 172	482.045.862	453.989.772	0,06179895
Szenario 172	480.259.312	453.989.772	0,05786373
Szenario 172	481.908.682	453.989.772	0,06149678
Szenario 173	481.295.623	456.348.302	0,05466728
Szenario 173	483.342.640	456.348.302	0,05915293
Szenario 173	483.746.508	456.348.302	0,06003793
Szenario 173	484.057.442	456.348.302	0,06071928
Szenario 173	482.895.573	456.348.302	0,05817327
Szenario 174	485.375.607	461.544.075	0,05163436
Szenario 174	488.424.133	461.544.075	0,05823942
Szenario 174	485.695.941	461.544.075	0,05232841
Szenario 174	488.647.947	461.544.075	0,05872434
Szenario 174	486.519.876	461.544.075	0,05411358
Szenario 175	479.675.136	452.785.445	0,05938727
Szenario 175	480.372.471	452.785.445	0,06092737
Szenario 175	480.437.971	452.785.445	0,06107203
Szenario 175	477.107.931	452.785.445	0,05371746
Szenario 175	480.475.671	452.785.445	0,06115529
Szenario 176	484.322.175	455.814.155	0,06254308
Szenario 176	484.106.822	455.814.155	0,06207062
Szenario 176	481.463.683	455.814.155	0,0562719
Szenario 176	484.461.896	455.814.155	0,06284961
Szenario 176	480.805.882	455.814.155	0,05482876
Szenario 177	479.658.819	453.946.650	0,05664139
Szenario 177	481.451.456	453.946.650	0,06059039
Szenario 177	479.191.458	453.946.650	0,05561184
Szenario 177	480.856.788	453.946.650	0,0592804

Szenario 177	478.996.951	453.946.650	0,05518336
Szenario 178	477.412.962	450.805.102	0,05902298
Szenario 178	478.534.298	450.805.102	0,06151039
Szenario 178	473.427.434	450.805.102	0,05018207
Szenario 178	478.155.731	450.805.102	0,06067063
Szenario 178	474.510.290	450.805.102	0,05258412
Szenario 179	484.788.428	457.936.307	0,05863724
Szenario 179	488.391.102	457.936.307	0,06650443
Szenario 179	485.120.162	457.936.307	0,05936165
Szenario 179	483.483.892	457.936.307	0,05578851
Szenario 179	485.639.883	457.936.307	0,06049657
Szenario 180	478.769.697	453.671.106	0,05532332
Szenario 180	481.208.235	453.671.106	0,06069844
Szenario 180	476.940.920	453.671.106	0,05129225
Szenario 180	481.604.876	453.671.106	0,06157273
Szenario 180	478.898.254	453.671.106	0,05560669
Szenario 181	482.774.653	455.086.820	0,06084077
Szenario 181	482.921.293	455.086.820	0,061163
Szenario 181	475.962.579	455.086.820	0,04587204
Szenario 181	482.854.493	455.086.820	0,06101621
Szenario 181	482.791.193	455.086.820	0,06087712
Szenario 182	483.532.729	456.753.978	0,05862839
Szenario 182	484.138.820	456.753.978	0,05995534
Szenario 182	483.514.912	456.753.978	0,05858938
Szenario 182	481.216.614	456.753.978	0,05355758
Szenario 182	481.764.299	456.753.978	0,05475666
Szenario 183	477.533.882	453.381.046	0,05327271
Szenario 183	480.520.671	453.381.046	0,05986052
Szenario 183	476.016.812	453.381.046	0,04992658
Szenario 183	480.919.242	453.381.046	0,06073963
Szenario 183	480.276.754	453.381.046	0,05932252
Szenario 184	487.937.509	460.783.337	0,05893046
Szenario 184	485.021.503	460.783.337	0,05260209
Szenario 184	489.002.598	460.783.337	0,06124193
Szenario 184	487.953.509	460.783.337	0,05896518
Szenario 184	483.561.180	460.783.337	0,04943287
Szenario 185	486.024.904	458.431.558	0,06019076
Szenario 185	486.311.791	458.431.558	0,06081657
Szenario 185	486.144.251	458.431.558	0,0604511

Szenario 185	482.544.017	458.431.558	0,05259773
Szenario 185	483.498.679	458.431.558	0,05468018
Szenario 186	488.314.273	460.601.840	0,0601657
Szenario 186	488.312.613	460.601.840	0,0601621
Szenario 186	488.289.413	460.601.840	0,06011173
Szenario 186	488.547.147	460.601.840	0,06067129
Szenario 186	482.933.695	460.601.840	0,04848408
Szenario 187	479.312.436	451.331.629	0,06199611
Szenario 187	478.642.698	451.331.629	0,0605122
Szenario 187	474.832.457	451.331.629	0,05206998
Szenario 187	476.577.267	451.331.629	0,05593589
Szenario 187	478.727.115	451.331.629	0,06069924
Szenario 188	481.466.544	453.208.321	0,06235151
Szenario 188	481.176.524	453.208.321	0,06171158
Szenario 188	477.760.997	453.208.321	0,05417525
Szenario 188	481.616.338	453.208.321	0,06268203
Szenario 188	477.731.197	453.208.321	0,0541095
Szenario 189	480.167.348	452.715.112	0,0606391
Szenario 189	476.559.787	452.715.112	0,05267038
Szenario 189	480.833.429	452.715.112	0,0621104
Szenario 189	481.961.198	452.715.112	0,06460152
Szenario 189	480.196.681	452.715.112	0,06070389
Szenario 190	479.050.733	453.617.978	0,05606646
Szenario 190	478.550.952	453.617.978	0,0549647
Szenario 190	478.714.712	453.617.978	0,0553257
Szenario 190	481.205.724	453.617.978	0,06081714
Szenario 190	480.933.890	453.617.978	0,06021788
Szenario 191	483.920.099	455.490.451	0,06241546
Szenario 191	482.906.230	455.490.451	0,06018958
Szenario 191	483.355.258	455.490.451	0,06117539
Szenario 191	482.377.876	455.490.451	0,05902961
Szenario 191	484.609.296	455.490.451	0,06392855
Szenario 192	482.066.469	456.881.221	0,05512428
Szenario 192	484.161.940	456.881.221	0,05971075
Szenario 192	484.159.280	456.881.221	0,05970492
Szenario 192	486.981.079	456.881.221	0,06588115
Szenario 192	482.150.669	456.881.221	0,05530857
Szenario 193	480.230.229	453.570.558	0,05877734
Szenario 193	475.626.946	453.570.558	0,04862835

Szenario 193	480.040.762	453.570.558	0,05835962
Szenario 193	477.113.656	453.570.558	0,05190614
Szenario 193	480.990.364	453.570.558	0,06045323
Szenario 194	483.761.356	457.276.752	0,05791811
Szenario 194	485.382.706	457.276.752	0,06146377
Szenario 194	484.670.024	457.276.752	0,05990524
Szenario 194	483.364.555	457.276.752	0,05705036
Szenario 194	481.572.618	457.276.752	0,05313164
Szenario 195	479.501.979	454.550.005	0,05489379
Szenario 195	478.850.971	454.550.005	0,05346159
Szenario 195	482.577.845	454.550.005	0,06166063
Szenario 195	482.296.678	454.550.005	0,06104207
Szenario 195	482.314.278	454.550.005	0,06108079
Szenario 196	487.369.474	459.808.218	0,05994076
Szenario 196	484.441.668	459.808.218	0,05357331
Szenario 196	485.281.603	459.808.218	0,05540002
Szenario 196	482.140.330	459.808.218	0,04856832
Szenario 196	484.410.568	459.808.218	0,05350568
Szenario 197	486.822.386	458.803.509	0,06106945
Szenario 197	486.634.119	458.803.509	0,0606591
Szenario 197	483.713.313	458.803.509	0,05429297
Szenario 197	486.822.286	458.803.509	0,06106923
Szenario 197	488.347.156	458.803.509	0,06439281
Szenario 198	485.906.665	460.779.097	0,05453279
Szenario 198	488.886.071	460.779.097	0,0609988
Szenario 198	489.034.471	460.779.097	0,06132087
Szenario 198	485.461.464	460.779.097	0,05356659
Szenario 198	490.463.854	460.779.097	0,06442297
Szenario 199	484.588.806	456.600.099	0,06129807
Szenario 199	481.498.200	456.600.099	0,05452934
Szenario 199	484.447.606	456.600.099	0,06098883
Szenario 199	483.807.338	456.600.099	0,05958658
Szenario 199	483.465.037	456.600.099	0,05883691
Szenario 200	481.692.774	454.042.301	0,06089845
Szenario 200	481.969.208	454.042.301	0,06150728
Szenario 200	478.848.775	454.042.301	0,05463472
Szenario 200	480.672.672	454.042.301	0,05865174
Szenario 200	483.234.604	454.042.301	0,06429424

A.9 Optimierte Schedules und deren Eigenschaften inkl. der gewichteten Summe der Robustheitsmaße des Referenzprojekts des Rückbaus einer Gesamtanlage

Rang (sortiert nach gewichteter Summe der Robustheitsmaße)	Plannummer	Gewichtete Summe der Robustheitsmaße	Szenario	Kosten [€]	LB [€]	Relative optimality gap
1	460	0,864084254	191	484609296	455490451	0,0639286
2	459	0,861648645	191	483920099	455490451	0,0624155
3	9	0,853100803	200	481969208	454042301	0,0615073
4	214	0,852166386	147	483821590	456384184	0,0601191
5	458	0,84895152	191	483355258	455490451	0,0611754
6	215	0,824671536	147	483921950	456384184	0,060339
7	456	0,821373836	191	482377876	455490451	0,0590296
8	165	0,818349997	138	483483052	456117413	0,0599969
9	162	0,814049835	138	480108512	456117413	0,0525985
10	6	0,812784371	200	478848775	454042301	0,0546347
11	212	0,812417308	147	481351985	456384184	0,0547079
12	293	0,811668755	161	486679843	458685646	0,0610313
13	8	0,811174093	200	481692774	454042301	0,0608985
14	164	0,810463162	138	482559850	456117413	0,0579729
15	457	0,80491877	191	482906230	455490451	0,0601896
16	213	0,801620725	147	483259622	456384184	0,0588878
17	276	0,795501983	104	483386807	458407346	0,0544918
18	294	0,793827288	161	487097237	458685646	0,0619413
19	464	0,793228369	192	484161940	456881221	0,0597107
20	470	0,792187956	193	480990364	453570558	0,0604532
21	303	0,791671252	163	483447334	455664594	0,0609719
22	49	0,790292507	116	482738115	456208098	0,0581533
23	314	0,78898077	165	484556880	459192345	0,0552373
24	83	0,788453827	123	483517394	456290382	0,0596704
25	320	0,788417266	166	478619432	451206690	0,0607543

26	7	0,788157766	200	480672672	454042301	0,0586517
27	478	0,785700576	195	482296678	454550005	0,0610421
28	313	0,784691335	165	484410853	459192345	0,0549193
29	10	0,784118212	200	483234604	454042301	0,0642942
30	474	0,783372358	194	484670024	457276752	0,0599052
31	301	0,781740846	163	482599499	455664594	0,0591113
32	60	0,778821437	118	480930035	453617646	0,0602102
33	163	0,778800908	138	481594975	456117413	0,0558575
34	20	0,778516591	110	484614973	455531724	0,0638446
35	47	0,776777688	116	482534948	456208098	0,057708
36	285	0,776565131	159	484669617	456950531	0,060661
37	40	0,776141071	114	481046961	453596155	0,0605182
38	461	0,775859373	192	482066469	456881221	0,0551243
39	279	0,774034419	104	485533898	458407346	0,0591756
40	292	0,773154672	161	486294302	458685646	0,0601908
41	312	0,771126331	165	483949832	459192345	0,0539153
42	180	0,768972487	140	484619690	456786807	0,0609319
43	305	0,768236033	163	483481634	455664594	0,0610472
44	46	0,767809448	116	480887845	456208098	0,0540976
45	98	0,767772322	126	480952337	453748595	0,0599533
46	19	0,767527979	110	483378904	455531724	0,0611312
47	477	0,767211668	195	479501979	454550005	0,0548938
48	85	0,766592523	123	483973155	456290382	0,0606692
49	462	0,765589849	192	482150669	456881221	0,0553086
50	200	0,765161378	144	489238903	460682728	0,0619866
51	48	0,764913108	116	482687082	456208098	0,0580415
52	427	0,764901285	186	488289413	460601840	0,0601117
53	463	0,764314978	192	484159280	456881221	0,0597049
54	430	0,76419158	186	488547147	460601840	0,0606713
55	4	0,764153734	199	484447606	456600099	0,0609888
56	475	0,764106132	194	485382706	457276752	0,0614638
57	304	0,763819382	163	483461134	455664594	0,0610022
58	268	0,76331874	157	481439824	453848691	0,0607937
59	18	0,762908971	110	480781832	455531724	0,05543
60	318	0,762789024	166	476868102	451206690	0,0568729
61	224	0,761360012	103	478566415	449834873	0,0638713
62	233	0,759918561	150	481431383	454246961	0,059845
63	465	0,759550329	192	486981079	456881221	0,0658811
64	151	0,759361583	136	483311094	457848792	0,0556129

65	150	0,758861644	135	484690910	456319749	0,0621739
66	196	0,758204939	144	484443893	460682728	0,0515782
67	179	0,757193048	140	484495510	456786807	0,06066
68	302	0,756991158	163	482958533	455664594	0,0598992
69	428	0,756709188	186	488312613	460601840	0,0601621
70	449	0,756410777	189	480833429	452715112	0,0621104
71	350	0,75454329	171	480113495	454527073	0,0562924
72	289	0,75393639	160	483573624	456552919	0,0591842
73	319	0,753930368	166	478029171	451206690	0,0594461
74	5	0,753868574	199	484588806	456600099	0,0612981
75	72	0,753759933	121	481540043	455327940	0,0575675
76	109	0,753742817	128	481277241	453878052	0,0603669
77	50	0,753215543	116	485407501	456208098	0,0640046
78	84	0,753175759	123	483813168	456290382	0,0603186
79	472	0,752820785	194	483364555	457276752	0,0570504
80	124	0,752561416	130	485019890	458074702	0,0588227
81	100	0,752466248	126	480992937	453748595	0,0600428
82	177	0,752168869	140	481511164	456786807	0,0541267
83	155	0,751206686	136	487062735	457848792	0,063807
84	277	0,749902793	104	483531194	458407346	0,0548068
85	149	0,749622641	135	481318270	456319749	0,0547829
86	274	0,749245595	158	482506014	455020028	0,0604061
87	108	0,747927909	128	480893157	453878052	0,0595206
88	234	0,747924969	150	481623967	454246961	0,060269
89	97	0,747847079	126	480920870	453748595	0,059884
90	299	0,746701541	162	483417059	458865816	0,0535042
91	479	0,74635664	195	482314278	454550005	0,0610808
92	384	0,745922622	178	478155731	450805102	0,0606706
93	473	0,745733644	194	483761356	457276752	0,0579181
94	256	0,745350329	155	482348545	457135844	0,0551536
95	282	0,744956958	159	481406344	456950531	0,0535196
96	377	0,744953722	177	479191458	453946650	0,0556118
97	1	0,744678469	199	481498200	456600099	0,0545293
98	231	0,744401105	150	480680715	454246961	0,0581925
99	342	0,744353529	170	482258533	456635181	0,0561134
100	3	0,744014514	199	483807338	456600099	0,0595866
101	444	0,743868995	107	483074471	455608785	0,0602835
102	300	0,743435396	162	486113118	458865816	0,0593797
103	130	0,743341925	131	484757476	456035241	0,0629825

104	290	0,743046729	160	484724293	456552919	0,0617045
105	258	0,742867834	155	484487083	457135844	0,0598318
106	81	0,742434425	123	480526548	456290382	0,0531157
107	480	0,742164289	195	482577845	454550005	0,0616606
108	129	0,741775995	131	483400100	456035241	0,060006
109	471	0,7411107001	194	481572618	457276752	0,0531316
110	448	0,740744286	189	480196681	452715112	0,0607039
111	217	0,740605711	148	477959949	450680740	0,0605289
112	315	0,740501348	165	486688071	459192345	0,0598785
113	295	0,73935945	161	487393104	458685646	0,0625863
114	59	0,739049143	118	480867308	453617646	0,0600719
115	99	0,738032188	126	480978737	453748595	0,0600115
116	259	0,737971737	155	484645450	457135844	0,0601782
117	370	0,737719228	175	480475671	452785445	0,0611553
118	267	0,737360131	157	480751349	453848691	0,0592767
119	270	0,737157885	157	483144487	453848691	0,0645497
120	352	0,737014185	172	480271529	453989772	0,0578906
121	499	0,736429703	108	480512631	452927062	0,0609051
122	337	0,734702838	169	484146739	458551564	0,0558174
123	218	0,734627188	148	477979849	450680740	0,0605731
124	344	0,734493596	170	484386671	456635181	0,0607739
125	415	0,733582723	183	480919242	453381046	0,0607396
126	211	0,733476375	147	479988235	456384184	0,0517197
127	76	0,733085681	122	483304588	459263299	0,0523475
128	42	0,731801772	115	479543315	452222376	0,0604148
129	421	0,731760636	185	482544017	458431558	0,0525977
130	39	0,731157587	114	480214426	453596155	0,0586828
131	77	0,730321381	122	485715506	459263299	0,057597
132	152	0,729909547	136	483311094	457848792	0,0556129
133	341	0,729294564	170	480960264	456635181	0,0532703
134	454	0,72909543	190	480933890	453617978	0,0602179
135	75	0,729023241	121	483816748	455327940	0,0625677
136	32	0,72845256	113	478551345	453368237	0,0555467
137	455	0,72818026	190	481205724	453617978	0,0608171
138	17	0,727936875	110	480781032	455531724	0,0554282
139	260	0,727832401	155	485009351	457135844	0,0609742
140	43	0,727612232	115	479709982	452222376	0,0607834
141	178	0,727299161	140	482393759	456786807	0,0560589
142	288	0,727237184	160	483426637	456552919	0,0588622

143	298	0,727079568	162	483101232	458865816	0,0528159
144	275	0,726432382	158	482638801	455020028	0,0606979
145	283	0,726387341	159	481955812	456950531	0,0547221
146	57	0,726190412	118	480769128	453617646	0,0598554
147	58	0,726168013	118	480769708	453617646	0,0598567
148	169	0,726021207	102	479829345	452168629	0,0611735
149	176	0,725649733	140	481282937	456786807	0,0536271
150	123	0,724979657	130	483409707	458074702	0,0553076
151	122	0,724512585	130	482428905	458074702	0,0531664
152	125	0,724425675	130	485363871	458074702	0,0595736
153	235	0,723886393	150	481665317	454246961	0,06036
154	476	0,723863713	195	478850971	454550005	0,0534616
155	291	0,72346421	161	484976906	458685646	0,0573187
156	376	0,723243972	177	478996951	453946650	0,0551834
157	199	0,722970274	144	486905778	460682728	0,0569221
158	264	0,721654331	156	483783096	454342199	0,0647989
159	368	0,721294446	175	480372471	452785445	0,0609274
160	35	0,721190539	113	480662299	453368237	0,0602029
161	311	0,720759326	165	480994726	459192345	0,0474798
162	272	0,720404895	158	480499350	455020028	0,055996
163	284	0,719743272	159	482055612	456950531	0,0549405
164	429	0,719401497	186	488314273	460601840	0,0601657
165	110	0,718881527	128	484555298	453878052	0,0675892
166	89	0,718816084	124	477231496	452490889	0,0546765
167	358	0,718081773	173	483342640	456348302	0,0591529
168	257	0,717282366	155	482505179	457135844	0,0554963
169	15	0,717172961	109	480157721	452467408	0,0611985
170	369	0,716390776	175	480437971	452785445	0,061072
171	74	0,716208642	121	482019411	455327940	0,0586203
172	380	0,716053281	177	481451456	453946650	0,0605904
173	14	0,715464892	109	480143921	452467408	0,061168
174	399	0,714474812	180	481208235	453671106	0,0606984
175	408	0,714425368	182	483514912	456753978	0,0585894
176	491	0,713439968	198	485461464	460779097	0,0535666
177	198	0,713297037	144	486468764	460682728	0,0559735
178	422	0,712295025	185	483498679	458431558	0,0546802
179	146	0,71229121	135	479637033	456319749	0,0510986
180	45	0,712171929	115	480050516	452222376	0,0615364
181	278	0,712086766	104	485520778	458407346	0,059147

182	398	0,712042783	180	478898254	453671106	0,0556067
183	383	0,711284858	178	477412962	450805102	0,059023
184	44	0,7112044	115	479960115	452222376	0,0613365
185	362	0,711162475	174	485695941	461544075	0,0523284
186	280	0,711099921	104	486482400	458407346	0,0612448
187	13	0,710908259	109	479994454	452467408	0,0608376
188	41	0,710846801	115	476971110	452222376	0,0547269
189	261	0,710179123	156	479929488	454342199	0,0563172
190	238	0,710153164	151	480739263	452239835	0,0630184
191	82	0,709973113	123	480588848	456290382	0,0532522
192	222	0,709800528	103	477105775	449834873	0,0606243
193	79	0,709482385	122	487343796	459263299	0,0611425
194	80	0,709301406	122	488354245	459263299	0,0633426
195	216	0,708675189	148	475512744	450680740	0,0550989
196	273	0,708401084	158	482471654	455020028	0,0603306
197	73	0,707579394	121	481835144	455327940	0,0582156
198	107	0,707572842	128	479429337	453878052	0,0562955
199	385	0,707555748	178	478534298	450805102	0,0615104
200	452	0,707279403	190	478714712	453617978	0,0553257
201	353	0,706707072	172	480712506	453989772	0,058862
202	409	0,706076569	182	483532729	456753978	0,0586284
203	360	0,705270201	173	484057442	456348302	0,0607193
204	493	0,705184777	198	488886071	460779097	0,0609988
205	148	0,705179069	135	480983336	456319749	0,0540489
206	335	0,705054046	105	479099943	451564284	0,0609784
207	232	0,704166597	150	480786415	454246961	0,0584252
208	400	0,703876428	180	481604876	453671106	0,0615727
209	397	0,703164711	180	478769697	453671106	0,0553233
210	336	0,703067485	169	482928397	458551564	0,0531605
211	68	0,703044023	120	479285225	451921366	0,06055
212	333	0,702859086	105	478705356	451564284	0,0601046
213	469	0,702575725	193	480230229	453570558	0,0587773
214	467	0,702557636	193	477113656	453570558	0,0519061
215	90	0,70202902	124	480024035	452490889	0,060848
216	269	0,70185412	157	481763618	453848691	0,0615071
217	323	0,700949853	167	484151651	457427060	0,0584237
218	490	0,700750736	197	488347156	458803509	0,0643928
219	434	0,699764138	187	478727115	451331629	0,0606992
220	197	0,699348007	144	484496760	460682728	0,0516929

221	190	0,698898381	142	481325411	454230089	0,0596511
222	407	0,6982001	182	481764299	456753978	0,0547567
223	496	0,698141189	108	477387445	452927062	0,0540051
224	379	0,697812325	177	480856788	453946650	0,0592804
225	187	0,697785396	142	479711841	454230089	0,0560988
226	128	0,697226738	131	482276331	456035241	0,0575418
227	220	0,6972169	148	484285792	450680740	0,0745651
228	161	0,696886865	138	480082245	456117413	0,0525409
229	417	0,696237959	184	485021503	460783337	0,0526021
230	419	0,695776463	184	487953509	460783337	0,0589652
231	297	0,695733351	162	482239597	458865816	0,0509382
232	450	0,695177464	189	481961198	452715112	0,0646015
233	487	0,69502897	197	486634119	455803509	0,0606591
234	403	0,694292891	181	482791193	455086820	0,0608771
235	324	0,693996359	167	484824719	457427060	0,0598951
236	494	0,693774537	198	489034471	460779097	0,0613209
237	170	0,693339247	102	479941939	452168629	0,0614225
238	263	0,693273716	156	482746380	454342199	0,0625172
239	354	0,693028447	172	481908682	453989772	0,0614968
240	489	0,692397382	197	486822386	458803509	0,0610694
241	262	0,692306644	156	482574913	454342199	0,0621398
242	69	0,691982678	120	479425492	451921366	0,0608604
243	486	0,691737146	197	483713313	458803509	0,054293
244	413	0,691667219	183	480276754	453381046	0,0593225
245	183	0,691515804	141	478691713	450684206	0,0621444
246	445	0,691203921	107	483208431	455608785	0,0605775
247	239	0,690738767	151	480972730	452239835	0,0635346
248	188	0,690690531	142	480672943	454230089	0,0582147
249	356	0,690173356	173	481295623	456348302	0,0546673
250	271	0,690166854	158	479220514	455020028	0,0531855
251	147	0,68953227	135	480556835	456319749	0,0531143
252	31	0,689422229	113	478345894	453368237	0,0550935
253	286	0,6889574	160	480633618	456552919	0,0527446
254	347	0,688164566	171	478344998	454527073	0,0524016
255	168	0,687969861	102	479609645	452168629	0,0606876
256	339	0,687885574	169	485950903	458551564	0,0597519
257	38	0,687787426	114	478438689	453596155	0,054768
258	435	0,68768973	187	479312436	451331629	0,0619961
259	365	0,686795031	174	488647947	461544075	0,0587243

260	367	0,686633401	175	479675136	452785445	0,0593873
261	225	0,686302656	103	478661278	449834873	0,0640822
262	406	0,685817253	182	481216614	456753978	0,0535576
263	348	0,684858768	171	478839559	454527073	0,0534896
264	281	0,684481533	159	481257357	456950531	0,0531936
265	404	0,683958585	181	482854493	455086820	0,0610162
266	359	0,683705129	173	483746508	456348302	0,0600379
267	443	0,683589711	107	480767573	455608785	0,0552202
268	135	0,6832595	132	479562392	453076248	0,0584585
269	423	0,683198232	185	486024904	458431558	0,0601908
270	498	0,682378276	108	479112215	452927062	0,0578132
271	166	0,68199064	102	476983873	452168629	0,0548805
272	192	0,681171192	143	478642106	452830030	0,0570017
273	96	0,680712385	126	480492436	453748595	0,0589398
274	349	0,680448323	171	479826761	454527073	0,0556616
275	332	0,680376467	105	477956474	451564284	0,0584461
276	185	0,680110655	141	479395081	450684206	0,0637051
277	355	0,679613446	172	482045862	453989772	0,0617989
278	87	0,678379377	124	476765415	452490889	0,0536464
279	221	0,678371292	103	474140409	449834873	0,0540321
280	334	0,678175862	105	478753676	451564284	0,0602116
281	468	0,677866027	193	480040762	453570558	0,0583596
282	357	0,677590124	173	482895573	456348302	0,0581733
283	321	0,677565457	167	482182147	457427060	0,0541181
284	194	0,676861257	143	479813275	452830030	0,059588
285	189	0,676662677	142	481303991	454230089	0,0596039
286	442	0,676655501	107	479626504	455608785	0,0527157
287	495	0,676278842	198	490463854	460779097	0,064423
288	418	0,675968259	184	487937509	460783337	0,0589305
289	424	0,675003128	185	486144251	458431558	0,0604511
290	497	0,674961571	108	478051233	452927062	0,0554707
291	127	0,672992454	131	480453694	456035241	0,0535451
292	351	0,672852352	172	480259312	453989772	0,0578637
293	70	0,672596623	120	480644428	451921366	0,0635577
294	402	0,672534266	181	482774653	455086820	0,0608408
295	193	0,672272982	143	479798341	452830030	0,059555
296	346	0,672238047	171	477560090	454527073	0,0506747
297	106	0,671162307	128	479294537	453878052	0,0559985
298	426	0,671076742	186	482933695	460601840	0,0484841

299	153	0,670744081	136	485011364	457848792	0,0593265
300	265	0,670615797	156	483969623	454342199	0,0652095
301	62	0,670009797	119	481615927	454038071	0,0607391
302	154	0,669855401	136	486746941	457848792	0,0631172
303	34	0,669545278	113	479727417	453368237	0,0581408
304	338	0,669324631	169	485598369	458551564	0,0589831
305	237	0,668525287	151	479548727	452239835	0,0603859
306	33	0,668140557	113	479207896	453368237	0,0569949
307	345	0,667761137	170	487484124	456635181	0,0675571
308	117	0,667204952	129	478303954	452790812	0,0563464
309	441	0,666997446	107	479287770	455608785	0,0519722
310	167	0,666696116	102	479198777	452168629	0,0597789
311	363	0,666621271	174	486519876	461544075	0,0541136
312	119	0,666603045	129	479621510	452790812	0,0592563
313	405	0,665348783	181	482921293	455086820	0,061163
314	484	0,664275027	196	485281603	459808218	0,0554
315	195	0,663951625	143	480974344	452830030	0,062152
316	184	0,663587352	141	478878660	450684206	0,0625592
317	65	0,6627251	119	481870294	454038071	0,0612993
318	12	0,66167151	109	479884454	452467408	0,0605945
319	322	0,661511547	167	483929117	457427060	0,0579372
320	447	0,661099499	189	480167348	452715112	0,0606391
321	240	0,660708476	151	482583100	452239835	0,0670955
322	451	0,660407685	190	478550952	453617978	0,0549647
323	145	0,660061025	134	477195987	448704223	0,0634979
324	453	0,659743749	190	479050733	453617978	0,0560665
325	182	0,659284043	141	477623711	450684206	0,0597747
326	78	0,659170169	122	486491261	459263299	0,0592862
327	223	0,658917845	103	477392915	449834873	0,0612626
328	425	0,657641768	185	486311791	458431558	0,0608166
329	133	0,657361529	132	478127189	453076248	0,0552908
330	416	0,65664032	184	483561180	460783337	0,0494329
331	11	0,656281797	109	478013250	452467408	0,056459
332	37	0,655911258	114	477787221	453596155	0,0533317
333	134	0,655582777	132	478764557	453076248	0,0566975
334	126	0,655060682	131	479286825	456035241	0,0509864
335	378	0,654889021	177	479658819	453946650	0,0566414
336	66	0,654703159	120	477650555	451921366	0,0569329
337	104	0,654569784	127	482525483	455129391	0,0601941

338	361	0,65411059	174	485375607	461544075	0,0516344
339	488	0,653995232	197	486822286	458803509	0,0610692
340	2	0,65372047	199	483465037	456600099	0,0588369
341	340	0,653075971	169	490324192	458551564	0,0692891
342	414	0,651838668	183	480520671	453381046	0,0598605
343	118	0,651579192	129	479534583	452790812	0,0590643
344	331	0,649087355	105	476504504	451564284	0,0552307
345	86	0,647692018	124	476250694	452490889	0,0525089
346	387	0,647634093	106	479545099	452580694	0,0595792
347	71	0,647619497	121	478581004	455327940	0,0510688
348	325	0,647511943	167	486493036	457427060	0,0635423
349	219	0,647099485	148	479285671	450680740	0,0634705
350	36	0,646784248	114	476549965	453596155	0,0506041
351	317	0,645899058	166	475992707	451206690	0,0549327
352	191	0,645169397	143	477531937	452830030	0,0545501
353	131	0,644646337	132	477432721	453076248	0,053758
354	366	0,644375238	175	477107931	452785445	0,0537175
355	63	0,643811214	119	481752327	454038071	0,0610395
356	16	0,643608636	110	478195560	455531724	0,0497525
357	410	0,642561576	182	484138820	456753978	0,0599553
358	144	0,639729533	134	476274732	448704223	0,0614447
359	389	0,638912605	106	479789499	452580694	0,0601192
360	56	0,638561444	118	480091550	453617646	0,0583617
361	433	0,637969129	187	478642698	451331629	0,0605122
362	412	0,637531356	183	477533882	453381046	0,0532727
363	485	0,637466468	196	487369474	459808218	0,0599408
364	296	0,636911176	162	481257195	458865816	0,0487972
365	396	0,636108912	180	476940920	453671106	0,0512923
366	186	0,635466875	142	478224688	454230089	0,0528248
367	500	0,634455516	108	484185219	452927062	0,0690137
368	64	0,626175238	119	481777794	454038071	0,0610956
369	388	0,625918757	106	479644432	452580694	0,0597987
370	420	0,625692786	184	489002598	460783337	0,0612419
371	141	0,62383233	134	473179046	448704223	0,0545456
372	103	0,622319017	127	481712935	455129391	0,0584088
373	101	0,621934628	127	480387199	455129391	0,0554959
374	394	0,621391314	179	485639883	457936307	0,0604966
375	343	0,6199758	170	482569334	456635181	0,056794
376	143	0,619266499	134	475921251	448704223	0,0606569

377	446	0,619040309	189	476559787	452715112	0,0526704
378	391	0,618190738	179	483483892	457936307	0,0557885
379	181	0,617699622	141	476382975	450684206	0,0570217
380	481	0,6160432	196	482140330	459808218	0,0485683
381	132	0,614990614	132	477739255	453076248	0,0544346
382	88	0,614554688	124	477178989	452490889	0,0545604
383	483	0,612396538	196	484441668	459808218	0,0535733
384	67	0,61041188	120	478352690	451921366	0,0584866
385	266	0,609534892	157	474384236	453848691	0,0452476
386	105	0,60894531	127	482846004	455129391	0,0608983
387	393	0,608714696	179	485120162	457936307	0,0593617
388	466	0,604750022	193	475626946	453570558	0,0486284
389	492	0,603848171	198	485906665	460779097	0,0545328
390	381	0,603684467	178	473427434	450805102	0,0501821
391	432	0,602659581	187	476577267	451331629	0,0559359
392	382	0,602549277	178	474510290	450805102	0,0525841
393	287	0,602081403	160	482897356	456552919	0,0577029
394	316	0,60155833	166	473915456	451206690	0,050329
395	236	0,598008829	151	477064922	452239835	0,0548936
396	390	0,596289872	106	479823466	452580694	0,0601943
397	61	0,595053792	119	481452460	454038071	0,0603791
398	392	0,594902367	179	484788428	457936307	0,0586372
399	431	0,594391742	187	474832457	451331629	0,05207
400	229	0,590541347	149	480340738	452755922	0,0609265
401	330	0,589757594	168	478016033	447673521	0,0677782
402	228	0,589174523	149	479775070	452755922	0,0596771
403	411	0,580630528	183	476016812	453381046	0,0499266
404	482	0,579482148	196	484410568	459808218	0,0535057
405	121	0,574401043	130	481434663	458074702	0,050996
406	102	0,568829083	127	481091147	455129391	0,0570426
407	142	0,567136135	134	474312895	448704223	0,0570725
408	116	0,55301502	129	475337508	452790812	0,049795
409	395	0,551071605	179	488391102	457936307	0,0665044
410	401	0,544488573	181	475962579	455086820	0,045872
411	326	0,544230969	168	472932856	447673521	0,0564236
412	327	0,539164975	168	473257890	447673521	0,0571496
413	120	0,536313478	129	482538456	452790812	0,0656984
414	364	0,531917115	174	488424133	461544075	0,0582394
415	329	0,528153007	168	475075527	447673521	0,0612098

416	52	0,522064741	117	483116530	457135638	0,0568341
417	226	0,520158711	149	477723986	452755922	0,0551469
418	230	0,51528997	149	481303213	452755922	0,0630523
419	308	0,51124462	164	486196173	457232582	0,0633454
420	328	0,509131803	168	474408859	447673521	0,0597206
421	386	0,508070923	106	478350963	452580694	0,0569407
422	53	0,499101232	117	484765860	457135638	0,0604421
423	254	0,492745621	154	484440586	455650255	0,0631852
424	55	0,490853693	117	485592835	457135638	0,0622511
425	252	0,486518152	154	481579040	455650255	0,056905
426	255	0,48422776	154	484475985	455650255	0,0632628
427	206	0,48263199	146	485922601	458209212	0,060482
428	51	0,480362669	117	482801156	457135638	0,0561442
429	175	0,479411572	139	483554248	454988511	0,0627834
430	207	0,478790254	146	485928401	458209212	0,0604946
431	227	0,478041032	149	477872806	452755922	0,0554756
432	174	0,475844019	139	482661060	454988511	0,0608203
433	209	0,474963832	146	486068468	458209212	0,0608003
434	307	0,471815022	164	486054273	457232582	0,0630351
435	54	0,465178857	117	484991267	457135638	0,0609352
436	436	0,465149254	188	477731197	453208321	0,0541095
437	309	0,464717435	164	486438337	457232582	0,0638751
438	172	0,464555195	139	482314679	454988511	0,060059
439	24	0,464303425	111	484980279	457659694	0,0596963
440	306	0,46394433	164	485795619	457232582	0,0624694
441	113	0,462720049	101	482661892	454792786	0,0612787
442	310	0,461730298	164	486964115	457232582	0,065025
443	440	0,460204531	188	481616338	453208321	0,062682
444	173	0,459203877	139	482430326	454988511	0,0603132
445	112	0,454992653	101	482328011	454792786	0,0605446
446	114	0,454938193	101	482760659	454792786	0,0614959
447	249	0,451305591	153	482113779	453704845	0,0626155
448	140	0,450334606	133	481866682	454164163	0,0609967
449	247	0,447484616	153	480068908	453704845	0,0581084
450	439	0,441613859	188	481466544	453208321	0,0623515
451	438	0,439228858	188	481176524	453208321	0,0617116
452	159	0,437607091	137	486209615	458329536	0,0608298
453	138	0,434263377	133	481668428	454164163	0,0605602
454	25	0,433955622	111	485174526	457659694	0,0601207

455	139	0,433704751	133	481702695	454164163	0,0606356
456	250	0,431997421	153	483557582	453704845	0,0657977
457	111	0,431643131	101	480377974	454792786	0,0562568
458	93	0,431309509	125	478829116	451735218	0,0599774
459	375	0,43116233	176	484461896	455814155	0,0628496
460	253	0,430781793	154	483971385	455650255	0,0621554
461	157	0,429853387	137	485574914	458329536	0,059445
462	160	0,42674019	137	486427382	458329536	0,0613049
463	210	0,424414069	146	486231135	458209212	0,0611553
464	437	0,420300816	188	477760997	453208321	0,0541753
465	245	0,41765542	152	480059693	452120580	0,0617957
466	374	0,416391483	176	484322175	455814155	0,0625431
467	246	0,416289997	153	477987304	453704845	0,0535204
468	156	0,408969754	137	483326043	458329536	0,0545383
469	115	0,407048113	101	485504418	454792786	0,0675288
470	204	0,405826887	145	484252168	457119857	0,0593549
471	251	0,404616062	154	480622845	455650255	0,0548065
472	205	0,40397869	145	484380995	457119857	0,0596367
473	171	0,403113546	139	479961521	454988511	0,0548871
474	94	0,400865693	125	479297990	451735218	0,0610153
475	29	0,398628321	112	481252162	452898695	0,0626044
476	243	0,393567847	152	479900326	452120580	0,0614432
477	21	0,392309312	111	481735219	457659694	0,0526057
478	203	0,392300185	145	483149566	457119857	0,0569429
479	373	0,387031074	176	484106822	455814155	0,0620706
480	158	0,383744786	137	485980115	458329536	0,060329
481	371	0,382695813	176	480805882	455814155	0,0548288
482	27	0,379324822	112	478679940	452898695	0,056925
483	372	0,374494996	176	481463683	455814155	0,0562719
484	244	0,37347362	152	479991826	452120580	0,0616456
485	28	0,37219466	112	478727877	452898695	0,0570308
486	22	0,370241227	111	482938955	457659694	0,0552359
487	95	0,370194915	125	479435050	451735218	0,0613187
488	23	0,369636388	111	484319491	457659694	0,0582524
489	201	0,365775296	145	481408189	457119857	0,0531334
490	30	0,365103409	112	481307412	452898695	0,0627264
491	208	0,361262976	146	486054455	458209212	0,0607697
492	136	0,361087699	133	478116821	454164163	0,0527401
493	242	0,359216913	152	479889026	452120580	0,0614182

494	248	0,358954445	153	480285042	453704845	0,0585848
495	202	0,356858388	145	481776163	457119857	0,0539384
496	137	0,350927393	133	478923889	454164163	0,0545171
497	91	0,332669584	125	477515513	451735218	0,0570695
498	92	0,329395456	125	478417735	451735218	0,0590667
499	26	0,317503917	112	477534871	452898695	0,0543967
500	241	0,229709156	152	475464350	452120580	0,0516317

B. Literaturverzeichnis

- Abdullah, Arham (2003): Intelligent selection of demolition techniques. PhD Thesis, Loughborough University.
- Abdullah, Arham; Anumba, Chimay J. (2002): Decision Model for the Selection of Demolition Techniques. International Conference in Advanced Building Technology. Sheraton Hong Kong Hotel, HK, 4. – 6. Dezember 2002. In: Anson, M., Ko, J. M.; Lam, E. S. S., (Hrsg.), (2), S. 1671-1679.
- Abdullah, Arham; Anumba, Chimay J.; Durmisevic, Elma (2003): Decision Tools for Demolition Techniques Selection. 11th Rinker International Conference on Deconstruction and Materials Reuse. Gainesville, Florida, USA, 7. – 10. Mai 2003. In: Chini, A. R., (Hrsg.), S. 55-72.
- Ahlemann, Frederik; Smolnik, Stefan; Müller, Benjamin; Radeke, Frank (2008): Social Software für das Projektmanagement: Grundlagen, Potenzialanalyse und Marktbewertung. In: Mayer, Thomas-Ludwig; Gleich, Ronald; Wald, Andreas; Wagner, Reinhard (Hrsg.) (2008): Advanced project Management. Herausforderungen - Praxiserfahrungen - Perspektiven. S. 33-52, Berlin, Münster: Lit Verlag (Advanced project Management, Bd.1).
- Ahuja, Ravindra K.; Magnanti, Thomas L.; Orlin, James B. (1993): Network flows. Theory, algorithms, and applications. Englewood Cliffs, N.J: Prentice Hall.
- Aidonis, D.; Xanthopoulos, A.; Vlachos, D.; Iakovou, E. (2008): On the optimal deconstruction and recovery processes of end-of-life buildings. In: Proceedings of the 2nd International Conference on Waste Management, Water Pollution, Air Pollution, Indoor Climate (WWAI'08). 2008, S. 211-216.

- Akbarnezhad, Ali; Ong, Khim Chye Gary; Chandra, Lado Riannevo (2014): Economic and environmental assessment of deconstruction strategies using building information modeling. In: *Automation in Construction* 37, S. 131–144. DOI: 10.1016/j.autcon.2013.10.017.
- Al-Fawzan, M. A.; Haouari, Mohamed (2005): A bi-objective model for robust resource-constrained project scheduling. In: *International Journal of Production Economics* 96 (2), S. 175–187. DOI: 10.1016/j.ijpe.2004.04.002.
- Alagöz, Oğuzhan; Azizoglu, Meral (2003): Rescheduling of identical parallel machines under machine eligibility constraints. In: *European Journal of Operational Research* 149 (3), S. 523–532. DOI: 10.1016/S0377-2217(02)00499-X.
- Altroge, Günter (1996): *Netzplantechnik*. 3. Aufl., München/Wien: Oldenbourg.
- Alvarez-Valdes, Ramon; Tamarit, Jose Manuel; Villa, Fulgencia (2015): Partially Renewable Resources. In: Schwindt, Christoph; Zimmermann, Jürgen (Hrsg.): *Handbook on Project Management and Scheduling* Vol.1. Heidelberg, New York, NY [u. a.]: Springer, S. 203-227.
- Anthofer, A.; Lippmann, W.; Peise, O.; Voss, S.; Trimis, D.; Hurtado, A. (2013): Lasertechnologie zur Entfernung radioaktiver und chemisch-toxischer Kontaminationen beim Rückbau kerntechnischer Anlagen. *Proceedings Kontec* 13.-15.03.2013.
- Anumba, Chimay J.; Abdullah, Arham; Fesseha, Tewedros (2003): Selection of demolition techniques: a case study of the Warren Farm Bridge. In: *Structural Survey* 21 (1), S. 36–48. DOI: 10.1108/02630800310470853.

- Anumba, Chimay J.; Abdullah, Arham; Ruikar, K. (2008): An Integrated System for Demolition Techniques Selection. In: Architectural Engineering and Design Management 4 (2), S. 130–148.
DOI: 10.3763/aedm.2008.0071.
- Artigues, Christian; Koné, Oumar; Lopez, Pierre; Mongeau, Marcel (2015): Mixed-Integer Linear Programming Formulations. In: Schwindt, Christoph; Zimmermann, Jürgen (Hrsg.): Handbook on Project Management and Scheduling Vol.1. Heidelberg, New York, NY [u. a.]: Springer, S. 17–41.
- Artigues, Christian; Roubellat, François (2000): A polynomial activity insertion algorithm in a multi-resource schedule with cumulative constraints and multiple modes. In: European Journal of Operational Research 127 (2), S. 297–316. DOI: 10.1016/S0377-2217(99)00496-8.
- AtG (2017): Gesetz über die friedliche Verwendung der Kernenergie und den Schutz gegen ihre Gefahren (Atomgesetz), kurz AtG, vom 20.07.2017, BGBl. I 2017, S. 2808.
- AtHaftÜbkG (2001): Gesetz zu dem Übereinkommen vom 29. Juli 1960 über die Haftung gegenüber Dritten auf dem Gebiet der Kernenergie nebst Zusatzvereinbarungen, zu dem Übereinkommen vom 25. Mai 1962 über die Haftung der Inhaber von Reaktorschiffen nebst Zusatzprotokoll und zu dem Übereinkommen vom 17. Dezember 1971 über die zivilrechtliche Haftung bei der Beförderung von Kernmaterial auf See (Gesetz zu den Pariser und Brüsseler Atomhaftungs-Übereinkommen), kurz AtHaftÜbkG vom 09.09.2001, BGBl. I 2001, S. 2331.

- Attenberg, Josh; Ipeirotis, Panagiotis G.; Provost, Foster (2011): Beat the Machine: Challenging Workers to Find the Unknown Unknowns. Workshops at the Twenty-Fifth AAAI Conference on Artificial Intelligence. Online im Internet: URL <<https://www.aaai.org/ocs/index.php/WS/AAAIW11/paper/view/3954>> (Stand: 24.08.2011, Abfrage am: 30.05.2018).
- Bach, Fr.-W.; Pfeifer, W.; Versemann, 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.
- Badiru, A. B. (2012): Project management. Systems, principles, and applications. Boca Raton, FL: CRC Press.
- 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, Martin; Möhring, Rolf H.; Radermacher, Franz-Josef (1988): Scheduling project networks with resource constraints and time windows. In: Annals of Operations Research 16 (1), S. 199–240. DOI: 10.1007/BF02283745.
- Bartz-Beielstein, Thomas; Chiarandini, Marco; Paquete, Luís; Preuss, Mike (Hrsg.) (2010): Experimental Methods for the Analysis of Optimization Algorithms. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg.

- BAStrlSchG (2015): Gesetz über die Errichtung eines Bundesamtes für Strahlenschutz, kurz BAStrlSchG, vom 31. August 2015, BGBl. I 2015, S. 1474.
- BBR Bundesministerium für Raumordnung, Bauwesen und Städtebau (1998): Arbeitshilfen Recycling, Vermeidung, Verwertung und Beseitigung von Bauabfällen bei Planung und Ausführung von baulichen Anlagen. Studie des Bundesamtes für Bauwesen und Raumordnung in Zusammenarbeit mit dem Lehrstuhl Baugrund-Grundbau der Universität Dortmund, Bonn, 60 S.
- Bethge, Klaus; Walter, Gertrud; Wiedemann, Bernhard (2008): Kernphysik. Eine Einführung. 3. Auflage. Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag.
- BfkEG (2015): Gesetz über die Errichtung eines Bundesamtes für kerntechnische Entsorgung, kurz BfkEG, vom 31. August 2015, BGBl. I 2015, S. 1474.
- BfS – Bundesamt für Strahlenschutz (2017): Strahlung und Strahlenschutz. Online im Internet: URL
<http://www.bfs.de/SharedDocs/Downloads/BfS/DE/broschueren/str-u-strschutz.pdf?__blob=publicationFile&v=3> (Stand: April 2017, Abfrage am: 19.02.2018).
- Bhaskar, Tarun; Pal, Manabendra N.; Pal, Asim K. (2011): A heuristic method for RCPSp with fuzzy activity times. In: European Journal of Operational Research 208 (1), S. 57–66.
DOI: 10.1016/j.ejor.2010.07.021.
- Bianco, Lucio; Caramia, Massimiliano (2015): Lower Bounds and Exact Solution Approaches. In: Schwindt, Christoph; Zimmermann, Jürgen (Hrsg.): Handbook on Project Management and Scheduling Vol.1. Heidelberg, New York, NY [u. a.]: Springer, S. 77–111.

- Bienia, Harald (2015): Rückbautechniken im Einsatz – Vergleich von thermischen und mechanischen Trennverfahren. Vortrag im Rahmen des Experten-Roundtables AKW-Rückbau, 6.-7.10.2015 in Köln.
- Billaut, Jean-Charles; Moukrim, Aziz; Sanlaville, Eric (2008): Flexibility and robustness in scheduling. London, Hoboken, NJ: ISTE/John Wiley & Sons (Control systems, robotics and manufacturing series).
- Billaut, Jean-Charles; Roubellat, François (1996): A new method for workshop real time scheduling. In: International Journal of Production Research 34 (6), S. 1555–1579. DOI: 10.1080/00207549608904984.
- Birattari, Mauro; Yuan, Zhi; Balaprakash, Prasanna; Stützle, Thomas (2010): F-Race and Iterated F-Race: An Overview. In: Thomas Bartz-Beielstein, Marco Chiarandini, Luís Paquete und Mike Preuss (Hrsg.): Experimental Methods for the Analysis of Optimization Algorithms. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, S. 311–336.
- 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.
- Blettner, Maria; Wicke, Henryk; Schlehofer, Brigitte (2012): Strahlen-epidemiologie. In: Public Health Forum 20 (3).

- BMUB (Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit) (2015): Erster Bericht zur Durchführung der Richtlinie 2011/70/Euratom (Bericht nach Artikel 14 (1) der Richtlinie 2011/70/Euratom des Rates vom 19. Juli 2011 über einen Gemeinschaftsrahmen für die verantwortungsvolle und sichere Entsorgung abgebrannter Brennelemente und radioaktiver Abfälle). Online im Internet: URL <http://www.bmub.bund.de/fileadmin/Daten_BMU/Download_PDF/Nukleare_Sicherheit/euratom_durchfuehrungsbericht_bf.pdf> (Stand: August 2015, Abfrage am: 20.02.2018).
- BMUB (Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit) (2014): Regelwerk des Kerntechnischen Ausschusses (KTA-Regelwerk). Online im Internet: URL <www.bmub.bund.de/P269/> (Stand: 15.10.2013, Abfrage am: 12.11.2015).
- BMUB (Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit) (2013): Stilllegung – Genehmigungs- und Aufsichtsverfahren/ Aufgaben des BMUB. Online im Internet: URL <www.bmub.bund.de/P3637/> (Stand: 17.12.2014, Abfrage am: 02.11.2015).
- BMUB (Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit) (2010): Bekanntmachung einer Empfehlung der Entsorgungskommission: Leitlinien zur Stilllegung kerntechnischer Anlagen. Bundesanzeiger, Amtlicher Teil, Nummer 187, S. 4094-4099.
- BMUB (Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit) (2009): Leitfaden zur Stilllegung, zum sicheren Einschluss und zum Abbau von Anlagen oder Anlagenteilen nach § 7 des Atomgesetzes. BAnz 2009, Nr. 162a.

- BMUB (Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit) (2002): Neues Atomgesetz tritt in Kraft. Online im Internet: URL <www.bmub.bund.de/N1472/> (Stand: 25.04.2002, Abfrage am: 14.03.2016).
- Bohinc, Tomas (2010): Grundlagen des Projektmanagements. Methoden, Techniken und Tools für Projektleiter. 2. Auflage. Offenbach am Main: GABAL.
- Böttcher, Jan; Drexl, Andreas; Kolisch, Rainer; Salewski, Frank (1999): Project Scheduling Under Partially Renewable Resource Constraints. In: *Management Science* 45 (4), S. 543-559.
DOI: 10.1287/mnsc.45.4.543.
- Brandenberger, Jürg; Ruosch, Ernst (1993): Ablaufplanung im Bauwesen. 3. überarb. und akt. Aufl., Zürich: Dietikon Baufachverlag.
- Brauers, Jutta; Weber, Martin (1988): A new method of scenario analysis for strategic planning. In: *Journal of Forecasting* 7 (1), S. 31–47.
DOI: 10.1002/for.3980070104.
- Brendebach, Boris (2015): Vergleich von Stilllegungsstrategien – Welche Optionen gibt es und welche Kriterien müssen eingehalten werden? Vortrag im Rahmen des Experten-Roundtables AKW-Rückbau, 6.-7.10.2015 in Köln.
- Brucker, Peter; Drexl, Andreas; Möhring, Rolf; Neumann, Klaus; Pesch, Erwin (1999): Resource-constrained project scheduling: Notation, classification, models, and methods. In: *European Journal of Operational Research* 112 (1), S. 3–41.
DOI: 10.1016/S0377-2217(98)00204-5.

- Bundesrat (2016): TOP 88 – Finanzierung Atomausstieg. Online im Internet: URL <<http://www.bundesrat.de/DE/plenum/plenum-kompakt/16/952/952-pk.html#top-88>> (Stand: 16.12.2016, Abfrage am: 06.02.2017).
- Bünemann, Dietrich (1992): Von der Kernspaltung zum Kernkraftwerk. München, Wien: Hanser.
- Bundesregierung (2015): Energiewende - Das nächste Kernkraftwerk ist vom Netz. Online im Internet: URL <<https://www.bundesregierung.de/Content/DE/Artikel/2015/06/2015-06-26-akw-grafenrheinfeld-geht-vom-netz.html>> (Stand: 26.06.2015, Abfrage am: 04.11.2016).
- Cacuci, Dan Gabriel (Hrsg.) (2010): Handbook of nuclear engineering. New York, London: Springer.
- Carlier, Jacques; Moukrim, Aziz (2015): Storage Resources. In: Schwindt, Christoph ; Zimmermann, Jürgen (Hrsg.): Handbook on Project Management and Scheduling Vol.1. Heidelberg, New York, NY [u. a.]: Springer, S. 177–189.
- CDE – Connaissance des energies (2017): 50% de nucléaire en 2025: combien faudrait-il fermer de réacteurs? Online im Internet: URL <<https://www.connaissancedesenergies.org/50-de-nucleaire-en-2025-combien-faudrait-il-fermer-de-reacteurs-170710>> (Stand: 10.07.2017, Abfrage am: 21.08.2017).
- 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.

- Chen, Chen-Tung; Huang, Sue-Fen (2007): Applying fuzzy method for measuring criticality in project network. In: *Information Sciences* 177 (12), S. 2448–2458. DOI: 10.1016/j.ins.2007.01.035.
- Cheng, Jack C.P.; Ma, Lauren Y.H. (2013): A BIM-based system for demolition and renovation waste estimation and planning. In: *Waste Management* 33 (6), S. 1539–1551.
DOI: 10.1016/j.wasman.2013.01.001.
- Chen, Peter Pin-Shan (1976): The entity-relationship model-toward a unified view of data. In: *ACM Trans. Database Syst.* 1 (1), S. 9–36.
DOI: 10.1145/320434.320440.
- Chtourou, Hédi; Haouari, Mohamed (2008): A two-stage-priority-rule-based algorithm for robust resource-constrained project scheduling. In: *Computers & Industrial Engineering* 55 (1), S. 183–194.
DOI: 10.1016/j.cie.2007.11.017.
- Clark, Charles E. (1962): Letter to the Editor - The PERT Model for the Distribution of an Activity Time. In: *Operations Research* 10 (3), S. 405-406. DOI: 10.1287/opre.10.3.405.
- Clark, Charles E. (1961): The Greatest of a Finite Set of Random Variables. In: *Operations Research* 9 (2), S. 145–162. DOI: 10.1287/opre.9.2.145.
- Coelho, André; de Brito, Jorge (2013): Conventional demolition versus deconstruction techniques in managing construction and demolition waste (CDW). In: Fernando Pacheco Torgal (Hrsg.): *Handbook of recycled concrete and demolition waste*. Cambridge: Woodhead Publishing Ltd. (no. 47), S. 141–185.

- Coelho, José; Vanhoucke, Mario (2015): The Multi-Mode Resource-Constrained Project Scheduling Problem. In: Schwindt, Christoph; Zimmermann, Jürgen (Hrsg.): 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.
- Corsten, Hans; Corsten, Hilde; Gössinger, Ralf (2008): Projektmanagement. Einführung. 2. Aufl. München: Oldenbourg (Lehr- und Handbücher der Betriebswirtschaftslehre).
- Cottin, Claudia; Döhler, Sebastian (2013): Risikoanalyse. Modellierung, Beurteilung und Management von Risiken mit Praxisbeispielen. 2., überarb. u. erw. Aufl. 2013. Wiesbaden: Springer Fachmedien.
- Cumo, Maurizio (2010): Decommissioning of Nuclear Plants. In: Cacuci, Dan Gabriel (Hrsg.): Handbook of nuclear engineering. New York, London: Springer, S. 2999–3252.
- Daase, Christopher; Kessler, Oliver (2007): Knowns and Unknowns in the 'War on Terror': Uncertainty and the Political Construction of Danger. In: Security Dialogue 38 (4), S. 411-434. DOI: 10.1177/0967010607084994.
- Daniels, Richard L.; Kouvelis, Panagiotis (1995): Robust Scheduling to Hedge against Processing Time Uncertainty in Single-Stage Production. In: Management Science 41 (2), S. 363–376. Online im Internet: URL <<http://www.jstor.org/stable/2632994>> (Abfrage am: 28.08.2018).

- DAtF - Deutsches Atomforum e.V. (2013): Stilllegung und Rückbau von Kernkraftwerken. Online im Internet: URL <<http://www.kernfragen.de/sites/default/files/media/publication/file/060rueckbau-von-kkw.pdf>> (Stand: Januar 2013, Abfrage am: 02.12.2016).
- Davari, Morteza; Demeulemeester, Erik (2017): The Proactive and Reactive Resource-Constrained Project Scheduling Problem: The Crucial Role of Buffer-Based Reactions. In: SSRN Journal 38 (4), S. 411-434. DOI: 10.2139/ssrn.2976350.
- Davenport, Andrew J.; Gefflot, Christophe; Beck, J. Christopher (2014): Slack-Based Techniques for Robust Schedules. In: Proceedings of the Sixth European Conference on Planning, Association for the Advancement of Artificial Intelligence.
- Davis, Ron (2008): Teaching Note —Teaching Project Simulation in Excel Using PERT- Beta Distributions. In: INFORMS Transactions on Education 8 (3), S. 139–148. DOI: 10.1287/ited.1080.0013.
- De Reyck, Bert; Demeulemeester, Erik; Herroelen, Willy (1998): Local Search Methods for the Discrete Time/Resource Trade-Off Problem in Project Networks. In: Naval Research 45 (6), S. 533–578.
- Deblaere, Filip; Demeulemeester, Erik; Herroelen, Willy (2011): Proactive policies for the stochastic resource-constrained project scheduling problem. In: European Journal of Operational Research 214 (2), S. 308–316. DOI: 10.1016/j.ejor.2011.04.019.
- 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.

- Demeulemeester, Erik; De Reyck, Bert; Herroelen, Willy (2000): The discrete time/resource trade-off problem in project networks: a branch-and-bound approach. In: IIE Transactions 32 (11), S. 1059-1069. DOI: 10.1080/07408170008967461.
- Demeulemeester, Erik L.; Herroelen, Willy (2011): Robust project scheduling. Boston: Now (Foundations and trends in technology, information and operations management 3 (3-4), S. 201-376). DOI: 10.1561/02000000021.
- Deutscher Abbruchverband e.V. (Hrsg.) (2014): Abbrucharbeiten. Grundlagen, Planung, Durchführung. Unter Mitarbeit von Marcel Schröder. 3., aktualisierte und erweiterte Auflage. Köln: Müller.
- Deutscher Abbruchverband e.V. (Hrsg.) (2007): Abbrucharbeiten. Grundlagen, Vorbereitung, Durchführung ; mit 114 Tabellen. Unter Mitarbeit von Jürgen Lippok und Dietrich Korth. 2., aktualisierte und erw. Aufl. Köln: R. Müller.
- Deutscher Bundestag (2011): Drucksache 17/7777: Antwort der Bundesregierung: Stilllegung und Rückbau von Atomkraftwerken und Entsorgung radioaktiver Abfälle – Fragen zur Kostentragung und zu den Rückstellungen der Energieversorgungsunternehmen. Online im Internet: URL <<http://dipbt.bundestag.de/dip21/btd/17/077/1707777.pdf>> (Stand: 23.11.2011, Abfrage am: 12.11.2015).
- Di Fabio, Udo; Durner, Wolfgang; Wagner, Gerhard (2013): Kernenergieausstieg 2011. Die 13. AtG-Novelle aus verfassungsrechtlicher Sicht. 1. Aufl. Baden-Baden: Nomos.

- Die Welt (2014): Frankreich will deutschen Atomausstieg übertrumpfen.
Online im Internet: URL
<<http://www.welt.de/wirtschaft/energie/article133171538/Frankreich-will-deutschen-Atomausstieg-uebertrumpfen.html>> (Stand:
12.10.2014, Abfrage am: 13.10.2014).
- DIN Deutsches Institut für Normung e.V. (2009): DIN 69900,
Projektmanagement – Netzplantechnik; Beschreibungen und Begriffe,
Berlin: Beuth Verlag GmbH.
- DIN Deutsches Institut für Normung e.V. (2009): DIN 69901-5,
Projektmanagement – Projektmanagementsysteme – Teil 5: Begriffe,
Berlin: Beuth Verlag GmbH.
- Domschke, Wolfgang; Drexl, Andreas (2007): Einführung in Operations
Research. Mit 63 Tabellen. 7., überarb. Aufl. Berlin: Springer
(Springer-Lehrbuch).
- Domschke, Wolfgang; Scholl, Armin (2008): Grundlagen der Betriebswirt-
schaftslehre. Eine Einführung aus entscheidungsorientierter Sicht. 4.,
verb. und aktualisierte Aufl. Berlin, Heidelberg: Springer.
- Dreizehntes Gesetz zur Änderung des Atomgesetzes vom 31. Juli 2011,
BGBl. 2011 I Nr. 43, S. 1704.
- Drews, Günter; Hillebrand, Norbert; Dr. Kärner, Martin; Peipe, Sabine;
Rohrschneider, Uwe (2014): Praxishandbuch Projektmanagement,
1. Auflage, Freiburg, München: Haufe.
- Drexl, Andreas; Kolisch, Rainer; Sprecher, Arno (1997): Neuere
Entwicklungen in der Projektplanung. In: Schmalenbachs Zeitschrift
für betriebswirtschaftliche Forschung 49 (2), S. 95-120.

- EAG (1957): Vertrag zur Gründung der Europäischen Atomgemeinschaft (EURATOM): vom 25. März 1957, BGBl. 1957 II S. 1014.
- Elftes Gesetz zur Änderung des Atomgesetzes vom 8. Dezember 2010, BGBl. 2010 I Nr. 62, S. 1814.
- Elmaghraby, Salah E. (1977): Activity networks. Project planning and control by network models. New York: Wiley.
- 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.
- Elmasri, Ramez; Navathe, Shamkant (2011): Grundlagen von Datenbanksystemen. Bachelorausgabe. 3., aktualisierte Aufl., Bachelorausg., [Nachdr.]. München [u. a.]: Pearson Studium (Informatik).
- Elkhyari, Abdallah; Guéret, Christelle; Jussien, Narendra (2003): Solving Dynamic Resource Constraint Project Scheduling Problems Using New Constraint Programming Tools. In: Burke, Edmund; De Causmaecker, Patrick (Hrsg.) (2003): Practice and Theory of Automated Timetabling IV. 4th international conference, PATAT 2002, Gent, Belgium, August 21-23, 2002: revised selected papers. Berlin, London: Springer (2740), S. 39-59.
- El Sakkout, Hani; Wallace, Mark (2000): Probe Backtrack Search for Minimal Perturbation in Dynamic Scheduling. In: Constraints 5 (4), S. 359-388.

EnBW Kernkraft GmbH (2014): Stilllegung und Abbau von Anlagenteilen des Kernkraftwerks Philippsburg Block 1 (KKP 1). Online im Internet: URL <https://um.baden-wuerttemberg.de/fileadmin/redaktion/m-um/intern/Dateien/Dokumente/3_Umwelt/Kernenergie/Genehmigungsverfahren/KKP/KKP_1/141201_Sicherheitsbericht_1-SAG_KKP-1.pdf> (Stand: Dezember 2014, Abfrage am: 19.02.2018).

E.ON Kernkraft GmbH (2008): Stade: Stilllegung und Rückbau des Kernkraftwerks – vom Kernkraftwerk zur „Grünen Wiese“. Online im Internet: URL <http://www.atommuellreport.de/fileadmin/Dateien/pdf/Datenblaetter/Stade/EON_Stade-Rueckbau_Unt_2008-03.pdf> (Stand: März 2008, Abfrage am: 23.10.2017).

ESK (2015): Empfehlung der Entsorgungskommission, Leitlinien zur Stilllegung kerntechnischer Anlagen. Empfehlung der Entsorgungskommission vom 16.03.2015. Online im Internet: URL <<http://www.entsorgungskommission.de/sites/default/files/reports/empflstesk46hp.pdf>> (Stand: 16.03.2015, Abfrage am: 24.11.2016).

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> (Stand: 04.04.2016, Abfrage am: 29.03.2017).
- Europäische Kommission (2009): Dismantling Techniques, Decontamination Techniques, Dissemination of Best Practice, Experience and Know-how. Final Report. Online im Internet: URL <<https://cordis.europa.eu/docs/projects/files/508/508855/cnd-wp7-decontamination-dismantling-techniques-finalreport.pdf>> (Stand: Juni 2009, Abfrage am: 31.08.2018).
- Europäische Kommission (2008): Coordination Network on Decommissioning: Project Management and Planning, Final Report 2008. Online im Internet: URL <<http://cordis.europa.eu/pub/fp6- Euratom/docs/cnd-projectmanagement-finalreport.pdf>> (Stand: Dezember 2008, Abfrage: 21.08.2017)
- Fachverband für Strahlenschutz (2005): Leitfaden für die praktische Umsetzung des § 29 StrlSchV (Freigabeleitfaden). erstellt durch Arbeitskreis Entsorgung, Ausgabe 3. Bearbeitung durch Bertram-Berg, A.; Borchers, F.; Hanschke, C.; Herzog, F.; Kastl, U.; Kretner, R.; Reichert, A.; Theis, S. und Zoubek, N. Fachverband für Strahlenschutz, Garching.
- Fahrmeir, Ludwig; Künstler, Rita; Pigeot, Iris; Tutz, Herhard (2007): Statistik. Der Weg zur Datenanalyse. 6., überarbeitete Aufl. Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag Berlin Heidelberg.

- Feige, Gerhard (o.J.): Die IAEA-Sicherheitsstandards – Entwicklung und globale Anwendung. International Atomic Energy Agency (IAEA), Department of Safety and Security, Division of Installation Safety.
- Fendrik, István; Bors, Jenő (1991): Die nichtparasitären Krankheiten: Strahlenschäden an Pflanzen. In: Sorauer, Paul; Rademacher, Bernhard (Hrsg.): Handbuch der Pflanzenkrankheiten. 4. Aufl. Berlin: Parey.
- Fente, Javier; Schexnayder, Cliff; Knutson, Kraig (2000): Defining a Probability Distribution Function for Construction Simulation. In: Journal of Construction Engineering and Management 126 (3), S. 234-241. DOI: 10.1061/(ASCE)0733-9364(2000)126:3(234).
- Fernandez, Abel A.; Armacost, Robert L.; Pet-Edwards, Julia J.A. (1996): The role of the nonanticipativity constraint in commercial software for stochastic project scheduling. In: Computers & Industrial Engineering 31 (1-2), S. 233–236. DOI: 10.1016/0360-8352(96)00119-2.
- Fieber, Werner (2015): Die Mitwirkung von Behörden beim Rückbau – Genehmigungsverfahren für Stilllegung und Abbau von Kernkraftwerken. Vortrag im Rahmen des Experten-Roundtables AKW-Rückbau, 6.-7.10.2015 in Köln.
- Fishman, George S. (2013): Monte Carlo. Concepts, algorithms, and applications. 7. [print.]. New York, NY: Springer (Springer series in operations research).
- Fix, Wolfgang (1978): Strukturuntersuchungen und Verfahren zur Zeitplanung bei GERT-Netzplänen. Dissertation, Universität Fridericiana Karlsruhe (TH), Fachbereich Wirtschaftswissenschaften. Stuttgart: Hochschulverlag (Hochschulsammlung Wirtschaftswissenschaft : Betriebswirtschaftslehre, Bd. 2).

- Flyvbjerg, Bent (2014): What You Should Know About Megaprojects and Why: An Overview. In: Project Management Journal 45 (2), S. 6–19. DOI: 10.1002/pmj.21409.
- Flyvbjerg, Bent; Bruzelius, Nils; Rothengatter, Werner (2003): Megaprojects and risk. An anatomy of ambition. United Kingdom, New York: Cambridge University Press.
- Forschungszentrum Karlsruhe (2001): Bericht über den Stand der BMBF-Stilllegungsprojekte und der vom BMBF geförderten FuE-Arbeiten zu „Stilllegung/Rückbau kerntechnischer Anlagen“. PTE-S Nr. 1. Online im Internet: URL <http://www.ptka.kit.edu/downloads/ptka-wte-e/PTE-S_FB01.pdf> (Stand: März 2001, Abfrage am: 08.05.2018).
- Frese, Erich; Graumann, Matthias; Theuvsen, Ludwig (2012): Grundlagen der Organisation. Entscheidungsorientiertes Konzept der Organisationsgestaltung. 10. Aufl. Wiesbaden: Betriebswirtschaftlicher Verlag Gabler (Lehrbuch).
- Fujita, Reiko; Enda, Masami; Morisue, Tetsuo (1988): REDOX decontamination technique development. (II). REDOX decontamination system using pilot plant. In: Journal of Nuclear Science and Technology 26 (4), S. 449–458. DOI: 10.3327/jnst.26.449.
- Fulkerson, D.R. (1962): Expected critical path length in PERT type networks. In: Operations Research 10 (6), S. 808-817. DOI: 10.1287/opre.10.6.808.
- Gallagher, Charles (1987): Reply: A Note on PERT Assumptions. In: Management Science 33 (10), S. 1360. DOI: 10.1287/mnsc.33.10.1360.

- Gareis, Roland (2008): Change-Management und Projekte. In: Mayer, Thomas-Ludwig; Gleich, Ronald; Wald, Andreas; Wagner, Reinhard (Hrsg.) (2008): Advanced project Management. Herausforderungen - Praxiserfahrungen - Perspektiven. S. 155-176, Berlin, Münster: Lit Verlag (Advanced project Management, Bd. 1).
- Gebhard, Marina (2009): Hierarchische Produktionsplanung bei Unsicherheit. Wiesbaden: Gabler.
- Geisler, Frank (2014): Datenbanken: Grundlagen und Design. 5., aktualisierte und erweiterte Aufl. Heidelberg: Mitp.
- Gentes, Sascha; Aminy, Akramullah; Gabor, Nadine; Reinhardt, Steffen (2015): Internationale Rückbautechniken und Managementmethoden für kerntechnische Anlagen - Eine wissenschaftliche Analyse aufbauend auf dem internationalen Stand der Technik (IRMKA). Endbericht des Forschungsprojekts mit dem Förderkennzeichen 02S8851.
- Gerhards, Patrick; Stürck, Christian; Fink, Andreas (2017): An Adaptive Large Neighborhood Search as a Matheuristic for the Multi-Mode Resource-Constrained Project Scheduling Problem. In: European Journal of Industrial Engineering 11 (6), S. 774–791. DOI: 10.1504/EJIE.2017.10006713.
- Gesetz über die Umweltverträglichkeitsprüfung (UVPG) vom 31. August 2015, BGBl. I 2015, S. 1474.
- Gesetz zum Schutz vor schädlichen Umwelteinwirkungen durch Luftverunreinigungen, Geräusche, Erschütterungen und ähnliche Vorgänge (Bundes-Immissionsschutzgesetz - BImSchG) vom 31. August 2015, BGBl. I 2015, S. 1474.

Gesetz zur Errichtung eines Fonds zur Finanzierung der kerntechnischen Entsorgung (Entsorgungsfondsgesetz – EntsorgFondsG), Artikel 1 des Gesetzes zur Neuordnung der Verantwortung in der kerntechnischen Entsorgung vom 27. Januar 2017 (BGBl. I S. 114, 1676), das durch Artikel 1 der Verordnung vom 16. Juni 2017 (BGBl. I S. 1672) geändert worden ist.

Gesetz zur Förderung der Kreislaufwirtschaft und Sicherung der umweltverträglichen Bewirtschaftung von Abfällen (Kreislaufwirtschaftsgesetz - KrWG), vom 24. Februar 2012, BGBl. I, S. 212.

Gesetz zur geordneten Beendigung der Kernenergienutzung zur gewerblichen Erzeugung von Elektrizität vom 22. April 2002, BGBl. I Nr. 26 2002, S. 1351.

Gesetz zur Nachhaftung für Abbau- und Entsorgungskosten im Kernenergiebereich (Nachhaftungsgesetz) Artikel 8 des Gesetzes zur Neuordnung der Verantwortung in der kerntechnischen Entsorgung vom 27. Januar 2017 (BGBl. I S. 114, 127, 1676), das durch nach Maßgabe des Artikel 5 Absatz 2 durch Artikel 4 Absatz 3 des Gesetzes vom 5. Mai 2017 (BGBl. I S. 1074) geändert worden ist.

Gesetz zur Neuordnung der Verantwortung in der kerntechnischen Entsorgung vom 27. Januar 2017, BGBl. 2017 Teil I, Nr. 5, S. 114..

Gesetz zur Regelung des Übergangs der Finanzierungs- und Handlungspflichten für die Entsorgung radioaktiver Abfälle der Betreiber von Kernkraftwerken (Entsorgungsübergangsgesetz) Artikel 2 des Gesetzes zur Neuordnung der Verantwortung in der kerntechnischen Entsorgung vom 27. Januar 2017 (BGBl. I S. 114, 120, 1676), das durch nach Maßgabe des Artikel 5 Absatz 2 durch Artikel 4 Absatz 2 des Gesetzes vom 5. Mai 2017 (BGBl. I S. 1074) geändert worden ist.

- Gesetz zur Suche und Auswahl eines Standortes für ein Endlager für Wärme entwickelnde radioaktive Abfälle (Standortauswahlgesetz - StandAG) vom 31. August 2015, BGBl. I 2015, S. 1474.
- Gesetz zur Transparenz über die Kosten der Stilllegung und des Rückbaus der Kernkraftwerke sowie der Verpackung radioaktiver Abfälle (Transparenzgesetz) Artikel 7 des Gesetzes zur Neuordnung der Verantwortung in der kerntechnischen Entsorgung vom 27. Januar 2017 (BGBl. I S. 114, 125, 1676).
- Ghezail, Feiza; Pierreval, Henri; Hajri-Gabouj, Sonia (2010): Analysis of robustness in proactive scheduling: A graphical approach. In: Computers & Industrial Engineering 58 (2), S. 193–198.
DOI: 10.1016/j.cie.2009.03.004.
- Gido, Jack; Clements, Jim P. (2014): Successful project management. 6. Auflage.
- Goldratt, Eliyahu M. (1997): Critical chain. Great Barrington, Mass: North River Press.
- Golenko-Ginzburg, Dimitri; Gonik, Aharon (1997): Stochastic network project scheduling with non-consumable limited resources. In: International Journal of Production Economics 48 (1), S. 29–37.
DOI: 10.1016/S0925-5273(96)00019-9.
- Gonçalves, José Fernando; de Magalhães Mendes, Jorge José; Resende, Mauricio G.C. (2015): The Basic Multi-Project Scheduling Problem. In: Schwindt, Christoph; Zimmermann, Jürgen (Hrsg.): Handbook on Project Management and Scheduling Vol. 2. Heidelberg, New York, NY [u. a.]: Springer, S. 667–683.

- Goren, Selcuk; Sabuncuoglu, Ihsan (2008): Robustness and stability measures for scheduling: single-machine environment. In: IIE Transactions 40 (1), S. 66–83. DOI: 10.1080/07408170701283198.
- Gottwald, Richard (1990): Entscheidung unter Unsicherheit. Informationsdefizite und unklare Präferenzen. Wiesbaden: Gabler.
- Grubbs, Frank E. (1962): Attempts to Validate Certain PERT Statistics or “Picking on PERT”. In: Operations Research 10 (6), S. 912–915. DOI: 10.1287/opre.10.6.912.
- 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: Schwindt, Christoph; Zimmermann, Jürgen (Hrsg.): Handbook on Project Management and Scheduling Vol.1. Heidelberg, New York, NY [u. a.]: Springer, S. 299-318.
- Hagen, Ulrich (1994): Strahlungen. In: Marquardt, Hans; Schäfer, Siegfried G. (Hrsg.): Lehrbuch der Toxikologie. Mannheim: BI-Wissenschaftsverlag, S. 630–649.
- Hartley, H.O.; Wortham, A.W. (1966): A statistical theory for PERT critical path analysis. In: Management Science 12 (10), S. 469-481. DOI: 10.1287/mnsc.12.10.B469.
- Hartmann, Sönke (2015): Time-Varying Resource Requirements and Capacities. In: Schwindt, Christoph; Zimmermann, Jürgen (Hrsg.): Handbook on Project Management and Scheduling Vol.1. Heidelberg, New York, NY [u. a.]: Springer, S. 163–176.
- Hauptmanns, Ulrich; Herttrich, Michael; Werner, Wolfgang (1987): Technische Risiken. Ermittlung u. Beurteilung. Berlin u.a: Springer.

- Hazır, Öncü; Haouari, Mohamed; Erel, Erdal (2010): Robust scheduling and robustness measures for the discrete time/cost trade-off problem. In: *European Journal of Operational Research* 207 (2), S. 633–643.
DOI: 10.1016/j.ejor.2010.05.046.
- Healy, Thomas L.; Clark, Charles E.; Millstein, Herbert S. (1961): Activity Subdivision and PERT Probability Statements. In: *Operations Research* 9 (3), S. 341–348. DOI: 10.1287/opre.9.3.341.
- Heilmann, Roland (2000): Ressourcenbeschränkte Projektplanung im Mehr-Modus-Fall. Dissertation. Wiesbaden: Dt. Univ.-Verl.; Gabler.
- Hering, Ekbert; Schulz, Wolfgang (1987): *Kernkraftwerke, Radioaktivität und Strahlenwirkung*. Düsseldorf: VDI-Verlag.
- Herrerías-Velasco, José Manuel; Herrerías-Pleguezuelo, Rafael; van Dorp, Johan R. (2011): Revisiting the PERT mean and variance. In: *European Journal of Operational Research* 210 (2), S. 448–451.
DOI: 10.1016/j.ejor.2010.08.014.
- Herrmann, Thomas; Baumann, Michael; Dörr, Wolfgang (2006): *Klinische Strahlenbiologie. Kurz und bündig. 4., völlig überarb. Aufl.* München [u. a.]: Elsevier, Urban & Fischer.
- Herroelen, Willy S.; van Dommelen, Patrick; Demeulemeester, Erik L. (1997): Project network models with discounted cash flows a guided tour through recent developments. In: *European Journal of Operational Research* 100 (1), S. 97–121.
DOI: 10.1016/S0377-2217(96)00112-9.
- Herroelen, Willy; Demeulemeester, Erik; Reyck, Bert de (1999): A Classification Scheme for Project Scheduling. In: Węglarz, Jan (Hrsg.): *Project scheduling. Recent models, algorithms, and applications*. Boston: Kluwer, S. 1–26.

- Herroelen, Willy; Leus, Roel (2004): Robust and reactive project scheduling: a review and classification of procedures. In: *International Journal of Production Research* 42 (8), S. 1599–1620.
DOI: 10.1080/00207540310001638055.
- Herroelen, Willy; Leus, Roel (2005): Project scheduling under uncertainty: Survey and research potentials. In: *European Journal of Operational Research* 165 (2), S. 289–306. DOI: 10.1016/j.ejor.2004.04.002.
- Hill, Hans (1978): Strahlenschäden an Tieren. In: Gerhard Olschowy (Hrsg.): *Natur- und Umweltschutz in der Bundesrepublik Deutschland*. Mit 133 Tabellen. 1. Aufl. Hamburg, Berlin: Parey, S. 739–749.
- Hohmuth, Timo (2014): *Die atomrechtspolitische Entwicklung in Deutschland seit 1980. Darstellung, Analyse, Materialien*. 1. Aufl. Berlin: Berliner Wissenschafts-Verlag.
- Hoppenbrock, Volker (2009): *Finanzierung der nuklearen Entsorgung und der Stilllegung von Kernkraftwerken. Ein Vergleich zwischen der Rechtslage in Deutschland und der Schweiz*. 1. Aufl. Baden-Baden: Nomos (144).
- Hu, Xuejun; Demeulemeester, Erik; Cui, Nanfang; Wang, Jianjiang; Tian, Wendi (2017): Improved critical chain buffer management framework considering resource costs and schedule stability. In: *Flex Serv Manuf J* 29 (2), S. 159–183. DOI: 10.1007/s10696-016-9241-y.
- Hübner, Felix; Volk, Rebekka; Secer, Oktay; Kühn, Daniel; Sahre, Peter; Knappik, Reinhard; Schultmann, Frank; Gentes, Sascha; von Both, Petra (2018a): *Modellentwicklung eines ganzheitlichen Projektmanagementsystems für kerntechnische Rückbauprojekte (MogaMaR). Schlussbericht des Forschungsvorhabens*. Karlsruhe: KIT Scientific Publishing (Produktion und Energie, 24).
DOI: 10.5445/KSP/1000080517.

- Hübner, Felix; Möller, Sven; Schultmann, Frank (2018b): Entwicklung eines Expertensystems für die Planung kerntechnischer Rückbauprojekte. Working Paper in: Series in Production and Energy, Nr. 28, DOI(KIT): 10.5445/IR/1000082411.
- Hübner, Felix; Volk, Rebekka; Kühlen, Anna; Schultmann, Frank (2017a): Review of project planning methods for deconstruction projects of buildings. In: Built Environment Project and Asset Management 7 (2), S. 212-226. DOI: 10.1108/BEPAM-11-2016-0075.
- Hübner, Felix; Hünlich, Tobias; Frost, Florian; Volk, Rebekka; Schultmann, Frank (2017b): Analyse des internationalen Marktes für den Rückbau kerntechnischer Anlagen : Stand und Ausblick. Working Paper in: Series in Production and Energy, Nr. 25, DOI(KIT): 10.5445/IR/1000076792.
- Hübner, Felix; von Grone, Georg; Schultmann, Frank (2017c): Technologien zur Zerlegung und zur Dekontamination von kerntechnischen Anlagen. Working Paper in: Series in Production and Energy, Nr. 18, DOI(KIT): 10.5445/IR/1000067419.
- Hübner, Felix; Jung, Jennifer Jana; Schultmann, Frank (2017d): Gefahren ionisierender Strahlung für Mensch und Umwelt in Bezug auf kerntechnische Anlagen. Working Paper in: Series in Production and Energy, Nr. 19, DOI(KIT): 10.5445/IR/1000068030.
- Hübner, Felix; Schellenbaum, Uli; Stürck, Christian; Gerhards, Patrick; Schultmann, Frank (2017e): Evaluation von Schedulingproblemen für die Projektplanung von Großprojekten am Beispiel des kerntechnischen Rückbaus. Working Paper in: Series in Production and Energy, Nr. 22, DOI(KIT): 10.5445/IR/1000069932.

- Huger, Helmut; Woodcock, Richard (2016): Nuclear Power Plants: Safe and Efficient Decommissioning. In: ATW - Internationale Zeitschrift für Kernenergie 61 (2), S. 124-128.
- Huth, Michael; Romeike, Frank (2016): Risikomanagement in der Logistik. Konzepte - Instrumente - Anwendungsbeispiele. 1. Aufl. 2016. Wiesbaden: Gabler.
- IAEA – International Atomic Energy Agency (2018a): PRIS – Power Reactor Information System. Online im Internet: URL
<<https://pris.iaea.org/PRIS/home.aspx>> (Stand: 30.08.2018, Abfrage am: 31.08.2018).
- IAEA – International Atomic Energy Agency (2018b): Research Reactors. Online im Internet: URL
<<http://nucleus.iaea.org/RRDB/RR/ReactorSearch.aspx?filter=0>> (Abfrage am: 31.08.2018).
- IAEA – International Atomic Energy Agency (2016): Managing the unexpected in decommissioning. Technical Report. IAEA Nuclear Energy Series No. NW-T-2.8. Vienna: IAEA.
- IAEA – International Atomic Energy Agency (2014): Safety Standards: Decommissioning of facilities. General safety requirements No. GSR pt. 6. Vienna: International Atomic Energy Agency.
- IAEA – International Atomic Energy Agency (2013): Cost estimation for research reactor decommissioning. IAEA Nuclear Energy Series No. NW-T-2.4.
- IAEA – International Atomic Energy Agency (2011a): Policies and strategies for the decommissioning of nuclear and radiological facilities. IAEA Nuclear Energy Series No. NW-G-2.1.

- IAEA – International Atomic Energy Agency (2011b): Selection and Use of Performance Indicators in Decommissioning. IAEA Nuclear Energy Series No. NW-T-2.1.
- IAEA – International Atomic Energy Agency (2009): Classification of radioactive waste - General safety guide. Vienna: International Atomic Energy Agency, Safety Standards Series No. GSG-1.
- IAEA – International Atomic Energy Agency (2007): IAEA Safety Glossary, Terminology Used in Nuclear Safety and Radiation Protection, 2007 Edition. Wien: International Atomic Energy Agency.
- IAEA – International Atomic Energy Agency (2005): Selection of decommissioning strategies. Issues and factors, report by an expert group. IAEA-TECDOC-1478. Wien: International Atomic Energy Agency.
- IAEA – International Atomic Energy Agency (2004): Planning, managing and organizing the decommissioning of nuclear facilities. Lessons learned. IAEA-TECDOC-1394. Wien: International Atomic Energy Agency.
- IAEA – International Atomic Energy Agency (2001): Methods for the minimization of radioactive waste from decontamination and decommissioning of nuclear facilities. Vienna: International Atomic Energy Agency (Technical Reports Series, no. 401).
- IAEA – International Atomic Energy Agency (1999): State of the art technology for decontamination and dismantling of nuclear facilities. Vienna: International Atomic Energy Agency, Technical Reports Series No. 389.
- IAEA – International Atomic Energy Agency (1998): Radiological characterization of shut down nuclear reactors for decommissioning purposes. Vienna: International Atomic Energy Agency (no. 395).

IEA – International Energy Agency (2014): World Energy Outlook 2014.

Iguchi, Yukihiro; Kanehira, Yoshiki; Tachibana, Mitsuo; Johnsen, Terje (2004): Development of Decommissioning Engineering Support System (DEXUS) of the Fugen Nuclear Power Station. In: Journal of Nuclear Science and Technology 41 (3), S. 367–375. DOI: 10.1080/18811248.2004.9715497.

ISO 21500 (2012): Guidance on project management.

Jarosch, Helmut (2016): Grundkurs Datenbankentwurf. Eine beispielorientierte Einführung für Studierende und Praktiker. 4., überarbeitete und aktualisierte Auflage. Wiesbaden: Springer Vieweg.

Jeong, Kwan-Seong; Choi, Byung-Seon; Moon, Jei-Kwon; Hyun, Dong-Jun; Lee, Jong-Hwan; Kim, Geun-Ho et al. (2014): An evaluation on alternative cutting technologies for decommissioning of the components in a NPP. In: Annals of Nuclear Energy 70, S. 44–47. DOI: 10.1016/j.anucene.2014.02.024.

Johnson, David (1997): The triangular distribution as a proxy for the beta distribution in risk analysis. In: Journal of the Royal Statistical Society: Series D (The Statistician) 46 (3), S. 387–398. DOI: 10.1111/1467-9884.00091.

Jung, Thomas (2003): Der Risikobegriff in Wissenschaft und Gesellschaft. In: Bundesgesundheitsblatt - Gesundheitsforschung - Gesundheitsschutz 46 (7), S. 542–548. DOI: 10.1007/s00103-003-0636-z.

Kauffmann, Günter Werner; Sauer, Rolf; Weber, Wolfgang (2011): Radiologie. Bildgebende Verfahren, Strahlentherapie, Nuklearmedizin und Strahlenschutz. 4., völlig überarb. Aufl. München: Elsevier, Urban & Fischer.

- Kaulard, Jörg; Brendebach, Boris; Strub, Erik (2010): Strahlenschutzaspekte gängiger Abbau- und Dekontaminationstechniken. Informationen und Erfahrungen aus der Stilllegung kerntechnischer Anlagen. Köln [u. a.]: Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) (270).
- Keefer, Donald L.; Bodily, Samuel E. (1983): Three-Point Approximations for Continuous Random Variables. In: *Management Science* 29 (5), S. 595–609. DOI: 10.1287/mnsc.29.5.595.
- Keefer, Donald L.; Verdini, William A. (1993): Better Estimation of PERT Activity Time Parameters. In: *Management Science* 39 (9), S. 1086-1091. DOI: 10.1287/mnsc.39.9.1086.
- Kelley, James E.; Walker, Morgan R. (1959): Critical-Path Planning and Scheduling. In: *Proceedings of the eastern joint computer conference*, S. 160-173. DOI: 10.1145/1460299.1460318.
- Kerzner, Harold (2013): *Project management. A systems approach to planning, scheduling, and controlling*. 11. Auflage.
- Keynes, John Maynard (1936): *The general theory of employment, interest and money*. London: Palgrave Macmillan UK.
- Khemakhem, Mohamed Ali; Chtourou, Hédi (2013): Efficient robustness measures for the resource-constrained project scheduling problem. In: *International Journal of Industrial and Systems Engineering* 14 (2), S. 245. DOI: 10.1504/IJISE.2013.053738.
- Kiefer, Jürgen (2012): *Strahlen und Gesundheit. Nutzen und Risiken*: Wiley-VCH.

- Kinnunen, Petri (2008): ANTIOXI - Decontamination techniques for activity removal in nuclear environments. Research Report NO VTT-R-00299-08 of the project FP6-036367. Online im Internet: URL <<http://www.vtt.fi/inf/julkaisut/muut/2008/VTT-R-00299-08.pdf>> (Stand: 12.03.2008, Abfrage am: 21.12.2016).
- KIT - Universität des Landes Baden-Württemberg und nationales Forschungszentrum in der Helmholtz-Gemeinschaft (2014): BMBF-Stilllegungsprojekte und BMBF geförderte FuE zu „Stilllegung/Rückbau kerntechnischer Anlagen“, Berichtszeitraum: 1. Juli - 31. Dezember 2013. PTE-S Nr. 27. Online im Internet: URL <https://www.ptka.kit.edu/ptka-alt/downloads/ptka-wte-e/PTE_S-FB27.pdf> (Stand: April 2014, Abfrage am: 31.08.2018).
- KIT - Universität des Landes Baden-Württemberg und nationales Forschungszentrum in der Helmholtz-Gemeinschaft (2012): BMBF-Stilllegungsprojekte und BMBF geförderte FuE zu „Stilllegung/Rückbau kerntechnischer Anlagen“, Berichtszeitraum: 1. Juli - 31. Dezember 2011. PTE-S Nr. 23. Online im Internet: URL <<https://manualzz.com/doc/4335832/stilllegung-r%C3%BCckbau-kerntechnischer-anlagen---ptka>> (Stand: März 2012, Abfrage am: 08.05.2018).
- 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.
- Knight, Frank Hyneman (1921): Risk, uncertainty and profit. Boston, MA: Houghton Mifflin Company (1921). Online im Internet: URL <<http://hdl.handle.net/2027/uc2.ark:/13960/t6c24wq3p>> (Abfrage am: 01.03.2018).

- Kobyłański, Przemysław; Kuchta, Dorota (2007): A note on the paper by M. A. Al-Fawzan and M. Haouari about a bi-objective problem for robust resource-constrained project scheduling. In: International Journal of Production Economics 107 (2), S. 496–501.
DOI: 10.1016/j.ijpe.2006.07.012.
- Koelzer, Winfried (2015): Lexikon zur Kernenergie 2015. Ausgabe Juli 2015. Karlsruhe: KIT Scientific Publishing.
- Kolisch, Rainer (2015): Shifts, Types, and Generation Schemes for Project Schedules. In: Schwindt, Christoph; Zimmermann, Jürgen (Hrsg.): Handbook on Project Management and Scheduling Vol.1. Heidelberg, New York, NY [u. a.]: Springer, S. 3–16.
- Kolisch, Rainer; Padman, Rema (2001): An integrated survey of deterministic project scheduling. In: Omega 29 (3), S. 249–272.
DOI: 10.1016/S0305-0483(00)00046-3.
- Kolisch, Rainer (1995): Project scheduling under resource constraints. Efficient heuristics for several problem classes. Heidelberg: Physica-Verlag.
- Korth, D. (1996): Abbruch oder Rückbau?. Baustoff-Recycling und Deponietechnik, 5, 22-23.
- Kostenverordnung zum Atomgesetz, kurz AtKostV.
- Kostka, Claudia; Mönch, Annette (2009): Change Management: 7 Methoden für die Gestaltung von Veränderungsprozessen. 4. Aufl. München: Hanser (Pocket-Power, 027).

- Kourmpanis, Basilis; Papadopoulos, Achilleas; Moustakas, Konstantinos; Kourmoussis, Fotis; Stylianou, Marinos; Loizidou, Maria (2008a): An integrated approach for the management of demolition waste in Cyprus. In: *Waste Management & Research* 26 (6), S. 573–581.
DOI: 10.1177/0734242X08091554.
- Kourmpanis, Basilis; Papadopoulos, Achilleas; Moustakas, Konstantinos; Stylianou, Marinos; Haralambous, Katherine J.; Loizidou, Maria (2008b): Preliminary study for the management of construction and demolition waste. In: *Waste Management & Research* 26 (3), S. 267-275. DOI: 10.1177/0734242X07083344.
- Krahmann, Elke (2011): Beck and beyond: selling security in the world risk society. In: *Rev. Int. Stud.* 37 (01), S. 349–372.
DOI: 10.1017/S0260210510000264.
- Kreter, Stefan; Schutt, Andreas; Stuckey, Peter J.; Zimmermann, Jürgen (2018): Mixed-integer linear programming and constraint programming formulations for solving resource availability cost problems. In: *European Journal of Operational Research* 266 (2), S. 472-486. DOI: 10.1016/j.ejor.2017.10.014.
- Krieger, Hanno (2013): *Strahlungsquellen für Technik und Medizin. 2., überarb. u. erw. Aufl.* Wiesbaden: Springer Fachmedien.
- Kröger, Wolfgang; Chakraborty, Sabyasachi (1989): *Tschernobyl und weltweite Konsequenzen.* Köln: TÜV Rheinland.
- Kuchta, Dorota (2000): Use of fuzzy numbers in project risk (criticality) assessment. In: *International Journal of Project Management* 19 (5), S. 305-310. DOI: 10.1016/S0263-7863(00)00022-3.

- Kühlen, Anna (2017): *Techno-Economic and Environmentally Conscious Deconstruction Project Planning and Decision Support (TEE-D-Plan)*. Dissertation, Karlsruher Institut für Technologie (KIT), 2017.
- Küppers, Christoph (2012): *Radioaktivität – Strahlung und ihre Folgen für den Menschen*. In: Neles, Julia Mareike; Pistner, Christoph (Hrsg.) (2012): *Kernenergie – Eine Technik für die Zukunft?* Berlin: Springer Vieweg (Technik im Fokus).
- Lamarsh, John R.; Baratta, Anthony John (2001): *Introduction to nuclear engineering*. 3rd ed. Upper Saddle River, N.J.: Prentice Hall (Addison-Wesley series in nuclear science and engineering).
- Lamas, Patricio; Demeulemeester, Erik (2016): *A purely proactive scheduling procedure for the resource-constrained project scheduling problem with stochastic activity durations*. In: *Journal of Scheduling* 19 (4), S. 409–428. DOI: 10.1007/s10951-015-0423-3.
- Lambrechts, Olivier; Demeulemeester, Erik; Herroelen, Willy (2008): *A tabu search procedure for developing robust predictive project schedules*. In: *International Journal of Production Economics* 111 (2), S. 493–508. DOI: 10.1016/j.ijpe.2007.02.003.
- Lang, Stefan M.; Lockemann, Peter C. (1995): *Datenbankeinsatz*. Berlin, New York: Springer-Verlag.
- Laraia, Michele (2012): *Introduction to nuclear decommissioning: definitions and history*. In: Laraia, Michele (Hrsg.): *Nuclear decommissioning. Planning, execution and international experience*. Philadelphia, Pa: Woodhead Publishing Series in Energy (Nummer 36), S. 1-10.

- Lau, Amy Hing-Ling; Lau, Hon-Shiang; Zhang, Yue. (1996): A simple and logical alternative for making PERT time estimates. In: IIE Transactions 28 (3), S. 183–192. DOI: 10.1080/07408179608966265.
- Laufs, Paul (2013): Reaktorsicherheit für Leistungskernkraftwerke. Die Entwicklung im politischen und technischen Umfeld der Bundesrepublik Deutschland. Berlin: Springer Vieweg.
- Laux, Helmut; Gillenkirch, Robert M.; Schenk-Mathes, Heike Yasmin (2014): Entscheidungstheorie. 9., vollst. überarb. Aufl. 2014. Berlin, Heidelberg: Springer Gabler (Springer-Lehrbuch).
- Le Pape, C. (1991): Constraint propagation in planning and scheduling. Technical report, CIFE Technical Report, Robotics Laboratory, Department of Computer Science, Stanford University.
- Lee, E.S.; Li, R.-J. (1988): Comparison of fuzzy numbers based on the probability measure of fuzzy events. In: Computers and Mathematics with Applications 15 (10), S. 887–896.
- Leus, Roel; Herroelen, Willy (2004): Stability and resource allocation in project planning. In: IIE Transactions 36 (7), S. 667–682. DOI: 10.1080/07408170490447348.
- LfU Landesanstalt für Umweltschutz Baden-Württemberg (Hrsg.) (2001): Abbruch von Wohn- und Verwaltungsgebäuden, Handlungshilfe. Bearbeitung durch Rentz, Otto, Seemann, Axel und Schultmann, Frank, Deutsch-Französisches Institut für Umweltforschung (DFIU), Universität Karlsruhe (TH), Kreislaufwirtschaft 17, Karlsruhe, 19 S.
- Liu, Chunlu; Lyle, Benjamin; Langston, Craig (2003): Estimating Demolition Costs for Single Residential Buildings. In: AJCEB 3 (2), S. 33. DOI: 10.5130/ajceb.v3i2.2917.

- Liu, Chunlu; Pun, Sung-Kin; Langston, Craig (2005): A preliminary study on building demolition engineering and management. In: World Transactions on Engineering and Technology Education, 4 (2), S. 201-207.
- Lloyd, W.R.; Sheaffer, Michael K.; Sutcliffe, William G. (1994): Dose rate estimates from irradiated light-water-reactor fuel assemblies in air. Online im Internet: URL https://inis.iaea.org/search/search.aspx?orig_q=RN:25047630 (Stand: Januar 1994, Abfrage am: 19.02.2018).
- Loeb, Andreas (2015): Experiences in the Dismantling of the Pressure Vessels. Proceedings: International Conference on Nuclear Decommissioning (ICOND), 16.-19.11.2015 in Bonn.
- Lootsma, Freerk A. (1989): Stochastic and fuzzy PERT. In: European Journal of Operational Research 43 (1989) 174-183. DOI: 10.1016/0377-2217(89)90211-7.
- Lootsma, Freerk A. (1966): Network planning with stochastic activity durations, an evaluation of PERT. In: Statistica Neerlandica 20, 43-69. DOI: 10.1111/j.1467-9574.1966.tb00492.x.
- López-Ibáñez, Manuel; Dubois-Lacoste, Jérémie; Pérez Cáceres, Leslie; Birattari, Mauro; Stützle, Thomas (2016): The irace package: Iterated racing for automatic algorithm configuration. In: Operations Research Perspectives 3, S. 43–58. DOI: 10.1016/j.orp.2016.09.002.
- Love, Peter E.D.; Sing, Chun-Pung; Wang, Xiangyu; Irani, Zahir; Thwala, Didibhuku W. (2014): Overruns in transportation infrastructure projects. In: Structure and Infrastructure Engineering 10 (2), S. 141-159. DOI: 10.1080/15732479.2012.715173.

- Lund, Ingemar (2003): Decommissioning of Nuclear Power Plants: Policies, Strategies and Costs. In: NEA - Nuclear Energy Agency (Hrsg.): Strategy Selection for the Decommissioning of Nuclear Facilities. Seminar Proceedings. Tarragona, Spain, 1-4 September (NEA No. 5300), S. 67-70.
- MacCrimmon, Kenneth R.; Ryavec, Charles A. (1964): An Analytical Study of the PERT Assumptions. In: Operations Research 12 (1), S. 16–37.
DOI: 10.1287/opre.12.1.16.
- Malcolm, Donald G.; Roseboom, J. H.; Clark, C. E.; Fazar, W. (1959): Application of a Technique for Research and Development Program Evaluation. In: Operations Research 7 (5), S. 646–669.
DOI: 10.1287/opre.7.5.646.
- Martí, Rafael; Resende, Mauricio G.C.; Ribeiro, Celso C. (2013): Multi-start methods for combinatorial optimization. In: European Journal of Operational Research 226 (1), S. 1–8.
DOI: 10.1016/j.ejor.2012.10.012.
- Martin, J.J. (1965): Distribution of the time through a directed, acyclic network. In: Operations Research 13 (1), S. 46-66.
DOI: 10.1287/opre.13.1.46.
- Mason, John (2015): Measurement Technologies for Radioactive Decommissioning Waste. Proceedings International Conference on Nuclear Decommissioning (ICOND), 16.-19.11.2015, Bonn.
- Mavrotas, George; Pechak, Olena; Siskos, Eleftherios; Doukas, Haris; Psarras, John (2015): Robustness analysis in Multi-Objective Mathematical Programming using Monte Carlo simulation. In: European Journal of Operational Research 240 (1), S. 193–201.
DOI: 10.1016/j.ejor.2014.06.039.

- Mayer, Thomas-Ludwig; Gleich, Ronald; Wald, Andreas; Wagner, Reinhard (2008): Advanced Project Management. In: Mayer, Thomas-Ludwig; Gleich, Ronald; Wald, Andreas; Wagner, Reinhard (Hrsg.) (2008): Advanced project Management. Herausforderungen - Praxiserfahrungen - Perspektiven. S. 1-12, Berlin, Münster: Lit Verlag (Advanced project Management, Bd. 1).
- McCombs, Edward L.; Elam, Matthew E.; Pratt, David B. (2009): Estimating Task Duration in PERT using the Weibull Probability Distribution. In: Journal of Modern Applied Statistical Methods, Vol. 8, Iss. 1, Article 26. DOI: 10.22237/jmasm/1241137500.
- Meier, Andreas; Kaufmann, Michael (2016): SQL- & NoSQL-datenbanken. 8., überarbeitete und erweiterte Auflage. Berlin, Heidelberg: Springer Vieweg.
- Meyer, Helga; Reher, Heinz-Josef (2016): Projektmanagement: Von der Definition über die Projektplanung zum erfolgreichen Abschluss. Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden.
- Michal, V. (2012): Remote operation and robotics technologies in nuclear decommissioning projects. In: Laraia, Michele (Hrsg.): Nuclear decommissioning. Planning, execution and international experience. Philadelphia, Pa: Woodhead Publishing Series in Energy (Nummer 36), S. 346–374.
- Mika, Marek; Waligóra, Grzegorz; Węglarz, Jan (2015): Overview and State of the Art. In: Schwindt, Christoph; Zimmermann, Jürgen (Hrsg.): 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.
- Mildner, Stormy-Annika; Boeckelmann, Lukas (2011): Unsicherheit, Ungewissheit, Risiko: die aktuelle wissenschaftliche Diskussion über die Bestimmung von Risiken. In: *Stiftung Wissenschaft und Politik -SWP- Deutsches Institut für Internationale Politik und Sicherheit* (Ed.), *SWP-Zeitschriftenschau* 02/2011. Online im Internet: URL <<http://www.ssoar.info/ssoar/handle/document/36681>> (Stand: 2011, Abfrage am: 21.06.2017).
- Ministerium für Umwelt, Klima und Energiewirtschaft Baden-Württemberg (2007): Leitfaden zur Freigabe nach § 29 StrlSchV. Online im Internet: URL <https://um.baden-wuerttemberg.de/fileadmin/redaktion/m-um/intern/Dateien/Dokumente/3_Umwelt/Kernenergie/Freigaben_StrlSCHVO/Leitfaden_zur_Freigabe.pdf> (Stand: 01.08.2007, Abfrage am: 02.12.2016).
- Moder, Joseph J.; Rodgers, E. G. (1968): Judgment Estimates of the Moments of Pert Type Distributions. In: *Management Science* 15 (2), S. B-76–B-83. DOI: 10.1287/mnsc.15.2.B76.
- Moder, Joseph J.; Phillips, Cecil R.; Davis, Edward Willmore (1983): *Project management with CPM, PERT, and precedence diagramming*. 3rd ed. New York: Van Nostrand Reinhold.
- 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.

- Möhring, Rolf H.; Radermacher, Franz-Josef; Weiss, G. (1985): Stochastic scheduling problems II-set strategies. In: Zeitschrift für Operations Research 29 (3), S. 65–104. DOI: 10.1007/BF01918198.
- Morovatdar, Reza; Aghaie, Abdollah; Yakhchali, Simak Haji (2011). Fuzzy Network Analysis for Projects with High Level of Risks – Uncertainty in Time and Structure. In: International Journal of Industrial Engineering 22 (1), S. 73-82.
- Mortimer, Charles E.; Beck, Johannes; Müller, Ulrich (2015): Chemie. Das Basiswissen der Chemie. 12., korr. und aktualisierte Aufl. Stuttgart [u. a.]: Thieme.
- Mosler, Karl C.; Schmid, Friedrich (2008): Wahrscheinlichkeitsrechnung und schliessende Statistik. 3., verb. Aufl. Berlin, Heidelberg: Springer.
- Mousavi, Shabnam; Gigerenzer, Gerd (2014): Risk, uncertainty, and heuristics. In: Journal of Business Research 67 (8), S. 1671–1678. DOI: 10.1016/j.jbusres.2014.02.013.
- Muller, Laurent Flindt (2011): An Adaptive Large Neighborhood Search Algorithm for the Multi-mode Resource-Constrained Project Scheduling Problem. Technical Report, Report 3.2011, Department of Management Engineering, Technical University of Denmark.
- Munns, Andy K.; Bjeirmi, Bassam F. (1996): The role of project management in achieving project success. In: International Journal of Project Management 14 (2), S. 81–87. DOI: 10.1016/0263-7863(95)00057-7.

- National Research Council of the National Academies (2006): Health risks from exposure to low levels of ionizing radiation: BEIR VII, Phase 2: Committee to Assess Health Risks from Exposure to Low Levels of Ionizing Radiation, Board on Radiation Effects Research, Division on Earth and Life Studies. Online im Internet: URL <<https://www.nap.edu/read/11340/chapter/1>> (Stand: 2006, Abfrage am: 11.10.2016).
- NDR (2017): Elbphilharmonie: Die wichtigsten Etappen. Online im Internet: URL <http://www.ndr.de/kultur/elbphilharmonie/elbphilchronologie100_page-1.html> (Stand: 12.01.2017, Abfrage am: 12.04.2017).
- NEA – Nuclear Energy Agency (2015): Technology Roadmap – Nuclear Energy. Online im Internet: URL <<https://www.iea.org/media/freepublications/technologyroadmaps/TechnologyRoadmapNuclearEnergy.pdf>> (Stand: 2015, Abfrage am: 09.02.2017).
- NEA – Nuclear Energy Agency (2011): Decontamination and Dismantling of Radioactive Concrete Structures – A Report by the NEA Co-operative programme on decommissioning and demolition of concrete structures. Online im Internet: URL <<https://www.oecd-nea.org/rwm/docs/2011/rwm-r2011-1.pdf>> (Stand: 20.09.2011, Abfrage am: 15.12.2016).
- NEA – Nuclear Energy Agency (2006): Kernenergie heute. Paris: Organisation for Economic Cooperation and Development (OECD). Online im Internet: URL <<https://www.oecd-nea.org/ndd/pubs/2006/6214-Kernenergie-heute.pdf>> (Abfrage am: 28.08.2018).

- NEA – Nuclear Energy Agency (2003): Decommissioning Nuclear Power Plants: Policies, Strategies and Costs. Online im Internet: URL <<https://www.oecd-nea.org/ndd/pubs/2003/3590-decommissioning-npps.pdf>> (Abfrage am: 28.08.2018).
- NEA – Nuclear Energy Agency (1999): Decontamination Techniques Used in Decommissioning Activities – A Report by the NEA Task Group on Decontamination. Online im Internet: URL <<https://www.oecd-nea.org/rwm/reports/1999/decontec.pdf>> (Stand: 1999, Abfrage am: 12.12.2016).
- Needham, Jim (2015): Decontamination to Achieve Free Release Levels Using Composite Abrasive Media. Proceedings International Conference on Nuclear Decommissioning (ICOND), 16.-19.11.2015, Bonn.
- Neles, Julia Mareike (2012): Rückblick – Von den Anfängen bis heute. In: Neles, Julia Mareike; Pistner, Christoph (Hrsg.) (2012): Kernenergie – Eine Technik für die Zukunft? S. 1-19. Berlin: Springer Vieweg (Technik im Fokus).
- Neles, Julia Mareike; Pistner, Christoph (Hrsg.) (2012): Kernenergie – Eine Technik für die Zukunft? S. 1-19. Berlin: Springer Vieweg (Technik im Fokus).
- Neumann, Klaus (1998): Scheduling of Projects with Stochastic Evolution Structure. Report WIOR-518, Technical Report der Universität Karlsruhe.
- Neumann, Klaus (1990): Stochastic project networks. Temporal Analysis, Scheduling and Cost Minimization. Lecture notes in economics and mathematical systems, 344, Berlin: Springer-Verlag.

- Neumann, Klaus (1981): GERT networks with several sources. Institut für Wirtschaftstheorie und Operations Research, Universität Karlsruhe, 86 S.
- Neumann, Klaus; Morlock, Martin (1993): Operations Research. Mit 111 Tabellen. München [u. a.]: Hanser.
- Neumann, Klaus; Schwindt, Christoph (1999): Project scheduling with inventory constraints. Report WIOR-572, Technical Report der Universität Karlsruhe.
- 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).
- Neumann, Klaus; Steinhardt, Ulrich (1979): GERT networks and the time-oriented evaluation of projects. In: Lecture Notes in Economics and Mathematical Systems. Vol. 172, Berlin: Springer Verlag.
- Neumann, Klaus; Zimmermann, Jürgen (1998): Heuristic procedures for parallel-machine scheduling problems with stochastic precedence constraints. In: Annals of Operations Research, 1998, Vol. 83, S. 115-136. DOI: 10.1023/A:1018951828603.
- Newbold, Robert C. (1998): Project management in the fast lane. Applying the theory of constraints: CRC Press.
- Nicolai, Wolfram (1979): Zeit- und Kostenanalyse von Projekten mit Hilfe von Netzwerken und zugeordneten stochastischen Prozessen. Dissertation, Universität Fridericiana Karlsruhe (TH), Fachbereich Wirtschaftswissenschaften, 1979, 87 S.

- Noll, Patrick (2009): Statistisches Matching mit Fuzzy Logic. 1. Aufl., Vieweg+Teubner Research Fachverlag, Wiesbaden.
- Noynaert, L. (2012): Decontamination processes and technologies in nuclear decommissioning projects. In: Laraia, Michele (Hrsg.): Nuclear decommissioning. Planning, execution and international experience. Philadelphia, Pa: Woodhead Publishing Series in Energy (Nummer 36), S. 319–345.
- Ó Conchúir, Deasún (2012): Overview of the PMBOK® Guide. Paving the Way for PMP® Certification. 3. Auflage. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg.
- Odendahl, Kerstin (2013): Internationales und europäisches Atomrecht. Die militärische und friedliche Nutzung der Atomenergie aus Sicht des Völker- und Europarechts. 1., neue Ausg. Berlin: Duncker & Humblot (185).
- OECD – Organisation for Economic Co-operation and Development (2016): Costs of Decommissioning Nuclear Power Plants. Nuclear Energy Agency Organisation for economic co-operation and development. NEA No. 7201. Paris: OECD Publishing.
- OECD – Organisation for Economic Co-operation and Development (2012): International Structure for Decommissioning Costing (ISDC) of Nuclear Installations. NEA No. 7088. Paris: OECD Publishing.
- Okashah, Lobna A.; Goldwater, Paul M. (1994): Unknown unknowns: modeling unanticipated events. In: Proceedings of Winter Simulation Conference S. 689–694. Lake Buena Vista, FL, USA. Online im Internet: URL <<https://ieeexplore.ieee.org/document/717413/>> (Stand: 06.08.2002, Abfrage am: 30.05.2018). DOI: 10.1109/WSC.1994.717413.

- Pariser Übereinkommen (2004): Übereinkommen vom 29. Juli 1960 über die Haftung gegenüber dritten auf dem Gebiet der Kernenergie in der Fassung des Zusatzprotokolls vom 28. Januar 1964, des Protokolls vom 16. November 1982 und des Protokolls vom 12. Februar 2004.
- PMI – Project Management Institute (2013): A Guide to the Project Management Body of Knowledge (PMBOK® Guide). 5. Auflage. Pennsylvania: Project Management Institute, Inc.
- PMI – Project Management Institute (2014): Standards Overview. Online im Internet: URL <<http://www.pmi.org/PMBOK-Guide-and-Standards/Standards-Overview.aspx>> (Stand: 2014, Abfrage am: 12.08.2014).
- Premachandra, I. M. (2001): An approximation of the activity duration distribution in PERT. In: Computers & Operations Research 28 (5), S. 443–452. DOI: 10.1016/S0305-0548(99)00129-X.
- Pritsker, A. Alan B. und Happ, W. W. (1966): GERT: Graphical evaluation and review technique, Part I. Fundamentals, Journal of Industrial Engineering 17, S. 267-274.
- Ramani, Tanmay und Kannan, Ramesh (2014): Scheduling of industrialized construction projects using Graphical Evaluation and Review Technique (GERT). In: Proceedings of second International Conference on Advances in Industrial Engineering Applications (ICAIEA 2014), 6. - 8.1.2014, Chennai (Indien).
- 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.

- Rasconi, Riccardo; Cesta, Amedeo; Policella, Nicola (2010): Validating scheduling approaches against executional uncertainty. In: Journal of Intelligent Manufacturing 21 (1), S. 49–64.
DOI: 10.1007/s10845-008-0172-7.
- Ratschinski, Wladimir (1979): Isotope und Strahlenquellen in der Landwirtschaft. Berlin : VEB Deutscher Landwirtschaftsverlag.
- rbb (2018): BER-Chronologie ab 2012 - Über 2.000 Tage in der Warteschleife. Online im Internet: URL
<<https://www.rbb24.de/politik/Flughafen-BER/BER-Aktuelles/hintergrund/berlin-brandenburg-ber-chronologie-teil-2-ab-2012.html>> (Stand: 26.01.2018, Abfrage am: 04.07.2018).
- Regnier, Eva (2005): Activity Completion Times in PERT and Scheduling Network Simulation, Part II. In: DRMI Newsletter (12) 2005. Online im Internet: URL
<<http://edocs.nps.edu/npspubs/institutional/newsletters/DRMI/2005/Apr05.pdf>> (Stand: 08.04.2005, Abfrage am: 16.06.2017).
- Reiß, Michael (1995): Projektmanagement. In: Hans Corsten; Michael Reiss (Hrsg.): Handbuch Unternehmensführung. Konzepte-Instrumente-Schnittstellen. Wiesbaden: Gabler, S. 447-457.
- Rentz, Otto (1998): Selektiver Gebäuderückbau und konventioneller Abbruch. Technisch-wirtschaftliche Analyse eines Pilotprojektes. Landsberg: Ecomed (AbfallPraxis).
- Rentz, Otto; Ruch, Marc; Nicolai, Marcus; Spengler, Thomas; Schultmann, Frank (1994): Selektiver Rückbau und Recycling von Gebäuden. Dargestellt am Beispiel des Hotel Post in Dobel, Landkreis Calw. 2. Aufl. Landsberg: ecomed (Umweltforschung in Baden-Württemberg).

- Rieck, Julia; Zimmermann, Jürgen (2015): Exact Methods for Resource Leveling Problems. In: Schwindt, Christoph; Zimmermann, Jürgen (Hrsg.): 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.
- Rodemann, Hans Peter (2000): Umweltstrahlung. Grundlagen, biologische Fakten, potentielle Risiken. 1. Aufl., [1. Dr.]. Stuttgart, Düsseldorf, Leipzig: Klett (Naturwissenschaftliche Reihe).
- Ropke, Stefan; Pisinger, David (2006): An Adaptive Large Neighborhood Search Heuristic for the Pickup and Delivery Problem with Time Windows. In: Transportation Science 40 (4), S. 455–472.
DOI: 10.1287/trsc.1050.0135.
- Rosen, Alex (2012): Effects of the Fukushima nuclear meltdowns on environment and health. Online im Internet: URL <<http://www.ippnw.de/commonFiles/pdfs/Atomenergie/FukushimaBackgroundPaper.pdf>> (Stand: 2012, Abfrage am: 11.10.2016).
- Rosenhead, Jonathan; Elton, Martin; Gupta, Shiv K. (1972): Robustness and Optimality as Criteria for Strategic Decisions. In: Operational Research Quarterly (1970-1977) 23 (4), S. 413. DOI: 10.2307/3007957.
- Rostami, Salim; Creemers, Stefan; Leus, Roel (2017): New strategies for stochastic resource-constrained project scheduling. In: Journal of Scheduling 116 (1–2), S. 533. DOI: 10.1007/s10951-016-0505-x.

- Roth, Armin; Dineiro, Victoria Herrera (2008): Integriertes Projekt- und Change-Management: Aus gutem Grund. In: Mayer, Thomas-Ludwig; Gleich, Ronald; Wald, Andreas; Wagner, Reinhard (Hrsg.) (2008): Advanced project Management. Herausforderungen - Praxiserfahrungen - Perspektiven. S. 15-32, Berlin, Münster: Lit Verlag (Advanced project Management, Bd. 1).
- Royce, Winston W. (1987): Managing the development of large software systems. In: ICSE '87 Proceedings of the 9th international conference on Software Engineering, S. 328–338.
- RSK - Reaktorsicherheitskommission (2005): Vorschlag für Anforderungen an die Stilllegung im kerntechnischen Regelwerk. In: RSK-STELLUNGNAHME, 15.-16.12.2005 (389. Sitzung), Bonn.
- Russell, A. H. (1970): Cash Flows in Networks. In: Management Science 16 (5), S. 357–373. DOI: 10.1287/mnsc.16.5.357.
- Saake, Gunter; Sattler, Kai-Uwe; Heuer, Andreas (2013): Datenbanken. Konzepte und Sprachen. 5. Aufl. Heidelberg [u. a.]: Mitp.
- Sabuncuoglu, Ihsan; Goren, Selcuk (2009): Hedging production schedules against uncertainty in manufacturing environment with a review of robustness and stability research. In: International Journal of Computer Integrated Manufacturing 22 (2), S. 138–157. DOI: 10.1080/09511920802209033.
- Sadeh, Norman; Otsuka, Shinichi; Schnellbach, Robert (1993): Predictive and Reactive Scheduling with the Micro-Boss Production Scheduling and Control Systems. In: Proceedings of the IJCAI-93 Workshop on Knowledge-based Production Planning, Scheduling, and Control, S. 293-306.

- Salas-Morera, Lorenzo; Arauzo-Azofra, Antonio; García-Hernández, Laura; Palomo-Romero, Juan M.; Hervás-Martínez, César (2013): PpcProject: An educational tool for software project management. In: Computers & Education 69, S. 181–188. DOI: 10.1016/j.compedu.2013.07.018.
- Sauer, Hermann (2002): Relationale Datenbanken. Theorie und Praxis. 5., aktualisierte und erweiterte Auflage. München: Addison-Wesley.
- Saynisch, Manfred; Schelle, Heinz; Schub, Adolf (Hrsg.); Deutsche Gesellschaft für Operations Research/ Arbeitsgruppe Netzplantechnik und Projektmanagement (1979): Projektmanagement – Konzepte, Verfahren, Anwendungen. München, Wien: Oldenbourg.
- Schatteman, Damien; Herroelen, Willy; Van de Vonder, Stijn; Boone, Anton (2008): Methodology for Integrated Risk Management and Proactive Scheduling of Construction Projects. In: Journal of Construction Engineering and Management 134 (11), S. 885-893.
- Schattke, Herbert (2002): Freigabe von radioaktiven Reststoffen, Gebäuden und Gelände, Rechtslage und Verfahren. In: VDI-Gesellschaft Energietechnik (Hrsg.): Stilllegung und Rückbau kerntechnischer Anlagen. Auswirkungen aktueller Regelungen und Randbedingungen ; Tagung Bonn, 10. April 2002. Düsseldorf: VDI-Verl. (VDI-Berichte, 1671), S. 25–38.
- Schirmer, Andreas (1999): Project scheduling with scarce resources. Models, methods, and applications. Hamburg: Kovač (100).
- Schmittem, Marc (2016): Nuclear Decommissioning in Japan. Opportunities for European Companies. EU-Japan Centre for Industrial Cooperation. Online im Internet: URL <http://cdnsite.eu-japan.eu/sites/default/files/publications/docs/2016-03-nuclear-decommissioning-japan-schmittem-min_0.pdf> (Stand: März 2016, Abfrage am: 29.03.2017).

- Schneeweiß, Christoph (1992): Planung. 2 Konzepte der Prozeß- und Modellgestaltung. Berlin, Heidelberg: Springer.
- Schneider, Welf G. (1997): Job shop scheduling with stochastic precedence constraints. Dissertation, Aachen: Shaker Verlag.
- Schneider, G.; Burkart, W. (1998): Gesundheitliche Risiken ionisierender Strahlung. In: Der Radiologe 38 (9), S. 719–725.
DOI: 10.1007/s001170050415.
- Scholl, Armin (2001): Robuste Planung und Optimierung. Grundlagen - Konzepte und Methoden - experimentelle Untersuchungen. Heidelberg: Physica-Verlag.
- Schröder, Marcel; Pocha, Andreas (2015): Abbrucharbeiten. Grundlagen, Planung, Durchführung ; mit 134 Tabellen. 3., aktualisierte und erw. Aufl. Köln: Müller.
- Schröder, Uwe G.; Schröder, Beate S. (2015): Strahlenschutzkurs für Mediziner. 44 Tabellen. 3., unveränd. Aufl. Stuttgart [u. a.]: Thieme.
- Schultmann, Frank (2003a): Projektplanungsmodelle und –methoden für den Rückbau von Bauwerken. In: Gürlebeck, K.; Hempel, L.; Könke, C. (Hrsg.): Proceedings 16th International Conference on the Applications of Computer Science and Mathematics in Architecture and Civil Engineering, Bauhaus University Weimar.
- Schultmann, Frank (2003b): Dealing with uncertainties in (de-)construction management - the contribution of fuzzy scheduling. In: Chini, CIB Report 287.

- Schultmann, Frank (1998): Kreislaufführung von Baustoffen. Stofffluss-basiertes Projektmanagement für die operative Demontage- und Recyclingplanung von Gebäuden. Berlin: Erich Schmidt (Baurecht und Bautechnik, Bd. 10).
- Schultmann, Frank; Rentz, Otto (2003): Fuzzy Scheduling for the Dismantling of Complex Products. In: Leopold-Wildburger, Ulrike; Rendl, Franz; Wäscher, Gerhard (Hrsg.) (2003): Operations Research Proceedings 2002, S. 302-307. Springer, Berlin, Heidelberg. DOI: 10.1007/978-3-642-55537-4_49.
- Schultmann, Frank; Rentz, Otto (2002): Scheduling of deconstruction projects under resource constraints. In: Construction Management and Economics 20 (5), S. 391–401. DOI: 10.1080/01446190210135913.
- Schultmann, Frank; Rentz, Otto (2001): Environment-oriented project scheduling for the dismantling of buildings. In: OR Spektrum 23 (1), S. 51–78. DOI: 10.1007/PL00013345.
- Schultmann, Frank; Rentz, Otto (2000): The state of deconstruction in Germany. In: Kibert, Charles J.; Chini, Abdol R. (Hrsg.) (2000): Overview of deconstruction in selected countries, International Council for Research and Innovation in Building Construction, Task group 39: Deconstruction, University of Florida, Rotterdam, 45-74.
- Schultmann, Frank; Sunke, Nicole (2007a): Energy-oriented deconstruction and recovery planning. In: Building Research & Information 35 (6), S. 602–615. DOI: 10.1080/09613210701431210.
- Schultmann, Frank; Sunke, Nicole (2007b): Sustainable Management of Construction Projects. In: CIB2007-313, S. 2428–2440.

- Schultmann, Frank; Sunke, Nicole (2006): Closed-loop oriented project management in construction: An approach for sustainable construction management. In: Proceedings of the Conference Rethinking Sustainable Construction 2006, Sarasota, USA.
- Schwarze, Jochen (2006): Projektmanagement mit Netzplantechnik. 9. überarb. Aufl., Neue Wirtschaftsbriefe, Berlin.
- Schwindt, Christoph (2005): Resource allocation in project management. Berlin, New York, NY: Springer.
- Schwindt, Christoph (1998): Verfahren zur Lösung des ressourcenbeschränkten Projektdauerminimierungsproblems mit planungsabhängigen Zeitfenstern. Als Ms. gedr. Aachen: Shaker.
- Schwindt, Christoph; Zimmermann, Jürgen (Hrsg.) (2015a): Handbook on project management and scheduling Vol. 1, Springer.
- Schwindt, Christoph; Zimmermann, Jürgen (Hrsg.) (2015b): Handbook on project management and scheduling Vol. 2, Springer.
- Seemann, Axel (2003): Entwicklung integrierter Rückbau- und Recyclingkonzepte für Gebäude. Ein Ansatz zur Kopplung von Demontage, Sortierung und Aufbereitung. Aachen: Shaker.
- Sevaux, Marc; Sörensen, Kenneth (2004): A genetic algorithm for robust schedules in a one-machine environment with ready times and due dates. In: Quarterly Journal of the Belgian, French and Italian Operations Research Societies, July 2004, 2 (2), S. 129-147. DOI: 10.1007/s10288-003-0028-0.
- Severa, Jan; Bár, Jaromír (1991): Handbook of radioactive contamination and decontamination. Amsterdam, New York: Elsevier (47).

- 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.
- Shaw, Paul (1997): A New Local Search Algorithm Providing High Quality Solutions to Vehicle Routing Problems. APES Group, Department of Computer Science, University of Strathclyde, Glasgow, Scotland.
- Skamris, Mette K.; Flyvbjerg, Bent (1997): Inaccuracy of traffic forecasts and cost estimates on large transport projects. In: *Transport Policy* 4 (3), S. 141–146.
- Smith-Daniels, D., Smith-Daniels, V. (1987): Maximizing the net present value of a project subject to materials and capital constraints. In: *Journal of Operations Management* 7 (1-2), S. 33–45.
- Smith, Stephen F. (1995): Reactive scheduling systems. In: *Intelligent Scheduling Systems, Operations Research / Computer Science Interfaces Series*, 1995, 3, S. 155-192.
DOI: 10.1007/978-1-4615-2263-8_7.
- Spengler, Thomas (1998): Bestimmung optimaler Demontagetiefen mit Hilfe der Fuzzy Linearen Optimierung. *Industrielles Stoffstrommanagement - Betriebswirtschaftliche Planung und Steuerung von Stoff- und Energieströmen in Produktionsunternehmen*. zugl. Karlsruhe, Universität, Habilitationsschrift, 1998, technological economics, Erich Schmidt Verlag (ESV), Berlin.
- Spengler, Thomas (1994): Planungsmodelle zur deckungsbeitragsmaximalen Demontage und Verwertung komplexer Verbundprodukte. Dissertation, Univ. Karlsruhe (TH).

- SSK Strahlenschutzkommission (2006): 20 Jahre nach Tschernobyl - Eine Bilanz aus Sicht des Strahlenschutzes: Stellungnahme der Strahlenschutzkommission. Online im Internet: URL <http://www.ssk.de/SharedDocs/Beratungsergebnisse_PDF/2006/20Jahre_Tschernobyl.pdf?__blob=publicationFile> (Stand: 2006, Abfrage am: 11.10.2016).
- Stahl, Thorsten; Strub, Erik (2012): Stilllegung kerntechnischer Anlagen. Köln [u. a.]: Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS).
- Steiner, H. (2012): Dismantling and demolition processes and technologies in nuclear decommissioning. In: Laraia, Michele (Hrsg.): Nuclear decommissioning. Planning, execution and international experience. Philadelphia, Pa: Woodhead Publishing Series in Energy (Nummer 36), S. 293–318.
- Steven, Marion (2008): BWL für Ingenieure. 3., korrigierte und aktualisierte Aufl. München: Oldenbourg.
- Steyn, Herman (2001): An investigation into the fundamentals of critical chain project scheduling. In: International Journal of Project Management 19 (6), S. 363–369.
DOI: 10.1016/S0263-7863(00)00026-0.
- Stolz, Werner (2005): Radioaktivität. Grundlagen - Messung - Anwendungen. 5., überarb. und erw. Aufl. Wiesbaden: Teubner.
- Stork, Frederik (2001): Stochastic resource-constrained project scheduling. Dissertation, TU Berlin.
- Strahlenschutzvorsorgegesetz (StrVG) vom 31. August 2015, BGBl. I 2015, S. 1474.

- Sunke, Nicole (2009): Planning of Construction Projects: A Managerial Approach. Dissertation, Universität Karlsruhe (TH).
- 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).
- Talbot, Patrick (2006): Automated Discovery of Unknown Unknowns. In: Proceeding MILCOM 2006 - 2006 IEEE Military Communications conference S. 1–7. Washington, DC, USA.
DOI: 10.1109/MILCOM.2006.302431. Online im Internet: URL <<https://ieeexplore.ieee.org/document/4086656/>> (Stand: 12.02.2007, Abfrage am: 30.05.2018).
- Talbot, F. Brian (1982): Resource-Constrained Project Scheduling with Time-Resource Tradeoffs: The Nonpreemptive Case. In: Management Science 28 (10), S. 1197–1210.
- Tarjan, Robert (1972): Depth-First Search and Linear Graph Algorithms. In: SIAM Journal on Computing 1 (2), S. 146–160. DOI: 10.1137/0201010.
- Thierfeldt, Stefan; Schartmann, Frank (2012): Stilllegung und Rückbau kerntechnischer Anlagen. Erfahrungen und Perspektiven. 4. Neu bearbeitete Auflage, Brenk Systemplanung GmbH im Auftrag des Bundesministeriums für Bildung und Forschung.
- Thomas, Oliver (2009): Fuzzy Process Engineering. Integration von Unschärfe bei der modellbasierten Gestaltung prozessorientierter Informationssysteme. Wiesbaden: Gabler (nbf, neue betriebswirtschaftliche Forschung, Bd. 368).

- Tsai, Ying-Wei; D. Gemmill, Douglas (1998): Using tabu search to schedule activities of stochastic resource-constrained projects. In: *European Journal of Operational Research* 111 (1), S. 129–141.
DOI: 10.1016/S0377-2217(97)00311-1.
- Ulrich, Hans (1994): Reflexionen über Wandel und Management. In: Gomez, Peter; Hahn, Dietger; Müller-Stewens, Günter; Wunderer, Rolf (Hrsg.): *Unternehmerischer Wandel: Konzepte zur organisatorischen Erneuerung*. Wiesbaden: Gabler Verlag.
- Umweltinformationsgesetz (UIG) vom 27. Oktober 2014, BGBl. I 2014, S. 1643.
- Van de Vonder, Stijn; Demeulemeester, Erik; Herroelen, Willy (2008): Proactive heuristic procedures for robust project scheduling: An experimental analysis. In: *European Journal of Operational Research* 189 (3), S. 723–733. DOI: 10.1016/j.ejor.2006.10.061.
- Van de Vonder, Stijn; Demeulemeester, Erik; Herroelen, Willy (2007): A classification of predictive-reactive project scheduling procedures. In: *Journal of Scheduling* 10 (3), S. 195-207.
DOI: 10.1007/s10951-007-0011-2.
- Van de Vonder, Stijn; Demeulemeester, Erik; Herroelen, Willy; Leus, Roel (2005): The use of buffers in project management: The trade-off between stability and makespan. In: *International Journal of Production Economics* 97 (2), S. 227–240.
DOI: 10.1016/j.ijpe.2004.08.004.
- van Peteghem, Vincent; Vanhoucke, Mario (2015): Heuristic Methods for the Resource Availability Cost Problem. In: Schwindt, Christoph; Zimmermann, Jürgen (Hrsg.): *Handbook on Project Management and Scheduling Vol.1*. Heidelberg, New York, NY [u. a.]: Springer, S. 339-359.

- van Peteghem, Vincent; Vanhoucke, Mario (2014): An experimental investigation of metaheuristics for the multi-mode resource-constrained project scheduling problem on new dataset instances. In: *European Journal of Operational Research* 235 (1), S. 62–72. DOI: 10.1016/j.ejor.2013.10.012.
- Vanhoucke, Mario (2013): *Project Management with Dynamic Scheduling. Baseline Scheduling, Risk Analysis and Project Control*. 2. Auflage. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg.
- Verordnung für die Überprüfung der Zuverlässigkeit zum Schutz gegen Entwendung oder Freisetzung radioaktiver Stoffe nach dem Atomgesetz (Atomrechtliche Zuverlässigkeitsüberprüfungs-Verordnung - AtZüV) vom 22.06.2010, BGBl. I 2010, S. 825.
- Verordnung über das Verfahren bei der Genehmigung von Anlagen nach §7 des Atomgesetzes (Atomrechtliche Verfahrensverordnung - AtVfV) vom 9. Dezember 2006, BGBl. I 2006, S. 2819.
- Verordnung über den Schutz vor Schäden durch ionisierende Strahlen (Strahlenschutzverordnung - StrlSchV) vom 11. Dezember 2014, BGBl. I 2014, S. 2010.
- Verordnung über die Deckungsvorsorge nach dem Atomgesetz (Atomrechtliche Deckungsvorsorge-Verordnung - AtDeckV) vom 1. April 2015, BGBl. I 2015, S. 434.
- Verordnung über Vorausleistungen für die Einrichtung von Anlagen des Bundes zur Sicherstellung und zur Endlagerung radioaktiver Abfälle (Endlagervorausleistungsverordnung - EndlagerVfV) vom 6. Juli 2004, BGBl. I 2004, S. 1476.
- Verwaltungsverfahrensgesetz (VwVfG) vom 25. Juli 2013, BGBl. I 2013, S. 2749.

- Vieira, Guilherme E.; Herrmann, Jeffrey W.; Lin, Edward (2003): Rescheduling Manufacturing Systems: A Framework of Strategies, Policies, and Methods. In: *Journal of Scheduling* 6 (1), S. 39–62. DOI: 10.1023/A:1022235519958.
- Vogt, Hans-Gerrit; Schultz, Heinrich (2011): *Grundzüge des praktischen Strahlenschutzes*. 6., überarbeitete Auflage. München: Hanser Verlag.
- Volk, Rebekka (2017): *Proactive-reactive, robust scheduling and capacity planning of deconstruction projects under uncertainty*. Dissertation, Karlsruher Institut für Technologie (KIT), 2016. Karlsruhe: KIT Scientific Publishing (Produktion und Energie, 20).
- Volkmer, Martin (2007): *Basiswissen zum Thema Kernenergie*. Überarb. Aufl. Berlin: Informationskreis Kernenergie.
- Wallenius, Jyrki; Dyer, James; Fishburn, Peter; Steuer, Ralph; Zionts, Stanley; Deb, Kalyanmoy (2008): Multiple criteria decision making, multi attribute utility theory: recent accomplishments and what lies ahead. In: *Management Science* 54 (7), S. 1336–1349.
- Warth & Klein Grant Thornton (2015): *Gutachterliche Stellungnahme zur Bewertung der Rückstellungen im Kernenergiebereich*. Online im Internet: URL <<https://www.bmwi.de/Redaktion/DE/Downloads/S-T/stresstestkernenergie.html>> (Stand: 09.10.2015, Abfrage am: 31.08.2018).
- Wasmuth, Pieter (2015): *Wie Unternehmen den Rückbau bewältigen können*. Vortrag im Rahmen des Experten-Roundtables AKW-Rückbau, 6.-7.10.2015 in Köln.

- Węglarz, Jan; Józefowska, Joanna; Mika, Marek; Waligóra, Grzegorz (2011): Project scheduling with finite or infinite number of activity processing modes – A survey. In: *European Journal of Operational Research* 208 (3), S. 177–205. DOI: 10.1016/j.ejor.2010.03.037.
- Wild, Michael T. (2008): Change Management. In: Mayer, Thomas-Ludwig; Gleich, Ronald; Wald, Andreas; Wagner, Reinhard (Hrsg.) (2008): *Advanced project Management. Herausforderungen – Praxiserfahrungen - Perspektiven*. S. 319-334, Berlin, Münster: Lit Verlag (Advanced project Management, Bd. 1).
- Williams, T. M. (1992): Practical Use of Distributions in Network Analysis. In: *Journal of the Operational Research Society* 43 (3), S. 265–270. DOI: 10.1057/jors.1992.35.
- Wöhe, Günter; Döring, Ulrich; Brösel, Gerrit (2016): *Einführung in die allgemeine Betriebswirtschaftslehre*. 26., überarbeitete und aktualisierte Auflage. München: Verlag Franz Vahlen.
- Wolling, Jens; Arlt, Dorothee (2014): Fukushima und die Folgen. Medienberichterstattung, Öffentliche Meinung, Politische Konsequenzen. Ilmenau, Thür: TU Ilmenau Universitätsbibliothek (Nachhaltigkeits-, Energie- und Umweltkommunikation, Bd. 2).
- World Nuclear Association (WNA) (2018): Decommissioning Nuclear Facilities. Online im Internet: URL <<http://world-nuclear.org/information-library/nuclear-fuel-cycle/nuclear-wastes/decommissioning-nuclear-facilities.aspx>> (Stand: 8. September 2017, Abfrage am: 26.02.2018).
- Wuppertal Institut für Klima, Umwelt, Energie GmbH im Wissenschaftszentrum Nordrhein-Westfalen (2012): *Final Report – EU Decommissioning Funding Methodologies*.

- Wittkamp, Christina (2012): Die rechtlichen Rahmenbedingungen des Rückbaus von Kernkraftwerken. Ein Sanierungsfall? 1. Aufl. Baden-Baden: Nomos (23).
- 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.
- zdf (2017): Klimaschutz geht vor - Frankreich verzögert Atom-Abbau. Online im Internet: URL
<<https://www.zdf.de/nachrichten/heute/klimaschutz-geht-vor-frankreich-verzoegert-atom-abbau-100.html>> (Stand: 07.11.2017, Abfrage am: 26.02.2018).
- Zeiber, Marco (2009): Ein Entscheidungsunterstützungsmodell für den Rückbau massiver Betonstrukturen in kerntechnischen Anlagen. Dissertation, Karlsruhe: Universitätsverlag (64).
- Zeit (2017): Frankreich will bis zu 17 Atomreaktoren stilllegen. Online im Internet: URL <<http://www.zeit.de/wirtschaft/2017-07/energie-wende-frankreich-atomreaktoren-abschaltung-nicolas-hulot>> (Stand: 10.07.2017, Abfrage am: 11.07.2017).
- Ziegler, Albert; Allelein, Hans-Josef (2013): Reaktortechnik. Physikalisch-technische Grundlagen. 2., neu bearb. Aufl. 2013. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg.
- Zimmermann, Hans-Jürgen; Gutsche, Lothar (1991): Multi-Criteria Analyse. Einführung in die Theorie der Entscheidungen bei Mehrfachzielsetzungen. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg.

- Zimmermann, Jürgen (2001): Ablauforientiertes Projektmanagement. Modelle, Verfahren und Anwendungen. Habilitation. 1. Aufl. Wiesbaden: Dt. Univ.-Verl. [u. a.].
- Zimmermann, Jürgen (1998): Time complexity of single- and identical parallel-machine scheduling with GERT network precedence constraints. In: *Mathematical Methods Of Operations Research*, 1999, 49 (2), S. 221-238. DOI: 10.1007/PL00020914.
- Zimmermann, Jürgen; Stark, Christoph; Rieck, Julia (2006): Projektplanung. Modelle, Methoden, Management. Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag Berlin Heidelberg.
- Zwölftes Gesetz zur Änderung des Atomgesetzes vom 8. Dezember 2010, BGBl. 2010 I Nr. 62, S. 1814.

PRODUKTION UND ENERGIE

Karlsruher Institut für Technologie (KIT)

Institut für Industriebetriebslehre und Industrielle Produktion

Deutsch-Französisches Institut für Umweltforschung



ISSN 2194-2404

- Band 1** National Integrated Assessment Modelling zur Bewertung umweltpolitischer Instrumente.
Entwicklung des otello-Modellsystems und dessen Anwendung auf die Bundesrepublik Deutschland. 2012
ISBN 978-3-86644-853-7
- Band 2** Erhöhung der Energie- und Ressourceneffizienz und Reduzierung der Treibhausgasemissionen in der Eisen-, Stahl- und Zinkindustrie (ERESTRE). 2013
ISBN 978-3-86644-857-5
- Band 3** Frederik Trippe
Techno-ökonomische Bewertung alternativer Verfahrenskonfigurationen zur Herstellung von Biomass-to-Liquid (BtL) Kraftstoffen und Chemikalien. 2013
ISBN 978-3-7315-0031-5
- Band 4** Dogan Keles
Uncertainties in energy markets and their consideration in energy storage evaluation. 2013
ISBN 978-3-7315-0046-9
- Band 5** Heidi Ursula Heinrichs
Analyse der langfristigen Auswirkungen von Elektromobilität auf das deutsche Energiesystem im europäischen Energieverbund. 2013
ISBN 978-3-7315-0131-2

- Band 6** Julian Stengel
**Akteursbasierte Simulation der energetischen
Modernisierung des Wohngebäudebestands
in Deutschland.** 2014
ISBN 978-3-7315-0236-4
- Band 7** Sonja Babrowski
**Bedarf und Verteilung elektrischer Tagesspeicher im
zukünftigen deutschen Energiesystem.** 2015
ISBN 978-3-7315-0306-4
- Band 8** Marius Wunder
**Integration neuer Technologien der
Bitumenkalthandhabung in die Versorgungskette.** 2015
ISBN 978-3-7315-0319-4
- Band 9** Felix Teufel
**Speicherbedarf und dessen Auswirkungen auf
die Energiewirtschaft bei Umsetzung der politischen
Ziele zur Energiewende.** 2015
ISBN 978-3-7315-0341-5
- Band 10** D. Keles, L. Renz, A. Bublitz, F. Zimmermann, M. Genoese,
W. Fichtner, H. Höfling, F. Sensfuß, J. Winkler
**Zukunftsfähige Designoptionen für den deutschen
Strommarkt: Ein Vergleich des Energy-only-Marktes
mit Kapazitätsmärkten.** 2016
ISBN 978-3-7315-0453-5
- Band 11** Patrick Breun
**Ein Ansatz zur Bewertung klimapolitischer Instrumente
am Beispiel der Metallerzeugung und -verarbeitung.** 2016
ISBN 978-3-7315-0494-8
- Band 12** P. Ringler, H. Schermeyer, M. Ruppert, M. Hayn,
V. Bertsch, D. Keles, W. Fichtner
**Decentralized Energy Systems,
Market Integration, Optimization.** 2016
ISBN 978-3-7315-0505-1

- Band 13** Marian Hayn
Modellgestützte Analyse neuer Stromtarife für Haushalte unter Berücksichtigung bedarfsorientierter Versorgungssicherheitsniveaus. 2016
ISBN 978-3-7315-0499-3
- Band 14** Frank Schätter
Decision support system for a reactive management of disaster-caused supply chain disturbances. 2016
ISBN 978-3-7315-0530-3
- Band 15** Robert Kunze
Techno-ökonomische Planung energetischer Wohngebäudemodernisierungen: Ein gemischt-ganzzahliges lineares Optimierungsmodell auf Basis einer vollständigen Finanzplanung. 2016
ISBN 978-3-7315-0531-0
- Band 16** A. Kühlen, J. Stengel, R. Volk, F. Schultmann, M. Reinhardt, H. Schlick, S. Haghsheno, A. Mettke, S. Asmus, S. Schmidt, J. Harzheim
ISA: Immissionsschutz beim Abbruch - Minimierung von Umweltbelastungen (Lärm, Staub, Erschütterungen) beim Abbruch von Hoch-/Tiefbauten und Schaffung hochwertiger Recyclingmöglichkeiten für Materialien aus Gebäudeabbruch. 2018
ISBN 978-3-7315-0534-1
- Band 17** Konrad Zimmer
Entscheidungsunterstützung zur Auswahl und Steuerung von Lieferanten und Lieferketten unter Berücksichtigung von Nachhaltigkeitsaspekten. 2016
ISBN 978-3-7315-0537-2
- Band 18** Kira Schumacher, Wolf Fichtner and Frank Schultmann (Eds.)
Innovations for sustainable biomass utilisation in the Upper Rhine Region. 2017
ISBN 978-3-7315-0423-8

- Band 19** Sophia Radloff
Modellgestützte Bewertung der Nutzung von Biokohle als Bodenzusatz in der Landwirtschaft. 2017
ISBN 978-3-7315-0559-4
- Band 20** Rebekka Volk
Proactive-reactive, robust scheduling and capacity planning of deconstruction projects under uncertainty. 2017
ISBN 978-3-7315-0592-1
- Band 21** Erik Merkel
Analyse und Bewertung des Elektrizitätssystems und des Wärmesystems der Wohngebäude in Deutschland. 2017
ISBN 978-3-7315-0636-2
- Band 22** Rebekka Volk (Hrsg.)
Entwicklung eines mobilen Systems zur Erfassung und Erschließung von Ressourceneffizienzpotenzialen beim Rückbau von Infrastruktur und Produkten („ResourceApp“): Schlussbericht des Forschungsvorhabens. 2017
ISBN 978-3-7315-0653-9
- Band 23** Thomas Kaschub
Batteriespeicher in Haushalten unter Berücksichtigung von Photovoltaik, Elektrofahrzeugen und Nachfragesteuerung. 2017
ISBN 978-3-7315-0688-1
- Band 24** Felix Hübner, Rebekka Volk, Oktay Secer, Daniel Kühn, Peter Sahre, Reinhard Knappik, Frank Schultmann, Sascha Gentes, Petra von Both
Modellentwicklung eines ganzheitlichen Projektmanagementsystems für kerntechnische Rückbauprojekte (MogaMaR): Schlussbericht des Forschungsvorhabens. 2018
ISBN 978-3-7315-0762-8

- Band 25** Karoline Fath
Technical and economic potential for photovoltaic systems on buildings. 2018
ISBN 978-3-7315-0787-1
- Band 26** Ann-Kathrin Müller
Decision Support for Biomass Value Chains for the Production of Biochemicals Considering Uncertainties. 2018
ISBN 978-3-7315-0820-5
- Band 27** Jonatan J. Gómez Vilchez
The Impact of Electric Cars on Oil Demand and Greenhouse Gas Emissions in Key Markets. 2019
ISBN 978-3-7315-0914-1
- Band 28** Carmen Schiel
Real Option Based Appraisal of Environmental Investments – An Assessment of NO_x Emission Control Techniques in Large Combustion Plants. 2019
ISBN 978-3-7315-0925-7
- Band 29** Hannes Schwarz
Optimierung der Investitions- und Einsatzplanung dezentraler Energiesysteme unter Unsicherheit. 2019
ISBN 978-3-7315-0919-6
- Band 30** Kai Mainzer
Analyse und Optimierung urbaner Energiesysteme – Entwicklung und Anwendung eines übertragbaren Modellierungswerkzeugs zur nachhaltigen Systemgestaltung. 2019
ISBN 978-3-7315-0882-3

- Band 31** Rupert Hartel, Viktor Slednev, Hasan Ümitcan Yilmaz, Armin Ardone, Dogan Keles, Wolf Fichtner, Anke Eßer, Marian Klobasa, Matthias Kühnbach, Pia Manz, Joachim Globisch, Rainer Elsland, Martin Wietschel (Hrsg.)
Dekarbonisierung des Energiesystems durch verstärkten Einsatz erneuerbaren Stroms im Wärme-, Verkehrs- und Industriesektor bei gleichzeitigen Stilllegungen von Kraftwerken – Auswirkungen auf die Versorgungssicherheit in Süddeutschland. 2019
ISBN 978-3-7315-0879-3
- Band 32** Rebekka Volk, Richard Müller, Frank Schultmann, Jérémy Rimbon, Thomas Lützkendorf, Joachim Reinhardt, Florian Knappe
Stofffluss- und Akteursmodell als Grundlage für ein aktives Ressourcenmanagement im Bauwesen von Baden-Württemberg „StAR-Bau“ – Schlussbericht des Forschungsvorhabens. 2019
ISBN 978-3-7315-0858-8
- Band 33** Felix Hübner
Planung und Modellierung des Rückbaus kerntechnischer Anlagen unter der Berücksichtigung von Unsicherheiten – Ein Beispiel zur Planung von Großprojekten. 2019
ISBN 978-3-7315-0911-0



Großprojekte wie der Rückbau kerntechnischer Anlagen besitzen häufig Kostenüberschreitungen und länger als geplante Ausführungsdauern. Dies ist neben Problemen im Management oder bei der Steuerung dieser Projekte auf eine unzureichende Planung zurückzuführen. Entsprechende Planungswerkzeuge zur computergestützten Optimierung für kerntechnische Rückbauprojekte existieren bisher nicht. Daher wurde im Rahmen dieser Arbeit ein Planungswerkzeug für Großprojekte entwickelt, welches exemplarisch die Anforderungen kerntechnischer Rückbauprojekte berücksichtigt. Ziel der Planung ist die Identifikation eines Plans auf operativer Ebene, der den Rückbau mit minimalen Kosten realisieren kann und der unter der Berücksichtigung von Unsicherheiten während der Projektausführung möglichst ohne Plananpassungen planmäßig ausführbar ist.

ISSN 2194-2404
ISBN 978-3-7315-0911-0

