

Optimierung der Instandhaltungsplanung mit genetischen Algorithmen unter Berücksichtigung des Speicherverhaltens bei der Verfügbarkeitsprognose von Kraftwerksanlagen

Von der Fakultät für Maschinenbau, Elektrotechnik und
Wirtschaftsingenieurwesen der Brandenburgischen
Technischen Universität Cottbus zur Erlangung
des akademischen Grades eines
Doktor-Ingenieurs genehmigte Dissertation

vorgelegt von

Diplom-Ingenieur Martin Warnecke

Geboren am 14.4.1978 in Darmstadt

Vorsitzender: Prof. Dr.-Ing. Heinz Peter Berg
Gutachter: Prof. Dr.-Ing. Hans Joachim Krautz
Gutachter: Prof. Dr.-Ing. Ralf Woll
Tag der mündlichen Prüfung: 19. Dezember 2008

”Human beings make life so interesting. Do you know, that in a universe so full of wonders, they have managed to invent boredom.”
- *Terry Pratchett (Hogfather)*

Dank

Danken möchte ich zunächst Prof. Dr.-Ing. H. J. Krautz und Dr.-Ing. M. Klatt dafür, dass Sie mich unterstützt und mir die Möglichkeit zur Promotion gegeben haben. Prof. Dr. sc. techn. G. Beckmann und Dr.-Ing. H. Kalina dafür, dass Sie für meine Fragen und Anmerkungen immer ein offenes Ohr hatten. Dem Lehrstuhl Kraftwerkstechnik möchte ich dafür danken, dass ich dort meiner Arbeit im angenehmen Umfeld nachgehen konnte. Danken möchte ich an dieser Stelle auch meinen Eltern, die mich bei allem, was ich angefangen habe, unterstützt haben.

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	1
1.1	Motivation	1
1.2	Zielsetzung	4
1.3	Inhaltliche Zusammenhänge	5
2	Stand der Forschung	9
2.1	Überblick	9
2.2	Instandhaltungsplanung	9
2.3	Genetische Algorithmen	14
2.4	Verfügbarkeitsprognose	16
3	Allgemeine Grundlagen	21
3.1	Stochastische Betrachtung einer Komponente	21
3.1.1	Verteilungsfunktion	21
3.1.2	Dichtefunktion	22
3.1.3	Ausfallrate λ	23
3.2	Verteilungen für Zufallsvariablen	24
3.2.1	Normalverteilung	26
3.2.2	Exponentialverteilung	27
3.2.3	Weibullverteilung	27
3.2.4	Gleichverteilung	31
3.3	Klassifizierung von Optimierungsverfahren	33
4	Grundlagen der Instandhaltung	39
4.1	Strategische Ansätze	39
4.2	Gesamtaufgabe	41
4.3	Gebrauchskosten	42
5	Grundlagen genetischer Algorithmen	47
5.1	Erzeugung neuer Generationen	48

5.2	Fitness	52
5.3	Selektion	53
5.4	Konvergenz	55
6	Grundlagen der Verfügbarkeitsprognose	57
6.1	Betrachtung der Komponente im Gesamtsystem	57
6.1.1	Boolesche Theorie	57
6.1.2	Markov Theorie	59
6.2	Modellierungsmethoden	59
6.2.1	Petri-Netze	60
6.2.2	Blockdiagramme	60
6.2.3	Markov-Analyse	61
6.2.4	Fehlerbaumbasierende Verfahren	62
6.3	Zeit-, Arbeits- und Leistungsverfügbarkeit	62
7	Methodik	67
7.1	Genetische Algorithmen in der Instandhaltung	67
7.1.1	Modifikation der genetischen Operatoren	68
7.1.2	Einführung eines Interpretationsschrittes	70
7.1.3	Kurzfassung des Ablaufs der Optimierung	71
7.1.4	Bewertung der Lösungen	72
7.1.5	Selektion	72
7.1.6	Vererbung	73
7.1.7	Konvergenzverhalten	73
7.1.8	Detaillierter Ablauf der genetischen Optimierung	74
7.2	Bewertung der Instandhaltung	81
7.2.1	Annahme der Minimalinstandsetzung	82
7.2.2	Die Verwendung der Weibull-Verteilung	82
7.2.3	Aufhebung der Teilbarkeitsbedingung	82
7.2.4	Verwendung von Teilfunktionen	84
7.2.5	Startansatz für die Abnutzungsbereiche	85
7.3	Verfügbarkeitsprognose	89
7.4	Speicherarten	91
7.5	Ansätze zur Speichermodellierung	92
7.6	Implementation des Speichers	95
7.7	Füllstandsregelung	97
7.8	Füllstandsabhängige Verluste	98
7.9	Ablauf der Monte-Carlo-Simulationen	101
7.9.1	Aufwandsreduzierte Monte-Carlo-Methode	101
7.9.2	Integration des Speichermodells in die aufwandsreduzierte Monte-Carlo-Methode	104

8	Anwendung	107
8.1	Optimierung mit angepassten Operatoren	107
8.2	Optimierung mit Interpretationsschritt	108
8.3	Optimierungserfahrungen im Überblick	120
8.4	Verfügbarkeitsprognose	121
8.5	Integration des Speichermodells	121
8.6	Speicher mit Zweipunktregler	124
8.7	Modellierung einer Trocknerkaskade	125
8.8	Speichermodellierung im Überblick	129
9	Zusammenfassung und Ausblick	131
	Literaturverzeichnis	136
A	Optimierungsdurchläufe	145
A.1	Tabellenlegende und Erläuterung	145
A.2	Optimierungsverlauf "1 / 2 / 10"-Jahresplan	149
A.3	Optimierungsverlauf "1 / 5 / 9"-Jahresplan	178

Kapitel 1

Einleitung

1.1 Motivation

Die Energie- und speziell die Stromversorgung wurde in der Vergangenheit (vor 1998) vom einzelnen Bürger kaum wahrgenommen. Sie funktionierte nahezu geräuschlos im Hintergrund. Die Bedeutung der Energieversorgung war dem Einzelnen kaum bewusst, allenfalls bei den seltenen Stromunterbrechungen oder beim Empfang der Stromrechnung wurde sie bemerkt.

Mit Beginn der Liberalisierung der Gas- und Stromversorgung in Deutschland im Jahre 1998 wurden aus Abnehmern plötzlich Kunden, die wechseln konnten. Ein Strommarkt mit einer Börse (EEX in Leipzig) etablierte sich und die Marketingabteilungen der Energieversorger verpassten dem Strom Produktmarken (z.B. YELLO, Schwabenstrom, Ökostrom) und sogar Farben. Hierdurch entstand ein deutlich schärferer Wettbewerb, der zu einer Suche nach möglichen Einsparpotentialen führte.

Heute muss sich der Kraftwerkserrichter und -betreiber daher die Wahl seiner Primärenergie, die Auslegung seines Kraftwerks hinsichtlich Emissionen und last but not least die Errichtungs- und späteren Betriebskosten genau überlegen. Große Netzbetreiber müssen z.B. die notwendige Verlustenergie gemäß §11 Netzzugangsverordnung [Bun05] transparent in einem Ausschreibungsverfahren beschaffen; das konzerneigene Kraftwerk steht damit in einem Wettbewerb. Daneben sind denkbare Erlöse für einen Regelennergieeinsatz (Primär-, Sekundärregelleistung oder Minutenreserve) bei der Kraftwerksplanung und seiner Instandhaltung zu berücksichtigen. Simulationen unter der Annahme verschiedener Szenarien sind bei diesem Marktumfeld zwingend erforderlich. Das Spannungsfeld zwischen Errichtungskosten, davon teilwei-

se abhängiger Verfügbarkeit, Instandhaltungsphilosophie und Betriebskosten bildet die Motivation für die Instandhaltungsoptimierung und Simulationen zur Verfügbarkeitsprognose.

In dieser Arbeit soll speziell die Stromerzeugung im Kraftwerk betrachtet werden. Kernpunkte der Betrachtung sind die Instandhaltung und eng damit verknüpft die Verfügbarkeit. Dies sind Bereiche im Kraftwerksmanagement, bei denen Ausgaben nicht direkt Erlösen zugeordnet werden können.

Aus Sicht des Kraftwerksbetreiber ist die Instandhaltung als i. a. drittgrößte Kostenposition nach Brennstoffkosten und Kapitaldiensten ständig im Fokus der Einsparüberlegungen. Gleichzeitig ist es unerwünscht, die Ausfallanzahl und -dauer deutlich steigen zu lassen, da sich mit gesicherten "Base"- oder "Peak-Futures" die besten Erlöse erzielen lassen. Die laufenden Aufwendungen und planmäßigen Stillstände im Rahmen der Instandhaltung haben den Zweck, plötzliche Ausfälle zu vermeiden. Somit ist die Instandhaltung mehrfach bei der Kosten-Nutzen-Überlegung zu berücksichtigen:

- Einmal tritt sie in Form von geplanten Stillstandzeiten auf, die zu den zufallsbedingten Stillständen hinzukommen.
- Ein weiteres Mal bei den Ausfallwahrscheinlichkeiten der Komponenten, die auf Grund der besseren Wartung absinken.
- Unter Einbeziehung dieser Wirkungen gilt es dann noch, die zusätzlichen Kosten der Wartungs- und Instandhaltungsarbeiten mit den Einsparungen durch das gesenkte Ausfallrisiko zu vergleichen.

Werden diese Überlegungen weiter verfolgt, so führt dies zu einem Optimierungsproblem für Instandhaltungsmaßnahmen:

1. Welche Instandhaltungsmaßnahmen sind vorbeugend sinnvoll?
2. Gibt es Warnsignale, mittels derer sich der Zustand einer Komponente überwachen lässt?
3. Wie lassen sich die Maßnahmen zeitlich möglichst günstig bündeln?

Je nachdem wie die Bedeutung der Instandhaltung einzustufen ist, wird eine zustands-, zeit- oder schadens-bezogene Instandhaltungsstrategie gewählt.

- Zustandsbezogene Instandhaltung:
Für geschultes Personal oder Sensoren ist es möglich, den Zustand der Komponente zu überwachen und sie bei Anzeichen für eine gravierende Vorschädigung rechtzeitig auszutauschen.
- Zeitbezogene Instandhaltung:
Die Inspektion der Komponente erfolgt nach einer vorgeschriebenen Zeitspanne, die sich aus den Betriebs- und Herstellererfahrungen ableitet.
- Schadensbezogene Instandhaltung:
Die Instandsetzung einer Komponente findet erst statt, wenn die Komponente ausgefallen ist. Dies bedeutet zwangsläufig ein Absinken der Verfügbarkeit.

Der Schwerpunkt dieser Arbeit liegt auf der Planung der zeitbezogenen Instandhaltungsstrategie. Diese Problemstellung ist besonders anspruchsvoll, weil es durch Synergieeffekte zu starken Wechselwirkungen der Komponenten untereinander kommt. So besitzt jede Komponente ihre eigene theoretisch optimale Inspektionsperiode, im Verbund kann es jedoch sein, dass es wegen Freischaltungen oder Stillstandszeiten günstiger ist, einige Komponenten gemeinsam instandzuhalten und dabei eine einzelne Baugruppe vorzuziehen oder zurückzustellen. Die hieraus entstehenden Wechselwirkungen bilden eine nichtlineare, gemischt-ganzzahlige¹ Berechnungsvorschrift für die Kostenabschätzung.

Eine häufig auf gemischt-ganzzahlige Probleme angewandte Klasse von Optimierungsverfahren sind die "Genetischen Algorithmen", die auch in dieser Arbeit angewandt werden. Sie sind stochastische ableitungsfreie Optimierungsverfahren, die aus den Prinzipien der natürlichen Auslese nach Darwin abgeleitet wurden. Auf spezielle Vor- und Nachteile wird in Kapitel 5 eingegangen.

Um diese Wechselwirkungen gerade bei den immer komplexeren neuen Anlagenkonzepten aufwandsoptimal zu bewerten, wird neben dem thematischen Schwerpunkt noch ein zweiter Teilaspekt fortgeführt und erweitert, die sogenannte Verfügbarkeitsprognose. Sie ist eng verbunden mit der Instandhaltungsthematik, da sie ebenfalls auf stochastischen Kennwerten beruht,

¹Einige Parameter der mathematischen Formulierung des Instandhaltungsplanes sind diskrete natürliche Zahlen.

jedoch versucht sie nicht, die Parameter der Zufallsgrößen durch Instandhaltungsmaßnahmen zu optimieren, sondern beschränkt sich darauf, mit dem simulierten Verhalten der Einzelkomponenten möglichst genau das Verhalten des Gesamtsystems zu prognostizieren.

1.2 Zielsetzung

Der Betrieb eines Kraftwerks ist mit einer Vielzahl von Kosten verbunden, wie Brennstoffkosten, Kapitalkosten, Personalkosten,... Die meisten dieser Kosten sind jedoch nach der Errichtung fix oder produktionsgebunden und lassen sich damit kaum beeinflussen. Eine Ausnahme bilden die Instandhaltungskosten. Diese lassen sich in planbare Kosten für Prävention und stochastische Kosten für ausfallbedingte Stillstände und Schäden unterteilen. Es ist möglich den planbaren Kostenanteil zu reduzieren, wenn dafür ein höheres Risiko für Ausfälle oder Schäden in Kauf genommen wird.

Diese Instandhaltungsoptimierung ist Kern dieser Arbeit. Dies geschieht basierend auf den in der Praxis bereits erfolgreich eingesetzten Näherungsfunktionen, die die "Gebrauchskosten"² eines Kraftwerks in Abhängigkeit von der Instandhaltungsplanung beschreiben. Der Gebrauchskostenansatz verfolgt dabei die Idee einer ganzheitlichen Bilanzierung des Kraftwerks über Kosten und Gewinnausfälle, deren Ergebnisse dann als ein "Geld pro Stunde"-Mittelwert über die Betrachtungszeit vorliegen. Für die Optimierung der Instandhaltungsplanung gilt es also, diese gemischt ganzzahlige Gebrauchskostenfunktion zu minimieren. Hierzu wird in dieser Arbeit nach einer geeigneten Optimierungsmethode gesucht und diese ("Genetischer Algorithmus") anschließend angewendet.

Als Eingangsdaten verwenden die Gebrauchskostenfunktionen neben allgemeinen Parametern (z.B.: Personalkosten) auch spezifische Parameter für das Verhalten der Funktionseinheiten (Definition siehe [Deu07]) (z.B.: mittlere Zeit zwischen zwei Ausfällen). Je nach Komplexität einer Funktionseinheit ist es schwer, die Parameter, insbesondere die zeitlichen Mittelwerte, sinnvoll zusammenzufassen. Zur Unterstützung beim Zusammenfassen wird eine Methodik der Verfügbarkeitsprognose weiterentwickelt und eingesetzt.

²[Bec94]: "Die Gebrauchskostenrechnung beschäftigt sich [...] mit der Wirtschaftlichkeit von Instandhaltungsleistungen an Anlagen, deren Baugruppen (Komponenten) und Bauteilen, im Einzelfall auch mit der Wirtschaftlichkeit einzelner Instandhaltungsaktivitäten."

Für die Prognose der Verfügbarkeit von komplexeren Funktionseinheiten in neuen Kraftwerkskonzepten wird dabei auf der Methodik von [Men03] aufgebaut, mit der sich umfangreiche Untersuchungen bereits durchführen lassen, wenn die Anlage selbst noch keine Daten über die gesamten Baugruppen geliefert hat. Es werden dabei Monte-Carlo-Simulationen eingesetzt, die die Verfügbarkeit der Baugruppen aus dem Verhalten der einzelnen Komponenten der Baugruppe während mehrerer Simulationen abschätzen. Wesentlich für die Anwendung auf neue Kraftwerkskonzepte ist die Erweiterung der Methodik um eine Komponente mit Speicherverhalten, da gerade bei den neueren Techniken vermehrt Puffer bzw. Speicher real eingebaut werden.

Vorangegangene Modellierungsarbeiten haben gezeigt, dass es bei Referenzdatensätzen von tatsächlichen Ausfällen, die mit dem Modell nachgestellt wurden, noch zu deutlichen Abweichungen kam. Die Ursache dieser Abweichungen liegt wahrscheinlich in der unzureichenden Berücksichtigung des Speicherverhaltens einiger Komponenten. Im Rahmen dieser Arbeit wird deshalb die Modellierung des Speicherverhaltens schwerpunktmäßig mitbetrachtet.

Insgesamt ergibt sich aus den Monte-Carlo-Simulationen eine solide Bewertungsgrundlage für die Kraftwerksplanung und / oder das Instandhaltungskonzept. Bewertet wird zunächst einmal die Auslegung der Anlage hinsichtlich notwendiger Redundanzen. Darüber hinaus ist aber auch das Zusammenfassen mehrerer Komponenten zu den Abnutzungseinheiten³ einfach machbar. Diese sind für die Gebrauchskostenbetrachtung erforderlich.

1.3 Inhaltliche Zusammenhänge

Um die Übersicht über die in dieser Arbeit behandelten Zusammenhänge zu erleichtern, werden sie in Abbildung 1.1 noch einmal veranschaulicht.

Als Einführung in die Thematik wird in Kapitel 2 der momentane Stand der Entwicklung in den Bereichen Instandhaltung, "Genetische Algorithmen" und Verfügbarkeitsprognose kurz zusammengefasst.

Grundlage aller Abschnitte dieser Arbeit ist es, dass sich das Ausfallverhalten der einzelnen Komponenten nur stochastisch beschreiben lässt. Hierzu werden in Kapitel 3 die Grundkenntnisse kurz zusammengefasst und darge-

³Abnutzungseinheiten sind Zusammenfassungen mehrerer Komponenten oder Anlagenabschnitte, eine genaue Erklärung folgt in Abschnitt 4.3.

stellt. Auf diesen Grundkenntnissen bauen später die in der Modellierung verwendeten Verteilungsfunktionen auf (siehe Abschnitt 3.2).

Zum Zusammenfassen komplexer Funktionseinheiten wird die Verfügbarkeitsprognose eingesetzt, deren Grundlagen in Kapitel 6 beschrieben werden. Besonders hervorzuheben ist das im Rahmen dieser Arbeit entwickelte Modell für Komponenten mit Speicherverhalten (Abschnitt 7.6), das insbesondere bei der Modellierung von neueren Anlagen eine wesentliche Rolle spielt.

Das Zusammenfassen ähnlicher Funktionseinheiten ist der letzte Schritt beim Aufbau eines Modells für die Instandhaltungsplanung (siehe Kapitel 4). Ein für ein solches Modell entworfener Plan wird anschließend mit den sogenannten "Gebrauchskostenfunktionen" (siehe [Bec94] oder 4.3) bewertet.

Diese Bewertung dient als Güte- bzw. Zielfunktion für die genetische Optimierung, deren Grundlagen in Kapitel 5 dargestellt sind.

Beim Zusammenfassen größerer Anlagenabschnitte wird auf das Hilfsmittel der Verfügbarkeitsprognose (siehe Kapitel 6) zurückgegriffen.

Einige Schritte der Optimierung, wie zum Beispiel die Suche nach geeigneten Startwerten (siehe Abschnitt 7.1.3) sind anwendungsspezifisch gelöst, andere sind mit abstrakten allgemeingültigen Methoden abgehandelt.

Am Ende der Arbeit stehen die Ergebnisse und Erfahrungen auf dem Gebiet der zeitbezogenen Instandhaltungsoptimierung im Vordergrund, die in den Abschnitten 8.1 und 8.2 dokumentiert sind. Weitere wesentliche Ergebnisse beschäftigen sich mit dem Einfluss des Speichermodells auf die Verfügbarkeitsprognose.

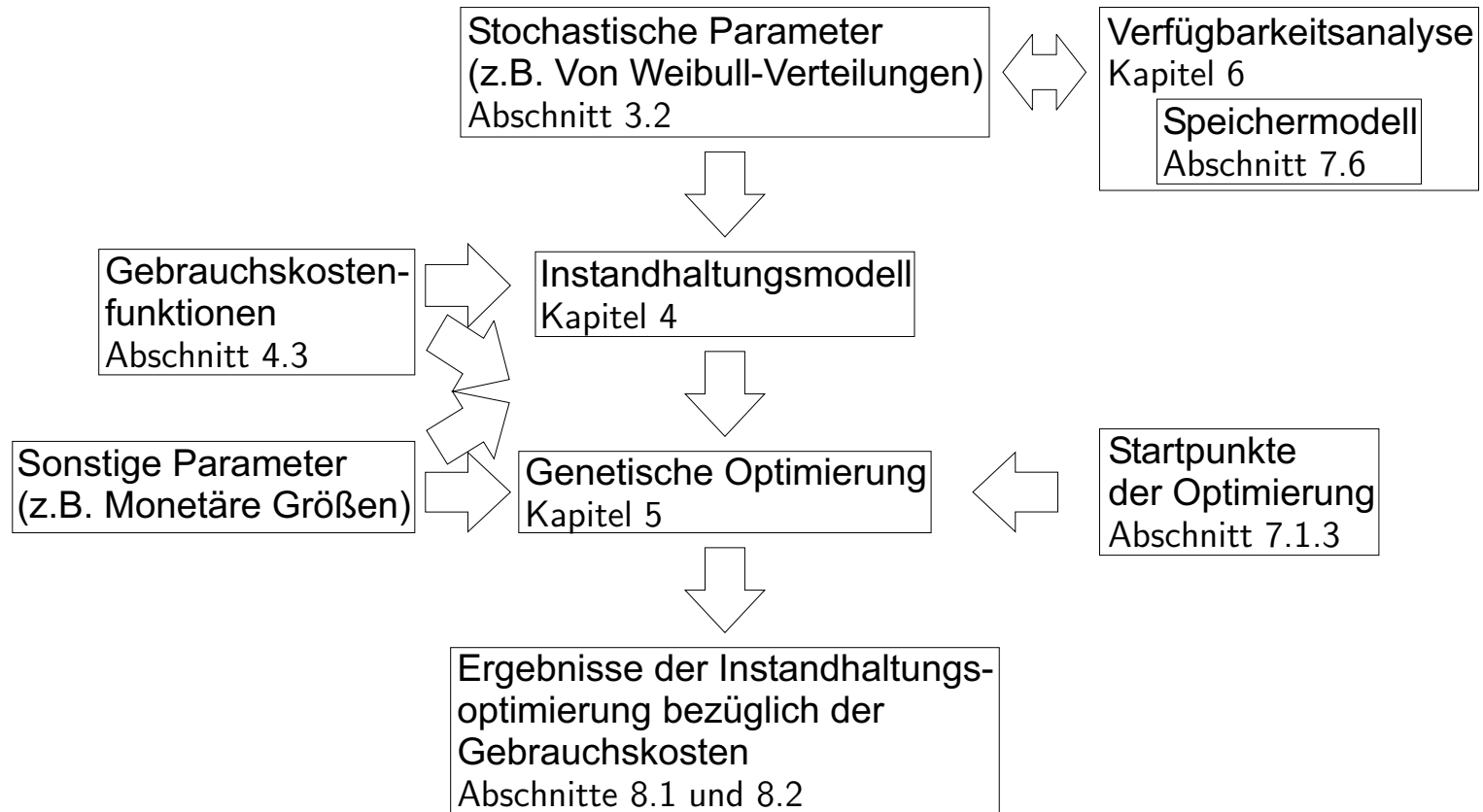


Abbildung 1.1: Überblick über die Teilgebiete der Arbeit und ihren Zusammenhang

Kapitel 2

Stand der Forschung

2.1 Überblick

Als Grundlagenwerke zur Instandhaltungsplanung seien an dieser Stelle [Stu96] und [Bec94] genannt. In ihnen werden die verschiedenen Instandhaltungsstrategien vorgestellt und die Zusammenhänge in der Instandhaltungsplanung vermittelt. Sie sind gut für den Einstieg in die Thematik geeignet, zumal diese Arbeit teilweise auf den in ihnen vorgestellten Grundprinzipien aufbaut.

Um sich dem Thema der Verfügbarkeit zu nähern, werden in dieser Arbeit folgende Literaturquellen als Einstieg genutzt: [Arn03], [Stu96], [Kec91], [Röt99, ab Kap. 5], [Ste00]. Die Beiträge werden im folgenden auszugsweise vorgestellt. Neben den wissenschaftlich-theoretischen Werken werden für die Anwendungsbeispiele auf dem Gebiet Modellierung auch Tabellenwerke benötigt, um fehlende Erfahrungswerte abzuschätzen. Hierzu wurden [VGB99], [SIN97] und [Hen98] verwendet.

Zu den genetischen Algorithmen bieten [Ger04] und [Bey01] einen guten Einstieg. Hier wird ein allgemeiner Überblick über die evolutionären Optimierungsverfahren gegeben, bei dem die unterschiedlichen Konvergenzstrategien ebenfalls beschrieben werden. Die Kapitel 5 und 7.1 bauen hierauf auf.

2.2 Instandhaltungsplanung

Für einen schnellen Einstieg in die Thematik der Instandhaltung eignet sich [Mat02] von Matyas. Er gibt einen kurzen Einblick in die Grundfragen der Instandhaltungsstrategie.

Veengerts hat in [Ven04] neben der Zuverlässigkeit und Instandhaltung auch damit verbundene wirtschaftliche Aspekte beim Betrieb von Stromnetzen betrachtet. Zur Optimierung setzt er genetische Algorithmen ein. Seine "Chromosomen" sind hierbei die aneinandergehängten Zeilen einer Matrix, die für jede Komponente angibt, ob sie in den entsprechenden Jahren gewartet wird. Die Komponenten sind 0 oder 1, wobei eine Eins an der Stelle i, j eine Wartung der Komponente i im Jahr j bedeutet. Resultierend konnte Veengerts in der Untersuchung feststellen, dass die durch reduzierte Instandhaltung und gesenkte Verfügbarkeit entstehenden Folgekosten im Bereich der Stromnetze meist größer sind als die Einsparungen. Es werden daher zuverlässigkeitsorientierte Instandhaltungspläne zur Erschließung von Einsparpotentialen im gesamten Netz empfohlen. Ein erster Ansatz, der im Rahmen der vorliegenden Arbeit verfolgt wurde, orientierte sich sehr stark an der in [Ven04] verwendeten Datenstruktur. Auf Grund des Rechenweges der in der vorliegenden Arbeit verwendeten "Gebrauchskostenfunktionen" war es jedoch günstiger, zu einer anderen Datenstruktur zu wechseln. Dies wird in Abschnitt 7.1.2 vertiefend behandelt.

Anlässlich der Überlegungen zur Einführung neuer Umweltrichtlinien haben Kalaitzis und Dalder in [Kal01] die Instandhaltungsvorgänge in deutschen Kraftwerken betrachtet. Hierbei zeigte sich, dass die Instandhaltungsstrategie der meisten deutschen Kraftwerke bereits 2001 der Mehrheit der Forderungen der Richtlinien genügt. Für die Berücksichtigung dieser und anderer verbindlicher Richtlinien musste in der Instandhaltungsoptimierung im Rahmen der vorliegenden Arbeit eine Möglichkeit zur bindender Vorgabe der Instandhaltungsmaßnahmen geschaffen werden.

Nachdem, ausgehend von der wirtschaftlichen Motivation, eine kurze Einführung in das Thema gegeben wurde, legt Wahl in [Wah01] den Schwerpunkt auf die Interessenkonflikte, die gegenwärtig bei der Instandhaltungsplanung eine Rolle spielen. Dies sind mehrheitlich organisatorische Varianten, die alle ihre Stärken und Schwächen haben. Eine Überlegung ist, inwieweit als erster Schritt eine Bündelung der einzelnen Instandhaltungsteams zu einem mobilen Einsatzteam, das zentral koordiniert werden kann, sinnvoll ist. Die nächste Stufe und damit die weiterführende Überlegung ist die Frage, ob es sinnvoll ist, die Instandhaltung durch Dritte vornehmen zu lassen. Zu diesem Thema gibt er sogar eine Hilfestellung, um sinnvoll zu entscheiden, was sich mehr zum Outsourcing eignet und was weniger. Die höherqualifizierten Aufgaben mit spezifischem "Know-How" beispielsweise sollten eher im Unternehmen

gelöst werden, es sei denn, es ist wirtschaftlich nicht sinnvoll, eigens einen geeigneten Spezialisten zu beschäftigen, der dann nicht ausgelastet wäre.

Die Instandhaltung aus Sicht des Controllings wird in [Kle01] von Klein und Schröder dargelegt. Ein wichtiges Hilfsmittel für das Controlling sind die sog. Life-Cycle-Cost(LCC)-Betrachtungen. In die LCC gehen neben den Kosten durch die Anschaffung auch die Betriebskosten und die Kosten durch Nichtverfügbarkeit ein. Letztere können im Vorfeld nur geschätzt werden. Damit ist dieser Ansatz eine Bestätigung der von Beckmann und Marx in [Bec94] gewählten Kostenstruktur.

In [Ell02] wird detaillierter auf die Chancen und Risiken des Outsourcings eingegangen. Die hierbei angesprochenen Aspekte sind wichtig für die weitere Anwendung der Ergebnisse dieser Arbeit.

In ihrem Buch [Al-95] wird von Al-Rahdi und Heuer das "Total Productive Maintenance", kurz TPM, vorgestellt. TPM hat das Ziel, das Bedienpersonal intensiver mit der Anlage vertraut zu machen. Das Bedienpersonal soll anschließend in der Lage sein, kleinere Schäden an der Anlage selbst zu erkennen und zu beheben. Auf diese Weise werden Produktivität und Verfügbarkeit verbessert.

[Röb00] gibt Empfehlungen für die Entscheidung, ob und welche Bereiche der Instandhaltung outgesourct werden können, bzw. sollen. Hierbei spielt neben dem reinen Schwierigkeitsgrad der Maßnahme auch eine Rolle, inwieweit sich die erforderlichen Qualifikationen mit den Kernanforderungen im Unternehmensalltag decken.

Die Einsatzmöglichkeiten von wissensbasierenden Analysen zur Zustandsüberwachung, Fehlerdiagnose und Instandhaltung wurden von Sturm und Georg in [Geo03] aufgezeigt. Diese Verfahren können teilweise zur Gewinnung von Parametern für die Modellierung in dieser Arbeit herangezogen werden.

Eine relativ umfassende Kostenbetrachtung der Instandhaltung wurde von Knaak und Busch in [Kna04] dargestellt. Der Artikel behandelt gezielt die betriebswirtschaftliche Sicht der Instandhaltung und geht nur wenig auf die technischen Aspekte ein.

Um besser mögliche Einsparmaßnahmen bei der Instandhaltung zu bewerten, wurden in [Dah04] sogenannte Importanzanalysen durchgeführt. Dabei werden, um die Bedeutung der einzelnen Instandhaltungsmaßnahme zu bewerten, die Parameter der betroffenen Komponenten des Modells an die verschiedenen Instandhaltungspläne angepasst. Anschließend werden Monte-

Carlo-Simulationen zur Bestimmung der Verfügbarkeit mit den Modellvarianten durchgeführt (RAMS-Analysen). Die Auswertung der Simulationsergebnisse gibt Aufschluss über die Bedeutung der einzelnen Instandhaltungsmaßnahme. Dieses Verfahren kann hilfreich sein, wenn es darum geht, eine einzelne "Abnutzungseinheit" auf ihr Optimum hin zu überprüfen. Ein vollständige Instandhaltungsplanung ohne einen nahezu optimalen Anfangsansatz lässt sich damit jedoch nicht durchführen.

Ein sehr komplexes Programm zur Berechnung der Verfügbarkeitskenngrößen von Rohrleitungen wird in [Web04] von Weber kurz vorgestellt. Das Programm ist zum Zeitpunkt, zu dem Weber den Beitrag geschrieben hat, noch in der Entwicklung. Einige wesentliche Einflussgrößen, wie Kräfte und Momente, fehlten noch in der vorgestellten Version. Aber eine Weiterentwicklung scheint angedacht zu sein. In seinem dargestellten Stand ist es für diese Arbeit noch von geringer Bedeutung, eine weiterentwickelte Version könnte jedoch nützlich sein.

Hofmann und Michaelis widmen sich in [Hof01] der Instandhaltungsplanung mittels einer Risikomatrix. Hierbei werden die Komponenten nach zwei Kriterien in eine Klassenhierarchie, die sogenannte Risikomatrix, eingeteilt. Die beiden Kriterien sind die Häufigkeitsklasse und die Schadensklasse, also wie oft und wie schwer die Schadensfälle durchschnittlich auftreten. Diesen Klassen werden dann Instandhaltungsstrategien zugeordnet. Unabhängig davon, ob die Qualität des Ergebnisses ausreichend ist, wird auf diese Weise mit vergleichsweise einfachen Methoden ein individueller Instandhaltungsplan entwickelt. Dies lässt sich als eine überschlägige Abschätzung zur Überprüfung der Plausibilität eines Instandhaltungsplanes verwenden.

In [And02] wird von Anderson ebenfalls eine Risikomatrix zur Instandhaltungsplanung eingesetzt. Die beiden Einteilungskriterien werden als "Likelihood of Failure" (LOF) und "Consequence of Failure" (COF) bezeichnet. Das Gesamtverfahren wird als "Riskbased Inspection" (ROI) bezeichnet. Wie die vorherige Arbeit lässt sich hierdurch die Plausibilität überprüfen.

Nicht unmittelbar mit Instandhaltung beschäftigt sich Theis in [The02]. Vielmehr geht es darum, den Zeitbedarf für eine vorgeplante Teamarbeit zu minimieren. Im Beispiel geht es um die Zeit, die ein Flugzeug am Boden verbringt, um z.B. aufzutanken, Essen mitzunehmen und zum Aufräumen. Die Optimierung sollte sich jedoch ohne weiteres auf die Reparaturzeiten bei Instandhaltungsmaßnahmen übertragen lassen. Im Rahmen der von den hier verwendeten Kostenfunktionen berechneten Synergieeffekten wird eine

Optimierung der Teamarbeit vorausgesetzt.

In [Pap01] wird erklärt, wie eine Instandhaltungsplanung von Null an aufgebaut wird. Erster Schritt hierzu ist eine Datenerhebung, um das Verhalten der betrachteten Anlage nachzubilden. Aufbauend auf diesen Daten wird eine Instandhaltungsstrategie entwickelt. Als letzter Schritt wird nun versucht, diese Strategie auf andere Anlagen zu übertragen. Diese Arbeit kann auf Grund der detaillierten Schilderung der Entscheidungsprozesse als Vorbild für die Entwicklung einer eigenen Instandhaltungsstrategie für einzelne Baugruppen an wichtigen Positionen dienen.

[Str02] stellt die wirtschaftliche Sicht auf die Instandhaltungsthematik dar. Es wird detailliert geschildert, wie sich die "Life-Cycle-Costs"(LCC) neben den Instandhaltungskosten zusammensetzen, und wie sich dies auf die Preisfindung der DB (Deutsche Bundesbahn) niederschlägt. Dies zeigt die Bedeutung der Instandhaltungsoptimierung über den Kraftwerksbereich hinaus.

Auch wenn laut anderen Quellen die Situation der Instandhaltung im Kraftwerksbereich in Deutschland weitgehend durchdacht ist und eher nach Kürzungsmöglichkeiten gesucht wird, so gibt [Sch00] bei der Betrachtung der kleinen und mittleren Industriebetriebe ein anderes Bild wieder. Es wurde festgestellt, dass ca. 17% der kleinen und mittleren Industrieunternehmen nur schadensbedingte Instandhaltung betreiben, d.h. erst reagieren, wenn ein Schaden eingetreten ist. Auch hier ist noch ein gewaltiges Potential für die Optimierung der Instandhaltung vorhanden.

Balzer und Brand stellen in [Bal00] ein Verfahren dar, mit dem durch Messungen im Netz zum Zeitpunkt von Störungen an einem Leistungsschalter die Auswirkungen dieses Schalters auf die Stabilität des Gesamtnetzes analysiert werden. Dieses Verfahren kann sehr hilfreich sein bei der Auswertung von Daten aus Prozessleitsystemen.

In [Fip99] beschäftigt sich Fipper ebenfalls mit der Instandhaltung von elektrischen Verteilnetzen. Hierbei zeigte sich, dass der Zusammenhang zwischen den Abständen der Instandhaltungsintervalle und der Zuverlässigkeit der Netze sehr stark ist. So führt, ausgehend von üblichen Intervalllängen, eine Verlängerung um 40% zu einer Verzehnfachung der Ausfälle. Da das neue Energiewirtschaftsgesetz und die nachgelagerten Verordnungen dem Kunden deutlich bessere Regressmöglichkeiten einräumen, werden das wirtschaftliche Risiko und der potentielle Schaden am Image des Versorgers immer größer. Dies zeigt einmal mehr, wie kritisch Einsparungen im Instandhaltungssektor

zu bewerten sind.

2.3 Genetische Algorithmen

Die Optimierungsstrategien, die im folgenden als "Genetische Algorithmen" bezeichnet werden, gehen im wesentlichen auf drei Ansätze zurück:

1. "Evolutionsstrategien" nach Rechenberg um 1973
2. "Genetische Algorithmen" nach Holland um 1975
3. "Evolutionäres Programmieren" nach Fogel um 1966

Diese drei zu Beginn unterschiedlichen Verfahren sind heute im Zuge ihrer Weiterentwicklung zu einem einzigen Verfahren zusammengefasst. Üblicherweise wird von genetischen Algorithmen oder Evolutionsstrategie gesprochen. Der Begriff des evolutionären Programmierens ist weniger gebräuchlich. Kernpunkt des Verfahrens ist es, die Prinzipien der biologischen Vererbung und der natürlichen Selektion auf technische Optimierungsprobleme zu übertragen. Auf die Vor- und Nachteile der genetischen Algorithmen im Vergleich mit anderen Optimierungsverfahren wird später in Abschnitt 3.3 eingegangen. Dort wird auch die Wahl der genetischen Algorithmen als geeignetes Optimierungsverfahrens begründet.

Beyer [Bey01] steht den genetischen Algorithmen durchaus kritisch gegenüber. Auf der einen Seite sieht er die Vorteile der genetischen Algorithmen im Bereich der Optimierung von Problemstellungen, deren analytische Lösung zu aufwändig wäre. Ein Beispiel hierfür sind Probleme, bei denen von einer NP-Vollständigkeit¹ ausgegangen wird. Andererseits hinterfragt er kritisch die Wirkung von Cross-Over Methoden auf das Konvergenzverhalten und inwieweit dies den erhöhten Rechenaufwand rechtfertigt.

Die genetischen Algorithmen und die Evolutionsstrategie bieten unendlich viele Möglichkeiten, die Optimierung zu gestalten. Beyer ist in seinem Werk bemüht, den Blick des Lesers für sinnvolle und unsinnige Konzepte zu schärfen. Dies ist gerade für den schnellen Einstieg in die Thematik wichtig, da vermittelt wird, an welchen Stellen die Optimierung an den Aufgabentyp anzupassen ist.

¹nicht in polynomialer Zeit lösbar, minimaler Rechenaufwand steigt z.B. exponentiell mit der Größe des Problems an

Etwas anders setzt Frau Gerdes in [Ger04] den Schwerpunkt. Ihr Ziel ist es eher, den Leser auf Ideen zur Gestaltung der genetischen Algorithmen zu bringen. Hierbei zeigt sie, dass sich das Konvergenzverhalten über die Variation der Vererbung und Selektion in begrenztem Maße steuern lässt.

Keppler liefert mit seiner Einsatzoptimierung von Turbinen [Kep98] ein anschauliches Beispiel zur Integration genetischer Algorithmen in ein Gesamtkonzept mit neuronalen Netzen und deterministischen Teil-Zielfunktionen. Das neuronale Netz dient hierbei als Näherungslösung für die deterministische Zielfunktion, deren Berechnung für jedes einzelne Individuum zu aufwändig wäre. Sie wird lediglich zur Validierung des Optimierungsergebnisses verwendet.

In [Mar98] werden genetische Algorithmen zum Design dynamischer Modelle eingesetzt. Hierbei repräsentieren die Gene (elementare Bausteine der Chromosomen) einfache dynamische Bausteine mit vorgegebenen Zeitkonstanten. Die Zielfunktion ist dann ein zu minimierender Fehlerterm für vorgegebene Testfunktionen. Das Auswerten der Zielfunktion hat hierdurch Ähnlichkeit mit dem Training eines neuronalen Netzes. Im Vergleich mit den Testfunktionen konnte dann auch gezeigt werden, dass das entstandene Dynamikmodell sehr große Ähnlichkeit mit den Trainingsdaten hat. Folglich bietet dieses Verfahren eine Alternative zu neuronalen Netzen. Aufgrund der fixen Parameter bei variabler Struktur wird es im Vergleich zu neuronalen Netzen, bei denen die Struktur vorgegeben wird und die Parameter variabel sind, zu Abweichungen im Ergebnis kommen. Letztendlich ist aber im Voraus nicht klar zu sagen, welches Approximationsverfahren besser ist. Es ist immer erforderlich das Ergebnis mit nicht verwendeten realen Daten zu testen, um das Approximationsverhalten außerhalb der Trainingsdaten zu bewerten.

In [bec02] werden verschiedene sehr spezielle Optimierungsprobleme betrachtet, von denen vor allem die letzten drei Beiträge einen Eindruck über die Leistungsfähigkeit von genetischen Algorithmen geben. In einem dieser Beiträge wird gezeigt, wie mit Hilfe der genetischen Algorithmen ein neuartiger Typ von Antennen entdeckt wurde, der eine exzellente, weitgehend konstante Verstärkung über einen relativ breiten Winkelbereich besitzt. Ein weiterer Artikel beschäftigt sich mit der Statik von Konstruktionen für die Robotik, z.B. als Kran. Die Ergebnisse, die mit Legosteinen nachgebaut wurden, beweisen die Realisierbarkeit. Ein weiteres ungewöhnliches Optimierungsgebiet ist die Bio-Chemie. Hier wurde die antibakterielle Wirkung von Peptiden mit einem neuronalen Netz als Zielfunktion über einen genetischen Algorith-

mus optimiert.

2.4 Verfügbarkeitsprognose

Zur Erzeugung von Sammelparametern für größere Baugruppen aus den Parametern der Einzelkomponenten wird ein am Lehrstuhl Kraftwerkstechnik der BTU Cottbus vorhandenes Verfügbarkeitsprognoseprogramm weiterentwickelt. Vor allem eine Berücksichtigung des Speicherverhaltens einzelner Komponenten ist für die Modellierung neuerer Funktionsgruppen erforderlich. Aus diesem Grund liegt der Schwerpunkt der Verfügbarkeitsbetrachtungen in dieser Arbeit vorwiegend auf der Speichermodellierung, was auch das Literaturstudium betrifft.

In [Sur99] wird die Verfügbarkeit einer Wind-Biogas-Hybridanlage untersucht, wobei die Strategie der Biogasspeicherführung im Vordergrund steht. Ziel ist es, durch geschickte Speicherführung (Biogastank) die Verfügbarkeit der Gesamtanlage bei maximaler Stromeinspeisung zu optimieren. Hierfür wird eine gute Börsenfähigkeit des Stromes durch ein kontinuierliches glattes Leistungsband angestrebt. Zur Modellierung des Speichers wurde ein Markov-Graph eingesetzt. Die Zustände hierbei stellen eine Kombination aus Füllstandspegel und Füllstandsänderung dar. Verwendet wurde hierzu ein Markov-Prozess erster Ordnung, was bedeutet, dass die Wahrscheinlichkeit eines Betriebszustandes zum Zeitpunkt t_k nur vom Zustand zum Zeitpunkt t_{k-1} abhängt und nicht von den Zuständen, die noch weiter zurückliegen. Dies ist ein bei Markov-Graphen durchaus üblicher Ansatz, der in diesem speziellen Fall zur Konsequenz hat, dass sich nur Einflüsse auf den Füllstand modellieren lassen, deren mittlere Periodendauer in der Nähe der doppelten Abtastzeit liegt. (Die Abtastzeit ist die Zeit zwischen zwei Beobachtungszeitpunkten.) Für die Anwendung auf Speichervorgänge wurde dies jedoch als akzeptabel angesehen, da der zum Abfangen von Störungen (Windflauten / Stürme) erforderliche Speicher bei gleicher Amplitude, proportional mit der Periodendauer wächst. Somit ist das Kosten-Nutzen-Verhältnis unterhalb der modellierten Frequenzen (Bereich der halben Abtastfrequenz) deutlich schlechter. Der Ausgleichseffekt durch einen größeren Speicher ist wiederum mit (zu) hohen Investitions- und Betriebskosten verbunden.

In [Sha87] hat Lele ein bestehendes Verfahren zur Speicherauslegung so erweitert, dass es nicht nur zur Modellierung eines Speichers mit maximaler Verfügbarkeit eingesetzt werden kann, sondern dass auch die Berechnung bei

einem suboptimalen Ansatz möglich ist. Des Weiteren wird hier ein Ansatz zur Berücksichtigung von Speicherverlusten bei Stauseen behandelt.

Bei [Lim00] handelt es sich um eine Sammlung verschiedener kurzer Beiträge zu Themen aus dem Bereich der Verfügbarkeit aus rein mathematischer Sicht. In Beitrag 18 der Sammlung wird untersucht, wie Alter und Nutzungsverhalten am besten zu einer Kenngröße für die Abnutzung zusammengefasst werden. In Beitrag 27 beschäftigt sich M. LuValle mit einem Verfahren zur Reduzierung von Frühausfällen in der ersten Betriebsphase. Hierbei werden im Anschluss an die Einbrennphase Stresstests vorgenommen, bei denen Komponenten mit leichten Herstellungsfehlern ausfallen sollen.

D. Menke beschreibt in [Men03], wie sich die Verfügbarkeit und Dynamik von komplexen Anlagen modular modellieren lässt, um so eine vergleichsweise übersichtliche Darstellungs- und Modellierungsart zu erhalten. Hierbei wurden im Modell sowohl das Ausfallverhalten der Komponenten, als auch ihre Dynamik hinterlegt. Die anschließende Simulation bietet die Möglichkeit, entweder durch die Monte-Carlo-Methode die Zeit- und Arbeitsverfügbarkeit zu simulieren oder die Leistungsverfügbarkeit mit Hilfe eines vorgegebenen Szenarios als Momentanwert oder Mittelwert eines bestimmten Zeitintervalls zu bestimmen.

A. Sturm hat mit [Stu96] ein Werk über die Grundlagen der Verfügbarkeit und Instandhaltung im Allgemeinen geschrieben, wobei er immer wieder Beispiele aus dem Kraftwerksbereich anführt. Im ersten Abschnitt betrachtet er die Thematik aus Sicht des Anwenders, der die Verfügbarkeit einer Anlage optimieren will. Insbesondere wird hierbei detailliert auf den Aspekt der Auswirkungen von Belastungen auf die Alterung von Komponenten eingegangen. Im zweiten Abschnitt wird die Instandhaltung aus Sicht des Managements und des Controllings betrachtet.

Das von D. Röttsch verfasste Werk [Röt99] lässt sich in zwei Abschnitte gliedern: Die Kapitel zwei und drei beschäftigen sich ausschließlich mit den Komponenten und der Planung von Wasser- und Fernwärmeversorgungssystemen, wohingegen sich die übrigen Kapitel des Buches mit der Verfügbarkeit und Instandhaltung beschäftigen. Röttsch verwendet hierbei vor allem die Erlang-Verteilung, da diese gut zu den dort gezeigten Ausfalldaten passt. Diese Verteilung ist in der Zuverlässigkeitsprognose jedoch nicht so weit verbreitet wie die Weibull-Verteilung. Dies zeigt eine Betrachtung der Tabelle auf [Röt99, Seite 354] in der er einige seiner Literaturquellen mit den von ihnen verwendeten Verteilungen darstellt.

Galikowski, Sivazlian und Chaovaitwongse haben in [Gal96] die Verfügbarkeit der Generatoren eines Kraftwerks mit Hilfe eines kleinen Modells optimiert. Auf Grund der geringen Größe des Modells wurde ein Markov-Ansatz verwendet, der anschließend geschlossen analytisch gelöst wurde.

Bernstein beschäftigt sich in [Ber95] mit den Auswirkungen erhöhter Abgastemperaturen auf die Lebensdauer von Gasturbinen. Die Ergebnisse dieser und ähnlicher Arbeiten sind wesentlich, um die Parameterschätzung in der Zuverlässigkeitsforschung auf einem aktuellen Stand zu halten.

Jankala, Louko und Kivela behandeln in [Jan86] die Verfügbarkeits- und Risikoanalyse am Beispiel eines Heizkraftwerks. Es werden sowohl die Methoden zur Risikobewertung als auch die Ergebnisse mit Gegenmaßnahmen präsentiert. Eingesetzt wurden PAAG, Fehlerbaum und Ereignisablaufanalyse. Außerdem wurde mit Hilfe proprietärer Software eine Verfügbarkeitsprognose auf Basis eines Blockdiagramms vorgenommen.

Barber behandelt in [Bar90] die Erstellung eines RAM-Modells (Reliability Availability Maintainability) am Beispiel eines 85 MW Kohlekraftwerksblocks. Dieser wird auf der Ebene der Gesamtanlage als Blockdiagramm modelliert, wobei die einzelnen Anlagenabschnitte als Fehlerbäume weiterverarbeitet werden. Anschließend zeigt er mit Hilfe der Simulationsergebnisse, wie sich die Verfügbarkeit des Kraftwerksblocks, basierend auf speziellen Problemen im Beispiel, erhöhen lässt.

Wen und Mohammed-Zadeh untersuchen in [Wen93] die Auswirkungen verschiedener Speisepumpenschaltungen auf die Verfügbarkeit. Außerdem wird die Abhängigkeit des Ausfallverhaltens von Zwischenüberhitzer und Hilfskondensator betrachtet.

Eine Verfügbarkeitsprognose eines kompletten elektrischen Übertragungsnetzes wurde von Clemens in [Cle99] durchgeführt. Betrachtungsschwerpunkte sind die zunehmende Zahl dezentraler kleiner regenerativer Einspeisungen und die Planung von altersbedingt notwendigen Instandhaltungsmaßnahmen.

Zell beschäftigt sich in [Zel00] mit der monetären Bewertung von einzelnen Kraftwerken und Kraftwerkspools, um die Wirtschaftlichkeit der Stromerzeugung zu optimieren. Dies liefert Anhaltspunkte, wenn es darum geht Stillstandsstunden monetär zu bewerten.

Richter und Gölz untersuchen in [Ric01] die wirtschaftliche Optimierung von einzelnen Kraftwerken, basierend auf der RAM-Prognose. Hierbei wird die Zeitverfügbarkeit eines Verfügbarkeitsblockdiagramms mit Hilfe der Monte-Carlo-Simulationen bestimmt.

Rigdon und Basu haben mit [Ste00] ein Buch über die Grundlagen der Zuverlässigkeitsprognose geschrieben. Es wird neben dem reinen Ausfallverhalten auch der Reparaturvorgang betrachtet. Des Weiteren werden verschiedene Verteilungen, unter anderem die Gamma-Verteilung, vorgestellt.

Kececioglu hat mit [Kec91] ein umfassendes Werk geschrieben, das sehr detailliert auf die verschiedenen Verteilungen eingeht und viele Beispiele enthält. Hervorzuheben sind außerdem die acht Punkte, die er unter 6.8 (S. 313/314) als Gründe für den Einsatz der Weibull-Verteilung aufführt. Einige der Punkte sind eine Auflistung von diversen Bauteilen, deren Ausfallraten weibull-verteilt sind. Neben diesen Bauteilen bestätigt Kececioglu in den restlichen Punkten, dass Ermüdungserscheinungen und die Lebensdauercharakteristiken von Subsystem allgemein gut mit Weibull-Verteilungen abbildet werden können.

Meyna und Pauli geben mit [Arn03] einen Überblick über die Zuverlässigkeitsprognose. Bemerkenswert sind die vielen Abbildungen und Beispiele. Das Buch ist anwendungsorientiert und leicht verständlich geschrieben. Es gibt nicht nur einen Überblick über das Kernthema, sondern widmet sich auch ausgiebig den Randgebieten, wie der Booleschen Algebra und den verschiedenen Verfahren zur Parameterschätzung.

Waller und Scherer haben in einem Artikel [Wal99] die Auslegung redundanter Komponenten behandelt. Insbesondere wurden Auslegungsvarianten mit wenigen Komponenten, die in Summe 100% der benötigten Leistung besitzen, mit Varianten mit höherer Komponentenanzahl bei geringerer Einzelleistung verglichen.

Bovert behandelt in [Bov00] die Verfügbarkeitsmodellierung von Förder- und Lagersystemen, wobei die Speichermodellierung ein wesentlicher Punkt für die Güte seines Modells ist. Im Vorfeld der Modellierung wurde untersucht, ob ein Boolescher Ansatz oder die Markov-Theorie besser zum Umsetzen der Aufgaben geeignet ist. Die Entscheidung wird zugunsten der Markov-Theorie getroffen. Mit ihr werden sieben elementare Strukturgruppen modelliert, aus denen ein Modell für ein Förder- und Lagersystem im Baukastenprinzip erstellt wurde. Die Einschränkungen, unter denen das Modell anwendbar ist, sind jedoch sehr restriktiv. So ist ein gleichzeitiger Ausfall mehrerer Komponenten unzulässig. Ferner werden Alterung und Verschleiß vernachlässigt. Dies dient dazu, den Markov-Graphen beherrschbar zu halten.

[Cor81] ist ein weiteres Werk über die Grundlagen der Verfügbarkeitsprognose. Der Autor, Mc Cormick, hat in seinem Buch eine Übersicht über die

verschiedenen Tabellenwerke zur Verfügbarkeit gegeben, die es 1981 gab. In den meisten Fällen geben diese Tabellen immer noch Orientierungswerte für die Lebensdauer heutiger Komponenten.

Lisnianski und Levitin haben in [Ana03] die Verfügbarkeit von Systemen untersucht, deren Komponenten mehr Zustände als nur "intakt" und "ausgefallen" besitzen. Hierzu wurden Markov-Graphen eingesetzt, an Hand derer das System mit Hilfe von genetischen Algorithmen (siehe auch Kapitel 5) optimiert wurde, um eine höhere Verfügbarkeit bei begrenzten Ressourcen zu erreichen.

Fishman hat in [Fis95] zur Auswertung unter anderem das Monte-Carlo-Verfahren eingesetzt. In seiner Arbeit werden verschiedene Algorithmen zur Monte-Carlo-Simulation sowohl mathematisch hergeleitet als auch in programmnahe Form beschrieben.

In der vorliegenden Arbeit werden einzelne Grundlagen aus den vorgenannten Veröffentlichungen genutzt. Dort wo ein stärkerer Bezug zu einer einzelnen Arbeit auftritt wird diese explizit zitiert.

Kapitel 3

Allgemeine Grundlagen

3.1 Stochastische Betrachtung einer Komponente

In der Regel ist im Voraus der genaue Zeitpunkt eines Ausfalls unbekannt. Die Zeitpunkte lassen sich nicht exakt angeben, sondern müssen zum Beispiel als Verteilungs- oder Dichtefunktion oder als Ausfallrate beschrieben werden. Es kann sich bei den Informationen über das Ausfallverhalten daher nur um stochastische Größen handeln.

Im Rahmen dieser Arbeit handelt es sich bei allen betrachteten Zufallsvariablen um Zeitpunkte, bzw. Betriebsdauern. Daher werden die stochastischen Funktionen im Folgenden als Funktionen der Zeit betrachtet.

3.1.1 Verteilungsfunktion

Die Verteilungsfunktion $F(t)$ beschreibt, mit welcher Wahrscheinlichkeit die Größe T (z.B. ein Ausfallzeitpunkt) kleiner gleich dem betrachteten Zeitpunkt t ist. Hierbei wird die Wahrscheinlichkeit über der Zeitachse aufgetragen. Liegt der betrachtete Zeitpunkt t unterhalb des möglichen Wertebereichs, so ist die Wahrscheinlichkeit, dass T unterhalb von t liegt, bei Null. Innerhalb des möglichen Wertebereichs von T steigt die Wahrscheinlichkeit monoton an, d.h. für $T_1 < T_2$ gilt $F(T_1) \leq F(T_2)$. Am oberen Rand des möglichen Wertebereichs von T wird $F(t)$ zu 1, da T mit Sicherheit kleiner gleich dem maximal zulässigen Wert ist, wie in Abbildung 3.1 zu sehen. Wenn es

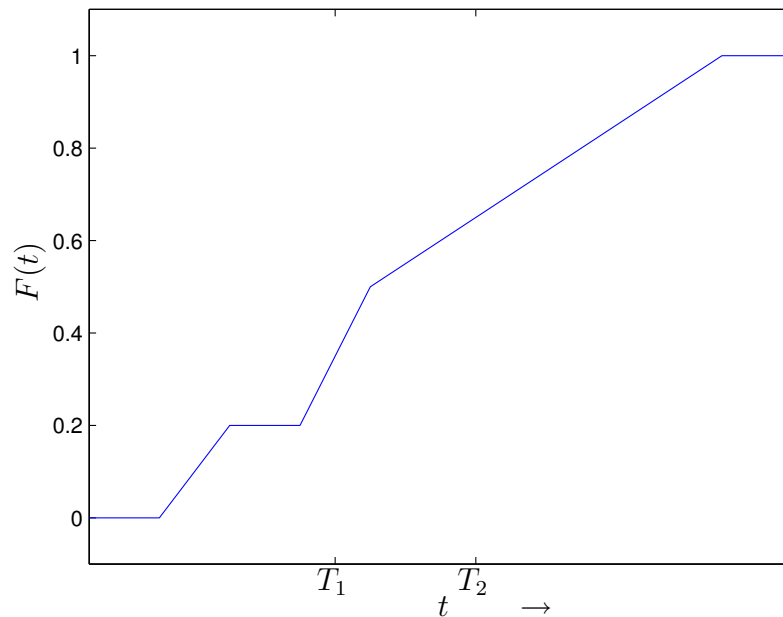


Abbildung 3.1: Ein Beispiel einer möglichen Verteilungsfunktion

sich bei der Zufallvariablen um das Ausfallverhalten einer Komponente handelt, so gibt die Verteilungsfunktion $F(t)$ an, wie groß die Wahrscheinlichkeit eines Ausfalls bis zum Zeitpunkt t ist.

3.1.2 Dichtefunktion

Eine andere Darstellungsform für stochastische Größen ist die Dichtefunktion $f(t)$. Sie ist die Ableitung der Verteilungsfunktion $F(t)$. Das Integral 3.1 beschreibt, mit welcher Wahrscheinlichkeit T zwischen a und b liegt.

$$\int_a^b f(\tau) d\tau = F(b) - F(a) \quad (3.1)$$

Handelt es sich bei der Zufallsvariablen um das Ausfallverhalten einer Komponente, so ist die Dichtefunktion $f(t)$ ein Maß dafür, wie groß die Wahrscheinlichkeit ist, dass der Ausfall genau zum Zeitpunkt t stattfindet.

3.1.3 Ausfallrate λ

Eine weitere Darstellungsform, die besonders für die Zuverlässigkeitsrechnung von Interesse ist, ist die Ausfallrate λ . Sie gibt an, mit welcher Wahrscheinlichkeit ein zum Zeitpunkt $t_1 - \Delta t$ mit $\Delta t \rightarrow 0$ intaktes Gerät zum Zeitpunkt t_1 ausfällt. Sie berechnet sich, wie in Gleichung 3.2 dargestellt, aus Verteilungs- und Dichtefunktion.

$$\lambda(t) = \frac{f(t)}{1 - F(t)} \quad (3.2)$$

Die graphische Darstellung der Ausfallrate wird ihrer charakteristischen Form wegen auch als "Badewannenkurve" bezeichnet. Ein typischer Verlauf ist in Abbildung 3.2 dargestellt.

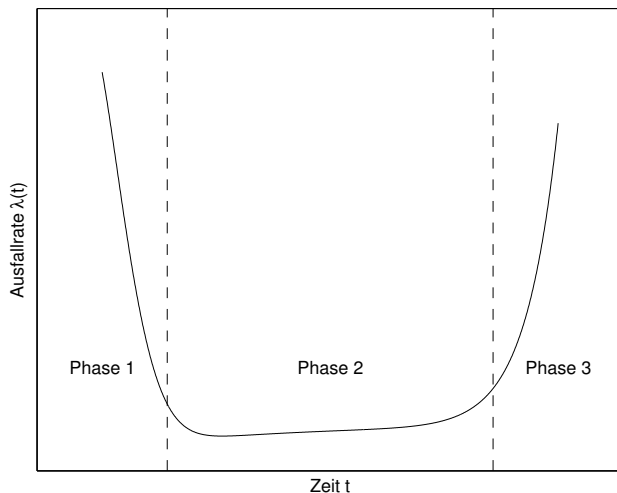


Abbildung 3.2: Skizze eines typischen Verlaufs der Ausfallrate

Sie fällt zu Beginn stark ab, bleibt in der Mitte fast konstant und steigt gegen Ende wieder an. Diese Abschnitte korrespondieren mit den Abschnitten im Lebenszyklus einer Komponente. Der starke Abfall zu Beginn stellt eine Art Einlaufzeit dar, während der minderwertige oder schlecht montierte Bauteile ausfallen. Der Abschnitt in der Mitte stellt das von minderwertigen Bauteilen bereinigte normale Betriebsverhalten dar. In Phase 3 erreicht die Komponente das Ende ihrer natürlichen Lebensdauer. In diesem Abschnitt fallen die Komponenten dann auf Grund ihrer normalen Verschleißerscheinungen aus.

TTF (Time to Failure)

Die Zeit, die von einem Zeitpunkt $T_{rep\ fertig}$, zu dem die Komponente frisch repariert ist, bis zum nächsten Ausfall vergeht, wird auch als TTF (Time to Failure) bezeichnet. Als Mittelwert MTTF (Mean Time to Failure) wird sie auch häufig zum Beschreiben der Zuverlässigkeit einer Komponente im System verwendet. Sie hängt jedoch nicht nur von der Komponente selbst, sondern auch von ihrer Belastung durch das System seit dem Einbau ab. Für eine realistische Modellierung der Komponente reicht es jedoch nicht aus, nur das Ausfallverhalten zu betrachten, es muss auch betrachtet werden, wie die notwendige Reparatur vonstatten geht.

TTR (Time to Repair)

Die Zeit, die von einem Zeitpunkt $T_{Ausfall}$, zu dem die Komponente ausfällt, bis zum Abschluss der Reparatur vergeht, wird auch als TTR (Time to Repair) bezeichnet. Ähnlich wie die TTF wird auch die TTR häufig als Mittelwert MTTR zum Beschreiben einer Komponente im System eingesetzt. Sie ist jedoch nicht nur von der Komponente selbst, sondern auch von der Geschwindigkeit der Fehlerdiagnose und der Zugänglichkeit in der Anlage abhängig. Die Reparaturdauer lässt sich ebenfalls durch eine Verteilungsfunktion darstellen.

Diese beiden Verteilungen beschreiben das Betriebsverhalten einer einzelnen Komponente aus Sicht der Zuverlässigkeit. Der Einfachheit halber werden sie durch gewichtete Standardfunktionen angenähert.

MTBF (Mean Time Between Failures)

Ebenfalls häufig wird die MTBF (Mean Time Between Failures) angegeben, die die Summe aus MTTF und MTTR ist. Sie ist meist leicht zu bestimmen, da hierzu die Ausfallzeitpunkte ausreichen. Das Verhältnis von Reparatur- zu Betriebszeit muss dazu nicht bekannt sein.

3.2 Verteilungen für Zufallsvariablen

Es gibt einige typische Verteilungsfunktionen, die zum Beschreiben von Vorgängen in der Natur und der Technik besonders wichtig und weit verbreitet sind. An dieser Stelle seien nur die wichtigsten Drei für die Beschreibung des

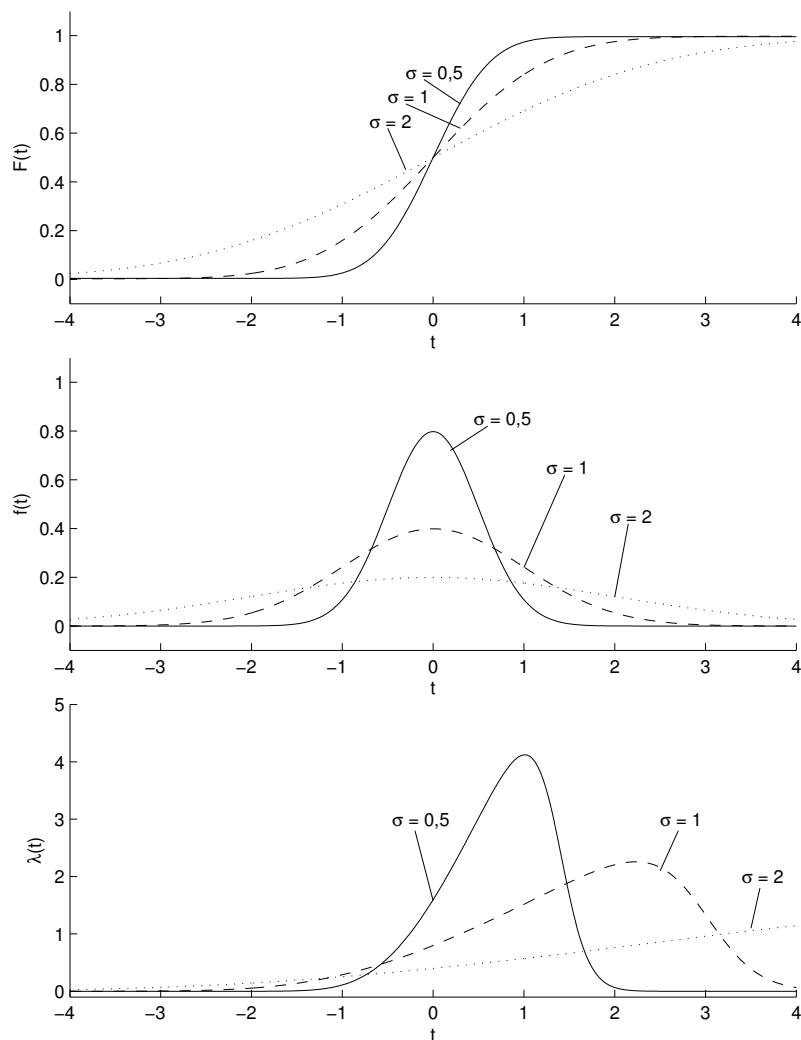


Abbildung 3.3: Verteilungs- und Dichtefunktion, sowie Ausfallrate der Normalverteilung für $\mu = 0$

Ausfallverhaltens genannt. Für diese Verteilungen werden im Folgenden Verteilungsfunktion $F(t)$, Dichtefunktion $f(t)$ und Ausfallrate $\lambda(t)$ angegeben. Die zugehörigen Bilder stellen den Fall einer kontinuierlichen Zufallsvariablen dar, da im Rahmen dieser Arbeit nur kontinuierliche, bzw. bei Simulationen am Computer quasi-kontinuierliche, Zufallsvariablen verwendet werden. Die Überlebenswahrscheinlichkeit $R(t)$ wird im Folgenden nicht explizit angegeben, da sich $R(t)$ sehr einfach aus $F(t)$ berechnen lässt. Der Vollständigkeit halber sei hier die Umrechnung von $F(t)$ in $R(t)$ angegeben:

$$R(t) = 1 - F(t) \quad (3.3)$$

3.2.1 Normalverteilung

Die Normalverteilung (Abb. 3.3), auch als Gauss-Verteilung bekannt, besitzt eine glockenförmige Dichtefunktion, die zum Erwartungswert μ symmetrisch ist. Als weiteren Parameter besitzt sie noch die Standardabweichung σ , ein Maß für die Streuung der Zufallsvariable. Mit diesen zwei Parametern ist die Verteilung bereits eindeutig festgelegt.

$$F(t) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^t e^{-\frac{(t-\mu)^2}{2\sigma^2}} dt \quad (3.4)$$

$$f(t) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(t-\mu)^2}{2\sigma^2}} \quad (3.5)$$

$$\lambda = \frac{f(t)}{1 - F(t)} \quad (3.6)$$

Die Normalverteilung ist in der Technik sehr verbreitet, da sich ihre Parameter anhand einer realen Stichprobe relativ sicher bestimmen lassen. Was die Beschreibung des Ausfallverhaltens betrifft, ist sie jedoch weniger geeignet, da sie drei Nachteile hat:

- Da der Parameter σ lediglich die Streuung beeinflusst, lassen sich mit ihr ausschließlich Verteilungen mit einem einzigen Häufungspunkt bei $t = \mu$ nachbilden. Die Ausfallwerte sind dann symmetrisch zu μ verteilt.
- Die zur Berechnung von $F(t)$ verwendeten Integrale lassen sich nicht analytisch lösen. Stattdessen wird der Funktionswert iterativ berechnet oder aus einer Tabelle entnommen.

- Die Eingangsgröße der Normalverteilung besitzt einen Wertebereich von $-\infty$ bis $+\infty$, während sich eine Ausfallzeit im Bereich zwischen 0 und $+\infty$ bewegt. Dies macht es erforderlich, das Ergebnis einer inversen Dichtefunktion auf seine Zulässigkeit zu überprüfen. Gegebenenfalls muss der Wert der Zufallsvariable neu zu erzeugt werden. Alternativ zur Überprüfung kann eine, für $t < 0$ ausgeblendete, neu skalierte Verteilung verwendet werden.

3.2.2 Exponentialverteilung

Die Dichtefunktion der Exponentialverteilung (Abb. 3.4) ist eine abfallende e-Funktion, die für eine Zeit kleiner Null ausgeblendet, d.h. zu Null gesetzt, ist. Die Ausfallrate ist für positive Zeiten konstant. Damit ist die Exponentialverteilung nur für die Beschreibung eines stationären Ausfallverhaltens, wie es im Mittelteil des typischen Ausfallverhaltens einer Komponente auftritt, geeignet. Die Vernachlässigung einer erhöhten Ausfallwahrscheinlichkeit am Anfang und der Verschleißerscheinungen am Ende des Lebenszyklus mögen im Einzelfall gerechtfertigt sein, jedoch für die große Masse der Komponenten scheidet die Exponentialverteilung damit aus.

$$F(t) = 1 - e^{-\lambda t} \quad (3.7)$$

$$f(t) = \lambda e^{-\lambda t} \quad (3.8)$$

$$\lambda(t) = \lambda = \text{const.} \quad (3.9)$$

3.2.3 Weibullverteilung

Die Weibullverteilung (Abb. 3.5) ist in ihrer Kurvenform sehr variabel, da sie drei Formparameter besitzt, α , β und γ . Dies führt dazu, dass sie die in der Zuverlässigkeitsprognose am häufigsten eingesetzte Verteilung ist.

Während der Parameter γ es ermöglicht, die Verteilung auf der Zeitachse zu verschieben, bestimmen α und β die Form der Verteilung.

Der Parameter β dient dazu, die Dichte $f(t)$ entlang der Zeitachse zu dehnen und gleichzeitig die Amplitude der Dichte so zu reduzieren, dass das Integral eins ergibt.

Der Parameter α ist in der Wirkung komplexer. Für $\alpha = 1$ ergibt sich eine Exponentialverteilung. In der Dichtefunktion gibt es eine Nullstelle ($\alpha - 1$ ten

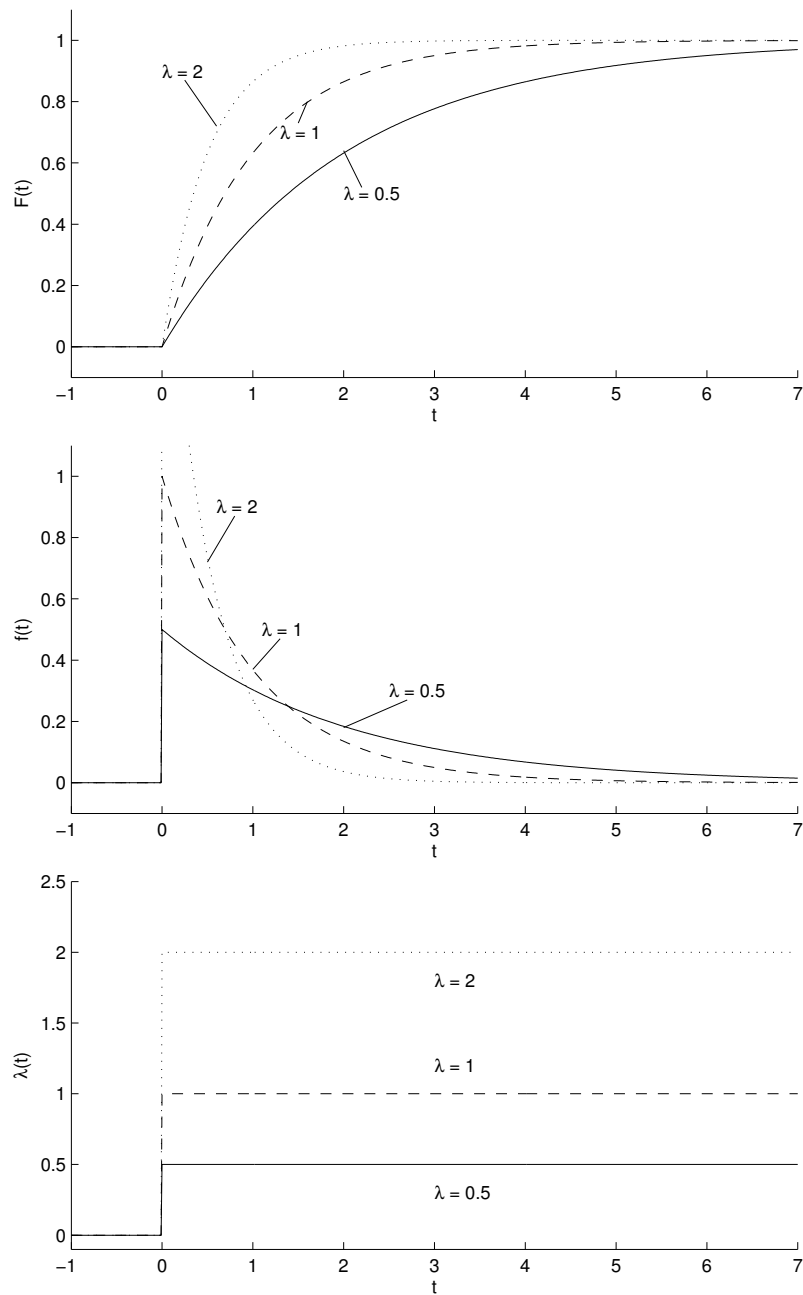


Abbildung 3.4: Verteilungs- und Dichtefunktion, sowie Ausfallrate der Exponentialverteilung

Grades an der Stelle $t - \gamma$, das heißt also zu Beginn der Dichtefunktion. Für $\alpha = 1$ macht sich die Nullstelle nicht bemerkbar, da sie dann den Grad 0 hat. Für $\alpha > 1$ beginnt die Dichte bei Null, um dann nach einem Maximum wieder gegen Null zu konvergieren. Hierbei sind, je nach Grad der Nullstelle, unterschiedlich viele ihrer Ableitungen zu Beginn ebenfalls Null. Für $\alpha < 1$ beginnt die Dichte bei $+\infty$, da eine Nullstelle negativen Grades eine Polstelle ist. Anschließend fällt sie hyperbel-ähnlich ab.

$$F(t) = 1 - e^{-\left(\frac{t-\gamma}{\beta}\right)^\alpha} \quad (3.10)$$

$$f(t) = \frac{dF}{dt} = \frac{\alpha(t-\gamma)^{\alpha-1}}{\beta^\alpha} e^{-\left(\frac{t-\gamma}{\beta}\right)^\alpha} \quad (3.11)$$

$$\lambda(t) = \frac{f(t)}{1 - F(t)} = \frac{\alpha(t-\gamma)^{\alpha-1}}{\beta^\alpha} \quad (3.12)$$

Was den Einsatz der Weibullverteilung zur Modellierung der Verfügbarkeit betrifft, so haben Beckmann und Marx [Bec94] für den Parameter α folgende Vorschläge gemacht:

- 1 ... 1,5: Lockerung von Befestigungsteilen, Bruch bei Überbeanspruchung, Durchschlag von Isolationsmaterial u.ä.
- 1,5 ... 2: Abnutzung geschmierter Anlagenteile
- 2: Ermüdung durch niederzyklische Beanspruchung und Dauerbeanspruchung, Korrosion, Schäden an Schaltkontakten
- 3: Abrieb durch Fremdstoffe oder ungeschmierte Anlagenteile, Erosion, Alterung u.ä.

Vertiefende Informationen über die Weibullverteilung können bei [Kec91, Kap.6] nachgelesen werden. Die Nomenklatur weicht dort jedoch von der hier benutzten Nomenklatur ab, die aus [Bec94] übernommen ist.

Diese Arbeit und [Bec94]	[Kec91]
α	β
β	η
γ	γ

Wegen ihrer guten Anpassbarkeit wird die Weibull-Verteilung häufig bei der Abbildung des Ausfallverhaltens eingesetzt.

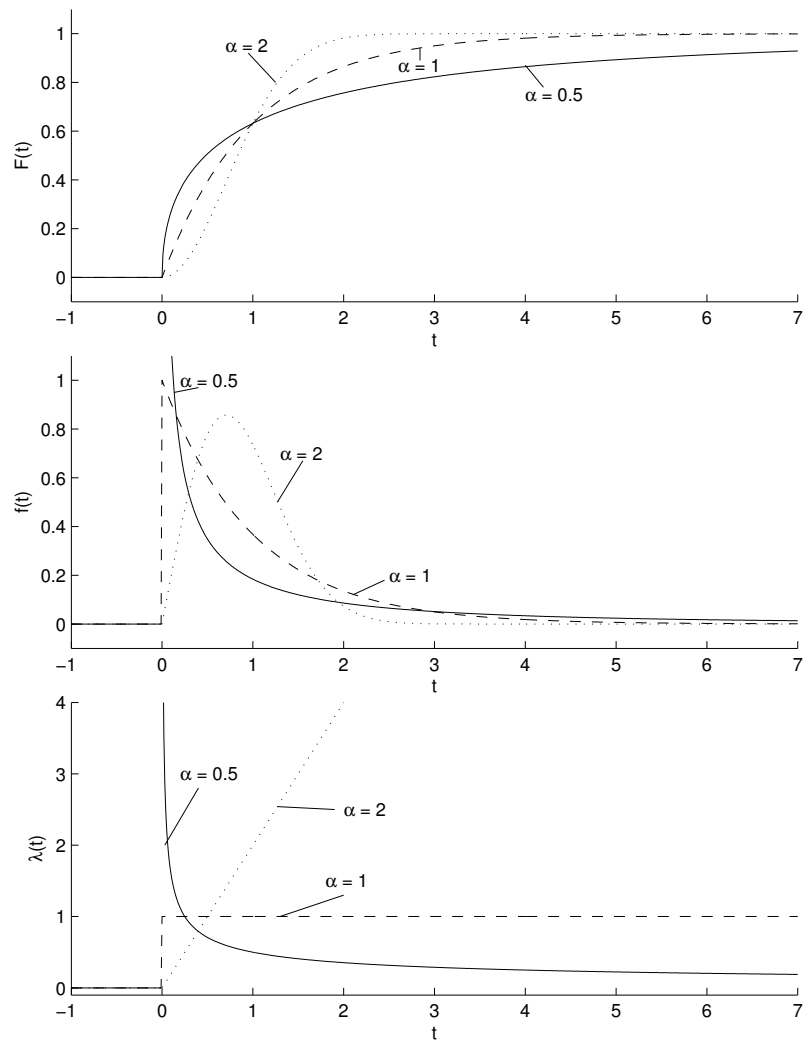


Abbildung 3.5: Verteilungs- und Dichtefunktion, sowie Ausfallrate der Weibullverteilung für $\beta = 1$ und $\gamma = 0$

3.2.4 Gleichverteilung

Die Gleichverteilung (Abb. 3.6) ist die einfachste aller Verteilungen. Eines der bekanntesten Beispiele für eine Gleichverteilung ist das Ergebnis eines Würfelwurfs. Jede Zahl ist gleich wahrscheinlich. In der Computertechnik ist eine gleichverteilte Zufallsvariable der Ausgangspunkt für jede zu erzeugende Zufallszahl. Dies kommt daher, dass ein Computer zwar eine Zufallsbitfolge mit fester Länge erzeugen kann, jedoch ist es nicht möglich, ihm bereits beim Erzeugen unterschiedliche Wahrscheinlichkeiten für bestimmte Kombinationen vorzugeben. Alle möglichen Bitfolgen dieser Länge sind gleich wahrscheinlich. Erst nach dem Erzeugen wird die Variable in die gewünschte Verteilungsfunktion umgerechnet.

Das Erzeugen einer nicht gleichverteilten Zufallszahl beginnt mit dem Erzeugen einer zwischen 0 und 1 gleichverteilten Zufallszahl. Diese wird dann über eine inverse Verteilungsfunktion in die gewünschte Verteilung umgerechnet. Auf diese Weise z. B. werden alle Zufallszahlen für die Monte-Carlo-Simulationen in der Verfügbarkeitsprognose erzeugt.

$$F(t) = \begin{cases} 0 & \text{für } t < a \\ \frac{t-a}{b-a} & \text{für } a < t < b \\ 1 & \text{für } b < t \end{cases} \quad (3.13)$$

$$f(t) = \begin{cases} 0 & \text{für } t < a \\ \frac{1}{b-a} & \text{für } a < t < b \\ 0 & \text{für } b < t \end{cases} \quad (3.14)$$

$$\lambda(t) = \frac{f(t)}{1 - F(t)} = \begin{cases} 0 & \text{für } t < a \\ \frac{1}{b-t} & \text{für } a < t < b \\ \text{nicht definiert} & \text{für } b < t \end{cases} \quad (3.15)$$

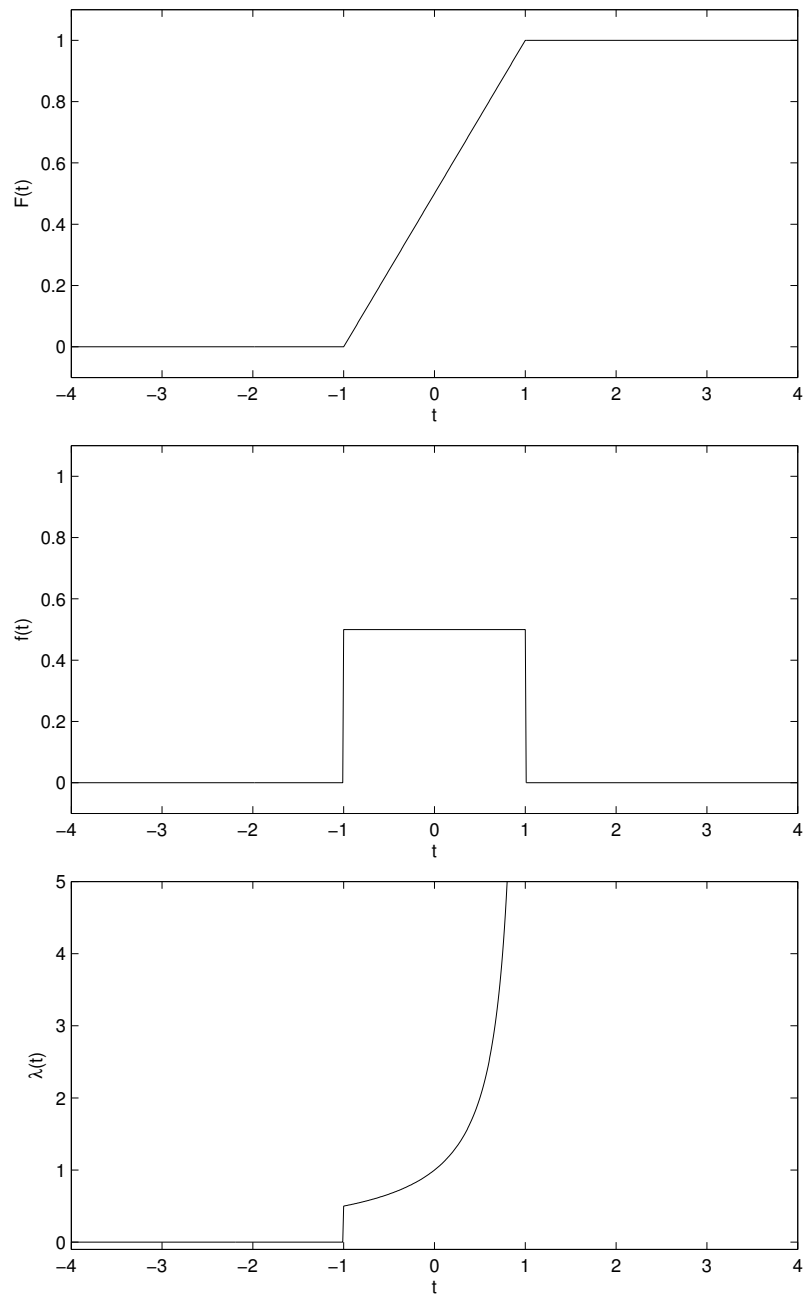


Abbildung 3.6: Verteilungs- und Dichtefunktion, sowie Ausfallrate der Gleichverteilung für $a = -1$ und $b = 1$

3.3 Klassifizierung von Optimierungsverfahren

Für die Wahl eines geeigneten Optimierungsverfahrens ist es zunächst notwendig, sich über die Natur der Aufgabenstellung oder des "Problems" klar zu werden.

Analytisch lösbar

Zunächst gibt es die Menge der in polynomialer¹ Zeit analytisch lösbaren Aufgaben, die dadurch gekennzeichnet ist, dass die Lösung sich direkt aus den Parametern der Aufgabe berechnen lässt, wie zum Beispiel die Nullstellen einer Parabel.

Bei einem analytischen Vorgehen wird das Problem in seinen Bestandteilen betrachtet, um über das hierdurch gewonnene Verständnis zur Lösung des Problems zu gelangen. Für die Berechnung des Optimums einer analytisch lösbaren Aufgabenstellung wird daher kein schrittweises Optimierungsverfahren benötigt, die Lösung kann in einem Schritt berechnet werden. Allerdings gibt es in der Praxis auch viele Aufgaben, die nicht analytisch sondern nur numerisch lösbar sind.

Numerisch lösbar

Die verbleibende Menge der nur numerisch lösbaren Aufgaben wird in der Literatur meist zunächst nach ihrer stetigen Differenzierbarkeit unterschieden.

¹Wichtig hierbei ist die Einschränkung der polynomialen Zeit. Der Begriff "polynomial" bezieht sich auf die benötigte Rechenzeit in Abhängigkeit von der Anzahl der Variablen. Ist es hierbei nicht möglich ein Polynom in Abhängigkeit der Variablenanzahl anzugeben, dass für eine gegen Unendlich gehende Variablenanzahl größer ist als die Rechenzeit, dann ist das Problem nicht in polynomialer Zeit lösbar. Die Grenze hierbei stellt die Exponentialfunktion dar. Als Gleichungen lässt sich dies wie folgt darstellen:

$$x = \text{Anzahl der Variablen des Problems} \quad (3.16)$$

$$y = \text{Rechenaufwand des Algorithmus} \quad (3.17)$$

$$y \leq x^n \quad \text{für } x \rightarrow \infty \quad n = \text{const.} \quad (3.18)$$

Lineare Optimierung

Eine relativ weit verbreitete Aufgabenstellung ist die Suche des Optimums einer linearen Funktion entlang linearer Restriktionen. Für diese Aufgabe wurde der Simplex-Algorithmus entwickelt, der sich von einem Schnittpunkt der Restriktionen zum nächst besseren Nachbarn weiterbewegt, bis er das Optimum gefunden hat. Mit der Einschränkung auf lineare Funktionen stellt er die schärfsten Anforderungen an die Ableitung, da sie konstant sein muss.

Ableitungsbasierende Verfahren für nichtlineare Funktionen

Für die Einteilung der differenzierbaren Funktionen werden die Kategorien "ohne Restriktionen", "mit linearen Restriktionen" und "mit nichtlinearen Restriktionen" verwendet. Der prinzipielle Ablauf nach der Wahl des Startpunktes bei ableitungsbasierenden Verfahren sieht wie folgt aus:

1. *Überprüfung der Abbruchbedingung*

Es wird überprüft, ob die bisher gefundene Lösung das Abbruchkriterium erfüllt. Neben der Bewertung der momentanen Lösung gibt es in der Regel noch eine "Notbremse", die die Optimierung beendet, falls kein sinnvolles Ergebnis gefunden wurde.

2. *Bestimmung der Abstiegsrichtung*

An diesem Punkt kommen in der Regel die Ableitungen zum Einsatz, um die Richtung zu bestimmen.

3. *Berechnung der Schrittweite*

Auch hier wird häufig auf die Ableitungen zurückgegriffen, um eine sinnvolle Schrittweite zu ermitteln.

4. *Durchführung*

Es wird ein neuer Punkt basierend auf Abstiegsrichtung und Schrittweite gebildet, der, falls er die Abbruchbedingung nicht erfüllt, zum Ausgangspunkt des nächsten Schrittes wird. Bei Erfüllung der Abbruchbedingung ist der neue Punkt das Ergebnis, ansonsten beginnt der Ablauf von vorne.

Restriktionsfreie Optimierung

Ein typisches Beispiele für die ableitungsbasierenden Verfahren ohne Berück-

sichtigung von Restriktionen ist das Newton-Verfahren². Im Falle des eindimensionalen Newton-Verfahrens entspricht dies dem Anlegen einer Tangente im Punkt x_k an die Kurve, um deren Schnittpunkt mit der X-Achse als neuen Startpunkt x_{k+1} zu berechnen.

$$x_{k+1} = x_k - \frac{f(x_k)}{f'(x_k)} \quad (3.19)$$

Wesentlicher Unterschied zwischen dem Newton-Verfahren und den anderen Verfahren ist die Wahl der Abstiegsrichtung und der Schrittweite. Während bei Newton beides durch die Tangente und ihre Nullstelle bestimmt ist, gibt es beispielsweise noch das Gradienten-Verfahren, das sich mit vordefinierter Schrittweite an der Ableitung entlang tastet. Die Schrittweite wird bei diesem Verfahren also nicht an die Aufgabenstellung angepasst.

Das Trust-Region-Verfahren versucht, die Funktion lokal zu approximieren, wobei in der Regel Polynome verwendet werden.³ Anschließend wird die Nullstelle der Näherungsfunktion mit einem beliebigen Verfahren gesucht. Sollte die Nullstelle außerhalb des Bereiches mit ausreichender Approximationsgüte liegen, so wird am entsprechenden Rand dieses Bereiches eine neue Approximation durchgeführt. Dies wiederholt sich bis die Nullstelle innerhalb des Bereiches liegt. Die Nullstelle der Näherungsfunktion ist mit ausreichender Approximationsgüte die Nullstelle der Funktion.

Lineare Restriktionen

Liegen die Restriktionen in Form von Gleichungen vor, wird das Problem durch eine Transformation in ein dimensionsreduziertes restriktionsfreies Problem überführt, gelöst und die Lösung wird anschließend zurück transformiert.

Handelt es sich bei den Restriktionen um Ungleichungen, so wird das SQP-Verfahren (Sequentiell Quadratic Programming, auch als sequentielle quadratische Minimierung bekannt) angewandt, bei dem, ähnlich wie beim Trust-Region-Verfahren, eine Reihe von quadratischen Näherungen des Problems gelöst wird, um sich iterativ der Lösung zu nähern.⁴

²Bei allen auf dem Newton-Verfahren basierenden Methoden wird implizit eine Beschränktheit des Betrags der ersten Ableitungen vorausgesetzt, siehe lipschitzsche Bedingung [Kel99], [Bro99]. Für den Fall $y' = f(x, y)$ wäre die Lipschitz-Bedingung:

$$|f(x, y_1) - f(x, y_2)| \leq N|y_1 - y_2| \quad N = \text{const}$$

³Die für das Polynom relevanten Ableitungen müssen lipschitz-stetig sein.

⁴Die Funktion muss zweimal lipschitz-stetig sein.

Nichtlineare Restriktionen

Hier wird unter Umständen das Lagrange-Newton-SQP-Verfahren [Wal02] eingesetzt. Dieses Verfahren versucht die Nebenbedingungen in das Gleichungssystem zu integrieren, um auf ein restriktionsfreies Gleichungssystem zu kommen. Es gibt jedoch für einige nichtlineare Probleme problemspezifische Ansätze, deren Erläuterung an dieser Stelle zu weit führen würde.

Ableitungsfreie Verfahren

Für das Thema dieser Arbeit sind die ableitungsfreien Verfahren von besonderem Interesse. In diesem Bereich gibt es im Wesentlichen zwei Verfahren:

- Das Nelder-Mead-Verfahren, bei dem deterministisch ausgehend von einer Startpunktemenge immer der schlechteste Punkt verbessert wird.
- Die evolutionären Verfahren (auch als genetische Algorithmen, Evolutionsstrategie oder unter Variationen dieser Begriffe bekannt), bei denen stochastisch Änderungen an einer Punktemenge vorgenommen werden, um die Punktemenge zu verbessern.

Nelder-Mead-Verfahren

Für die Suche eines Optimums im n -dimensionalen Raum werden beim Nelder-Mead-Verfahren $n + 1$ Startpunkte gewählt. Diese müssen einen Simplex aufspannen, einen in alle n Dimensionen ausgedehnten Körper.

Der sich wiederholende Ablauf des Algorithmus ist wie folgt:

1. Ermittlung des schlechtesten Punktes
2. Spiegelung dieses Punktes am geometrischen Schwerpunkt der anderen Punkte.
3. Bewertung der Spiegelung
4. Vergleich der Bewertungen und Berechnung eines Ersatzpunkts für den schlechtesten Punkt aus dem ersten Schritt
5. Überprüfung der Abbruchbedingungen (Ergebnis ausreichend gut, zu viele Iterationen und / oder Detektion von Konvergenzproblemen)

Voraussetzungen für die Anwendbarkeit des Nelder-Mead-Verfahrens sind:

- Eine sinnvolle Spiegelung der Punkte ist möglich. Bei der in dieser Arbeit betrachteten Instandhaltungsplanung würden beim Spiegeln innerhalb der Periodendauern der verschiedenen Maßnahmen große Lücken auftreten. Somit ist das Verfahren nicht sinnvoll anwendbar.
- Die Funktion sollte keine Nebenminima besitzen, da der Algorithmus zum ersten Minimum, das er findet, konvergiert und nicht einmal versucht, dieses wieder zu verlassen. Die in dieser Arbeit betrachtete Aufgabenstellung besitzt viele Nebenminima. Dies geht darauf zurück, dass zu jeder Periodenwahl eine optimale Komponentenzuordnung existiert. Bei einer Änderung der Periodenwahl führt eine, auf den alten Wert optimierte, Komponentenzuordnung in der Regel zu einer Verschlechterung. Bei der Einführung eines Interpretationsschrittes werden diese Minima durch große flache Bereiche ersetzt, in denen dann mehrere Ecken des Simplex gleichwertig sind, was das Bestimmen einer schlechtesten Ecke erschwert.

Ein weiteres Argument gegen den Einsatz des Nelder-Mead-Verfahrens ist, dass die betrachtete Aufgabe je nach Detaillierung des Modells der Kraftwerksanlage 70 oder mehr Dimensionen haben kann. Eine Spiegelung im 70-dimensionalen Raum ist nicht mehr so trivial, wie sie im zweidimensionalen Beispiel aussieht und erfordert deutlich mehr Rechenleistung.

Evolutionäre Verfahren

Hierbei handelt es sich um eine Gruppe von Verfahren, bei denen die Funktionsweise der Evolution und Vererbung, wie sie Darwin und Mendel in ihren Werken beschreiben, abstrahiert und auf technische Probleme angewandt wird. Hierbei werden stochastische Methoden eingesetzt, um neue Lösungen zu generieren.

Ursprünglich entstanden ist diese Gruppe aus mehreren unterschiedlichen Verfahren, die in der Zeit zwischen 1966 und 1975 entwickelt wurden, wie bereits in Abschnitt 2.3 ausgeführt.

Am Anfang dieser Optimierungsverfahren muss zunächst eine Menge von Startpunkten erzeugt werden. Im Gegensatz zum Nelder-Mead-Verfahren ist hierbei keine exakte Anzahl vorgeschrieben, zwei bis drei Punkte sind theoretisch ausreichend, mehr verbessern jedoch das Konvergenzverhalten. Da es sich hierbei um ein stochastisches Verfahren handelt, ist nur eine stochastische Aussage zur Konvergenzgeschwindigkeit möglich, die jedoch in der Praxis stark vom Problem abhängt. Somit sind also nur sehr vage Schätzun-

gen der Konvergenzgeschwindigkeit möglich, lediglich eine Divergenz kann sicher ausgeschlossen werden.

Der prinzipielle, sich wiederholende Ablauf nach der Wahl der Startpunkte ist:

1. Erzeugung neuer Punkte
2. Bewertung der neuen Punkte
3. Aussortieren der schlechteren Punkte

Die Reihenfolge der Punkte kann variieren. Für die Details sei auf das spätere Kapitel 5 verwiesen.

Diese Gruppe von Verfahren stellt so gut wie keine Voraussetzungen für ihre Anwendbarkeit an das Problem. Sobald es möglich ist, eine Lösung zu bewerten, kann die Lösung mit den genetischen Algorithmen optimiert werden. Dafür ist es schwer, eine Aussage bezüglich der Konvergenz zu treffen.

Da keines der anderen Verfahren anwendbar bzw. erfolgversprechend ist, wird ein genetischer Algorithmus zur Optimierung der Instandhaltung in dieser Arbeit eingesetzt.

Kapitel 4

Grundlagen der Instandhaltung

4.1 Strategische Ansätze

In der Instandhaltung von Komponenten werden, wie eingangs erwähnt, drei verschiedene Ansätze unterscheiden:

1. Zustandsbezogene Instandhaltung:

Die zustandsbezogene Instandhaltung setzt voraus, dass sich über beobachtbare Größen Rückschlüsse auf den Zustand der Komponente ziehen lassen. Beispielsweise kann der Energieverlust (Absinken des Wirkungsgrads) in einer Komponente oder eine Veränderung der Lagerschwingung einer Welle ein Indikator für die Abnutzung sein. Diese Überwachung kann aber gerade bei komplexeren Anlagen technisch aufwändig sein, da hier eventuell überlagernde Abhängigkeiten zu anderen Komponenten vorliegen.

2. Zeitbezogene Instandhaltung:

Bei der zeitbezogenen Instandhaltung wird, basierend auf dem Wissen über die Komponente, ein sinnvolles Instandhaltungsintervall gewählt. Die Komponente hält dann mit einer bestimmten hohen Wahrscheinlichkeit bis zur geplanten Inspektion durch. Wegen der Möglichkeit, diese Maßnahmen für mehrere Jahre bis Jahrzehnte im Vorfeld zu planen, ist diese Instandhaltungsstrategie Schwerpunkt der, in dieser Arbeit behandelten, Langzeitoptimierung der Instandhaltungsplanung.

3. Schadensbezogene (risikoorientierte) Instandhaltung:

Instandsetzungsmaßnahmen können auch zurückgestellt werden, bis ein

Schadensfall eintritt. Damit werden jedoch eventuelle Folgeschäden und resultierend ein Absinken der Gesamtverfügbarkeit in Kauf genommen. Außerdem lassen sich Maßnahmen besser koordinieren, wenn sie im Vorfeld geplant werden und nicht erst bei einer unvorhergesehenen Havarie durchgeführt werden müssen.

Letztendlich bieten aber auch die beiden erstgenannten Strategien nie eine totale Sicherheit vor Ausfällen, weshalb zwangsläufig von Zeit zu Zeit auch bei anderen Strategien Schäden auftreten. Wenn die Instandhaltungskosten größer sind, als die präventionsbedingten Einsparungen bei Schadensbeseitigungen nebst Stillstandskosten, kann die schadensbezogene Instandhaltungsstrategie gewählt werden.

Auch wenn die vorbeugenden Instandhaltungsansätze schwerpunktmäßig verfolgt werden, so bleibt immer eine Restausfallwahrscheinlichkeit, weswegen es auch Schadensbeseitigungen gibt. Die beiden präventiven Ansätze sind optional und lassen sich auch an ein und derselben Komponente kombinieren.

Für die Wahl der Instandhaltung ist es wichtig, einen globalen oder zumindest möglichst weit greifenden, ganzheitlichen Kostenansatz zu wählen. Ein Grund hierfür ist, dass die Auswirkungen der Instandhaltung sich über die reinen Material- und Personalkosten der Instandhaltung hinaus auf die Ausfallzeiten auswirken. Insbesondere in der Energiewirtschaft, bedingt durch die schlechte Speicherbarkeit elektrischer Energie, wirken sich Stillstandszeiten empfindlich auf die Erlöse aus.

Außerdem muss zwischen der geplanten und der ungeplanten Nichtverfügbarkeit unterschieden werden. Bei einer geplanten Nichtverfügbarkeit kann im Vorfeld der Strom relativ preiswert als Reserveleistung eingekauft werden, bei einer ungeplanten Nichtverfügbarkeit muss der Strom teuer am Spotmarkt zugekauft werden.

Einschränkungen gegenüber dem Idealfall

Sowohl was die Reparaturen als auch was die Inspektionen betrifft, ist es notwendig, ihre Wirksamkeit im Modell einzuschränken.

Bei den Inspektionen geht dies darauf zurück, dass nicht jeder Fehler automatisch gefunden wird. Jede Inspektion kann mit einer bestimmten Wahrscheinlichkeit einen Fehler nicht entdecken. Aus dieser Überlegung heraus wurde in der Fachliteratur der Diagnosewirkungsgrad eingeführt (siehe z.B. [Kal08]: "Darunter versteht man die Wahrscheinlichkeit, dass ein Schaden,

der in der nächsten Betriebsperiode zu einem Ausfall führen würde, durch eine Inspektion erkannt und vor dem zu erwartenden Ausfall behoben werden kann”).

Aber auch bei der Reparatur müssen Einschränkungen in Kauf genommen werden. Die Qualität der eingebauten Ersatzteile oder der instandgesetzten Bauteile ist nicht mit der einer neuen Abnutzungseinheit gleichzusetzen. Hierbei gibt es in der Literatur zwei unterschiedliche Ansätze. Eine Variante ist die Einführung eines Erneuerungskoeffizienten, wie er von [Men03]¹ verwendet wird. Aber es gibt auch die Ansicht, dass eine Instandsetzung immer nur den Zustand der Komponente vor der Schädigung wiederherstellt, ohne ihren Abnutzungsgrad zu reduzieren, die sogenannte ”Minimalinstandsetzung”². Auf letzterer Ansicht beruhen die in [Gro76] entwickelten Gebrauchskostenfunktionen (siehe Abschnitt 4.3), die auch in dieser Arbeit zum Einsatz kommen. Dementsprechend wird hier ebenfalls der Ansatz der Minimalinstandsetzung gewählt.

4.2 Gesamtaufgabe

Ziel dieser Arbeit ist es, das wirtschaftliche Optimum der zeitbezogenen Instandhaltungsplanung zu finden. Erschwert wird die Optimierung der Gebrauchskostenfunktion durch die Synergieeffekte, die bei der gleichzeitigen Instandhaltung verschiedener Anlagenteile entstehen. Auf der einen Seite kann auf diese Weise Zeit gespart werden, auf der anderen Seite steht nur eine begrenzte Personalkapazität als Basis zur Verfügung, bzw. die Anlage kann nur einer begrenzten Personenanzahl gleichzeitig zugänglich gemacht werden. Die Instandhaltungsdauer ist wegen der begrenzten Zugänglichkeit und eventueller Abkühlzeiten nichtlinear. Die Einnahmeverluste durch Stillstände sind jahreszeitabhängig und werden durch ihren Optimalwert während der Frühlings-/Sommerzeit angenähert. Durch diese Näherung wird der Definitionsbereich der geplanten Instandhaltungsmaßnahmen auf die Sommermonate

¹Es wird eine prozentuale Erneuerung bei der Instandsetzung angenommen. Das Alter der Komponenten wird durch die Instandsetzung reduziert.

²[Gro76][S. 36] zur Minimalinstandsetzung: ”[...]durch Minimalinstandsetzung, also ohne Zuverlässigkeitserhöhung und Veränderung der Ausfallrate $\lambda(t)$, wieder in Gang gesetzt wird,[...]”

beschränkt, was zu einem gemischt-ganzzahligen³ Problem führt.

Aufgrund der Nichtlinearitäten und der Unstetigkeiten wäre eine Lösung dieses Optimierungsproblems mit Hilfe einer ableitungsbasierenden Methode nicht praktikabel. Stattdessen wird der Weg der genetischen Algorithmen gewählt, die, mit Hilfe von stochastischen numerischen Methoden über die Variation einer Startpopulation, nach Optima suchen. Bei diesen ist zwar das Konvergenzverhalten schwieriger zu handhaben, dafür ist es jedoch möglich, vergleichsweise schnell brauchbare Ergebnisse zu liefern, die all die genannten Randbedingungen berücksichtigen.

4.3 Gebrauchskosten

Für die Optimierung der Instandhaltungsplanung werden die Kosten der Instandhaltungspläne mit Hilfe von Gebrauchskostenfunktionen nach Große [Gro76] und Beckmann / Marx [Bec94] abgeschätzt. Dabei handelt es sich um Näherungsfunktionen, die die stündlichen Kosten und Gewinnausfälle der betrachteten Anlage abschätzen. Eingabeparameter für diese Kostenabschätzung sind neben den in der gesamten Anlage einheitlichen Größen (wie Personalkosten, Anfahrtdauer der Anlage, Stillstandskosten der Anlage, ...) auch die für jede "Abnutzungseinheit" individuellen Größen, allen voran die Parameter der zugehörigen Weibullverteilung, aber auch z.B. Reparaturkosten und Personalaufwand.

Neben dem Begriff der Gebrauchskostenfunktionen verwenden Beckmann /Marx auch die Begriffe "Abnutzungseinheit" und "Abnutzungsbereich". Die Abnutzungseinheit ist hierbei meist eine Komponentengruppe, die ausschließlich Komponenten mit ähnlichem Abnutzungsverhalten enthält. So werden beispielsweise die Armaturen in einer Abnutzungseinheit zusammengefasst, obwohl sie über die ganze Anlage verteilt sind. Es gibt aber auch Abnutzungseinheiten, die nicht aus Komponentengruppen bestehen, z. B. die Abnutzungseinheit "Fehlbedienung", die noch nicht einmal physisch vorhanden ist, aber dennoch zur Abschätzung des Anlagenverhaltens benötigt wird.

Während der Instandhaltungsplanung werden Abnutzungseinheiten zu sogenannten Abnutzungsbereichen zusammengefasst. Hierbei handelt es sich um die Einteilung, welche Abnutzungseinheiten am besten gleichzeitig in-

³Einige Parameter in den Lösungsansätzen zum Problem sind ganzzahlig, was den sinnvollen Einsatz ableitungsbasierender Verfahren erschwert.

standgehalten werden. Ihre Einzelverteilungen werden zusammengefasst, wobei sie sich immer mehr einer Weibull-Verteilung annähern, je mehr nicht-redundante Komponenten hinzukommen [Bec94].

Ein weiterer Begriff der wesentlich für das Verständnis der Gebrauchskostenfunktionen ist, ist die "Minimalinstandsetzung". Hierunter ist eine vollständige Schadensbeseitigung zu verstehen, jedoch ohne den sonstigen Zustand der Komponente zu verbessern. Der Schaden wird behoben, aber die Komponente ist nach wie vor als gebraucht anzusehen. Diese Einschätzung ist ausschlaggebend für die Verwendung der integrierten Ausfallrate $\Lambda(t)$ zur Abschätzung der Ausfallanzahl bis zum Zeitpunkt t .

Gebrauchskostenansatz

Im Prinzip besteht der Gebrauchskostenansatz aus zwei Schritten, dem Abschätzen der Kosten der Ereignisse für die verschiedenen "Abnutzungseinheiten" und dem Abschätzen der Anzahl der Ereignisse während der Betrachtungszeit. Für die Kostenabschätzung werden alle "Abnutzungseinheiten" eines "Abnutzungsbereichs" betrachtet und die Kosten und Stillstandszeiten der verschiedenen Ereignisarten berechnet. Hierbei werden folgende Ereignisse unterschieden:

- Erneuerung
Die "Erneuerung" bei den Gebrauchskosten stellt einen schleichenden Prozess dar, während dem die Abnutzungseinheit Schritt für Schritt ausgetauscht wird. Es handelt sich nicht um einen tatsächlichen Erneuerungszeitpunkt, an dem die gesamte Abnutzungseinheit ausgetauscht wird, sondern um die mittlere Dauer bis die gesamte Einheit einmal ausgetauscht wurde.
- Inspektion
Unter "Inspektion" versteht man die Feststellung und Beurteilung des Istzustandes eines Arbeitsmittels. In den "Inspektionen" selbst sind keine korrigierenden Maßnahmen enthalten.
- Befundinstandsetzung
Die "Befundinstandsetzungen" sind korrigierende Maßnahmen, die im Rahmen der Inspektion anfallen können. Für ihre Kosten wird ein mittlerer Wert über alle Inspektionen gebildet, wobei die Mittelung auch die Inspektionen ohne Befunde einschließt.

- Schaden

Als "Schaden" zählen die direkten und indirekten Folgen eines Schadensfalls, also Schadensbeseitigung und Folgeschäden inklusive Stillständen.

Für jede Ereignisart gibt es dann noch eine Unterteilung in:

1. Stillstandsdauer

Die Anzahl der Stunden, die die Gesamtanlage wegen der Maßnahme stillsteht. Sie wird mit einem Kostenfaktor für geplante oder ungeplante Stillstandsstunden multipliziert.

2. Arbeitskräftestunden

Die Anzahl eigener Arbeitskräftestunden, die für die Maßnahme benötigt werden.

3. Material- und Fremdkosten

Die Kategorie Fremdkosten umfasst hierbei Pauschalkosten für die Leistungen Dritter inklusive zeitunabhängiger Bezahlung von fremden Arbeitskräften und Material. Zusammen mit den Materialkosten für eigene Arbeiten stellen sie die fixen Kosten dar, die nicht von der Dauer der Maßnahmen beeinflusst werden.

Basierend auf diesen Größen werden die Kosten der einzelnen Ereignisse abgeschätzt. Im zweiten Schritt wird die Anzahl der Ereignisse, die zu erwarten ist, bestimmt. Hierzu wird die Menge der Ereignisse pro Abnutzungsbereich bestimmt und mit der Anzahl des Auftretens des Abnutzungsbereichs im Instandhaltungsplan multipliziert.

In diesem Zusammenhang wird auch häufig der Begriff des "Instandhaltungsintervalls" oder der "Instandhaltungsperiode" gebraucht. Hierbei handelt es sich um die Zeit zwischen zwei Maßnahmen, die den zugehörigen Abnutzungsbereich betreffen.

Gültigkeitsbereich der Näherung

Es gibt zwei wesentliche Einschränkungen bezüglich der Gültigkeit der Gebrauchskostenfunktionen. Zum einen sind die Periodenlängen als ganzzahlige Jahre zu wählen. Dies kommt aus der Praxis des Anlagenbetriebs. Dort ist es eher sinnvoll größere Stillstände in die Sommermonate zu legen als in den Winter, da im Winter die Energiepreise und der Anlagenwirkungsgrad höher

sind. Die Näherung ist also nur für ganze Jahre gültig, alle anderen Werte sind unbrauchbar.

Des Weiteren gibt es in der ursprünglichen Version der Gebrauchskostenfunktionen [Kal08] die Nebenbedingung, dass alle Perioden Vielfache aller kleineren Perioden sein müssen. Dies ist eine einleuchtende Bedingung, da die verschiedenen Perioden der Instandhaltungsplanung ansonsten seltener gleichzeitig stattfinden können und dadurch die Tendenz zum Suboptimalen haben. Wichtig wird diese Teilbarkeitsbedingung bei der Bestimmung der Periodenanzahl. Hierbei kommen Terme der Form

$$\left(\frac{1}{p_{kl}} - \frac{1}{p_{gr}} \right) = \frac{1}{p_{gr}} \cdot \left(\frac{p_{gr}}{p_{kl}} - 1 \right) \quad (4.1)$$

vor, wobei p_{kl} die Periode ist, deren Anzahl zu bestimmen ist und p_{gr} die nächstgrößere Periode. Es wird also die Anzahl der kleinen Perioden, die nicht mit der nächst größeren zusammenfallen, bestimmt und durch die Dauer der größeren geteilt, um auf Anzahl pro Zeiteinheit (Stunden) zu kommen.

Struktur der Gebrauchskosten

Bei der Bewertung der Instandhaltungspläne mit dem Gebrauchskostenansatz von Beckmann [Bec94] werden, wie in Abschnitt 4.3 erläutert, die Kosten der einzelnen Maßnahmengruppen ("Abnutzungsbereiche") aus den einzelnen Komponentengruppen ("Abnutzungseinheiten") zusammengesetzt. Die Kostenfunktion setzt sich hierbei aus vier Kategorien zusammen:

1. Abschätzung der Kosten durch geplante Maßnahmen
2. Abschätzung der entgangenen Gewinne / Erlöse durch geplante Stillstände
3. Abschätzung der Kosten durch ungeplante Maßnahmen
4. Abschätzung der entgangenen Gewinne / Erlöse durch ungeplante Stillstände

Für jede dieser vier Kategorien gibt es bei jeder Abnutzungseinheit vier Unterkomponenten:

- a) Kosten für Material und Fremdleistungen
- b) Eigene Arbeitskräftestunden

c) Stillstandsstunden in Folge der Maßnahmen

d) An- und Abfahrkosten

Daneben gibt es noch Parameter, die in der gesamten Anlage gleich sind:

- Personalkosten für planmäßige Arbeiten pro Arbeitskräftestunde.
- Personalkosten für außerplanmäßige Arbeiten pro Arbeitskräftestunde.
- Verluste pro planmäßige Stillstandsstunde
- Verluste pro außerplanmäßige Stillstandsstunde
- Anfahrtdauer nach planmäßigen Maßnahmen
- Anfahrtdauer nach außerplanmäßigen Maßnahmen

Auf dieser Einteilung basierend bildet Beckmann unter Verwendung der integrierten Ausfallrate Abschätzungen für die Gebrauchskosten der einzelnen Maßnahmeperioden.

Kapitel 5

Grundlagen genetischer Algorithmen

Genetische Algorithmen [Ger04] stellen eine in den letzten Jahren zunehmend populär gewordene Klasse von Optimierungsverfahren dar. In diesem Abschnitt wird ihre Funktionsweise erläutert. Später wird dann in Abschnitt 7.1.8 die Anwendung auf die Instandhaltungsoptimierung betrachtet.

Aber zunächst gilt es, die Grundlagen zu erklären. Das Entscheidende bei diesen Verfahren ist, dass anstelle eines problemspezifischen, gezielten Lösungsansatzes ein abstraktes, nicht-deterministisches Verfahren eingesetzt wird. Die Abstraktion der gesuchten Parameter wird hierbei als "Gen" bezeichnet, ihre konkreten Werte als "Allel".

Allen genetischen Algorithmen gemeinsam ist, dass sie zur Optimierung eine Population anlegen. Dies bedeutet, dass sie mehrere Lösungsansätze, repräsentiert durch verschiedene Parameter in den Genen, gleichzeitig zur

Fachausdruck	Bedeutung
Chromosom / Individuum	Parametrische Beschreibung eines Lösungsansatzes
Gen	Platz eines Parameters
Allel	Wert eines Parameters
Population	Menge aller Lösungsansätze
Generation	Ergebnismenge eines einzigen Iterationsschritts
Fitness	Bewertung wie aussichtsreich ein Ansatz ist
Selektion	Entfernung weniger erfolgsversprechender Ansätze

Tabelle 5.1: Bedeutung der aus der Biologie entliehenen Fachausdrücke

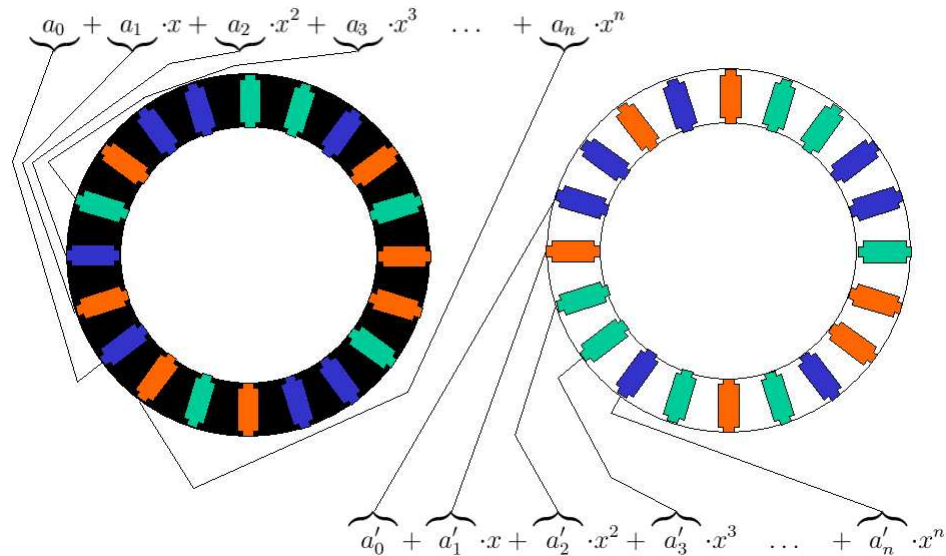


Abbildung 5.1: Zwei unterschiedliche Lösungsansätze (schwarzer und weißer Hintergrund) in Chromosomendarstellung.

Optimierung verwenden. Diese Lösungsansätze werden in Anlehnung an die Biologie auch als "Chromosomen" bezeichnet. Unterschiede zwischen den verschiedenen Algorithmen gibt es in Bezug auf die Verfahren zur Erzeugung neuer "Generationen" und die Übernahme neuer "Generationen" in die Population. Der Begriff "Generation" bezeichnet hierbei alle Lösungen, die zum gleichen Zeit- / Iterationsschritt generiert wurden.

In Tabelle 5.1 werden die Fachausdrücke, die bei der Beschreibung genetischer Algorithmen üblich sind, den allgemeinen Ausdrücken, die für die Beschreibung von Algorithmen üblich sind, gegenübergestellt.

Im Folgenden werden nun einige der gängigsten Ansätze zur Erzeugung von neuen Generationen (auch Reproduktion genannt) und zur Selektion aus der Population vorgestellt. Außerdem wird auf den Begriff der "Fitness" eingegangen, der für die "Vererbung" wichtig ist.

5.1 Erzeugung neuer Generationen

Der Name "Genetische Algorithmen" geht darauf zurück, dass die Elemente der neuen Generation mit Hilfe der Algorithmen aus der bestehenden Population erzeugt werden. Die Eigenschaften der "Eltern"-Elemente werden also quasi "vererbt". Hierzu gibt es viele verschiedene Verfahren, die sich beliebig

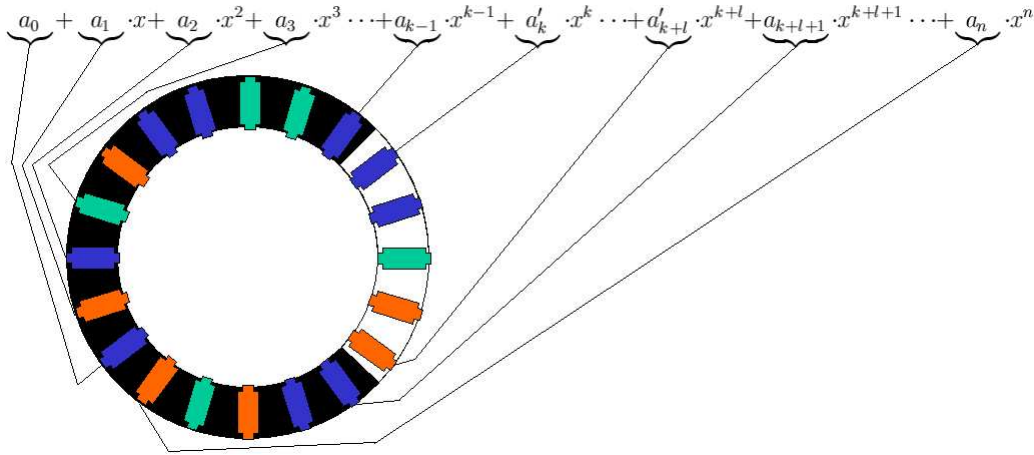


Abbildung 5.2: Neues Chromosom als Ergebnis eines Two-Point-Crossover.

kombinieren lassen. Die einfachste Möglichkeit zur Erzeugung neuer Chromosomen aus bestehenden Chromosomen ist die Mutation. Bei der Mutation werden zufällig ein oder mehrere Gene in der Kopie eines Chromosoms geändert. Für das Beispielpolynom aus Abb. 5.1 würde das bedeuten, dass einige Koeffizienten zufällig abgeändert werden ($a_k \rightarrow a'_k$). Zu beachten ist, dass die einzelnen Gene andere Werte haben, die Struktur jedoch identisch ist. In der Beispielsequenz über den Chromosomen bedeutet dies, dass die Koeffizienten des Polynoms immer an der gleichen Position zu finden sind, unabhängig von ihrem Wert.

Die meisten Verfahren fallen jedoch in die große Gruppe der Crossover-Operatoren. Der Unterschied zwischen Mutation und Crossover besteht darin, dass nach der zufälligen Auswahl eines Gens bei der Mutation eine zufällige Änderung erfolgt, wohingegen beim Crossover das entsprechende Gen einer zweiten Quelle eingesetzt wird. Alle Crossover-Operatoren bilden aus zwei oder mehr Chromosomen durch Austauschen der Allele (Werte einzelner Gene) neue Chromosomen. Hierbei wurden zur Auswahl der zu vertauschenden Gene so viele verschiedene Verfahren entwickelt, dass an dieser Stelle nur einige ausgesuchte genannt werden:

1. Two-Point-Crossover:

Hierbei werden ein Start- und ein Endgen für eine Kette aufeinander folgender Gene im Chromosom zufällig bestimmt und die Kette wird mit der korrespondierenden Kette des anderen Chromosoms ausgetauscht. Für das Beispielpolynom aus Abb. 5.2 heißt dies, dass die

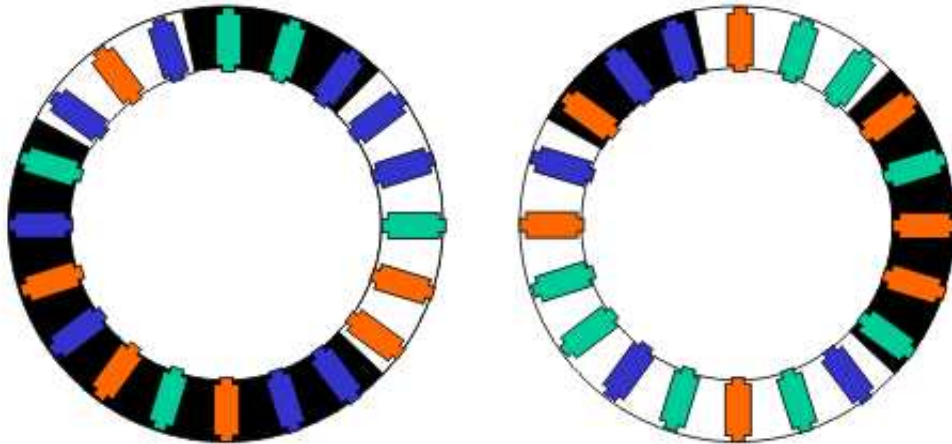


Abbildung 5.3: Ein Beispiel für ein k -Point-Crossover, charakteristisch ist die relativ grobe Clusterung ausgetauschter und nicht ausgetauschter Gene.

Koeffizienten für x^k bis $x^{(k+l)}$ aus einem anderen Chromosom kopiert wurden. Die Chromosomen werden hierbei der Einfachheit halber als Ring betrachtet, da so nicht überprüft werden muss, ob die Kette über das Ende des Chromosoms hinausgeht. Der Nachteil dieses Verfahrens liegt im Bias¹, das durch die meist gemeinsame Vertauschung von im Chromosom aufeinander folgenden Genen entsteht.

2. k -Point-Crossover:

Statt einer werden mehrere Ketten gebildet und ausgetauscht (siehe Abb. 5.3). Charakteristisch ist die relativ grobe Clusterung ausgetauschter und nicht ausgetauschter Gene, die beim k -Point-Crossover durch die ausgetauschten Ketten entsteht. Es ist wahrscheinlich, dass von zwei aufeinander folgende Gene entweder beide ausgetauscht werden, oder beide nicht ausgetauscht werden.

3. Parametrisiertes Uniform Crossover:

¹„Bias“ = Gleichanteil eines Zufallsereignisses aus mehreren Zufallsgrößen, der durch eine Koppelung der elementaren Zufallsgrößen zustandekommt. Im Falle des Austauschs von Ringsegmenten wird durch die Nachbarschaft zweier Gene eine Aufteilung auf unterschiedliche Segmente unwahrscheinlich, da es beim Austausch eines einzigen Ringsegments genau zwei Schnittstellen gibt. Somit gibt es $n-2$ Möglichkeiten das Segment so zu begrenzen, dass zwei benachbarte Gene nicht getrennt werden und zwei bei denen sie getrennt werden.

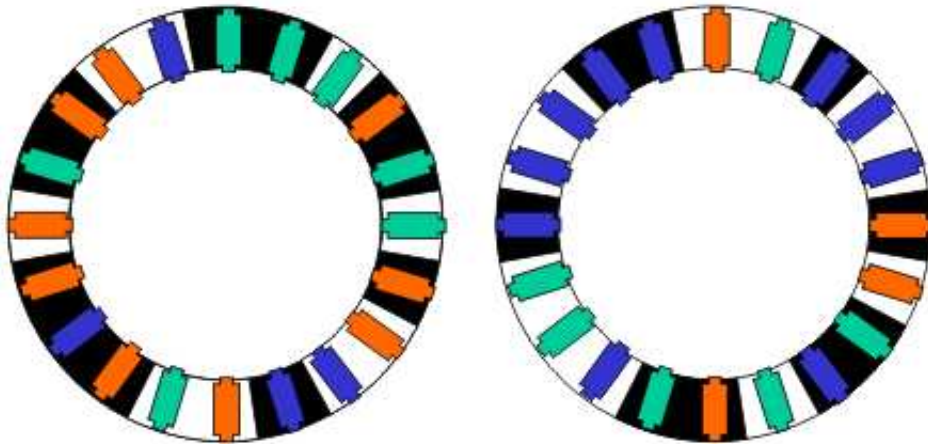


Abbildung 5.4: Zwei Chromosomen, bei denen eine relativ gleichmäßige Durchmischung der ursprünglichen Information stattgefunden hat.

Es werden keine Ketten bestimmt. Stattdessen wird für jedes Gen separat "ausgewürfelt", ob es ausgetauscht wird. Der Vorteil liegt in der Vermeidung des Bias, d.h. die Wahrscheinlichkeit, dass zwei Gene gemeinsam ausgetauscht werden, hängt nicht von ihrem Abstand auf dem Ring ab.

Im Gegenzug hierzu hat das Verfahren aber zwei Nachteile:

- (a) Es entsteht ein erhöhter Aufwand durch die Überprüfung der einzelnen Gene.
- (b) Die Anzahl der ausgetauschten Gene ist zufällig. Damit ist auch der Grad der Durchmischung nicht klar bestimmt.

Abbildung 5.4 zeigt ein Beispiel für eine gute Durchmischung zweier Chromosomen. Allerdings lässt sich an Hand eines einzelnen Individuums nicht sagen, ob das Mischungsverhältnis des Crossover-Operators konstant ist oder ob möglicherweise ein Uniform Crossover vorliegt.

4. Shuffle Crossover:

Es wird die Menge aller Indizes gebildet und gemischt. Anschließend wird basierend auf der temporär geänderten Reihenfolge eine Kette definiert und ausgetauscht. Ein Vorteil hierbei ist, wie beim vorangestellten

parametrisierten Uniform Crossover, die Vermeidung des Bias. Abbildung 5.4 zeigt ein Beispiel für eine gute Durchmischung mit geringem Bias. Allerdings ist eine Unterscheidung der verschiedenen Crossover-Operatoren ohne Bias an Hand eines einzelnen Individuums nicht mehr möglich. Erst über einen Vergleich mehrerer Ergebnis-Individuen können die stochastischen Abweichungen analysiert und Rückschlüsse auf das Verfahren gezogen werden. Der Hauptunterschied gegenüber dem parametrisierten Uniform Crossover besteht z. B. in der fest vorgebaren Anzahl der ausgetauschten Gene. Somit lässt sich beim Shuffle Crossover eine konstante Durchmischung sicherstellen.

Dafür hat das Shuffle Crossover den Nachteil eines erhöhten Rechenaufwand.

5. ... (Die Liste lässt sich beliebig fortsetzen.)

Ein Vertauschen funktional-verschiedener Gene wird im allgemeinen aus Kompatibilitätsgründen bei allen Crossover-Operatorvarianten vermieden.

5.2 Fitness

Für das Erzeugen einer neuen Generation werden, wie in dem vorangegangenen Abschnitt beschrieben, ein bis zwei Chromosomen der bestehenden Population benötigt. Diese werden zufällig ausgewählt, wobei einige bevorzugt werden, da sie eine bessere Fitness haben. Unter Fitness wird hierbei die Überlebensfähigkeit verstanden. Die Fitness wird aus den Gütefunktionen gebildet, nach denen die Lösung optimiert werden soll. Zwei Möglichkeiten für die Addition der Gütefunktionen sind:

- Lineare Skalierung

$$fit(\vec{x}) = \sum_i a_i \cdot f_i(\vec{x}) + b \quad a_i, b \in \mathbb{R} \quad \forall i \in \mathbb{N} \quad (5.1)$$

- Exponentielle Skalierung

$$fit(\vec{x}) = \sum_i (a_i \cdot f_i(\vec{x}) + b)^k \quad a_i, b, k \in \mathbb{R} \quad \forall i \in \mathbb{N} \quad (5.2)$$

Hierbei stellt \vec{x} das Chromosom dar. Es lassen sich noch beliebig viele weitere Verfahren zur Bestimmung der Fitness unter Betrachtung eines einzelnen Chromosoms finden.

Es bestehen jedoch noch weitere Möglichkeiten der Gewichtung, insbesondere unter Einbeziehung der gesamten Population. Zum Beispiel kann die Differenz zwischen jedem anderen Individuum und dem Optimum verdoppelt werden. Dies bewirkt ein verstärktes Ausscheiden von weniger "fitten" Chromosomen, wenn sich die Mehrheit um ein Optimum sammelt.

Eine umgekehrte Variante basiert auf der Einführung einer Ähnlichkeitsfunktion für Chromosomen. Bei jedem einzelnen Chromosom wird die Fitness durch die Ähnlichkeit zur Population geteilt. Der Zweck hierbei ist es, das "Hängenbleiben" in einem lokalen Optimum zu vermeiden, die sogenannte "vorzeitige Konvergenz".

Diese beiden Varianten haben genau entgegengesetzte Wirkungsweisen, wodurch schnell klar wird, dass es nicht nur eine feste Fitnessfunktion gibt, sondern dass sie in Abhängigkeit vom Problem und eventuell vom Fortschritt der Optimierung gewählt werden muss.

Beispiel aus der Natur

Die genetischen Algorithmen versuchen die "natürliche Auslese" auf technische Probleme zu übertragen. Eines der Beispiele, von denen sie ihre Ideen hierfür beziehen, ist der Überlebenskampf eines Beutetiers. An dieser Stelle seien es einmal die vom Fuchs gejagten Hasen. Alle Hasen werden vom Fuchs gejagt. Um zu überleben, müssen sie entweder schnell sein oder gut im Hakenschlagen. Hasen, die nicht schnell genug und nicht wendig genug sind, werden vom Fuchs "erwischt" und verschwinden aus der Population. Hasen, die nur gerade so entkommen sind, sind völlig erschöpft und daher beim Weitergeben ihrer Gene geschwächt und gehen weniger stark in die Folgegenerationen ein. In den folgenden Unterpunkten wird wieder auf dieses Beispiel eingegangen.

5.3 Selektion

Eng verknüpft mit der fitnessbasierten Erzeugung neuer Generationen ist die Selektion unter der bestehenden Population. Hierbei geht es darum, die Menge der sich ständig vermehrenden Chromosomen zu reduzieren. Dies dient nicht nur dazu, den Rechenaufwand zu reduzieren. Eine kontinuierlich wach-

		Zielfunktion		
		determ.	stoch.	-
Alter	determ.	1	2	3
	stoch.	4	5	6
	-	7	8	

Tabelle 5.2: 8 Möglichkeiten für die Selektion

sende Menge an Lösungsansätzen würde außerdem irgendwann die Speicherkapazität überschreiten.

Um sicherzustellen, dass der Algorithmus beim Löschen einiger Lösungsansätze das globale Optimum, falls er es schon gefunden hat, nicht wieder verliert, ist es sinnvoll, die beste bisher gefundene Lösung von der Selektion auszuschließen. Die "beste" Lösung bezieht sich hierbei auf die Funktion, auf die optimiert wird.

Ganz allgemein betrachtet existieren mindestens zwei Eigenschaften, die zur Auswahl der zu löschenden Chromosomen herangezogen werden können: Die Zielfunktion der Optimierung (auch Gütefunktion genannt) und das Alter der Lösung in Generationen. Für die Verwendung der Zielfunktion besteht dann nur noch die Wahl, deterministisch oder stochastisch vorzugehen. Beim Alter gibt es neben der Wahl zwischen deterministisch und stochastisch noch weitere Möglichkeiten: Unsterblichkeit für neue Lösungen oder vorgezogener Tot für ältere Lösungen. Es gibt also insgesamt für den allgemeinsten Optimierungsansatz bereits drei mögliche Kriterien, die sich fast unabhängig von einander deterministisch, stochastisch oder gar nicht auswerten lassen, wobei mindestens ein Kriterium deterministisch oder stochastisch ausgewertet werden muss. Insgesamt sind dies schon acht Möglichkeiten (siehe Tabelle 5.2) die immer zur Auswahl stehen.

Eine weitere Hilfe bei der Selektion sind eventuell Beschränkungen im zulässigen Wertebereich für die Gene. Wenn der Wert eines Gens beispielsweise nicht negativ werden darf, so können alle Chromosomen mit negativen Werten für dieses Gen aussortiert werden. Einige Verfahren belassen, insbesondere bei kompliziertem Definitionsbereich, auch ungültige Chromosomen eine Zeit lang in der Population², um eventuell an anderer Stelle wieder in den Definitionsbereich zurückzufinden. Dies macht aber nur Sinn, wenn sich der zulässige Wertebereich eines Gens in Abhängigkeit anderer Gene ändern

²Dies entspricht in der Natur einer stark verkürzten Lebenserwartung.

kann. Ansonsten bringt es keinen Vorteil, Gene außerhalb des Definitionsbereichs zuzulassen, da es keine Lücken zum "durchtunneln" gibt.

Häufig ist es jedoch so, dass die Zielfunktion sich sinnvoll in mehrere Unterfunktionen aufspalten lässt. Diese Aufspaltung ermöglicht es, nur pareto-optimale Chromosomen zuzulassen. Ein Chromosom ist dann pareto-optimal, wenn es kein Chromosom gibt, das in allen für die Optimierung zu betrachtenden Gütefunktionen besser ist.³

Dabei ist jedoch zu beachten, dass bei vielen Problemstellungen die Menge aller pareto-optimalen Lösungen nicht beschränkt ist. Es ist also meistens nicht ausreichend, die Population auf alle pareto-optimalen Lösungen zu reduzieren. Die Pareto-Optimalität kann damit kein hinreichendes Kriterium für den Erhalt einer Lösung sein.

In dieser Arbeit werden stattdessen Bonusterme für Lösungen vergeben, die pareto-optimal bezüglich einer Menge bester Lösungen sind. Diese verbessern die Bewertung durch die Zielfunktion vorübergehend. Die Vergleichslösungen müssen dabei von der Selektion ausgeschlossen werden, da sie ansonsten durch den Vergleich mit sich selbst verschlechtert werden. Anschließend wird eine durch die Zielfunktion der Optimierung gesteuerte Selektion durchgeführt. Nach Abschluss der Selektion werden die Bonusterme verworfen, da sie ansonsten die Zielfunktion der Optimierung dauerhaft verfälschen.

5.4 Konvergenz

Ein weiterer wichtiger Punkt bei Optimierungsverfahren ist das Konvergenzverhalten. Wie sich bereits bei Abschnitt 5.2 durch die völlig entgegengesetzten Strategien erahnen ließ, lässt sich hierzu keine generelle Aussage treffen. Es ist vom Problem abhängig, ob und welche genetischen Algorithmen konvergieren und wie viel Schritte bis zu einer befriedigenden Lösung nötig sind. Vor allem Letzteres ist oft auch eine Frage der Startpopulation.

³Zurückblickend auf das Fuchs und Hase Beispiel bedeutet das Behalten aller pareto-optimalen Lösungen, dass ein Hase überlebt, wenn es keinen Hasen gibt, der sowohl schneller als auch besser im Hakenschlagen ist.

Kapitel 6

Grundlagen der Verfügbarkeitsprognose

6.1 Betrachtung der Komponente im Gesamtsystem

Das Ausfallverhalten der einzelnen Komponenten zu betrachten ist der erste Schritt auf dem Weg zur Verfügbarkeitsprognose der gesamten Anlage. Zur weiteren Verarbeitung ist es erforderlich, den momentanen Zustand der Komponente binär-logisch zu beschreiben. Die zwei Möglichkeiten hierzu, auf die die später vorgestellten Modellierungsmethoden aufbauen, sind die Boolesche- und die Markov-Theorie.

6.1.1 Boolesche Theorie

In der Booleschen Theorie werden die Zustände der Komponenten wie logische Größen behandelt, also eine Analyse von Ausdrücken aus Variablen, die mit UND und ODER verknüpft sind. Im Zusammenhang mit der Verfügbarkeit sind jedoch eher die Begriffe Redundanz und Abhängigkeit gebräuchlich. Die Zuordnung von Redundanz und Abhängigkeit zu UND und ODER ist abhängig von der gewählten Modellierungsmethode.

- Redundanz:
Sind zwei Komponenten redundant angeordnet, so reicht das Funktionieren einer der beiden Komponenten für das Funktionieren der Gesamtanordnung aus. Dies führt zu einer Erhöhung der Verfügbarkeit

der Gesamtanordnung. Bei einer Redundanz mit mehr als zwei Komponenten kann es sein, dass mehr als eine funktionierende Komponente für die Funktion des Abschnittes erforderlich ist.¹ Es wird dann von einer m -aus- n -Redundanz ($m < n$) gesprochen. Weiterhin ist es für die stochastischen Kennwerte der redundanten Komponenten wichtig, ob es sich um eine kalte oder eine warme Redundanz handelt. Der Unterschied ist, dass im Falle einer heißen Redundanz die redundante Komponente bei funktionierender Hauptkomponente belastet ist. Bei einer kalten Redundanz geht sie im Falle eines Ausfalls der Hauptkomponente aus dem unbenutzten (kalten) Zustand in Betrieb.² Im Verfügbarkeitsschaltbild der Anlage stellt eine Redundanz eine Parallelschaltung dar.

Redundanzen erhöhen die Verfügbarkeit der Gesamtanordnung, es müssen jedoch Kosten-Nutzen-Überlegungen angestellt werden.

In Ausnahmefällen kann der Anschluss einer Redundanz, über eine Erhöhung der Komplexität der Anlage, die Verfügbarkeit der Anlage in Summe verringern, da der Einbau des redundanten Teils die Komplexität der Anlage erhöht. Dies wird jedoch normalerweise auch von der Kosten-Nutzen-Überlegung abgedeckt.

- Abhängigkeit:

In der Regel ist nicht die Verfügbarkeit einer einzelnen Komponente interessant, sondern die eines Systems aus mehreren verschiedenen Komponenten. In einem solchen System gibt meist triviale Abhängigkeiten zwischen einzelnen Komponenten, d. h. die Eine kann ohne die Anderen nicht funktionieren. Bei einem Turbosatz eines Kraftwerk zum Beispiel nützt eine funktionierende Turbine nichts, wenn der Genera-

¹[Stu96]: "Redundanz ist das Vorhandensein (bzw. die geeignete Anordnung) überzähliger Elemente innerhalb eines Systems, die dazu bestimmt sind, die Funktion gleichartiger Elemente zu übernehmen, um Lebensdauererlängerungen bzw. Zuverlässigkeitsvergrößerungen zu erreichen."

²[Stu96]: "Heiße Redundanz[...]: sämtliche parallel geschalteten Elemente sind gleichzeitig in Betrieb, alle Elemente unterliegen einer gemeinsamen Belastung und Abnutzung, zur Funktionstüchtigkeit ist nur eines der m Elemente notwendig, $r = m - 1$ Elemente sind heiß gelagert; es liegt eine r -fache heiße Redundanz vor.[...]

Kalte Redundanz[...]: nur eines der Elemente ist in Betrieb, belastet und wird abgenutzt, $r = m - 1$ Elemente sind kalt gelagert, außer dem in Betrieb befindlichen Element sind alle übrigen Elemente wie Ersatzteile in Reserve."

tor ausfällt. Umgekehrt wird auch kein Strom erzeugt, wenn zwar der Generator funktioniert, aber die Turbine defekt ist. Die Verfügbarkeit des Turbosatz-Teilsystems ist also geringer, als die Verfügbarkeiten der Einzelkomponenten Turbine oder Generator. Im Verfügbarkeitschaltbild der Anlage stellt eine Abhängigkeit eine Serienschaltung dar.

Teilsysteme, die durch eine Redundanz oder eine Abhängigkeit gebildet wurden, lassen sich wiederum als eine Komponente darstellen und können so Teil von weiteren überlagerten komplexeren Redundanzen und Abhängigkeiten werden. Die Darstellung der Booleschen Verknüpfungen kann variieren in Abhängigkeit von der Formulierungsweise³.

6.1.2 Markov Theorie

Die Markov Theorie betrachtet das System nicht als Netz der Einzelzustände, sondern fasst die Zustände aller Komponenten zu einem Verbundzustand zusammen, dem dann das Funktionieren oder Nicht-Funktionieren des Gesamtsystems zugeordnet wird. Die einzelnen Zustandsübergänge stellen den Ausfall oder die Reparatur einer Komponente dar. Dies ist auch einer der großen Vorteile der Markov Theorie. Es besteht die Möglichkeit, Ausfall- und Reparaturvorgänge in geschlossener Form zu modellieren. Ein weiterer Vorteil ist die Tatsache, dass es sehr einfach ist, für eine Komponente mehr Zustände als vollständig intakt oder vollständig defekt zu modellieren. Der Nachteil liegt in der Form der Zustandsdarstellung. Es wird für jede mögliche Kombination ausgefallener und intakter Komponenten ein Zustand benötigt. Das heißt für n Komponenten 2^n Zustände.

6.2 Modellierungsmethoden

Für die Modellierung ganzer Anlagen wurden, basierend auf einer der beiden Systemtheorien (Markovsche oder Boolesche) zahlreiche Verfahren entwickelt. An dieser Stelle seien nur die Wichtigsten kurz skizziert:

³Als extreme Formulierungsweisen seien an dieser Stelle die konjunktive und die disjunktive Normalform genannt, es gibt jedoch je nach Ausdruck noch weitere Möglichkeiten, die sich durch Umformung ineinander überführen lassen, siehe [Lip07].

6.2.1 Petri-Netze

In Petri-Netzen [Abe90] werden sowohl die Zustände als auch die Zustandsänderungen als Knoten dargestellt. Hierzu werden zwei Arten von Knoten benötigt, Stellen (Abb. 6.1) und Transitionen (Abb. 6.2). Eine Stelle ist nur mit Transitionen verbunden und umgekehrt. Die Stellen symbolisieren die Zustände der einzelnen Komponenten. Die momentanen Zustände werden durch Markierungen dargestellt. Diese Markierungen werden über die Transitionen, die die Ereignisse darstellen, weitergeschaltet. Eine Transition kann nur schalten, wenn alle Stellen im Vorfeld belegt und alle im Folgenden frei sind.



Abbildung 6.1: Stelle

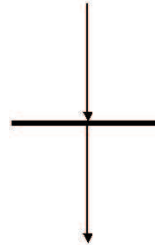


Abbildung 6.2: Transition

6.2.2 Blockdiagramme

Blockdiagramme sind die anschaulichste Möglichkeit, ein System zu modellieren. Hierbei werden die einzelnen Komponenten als Blöcke dargestellt und ihre Zusammenhänge als Verbindungen zwischen den Blöcken. Diese Darstellungsform ist nah an der realen Konstruktion der Baugruppe und daher sehr übersichtlich und anschaulich. Zwischenergebnisse an den Grenzen der Baugruppen können gut ermittelt werden.

Allerdings kann es sein, dass die Zusammenhänge zwischen den Komponenten im Verfügbarkeitsblockdiagramm andere sind, als die Zusammenhänge im Schaltplan oder der wirklichen Konstruktion. Dies ist darauf zurückzuführen, dass jeweils verschiedene Teilaspekte des Verhaltens der Anlage modelliert werden.

Ein gutes Beispiel hierfür findet man in [Stu96, S. 84], wo eine vereinfachte Darstellung einer Kraftwerksschaltung in ein Verfügbarkeitsblockdiagramm umgewandelt wird. Hierbei wird beispielsweise aus dem Kühlwasserkreislauf,

der in der Anlage nebenläufig zum Wasser-Dampf-Kreislauf ist, ein mit dem Wasser-Dampf-Kreislauf in Reihe geschalteter Abschnitt.

6.2.3 Markov-Analyse

Bei der Markov-Analyse, die als einziges der hier dargestellten Modellierungsverfahren auf der Markov Theorie aufbaut, beschreibt jeder Zustand eine Kombinationen aus intakten und ausgefallenen Komponenten im System. Die Übergänge beschreiben jeweils den Ausfall, bzw. die Reparatur einer Komponente. Die Reparatur- und Ausfallzeiten werden durch Übergangswahrscheinlichkeiten repräsentiert. Somit werden die Wahrscheinlichkeiten der zukünftigen Zustände für einen Markov-Graphen in Abhängigkeit des jeweils aktuellen Zustandes aus den Ausfall- und Reparaturraten gebildet. Bei konstanten Übergangsraten sind die Ausfall- und Reparaturzeiten exponential verteilt. Für einen Graph mit zwei Zuständen (eine Komponente) ergeben sich folgende Gleichungen:

$$\dot{P}_1(t+1) = (1-a)P_1(t) + bP_2(t) \quad (6.1)$$

$$\dot{P}_2(t+1) = aP_1(t) + (1-b)P_2(t) \quad (6.2)$$

P_1 ist die Wahrscheinlichkeit des Zustands "intakt"

P_2 ist die Wahrscheinlichkeit des Zustandes "defekt"

a ist die Ausfallrate

b ist die Reparaturrate

Die Wahrscheinlichkeiten der möglichen Gesamtzustände lassen sich auch als Vektor darstellen und über eine Matrixmultiplikation mit einer Übergangsmatrix in einen Vektor mit den Wahrscheinlichkeiten zu einem späteren Zeitpunkt überführen.

$$\vec{P}(t+1) = \begin{pmatrix} P_1(t+1) \\ P_2(t+1) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1-a & b \\ a & 1-b \end{pmatrix} * \begin{pmatrix} P_1(t) \\ P_2(t) \end{pmatrix} \quad (6.3)$$

Aufgrund der konstanten Übergangswahrscheinlichkeiten bei reinen Markov-Graphen lassen sich die Übergangsmatrizen für mehrere Zeitschritte über Multiplikation der Matrix mit sich selbst berechnen.

Wird zur Berücksichtigung von alterungsbedingten Ausfällen eine Zeitabhängigkeit der Übergangswahrscheinlichkeiten eingeführt, so entsteht ein sog. Semi-Markov-Graph, der mit einem stark ansteigendem Rechenaufwand

verbunden ist. Hierbei geht jedoch auch die Möglichkeit verloren, Übergangsmatrizen für mehrere Zeitschritte sinnvoll im Voraus zu bestimmen.

Da die Zustände des Markov-Graphen die Menge aller Kombinationen darstellen, wächst der zu einem System gehörende Graph exponentiell mit der Größe des Systems an, d.h. für n Komponenten gibt es 2^n Zustände. Deswegen ist dieses Verfahren ausschließlich für die Betrachtung kleinerer Zusammenhänge geeignet. Dies führt dazu, dass Markov-Graphen eigentlich nur bei kleinen Subsystemen eingesetzt werden können, eine Betrachtung größerer Systeme scheitert an der rapide ansteigenden Rechenzeit.

6.2.4 Fehlerbaumbasierende Verfahren

Der große Unterschied zwischen den fehlerbaumbasierenden Methoden und den bisherigen Modellen (Petri-Netzen, Blockdiagrammen und Markov Analyse) ist, dass bisher basierend auf den Bauteilen das Ausfallverhalten modelliert wurde, was auch als "Bottom-Up-Methode" bezeichnet wird. Der Fehlerbaum ist eine "Top-Down-Methode", d.h. basierend auf einem Ausfall werden die möglichen auslösenden Komponenten dargestellt. Einige der bekanntesten fehlerbaumbasierenden Verfahren sind:

- Fehlermode- und Fehlereffekt-Analyse (FMEA)
- Fehlerbaum (RCFA)
- Ereignisablaufanalyse (EAA)
- PAAG/HAZOP
- Probabilistische Sicherheitsbewertung (PSA)

Diese Verfahren sind sich alle sehr ähnlich. Meistens handelt es sich um Weiterentwicklungen oder Zusammenfassungen anderer Verfahren.

6.3 Zeit-, Arbeits- und Leistungsverfügbarkeit

Die Definitionen der verschiedenen Verfügbarkeitsarten sind in der Literatur nicht immer einheitlich. Diese Arbeit orientiert sich bei der Abgrenzung der einzelnen Begriffe zueinander an [VDE99]. Hier werden folgende Begriffsdefinitionen der Verfügbarkeit gegeben:

- Zeitverfügbarkeit k_T :

Die Zeitverfügbarkeit ist ein Maß für die zeitliche Einsatzfähigkeit einer Anlage. Gebildet wird sie als "Eins minus das Verhältnis der Stillstandzeiten zu der Gesamtzeit". Hierbei werden sowohl die planmäßigen, als auch die außerplanmäßigen Stillstände berücksichtigt. Jedoch werden nur vollständige Stillstände betrachtet, Teilausfälle bei denen die Anlage immer noch einen Teil ihrer Leistung liefert, werden nicht zu den Stillstandzeiten gerechnet. Als Gleichung ergibt sich: ⁴

$$k_T = 1 - \frac{T_{NV}}{T_N} = \frac{T_V}{T_N} = \frac{T_N - T_{NV}}{T_N} \quad (6.4)$$

- Arbeitsverfügbarkeit k_A :

Bei der Arbeitsverfügbarkeit wird die an der Anlage tatsächlich verfügbare Arbeit ins Verhältnis mit der theoretisch lieferbaren Arbeit bei Nennleistung gesetzt. Diese ergibt sich als Nennleistung multipliziert mit der Gesamtzeit. Im Unterschied zur Zeitverfügbarkeit werden bei der Arbeitsverfügbarkeit auch die Einflüsse von Teilausfällen ohne vollständigen Stillstand berücksichtigt. Als Gleichung dargestellt ist der Zusammenhang wie folgt:

$$k_A = \frac{A_V}{A_N} = \frac{A_N - A_{NV}}{P_N \cdot T_N} \quad (6.5)$$

- Leistungsverfügbarkeit k_P :

Die Leistungsverfügbarkeit ist das Verhältnis der momentan verfügbaren Leistung zur Nennleistung. Im Gegensatz zu Zeit- und Arbeitsverfügbarkeit wird sie üblicherweise nicht als Mittelwert angegeben, da sie ansonsten in die Arbeitsverfügbarkeit übergeht. Stattdessen wird sie als Momentanwert oder als Kurve über der Zeit betrachtet. Somit folgt die Gleichung:

$$k_P = \frac{P_V}{P_N} = \frac{P_N - P_{NV}}{P_N} \quad (6.6)$$

- Produktregel der Verfügbarkeiten:

Unter anderem in [Stu96] wird eine Berechnungsmöglichkeit der noch

⁴ Die Indizes in den Gleichungen haben folgende Bedeutungen:

_N für Nenn-

*_V für Verfügbare *

*_{NV} für Nicht-Verfügbare *

unbekannten dritten Verfügbarkeit in Abhängigkeit der beiden anderen bereits bekannten Verfügbarkeiten angeben:

$$k_A = k_T \cdot k_P \quad (6.7)$$

Für diese Gleichung sind jedoch 2 Einschränkungen zu beachten:

1. Die Betrachtungszeit für die Verfügbarkeiten muss gleich sein. Es ist also nicht möglich, mit einer mittleren Zeitverfügbarkeit und einem Momentanwert der Leistungsverfügbarkeit eine Arbeitsverfügbarkeit zu bestimmen.
2. Zeiträume, in denen die Anlage stillsteht sind bei der Leistungsverfügbarkeit für obige Gleichung 6.7 nicht zu berücksichtigen, da diese sonst doppelt eingehen.

Monte-Carlo-Simulationen

Bei der Berechnung von Zeit- und Arbeitsverfügbarkeit ist das Endergebnis ein Mittelwert über dem Betrachtungszeitraum. Da eine analytische Auswertung des Systems sehr rechenzeitintensiv wäre, wird für die Auswertung meist die Monte-Carlo-Simulation eingesetzt. Hierzu werden Zufallszahlen zwischen 0 und 1 erzeugt, die dann anhand der Ausfallrate in eine Ausfallzeit für die jeweilige Komponente umgerechnet werden. Dieser Zeitpunkt wird durch eventuelle Wartungsarbeiten gemäß einem Korrekturfaktor verschoben. In Summe lässt sich so, bei einer großen Anzahl von Simulationen, das Verhalten des Systems abschätzen. Um dies zu veranschaulichen ein kleines Beispiel aus dem Internet[htt03]:

Legt man ein Quadrat mit der Seitenlänge 2 um den Einheitskreis, so ist die Fläche des Quadrats 4 und die des Kreises π . Verteilt man nun innerhalb des Quadrats völlig zufällig n Punkte, so ist das Verhältnis der Anzahl der im Kreis befindlichen Punkte zur Gesamtzahl der Punkte näherungsweise $\pi/4$. Für große n erhält man so eine Näherung für $\pi/4$.

In Analogie dazu liefern die Monte-Carlo-Simulationen in dieser Arbeit als Resultat einen mittleren Verfügbarkeitswert für das System. Bei Überlegungen bezüglich der verschiedenen möglichen Strukturen der Anlage kann durch die resultierende Änderung dieses Ergebnisses und die wirtschaftlichen Rahmenbedingungen eine Kosten-/Nutzenanalyse erstellt werden. Anwendungsbeispiele zu Monte-Carlo-Simulationen in der Verfügbarkeitsprognose folgen in Kapitel 7.

Verwendung von einzelnen Zeitreihen

Für die Untersuchung der Leistungsverfügbarkeit gelten andere Rahmenbedingungen, da hierbei nicht ein Mittelwert sondern eine Kurve des zeitlichen Verlaufes von Interesse ist. Eine Untersuchung über eine Monte-Carlo-Simulation scheidet somit aus. Vielmehr ist die Verwendung von einzelnen gemessenen oder synthetischen Messreihen zielführend. Die Untersuchungen zu diesem Gebiet sind jedoch nicht Gegenstand dieser Arbeit. Sie werden bei [Men03] detailliert ausgeführt.

Kapitel 7

Methodik

7.1 Genetische Algorithmen in der Instandhaltung

Bei der Anwendung der genetischen Algorithmen (siehe Abschnitt 5) auf die Instandhaltungsoptimierung liegt die Hauptschwierigkeit darin, dass genetische Algorithmen alle Parameter des Lösungsansatzes als unabhängig voneinander ansehen. Dies widerspricht jedoch dem Ansatz für die Gebrauchskostenfunktionen, dass es bei der Bündelung von Maßnahmen zu Synergieeffekten kommt. Daraus resultieren zwei Lösungsansätze:

1. Modifikation der genetischen Operatoren

Es werden Grundinformationen zu den Instandhaltungszusammenhängen in den genetischen Operatoren hinterlegt. Dabei geht die vollständige Zufälligkeit der Operatoren verloren, es ist also im eigentlichen Sinne kein genetischer Algorithmus mehr, da eine partielle Steuerung vorliegt.

2. Einführung eines Interpretationsschrittes

Es wird ein Zwischenschritt eingeführt, der die von den Operatoren verarbeiteten Zufallsinformationen deterministisch verarbeitet und in zulässige Instandhaltungspläne umwandelt. Hierbei handelt es sich um einen rein genetischen Optimierungsalgorithmus. Allerdings kommt es durch die nachträgliche Berücksichtigung der Synergien dazu, dass bei der Umwandlung von der unabhängigen Darstellung für die Optimierung in die anwendbare gekoppelte Darstellung einige Informationen

aus dem Instandhaltungsplan herausgefiltert werden. Nicht alle Änderungen in der genetischen Datenrepräsentation lassen sich somit im Instandhaltungsplan wiederfinden und bewerten.

Beiden Ansätzen wird im Rahmen dieser Arbeit in Kapitel 8 nachgegangen.

7.1.1 Modifikation der genetischen Operatoren

Die Abhängigkeit lässt sich als eine Kopplung der Periodendauern mit den Zuordnungen der Instandhaltungsabschnitte zu den einzelnen Perioden betrachten. Die einzelnen Abnutzungseinheiten (Definition auf Seite 42) sind fest mit einer Periode verknüpft, so dass bei einer Verschiebung der Periodendauer, auch die Abnutzungseinheiten verschoben werden.

An diesem Punkt sind die "individuell optimalen Instandhaltungsperioden (TKO)"¹ von Bedeutung. Diese geben an, wie groß das kostenoptimale Instandhaltungsintervall einer einzelnen Komponente wäre, wenn es keine Synergieeffekte gäbe.

Zur Veranschaulichung sei hier auf Abb. 7.1 verwiesen, in der drei Datenzeilen gezeigt werden. Zu unterst steht die Zuordnung der Instandhaltungseinheiten zu den Instandhaltungsbereichen und damit zu den Perioden. Diese Zuordnung ist in dieser Variante starr über einen Index gelöst, der in der Vergangenheit einmal optimal gewählt wurde, basierend auf der TKO. Die erste Abnutzungseinheit wird Bereich Nr. 3 zugeordnet, ohne dass hierbei mögliche Änderungen der Periode, die zu Bereich Nr. 3 gehört, eine Rolle spielen.

Die mittlere Zeile enthält die Periodendauern. Dieser Parameter ist verantwortlich dafür, wo sich der Abnutzungsbereich auf der Zeitachse in der oberen Zeile befindet. Also ist die Position der Inspektionsperioden der Abnutzungseinheiten auf der Zeitachse von der Kopplung der Parameter der beiden unteren Zeilen abhängig.

¹Die TKO geht auf die integrierte Ausfallrate zurück. Sie berechnet sich zu:

$$b_{Hilf} = \frac{B}{\sqrt[3]{NK}} \quad (7.1)$$

$$TKO = ZEE \cdot b_{Hilf} \cdot \sqrt[3]{\frac{CKO}{(A-1) \cdot TH \cdot (CMO - CBO)}} \quad (7.2)$$

Hierbei sind CKO die voraussichtlichen Kosten einer Instandhaltungsmaßnahme, CMO die voraussichtlichen Kosten einer Schadensbeseitigung und CBO die voraussichtlichen Kosten einer Befundinstandsetzung. TH ist der Diagnosewirkungsgrad. Die Herleitung findet sich in [Gro76, S. 64].

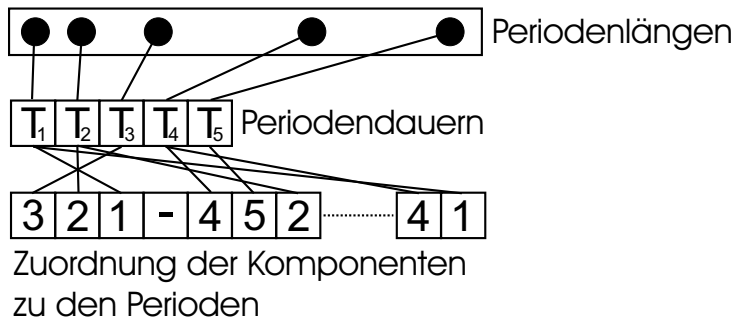


Abbildung 7.1: Darstellung mit abhängigen Parametern, die eine Modifikation der Operatoren erforderlich macht

Basierend auf diesem Konzept wurde in dieser Arbeit ein Mutationsoperator entwickelt. Der Ansatz eines Crossoveroperators scheiterte an der hohen Abhängigkeit von Zuordnung und Periodenlänge. Der Versuch, die Periodenlängen eines Lösungsansatzes mit der Zuordnung eines anderen zu kombinieren, führte fast immer zu einer unmittelbaren Verschlechterung, da jede Zuordnung bestrebt ist, das lokale Optimum ihrer Periodenlängen zu finden.² An dieser Stelle hat sich positiv ausgewirkt, dass der Crossoveroperator nicht unbedingt zum Funktionieren des genetischen Algorithmus notwendig ist.

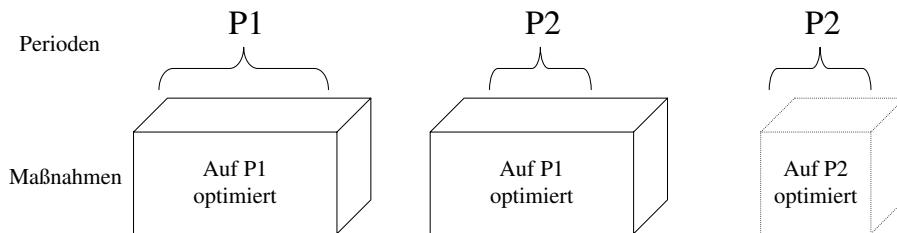


Abbildung 7.2: Problem der Optimierung von Abnutzungsbereichen auf vorläufige Perioden

²Abbildung 7.2: Beim Wechsel von Periodenlänge P1 (lang) zu Periodenlänge P2 (kurz) im Rahmen der Periodenoptimierung ist das Ergebnis zunächst schlechter, selbst wenn P2 besser ist, da die Inhalte des Abnutzungsbereichs auf P1 optimiert sind.

7.1.2 Einführung eines Interpretationsschrittes

Mit der Einführung des in dieser Arbeit entwickelten Interpretationsschrittes sind die einzelnen Abnutzungseinheiten nicht mehr fest mit einer Periode verknüpft. Bei einer Änderung der Periode wird im Interpretationsschritt entschieden, ob die Zuordnung gleich bleibt. Informationen, die mit dem genetischen Algorithmus variiert werden, sind die Dauern der Maßnahmeperioden und individuelle Instandhaltungsperioden für die Komponenten. Letztere gehen durch Variation aus der "individuell optimalen Instandhaltungsperiode" des jeweiligen Bereiches hervor.

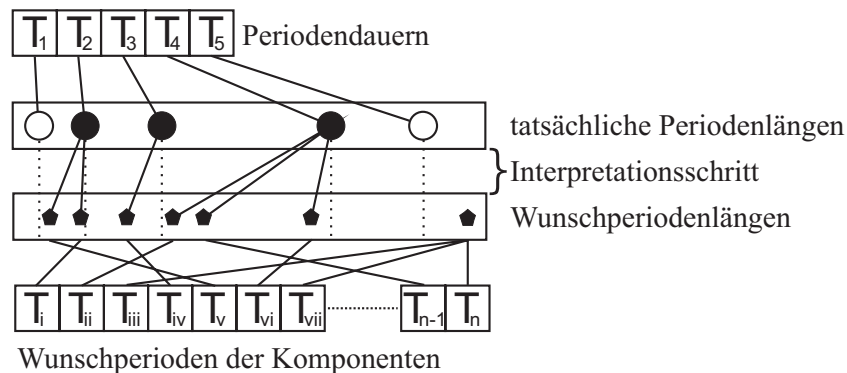


Abbildung 7.3: Parametrisierte Darstellung der Instandhaltungsplanung mit Interpretationsschritt

Diese individuelle Periode dient jetzt wieder zur Einschätzung, ob und in welcher Maßnahmeperiode die Komponente instandgehalten wird. Die Entscheidung, ob eine Instandhaltungsmaßnahme geplant wird, hängt hierbei von der "Individuellen Erneuerungsperiode" (TPO) ab. Diese gibt an, nach welcher Zeit ein Bereich durch das Austauschen von Verschleißteilen komplett erneuert ist. Eine Inspektionsperiode jenseits der TPO entfällt, da die ursprünglichen Komponenten, die inspiziert werden sollen, zum Zeitpunkt der Inspektion nicht mehr vorhanden sind.

Die Funktionsweise des Interpretationsschrittes wird in Abb. 7.3 veranschaulicht:

Es gibt eine Datenzeile, für die Periodendauern der Abnutzungsbereiche (oberste Zeile) und eine für die Periodenwünsche für die Abnutzungseinheiten (unterste Zeile). Diese Informationen werden unabhängig voneinander von der Optimierung verarbeitet. Nach der Optimierung werden die Peri-

odenwünsche im Interpretationsschritt dann den nächstgrößeren tatsächlichen Perioden deterministisch zugeordnet. Dies geschieht über die Periodenlängen (mittlere Zeilen).

Der Vorteil dieser Methode liegt in der Vermeidung von gegeneinander arbeitenden Optimierungsabläufen (siehe Abb. 7.2) für die Einteilung der Abnutzungseinheiten und die Perioden der Abnutzungsbereiche. Ohne Interpretationsschritt besteht hier sonst das Problem, dass eine Periode unabhängig davon, ob sie optimal ist, durch die auf ihre jetzige Länge optimierte Zuordnung der Abnutzungseinheiten fixiert ist.

Der Nachteil ist die im Interpretationsschritt anfallende Redundanz. Eine Änderung der Periodenwünsche macht sich nur dann bemerkbar, wenn sie die Einteilung im Interpretationsschritt um eine Periode verschiebt. Dieser Nachteil tritt jedoch nur an den Stellen auf, an denen die Zuordnung vorher die Optimierung der Perioden behinderte. Somit ist an dieser Stelle keine nützliche Information verloren gegangen, lediglich ein störender Einfluss wurde entfernt.

Für die Zuordnung der Erneuerungsmaßnahmen zu den Bereichen werden, statt der Periodenwünsche, wie gehabt die TPOs herangezogen.

Basierend auf diesem Konzept wird in dieser Arbeit sowohl ein neuer Mutations- als auch ein Crossoveroperator entwickelt.

7.1.3 Kurzfassung des Ablaufs der Optimierung

Zu Beginn der Optimierung wird eine Startpopulation benötigt, die variiert werden kann. Zur Erzeugung dieser Startpopulation werden eine untere und eine obere Schranke definiert, zwischen denen die zufälligen Lösungen erzeugt werden.

Die Perioden müssen zwischen einem Jahr und einem steigenden Anteil der Betrachtungszeit³ liegen (Details folgen in 7.1.8).

Bei der Wunschperiode der Abnutzungseinheiten wird der Startwert anhand der von "Instra" (ein von Beckmann entwickeltes Programmpaket) ermittelten "Individuell Optimalen Instandhaltungsperioden" (TKO) gewählt, mit einer Schwankung von 50%.

Nach dem Aufbau der Startpopulation beginnt die eigentliche Optimierung.

³Normalerweise ist die Betrachtungszeit für die Anlage die restliche geplante Betriebszeit.

In Iterationen werden:

- die neuen Lösungsansätze bewertet,
- aus allen Lösungen, die mindestens eine Iteration alt sind, die schlechtesten gelöscht,
- neue Lösungen erzeugt.

7.1.4 Bewertung der Lösungen

Für die Bewertung werden die eingelesenen Tabellen kopiert, mit den Daten des zu bewertenden Lösungsansatz abgeändert und anschließend mit den Funktionen von Instra ausgewertet. Danach werden die Ergebnisse ausgelesen und die Tabellen gelöscht.

Zur Entkopplung der Parameter in der Optimierung wurde in Abschnitt 7.1.2 ein Zwischenschritt eingeführt, der zwei Datenzeilen in einen Instandhaltungsplan umwandelt.

Die erste Daten-Zeile wird in die Periodenlängen umgewandelt. Hierbei ist zu beachten, dass Werte, die größer als die Betrachtungszeit sind, bedeuten, dass die jeweilige Periode nicht benutzt wird. In den Rohdaten werden diese Werte auf die Betrachtungszeit + 1 reduziert, um spätere Variationen zu erleichtern.

Die zweite Datenzeile stellt eine angestrebte Inspektionsperiode für die Komponenten dar. Eine Komponente wird in der ersten Periode inspiziert, die größer oder gleich ihrer Wunschperiode ist, es sei denn ihre "Individuell optimale Erneuerungsperiode" (TPO) ist ebenfalls kleiner als die TKO. Ist dies der Fall, wird keine Inspektion vorgenommen, da die Komponente innerhalb dieser Zeit bereits komplett erneuert wurde.

Die eigentliche Bewertung wird mit den Gebrauchskostenfunktionen aus [Bec94] durchgeführt.

7.1.5 Selektion

In diesem Schritt werden einige der schlechteren, älteren Lösungsansätze verworfen, um Platz für neue Ansätze zu schaffen. Hierbei ist die Bewertung einer Lösung vorrangiges Kriterium. Neue Lösungen sind von der Selektion ausgeschlossen. Sie können erst in der nächsten Runde gelöscht werden. Pro neuer Generation werden exakt 20% der Lösungsansätze gelöscht und ersetzt.

Es werden jedoch noch Zwischenergebnisse betrachtet, die Aufschluss über die Ähnlichkeiten zwischen den Lösungen geben. Wenn beispielsweise eine Lösung eine höhere Verfügbarkeit besitzt, aber auch höhere Instandhaltungskosten ausweist als eine andere Lösung, so können die gesamten Instandhaltungskosten in der gleichen Größenordnung liegen wie die der anderen Lösung. Durch die Betrachtung der Zwischenergebnisse, lassen sie sich jedoch von dieser unterscheiden, da das Verhältnis der Zwischenergebnisse die strategische Ausrichtung eines Planes wiedergibt. Auf diese Weise kann eine doppelte Lösung bevorzugt aussortiert werden. Dies ist sinnvoll, da mehrfach auftretende Lösungen bei der Kombination mit einer identischen Lösung keine Verbesserungen bringen können. Falls zwei dieser Lösungen als Eingangslösungen eines Crossoveroperators dienen, so ist das Ergebnis ein dritte identische Lösung. Je mehr Lösungen identisch sind, desto wahrscheinlicher wird dieses Szenario. Es ist also eine Kettenreaktion, die nach Möglichkeit unterbunden werden sollte.

7.1.6 Vererbung

Mutationsoperator

Beim Mutationsoperator wird eine Anzahl von Mutationen als prozentualer Anteil der Anzahl der Variablen in allen Zeilen des Chromosoms bestimmt. Anschließend wird zufällig eine Zeile bestimmt, in der dann ein Wert um ein Viertel bis hin zur ganzen Varianz der Zeile abgeändert wird.

Crossoveroperator

Der Crossoveroperator vermischt zwei Chromosomen miteinander zu einem neuen Chromosom. Dabei wird mit einer 50%-Wahrscheinlichkeit das Zeilenelement aus dem einen oder dem anderen Chromosom entnommen. Sollte hierbei versucht werden, über das Zeilenende hinaus zu lesen, wird die Zeile beendet.

7.1.7 Konvergenzverhalten

Eine der Hauptaufgaben bei der Anwendung genetischer Algorithmen ist, deren Neigung zur vorzeitigen Konvergenz zu unterdrücken. Das bedeutet, es wird ein lokales Optimum gefunden, in dem sich vorschnell alle Lösungs-

ansätze der Population ansammeln. Hierdurch werden nur noch mit Hilfe der Mutation neue Lösungen gebildet. In der Regel führt dies dazu, dass der Algorithmus im lokalen Optimum festsitzt und es von sich aus nicht wieder verlässt. Die Population ist zusammengebrochen. Es ist also notwendig, die Vielfalt der Population zu überwachen und gegebenenfalls Maßnahmen zur Korrektur einzuleiten.

Unzureichend für die Detektion des Zusammenbruchs der Population ist es, das gegenwärtige Optimum in der Population zu suchen und dessen Duplikate zu zählen. Früher oder später wird ein Wert in der Nähe eines lokalen Optimums es schaffen, die Population zu dominieren, bevor das lokale Optimum verlassen wurde.

Um zu verhindern, dass die Population von einem Individuum dominiert wird, wurde die Betrachtung auf alle Chromosomen ausgeweitet. Dies dient dazu, die in 7.1.5 beschriebene Kettenreaktion zu unterbinden.

7.1.8 Detaillierter Ablauf der genetischen Optimierung

Datenstrukturen

Die Datenstruktur ist in 3 Teile gegliedert:

1. *Daten, die Gegenstand der Optimierung sind*
Zu den Daten, die Gegenstand der Optimierung sind, gehören nur die Periodendauern der Instandhaltungsbereiche und die Wunschperioden der einzelnen Abnutzungseinheiten. Auch das Alter des jeweiligen Chromosoms (Instandhaltungsplan) in Generationen (Iterationsschritten) wird während der Optimierung mitgezählt.
2. *Daten, die für die Bewertung benötigt werden, bezüglich der Optimierung jedoch konstant sind*
Alle übrigen Daten, die der monetären oder zeitlichen Bewertung der Anlage dienen, sind als Konstanten hinterlegt. Das Gleiche gilt für die Parameter des Abnutzungsverhaltens der Abnutzungseinheiten.
3. *Zwischenergebnisse, die während der Berechnung der Gebrauchskosten aus den Optimierungsdaten und den Konstanten anfallen*
Abgelegte Zwischenergebnisse sind zum Beispiel die im Zwischenschritt (siehe Abschnitt 7.1.2) erzeugten Zuordnungen der Abnutzungseinheiten zu Abnutzungsbereichen. Die Zwischenergebnisse der Gebrauchskosten

stenfunktionen werden abgelegt, um bei Fehlern den Ablauf rekonstruieren zu können. Dieses Abspeichern ist auch nach dem Beseitigen der letzten Fehler nicht abgeschafft worden, da der Festplattenplatzbedarf des Programms auf heutigen Rechnern vernachlässigbar ist.

Aufbau der Startpopulation

Bei der Optimierung mit Genetischen Algorithmen, werden aus einer großen Menge von möglichen Lösungsansätzen die besseren Ansätze weiterentwickelt. Dazu muss zu Beginn des Algorithmus erst einmal eine Menge an Lösungen aufgebaut werden.

Für diese Arbeit wurde dies gelöst, indem zwei Lösungen erzeugt wurden, die die Extremwerte des plausiblen Lösungsraumes darstellen.

Zum einen ein Plan, der keinerlei Maßnahmen beinhaltet und zum anderen ein Plan, dessen Perioden durch Verdoppelungen aus einander hervorgegangen sind. Der Plan ohne Maßnahmen besitzt nur Perioden außerhalb der Betrachtungszeit. Damit stellt er die minimale Instandhaltung dar. Auf der anderen Seite steht ein Plan, der auf der Grundidee der Teilbarkeitsregel basiert. Diese Faustregel besagt, dass maximale Synergien bei den Maßnahmekosten genutzt werden, wenn die Intervalle mehrerer Perioden zusammenfallen. Deswegen wird erwartet, dass die Perioden Vielfache von einander sind. Auf die Details der Teilbarkeitsregel wird in Abschnitt 7.2.3 eingegangen. Der Plan, dessen Perioden durch Verdoppelung auseinander hervorgegangen sind, stellt also die dichteste Zusammenballung von Perioden dar, die unter Beachtung der Teilbarkeitsregel möglich ist.

Anschließend an die Erzeugung der beiden Extremwerte werden zufällige Lösungen zwischen diesen beiden Extremwerten erzeugt. Die Periodendauern werden nach unten durch 2er-Potenzen und nach oben durch die Betrachtungszeit +1 begrenzt. Die Wunschperiodendauern der Abnutzungseinheiten werden zu Beginn in einer 25% Umgebung der TKO (individuell optimale Instandhaltungsperiode) der jeweiligen Abnutzungseinheit gewählt.

Hauptschleife

Die Hauptschleife der Optimierung wird nach einer bestimmten Anzahl an Durchläufen verlassen. Es werden die in Abbildung 7.4 dargestellten Punkte abgearbeitet. Die Ausgabefunktion für Zwischenergebnisse wird aus folgenden Gründen bereits ab dem Beginn der Optimierung mit aufgerufen:

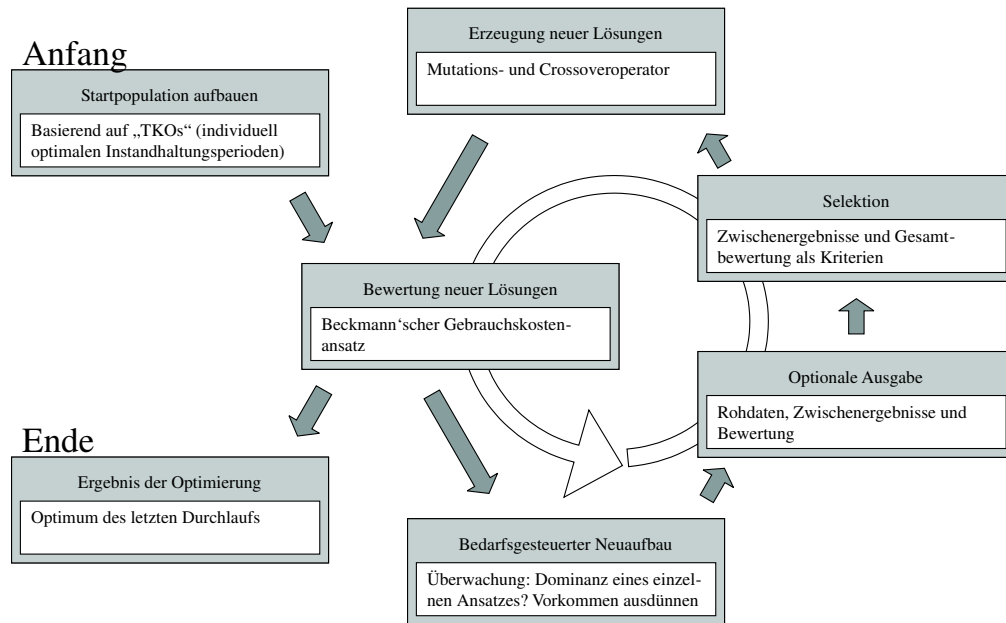


Abbildung 7.4: Der Ablauf der genetischen Optimierung: Rechts im Bild die sich immer wieder für jede Generation wiederholende Schleife, links Einstiegs- und Ausstiegspunkt der Schleife

1. Überprüfung der Startpopulation

Wenn die Startpopulation bereits falsch aufgebaut wurde oder die Gütefunktion fehlerhaft ist, dann lässt sich dies bei der ersten Ausgabe feststellen. Dies war in der Entwicklung des Algorithmus wichtig und stört den fertigen Algorithmus nicht.

2. Extrapolationsverhalten der Gebrauchskostenfunktionen

Bisher wurden die Gebrauchskostenfunktionen nur für die Bewertung unstrittig plausibler Planungsansätze, die mit Expertenwissen entworfen wurden, verwendet. Um zu verhindern, dass willkürliche Ansätze außerhalb aller plausiblen Annahmen entstehen, wäre es möglich, den Definitionsbereich gezielt zu begrenzen. Es ist in dieser Arbeit jedoch einfacher, dafür zu sorgen, dass unsinnige Ansätze schlecht bewertet werden. Um die notwendigen Änderungen der Gebrauchskostenfunktionen vorzunehmen, ist es jedoch sehr hilfreich zu sehen, wie die Ansätze entstehen, da sich so die Ursache von Fehlentwicklungen gezielt ausschalten lässt.

3. *Performance-Betrachtung*

Über die Zwischenergebnisse der Optimierung lässt sich ihre Leistungsfähigkeit abschätzen. Dies vereinfacht es, eine Aussage über mögliche Verbesserungen der Optimierung durch Modifikationen an den Operatoren zu treffen. Aus diesem Grund wurde die Ausgabe von Zwischenergebnissen (noch) beibehalten.

Nach dem Durchlaufen der Hauptschleife erfolgt dann eine letzte Bewertung. Anschließend ist der beste gefundene Instandhaltungsplan das Endergebnis. Im folgenden werden die Optimierungsschritte detailliert betrachtet.

Bewertung

Die Bewertung basiert auf den Gebrauchskostenfunktionen aus [Bec94]. Als Ergebnis der Bewertung sind die Gebrauchskosten "GK" anzusehen. Es werden jedoch noch die Zeitverfügbarkeiten, und Teilmengen der Gebrauchskosten unterteilt nach planmäßigen und unplanmäßigen Maßnahmen, sowie nach unmittelbaren Kosten als auch nach stillstandsbedingten Verlusten als Zwischenergebnisse bestimmt. Sie werden bei der Überwachung der Konvergenz gezielt eingesetzt, wie in Abschnitt 7.1.7 erklärt.

Alter der Chromosomen erhöhen

Die Anzahl der Selektionsschritte, die ein Chromosom überlebt, wird auch als "Alter" bezeichnet. Steigt das durchschnittliche Alter der Chromosomen, so kann davon ausgegangen werden, dass der Algorithmus sich zur Zeit in einem Optimum befindet und die Veränderungen in der Population nur geringfügig sind.

Das Alter der Chromosomen wird protokolliert, um gegebenenfalls die Konvergenz des Algorithmus zu steuern, wenn feststeht, dass die Optimierung trotz Ausbruchsversuchen das derzeitige Optimum nicht wieder verlässt. Außerdem kann darüber die Funktionsweise der Optimierung für spätere Auswertungen protokolliert werden.

Bedarfsgesteuerter Neuaufbau von Teilen der Population

An dieser Stelle wird auf die Gegenmaßnahmen gegen das bereits mehrfach erwähnte weit verbreitete generelle Problem bei genetischen Algorithmen eingegangen, die Möglichkeit der vorzeitigen Konvergenz. Darunter ist zu verste-

hen, dass ein Individuum aus der Population anfängt, die gesamte Population zu übernehmen, unabhängig davon, ob es das momentane Optimum ist. Es muss nur gut genug sein, um nicht automatisch wieder gelöscht zu werden. Es entstehen ein paar gleiche Lösungen, in der Regel durch Mutationen, die im Interpretationsschritt keine Veränderung bewirken. Die gleichen Lösungen haben ihrerseits eine erhöhte Wahrscheinlichkeit, gleiche Lösungen zu erzeugen, zum Beispiel, in dem sie vom Crossoveroperator miteinander kombiniert werden.

Deswegen ist es erforderlich, die Population auf die Dominanz einer einzelnen Lösung hin zu überprüfen. Dies geschieht, indem die Population nach Lösungen, die neben der gleichen Bewertung auch die gleichen Zwischenergebnisse haben, durchsucht wird. Ein Exemplar von diesen Lösungsansätzen wird beibehalten, die restlichen Exemplare werden gelöscht, um Platz für neue Individuen zu erhalten.

Selektion

Der Selektionsschritt führt dazu, dass die Anzahl der Lösungsansätze konstant bleibt, indem schlechte Lösungen aus der Population entfernt werden. Das Kriterium für die Auswahl der zu löschenden Lösungsansätze basiert auf den in der Bewertung berechneten Gebrauchskosten (GK), die jedoch noch modifiziert werden.

Hierzu wird als allererstes das aktuelle Optimum bezüglich der gesamten Gebrauchskosten bestimmt. Anschließend werden die Zwischenergebnisse des Optimums mit denen jeder einzelnen Lösung verglichen. Mit dem Ergebnis des Vergleichs werden Bonusterme gebildet. Das Optimum erhält für den aktuellen Selektionsschritt einen so starken Bonus, dass es nicht gelöscht werden kann. Alle anderen Lösungen erhalten Boni, wenn sie in einem oder mehreren der folgenden Zwischenergebnisse besser sind als das Optimum:

- Gebrauchskostenanteil für außerplanmäßige Stillstandsdauern (GKS-DA)
- Gebrauchskostenanteil für außerplanmäßige Maßnahmen (GKIHA)
- Gebrauchskostenanteil für planmäßige Stillstandsdauern (GKSDP)
- Gebrauchskostenanteil für planmäßige Maßnahmen (GKIHP)

- $\frac{1}{\text{Zeitverfügbarkeit}}$
- $\frac{1}{1 - \text{geplante Zeitnichtverfügbarkeit}}$
- $\frac{1}{1 - \text{ungeplante Zeitnichtverfügbarkeit}}$

Damit soll erreicht werden, dass Lösungsansätze, die über einen anderen Weg ein ähnlich gutes Ergebnis wie das momentane Optimum erzielen, begünstigt werden. Beispielsweise würde ein Ansatz begünstigt, wenn er geringfügig mehr Ausfälle produziert, aber deutlich weniger planmäßige Maßnahmen enthält. Auf diese Weise wird der Aufbau einer diversifizierten Population begünstigt und der vorzeitigen Konvergenz in lokalen Optima entgegen gewirkt.

Anschließend wird das nach Berücksichtigung der Boni am schlechtesten bewertete Fünftel der Population gelöscht.

Einbeziehung von Zwischenergebnissen

Nach diesem kurzen Abriss des Selektionsschritts wird an dieser Stelle noch auf die Details der modifizierten Bewertung eingegangen. Die Berechnung des Bonus für Chromosomen, die in einem Unterkriterium besser sind als das derzeitige Optimum, geschieht im Detail wie folgt:

1. Es wird der optimale Lösungsansatz in der aktuellen Population gesucht, sein Index wird als "*min_pos*" und sein GK-Wert als "*min*" eingelesen. Seine Bewertung für diesen Selektionsschritt wird zu Null gesetzt.
2. Für alle anderen Lösungen werden die Zwischenergebnisse mit denen des aktuellen Optimums verglichen. Sollten sie bei einem Zwischenergebnis besser als das Optimum sein, werden sie wie folgt begünstigt:

$$\begin{aligned} \text{bewert}_{neu} &= \text{bewert}_{alt} \cdot \left(1 - \frac{\text{Zwischenerg}_{opt}}{\text{bewert}_{opt}} + \frac{\text{Zwischenerg}_{\text{aktuell}}}{\text{bewert}_{\text{aktuell}}} \right) \\ &+ \text{bewert}_{opt} \cdot \left(\frac{\text{Zwischenerg}_{opt}}{\text{bewert}_{opt}} - \frac{\text{Zwischenerg}_{\text{aktuell}}}{\text{bewert}_{\text{aktuell}}} \right) \end{aligned} \quad (7.3)$$

Da das Ziel der Optimierung das Aufspüren eines Minimums der Bewertungsfunktion ist, wird die Bewertung kleiner. Die Bewertung eines

Ansatzes kann für mehrere verschiedene Zwischenergebnisse verbessert werden. (Details auf Seite 84)

3. Sollte hierbei eine negative Bewertung entstehen, so bestünde die Gefahr, dass ein anderes Chromosom besser als das Optimum bewertet wird. Deshalb werden in diesem Fall alle Bewertungen bis auf das Optimum soweit verschlechtert (erhöht), dass sie wieder positiv sind. Das kann aber nur geschehen, wenn ein Lösungsansatz in mehreren Zwischenergebnissen besser als das Optimum ist.
4. Löschen der n schlechtesten Ansätze gemäß der modifizierten Bewertung

Erzeugung neuer Ansätze

Für jeden durch die Selektion freigewordenen Platz in der Population wird mit einem zufällig ausgewählten Operator ein neuer Lösungsansatz erzeugt. Hierzu stehen drei Operatoren zur Auswahl:

1. Crossover-Operator:
Es werden zufällig zwei Lösungsansätze bestimmt und jedes Gen des neuen Chromosoms wird mit gleicher Wahrscheinlichkeit aus dem einen oder anderen ursprünglichen Lösungsansatz kopiert.
2. Einfacher Mutationsoperator:
Beim einfachen Mutationsoperator wird zunächst eine Datenzeile (Periodendauern oder Wunschintervalle) der Komponenten ausgewählt, anschließend wird zufällig ein Element der Zeile ausgewählt, das mutiert wird. Zum Mutieren wird dabei der Wert des Gens um einen Zufallswert, der maximal so groß wie die Varianz der Zeile ist, abgeändert.
3. Altersabhängiger Mutationsoperator
Der altersabhängige Mutationsoperator versucht zu Beginn vor allem die erste Datenzeile zu ändern. Später verschiebt sich die Gewichtung auf die zweite Datenzeile, die die Intervallwünsche enthält. Außerdem wird die Anzahl der Mutationen reduziert. Realisiert wird dies über

eine Gewichtung folgender Form:

pm	Prozentualer Mutationsanteil zu Beginn ohne Alterskorrektur
wa	Wechselalter bei dem die Hälfte des Mutationsanteils erreicht wird
qa	Quellenalter des zu mutierenden Chromosoms
nm	Neuer Mutationsanteil nach der Alterskorrektur
ma	Effektive Anzahl der Mutationen
ag	Anzahl der Gene, die mutiert werden könnten
za	Zeilenanzahl
zi	Der zu erzeugende Zeilenindex

$$nm = pm \cdot \frac{wa}{wa + qa} \quad (7.4)$$

$$ma = \frac{(ag \cdot qa) + (zl \cdot (wa - qa))}{nm \cdot 100 + 1} \quad (7.5)$$

Für den Fall, dass das Wechselalter wa erreicht oder überschritten wurde, werden alle Zeilen gleich wahrscheinlich für eine Mutation ausgewählt. Sonst gilt:

$$x = Zufall[0 \dots (wa \cdot za)] \quad (7.6)$$

$$y = wa \cdot za - qa \cdot (za - 1) \quad (7.7)$$

$$zi = \begin{cases} 1 & \text{für } x < y \\ \frac{x-y}{qa} \text{ (abgerundet)} & \text{sonst} \end{cases} \quad (7.8)$$

Optimierungsende

Nach dem Verlassen der Schleife erfolgt noch eine letzte Bewertung der Ansätze, wobei der beste Ansatz das gefundene Optimum darstellt. Die übrigen Ansätze können noch einen Eindruck von alternativen Vorgehensweisen vermitteln, was gerade beim Umstellen eines bestehenden Instandhaltungsplanes hilfreich sein kann.

7.2 Bewertung der Instandhaltung

Wie eingangs bereits erwähnt, bauen die Näherungsfunktionen, hier auch "Gebrauchskostenfunktionen" genannt, zur Bewertung eines Instandhaltungsplanes auf dem Programmpaket "Instra" von Prof. Dr. sc. techn. Beckmann

auf. Die Gebrauchskostenfunktionen werden im Rahmen dieser Arbeit deshalb nur kurz skizziert, um die Grundlagen und erforderliche Anpassungen zu vermitteln.

7.2.1 Annahme der Minimalinstandsetzung

Eine der wichtigsten Grundlagen für die Gebrauchskostenfunktionen ist die Annahme der minimalen Instandsetzung. Beckmann geht davon aus, dass bei einer Reparatur die Komponente lediglich in den letzten unbeschädigten Zustand zurückversetzt wird, eine Verbesserung des Abnutzungsgrads findet nicht statt. Das bedeutet, dass das Alter der Komponenten kontinuierlich steigt. Als Konsequenz daraus lässt sich die Anzahl der Ausfälle einfach über die Integration der Ausfallrate bestimmen, da sich die Verteilungsfunktion nicht verändert. Die integrierte Ausfallrate wird hierbei, korrespondierend zur Ausfallrate $\lambda(t)$, mit $\Lambda(t)$ abgekürzt.

7.2.2 Die Verwendung der Weibull-Verteilung

Alle Ausfallfunktionen sind bei Beckmann Weibull-Verteilungen. In [Bec94] begründet er dies damit, dass eine Reihenschaltung mit steigender Komponentenanzahl unabhängig von deren Verteilungsfunktionen sich immer mehr der Weibull-Verteilung annähert. Dieser Zusammenhang stammt aus der Theorie der Grenzverteilungen. Der Formparameter α wird, falls zu wenige Erfahrungswerte für eine zuverlässige Bestimmung aller Parameter vorliegen, mit 2 angenommen, um die Anzahl der Freiheitsgrade zu reduzieren und die Zuverlässigkeit der restlichen Schätzung zu erhöhen. Diese Annahme scheint im allgemeinen eine relativ gute Abschätzung zu sein, da sich der Parameter in den Fällen, in denen eine ausreichende Datenbasis vorhanden ist, meistens um weniger als 0,1 von 2 abweicht.

7.2.3 Aufhebung der Teilbarkeitsbedingung

Um mit den Gebrauchskosten (siehe Abschnitt 4.3 Seite 43 und 45) einzelner Perioden die Gebrauchskosten des gesamten Planes für den Betrachtungszeitraum abzuschätzen, verwendet Beckmann die Nebenbedingung der Teilbarkeit. Diese Nebenbedingung besagt, dass Pläne nur dann optimal sein können, wenn ihre Perioden Vielfache der nächstkleineren Periode sind. Fallen die kleineren Maßnahmeumfänge mit den größeren Umfängen zusammen,

so werden die Maßnahmen zusammen effizienter durchgeführt. Deshalb wird davon ausgegangen, dass die kleineren Umfänge bei jedem größeren Umfang mit durchgeführt werden. Dies hat zur Folge, dass die Zeit, die in Perioden der nächst kleineren Länge eingeteilt wird, sich mit der größeren Periode wiederholt. An dieser Stelle ist zu berücksichtigen, dass die Ausfallwahrscheinlichkeit mit der Zeit überproportional ansteigt. Dies hat zur Folge, dass eine Einteilung eines Zeitabschnittes in eine feste Anzahl Instandhaltungsintervalle genau dann eine minimale Ausfallwahrscheinlichkeit zur Folge hat, wenn alle Unterabschnitte gleich lang sind. Gleichzeitig sind alle Zeitdauern in der Instandhaltungsplanung, auf Grund des stark jahreszeitabhängigen Energiebedarfs, nur in ganzen Jahren anzugeben. Zwar stellt die optimal gleichmäßige Einteilung keine absolute Notwendigkeit dar, aber wenn sie in einem ersten Ansatz erzwungen wird, so entsteht daraus eine Teilbarkeitsbedingung. Diese Bedingung führt zu einer drastischen Vereinfachung der Umrechnung von Kosten pro Stillstand in Kosten pro Zeit, wie bereits weiter vorne (Abschnitt 4.3) demonstriert:

$$\frac{1}{p_{i+1}} \cdot \left(\frac{p_{i+1}}{p_i} - 1 \right) = \left(\frac{1}{p_i} - \frac{1}{p_{i+1}} \right) \quad (7.9)$$

$\frac{p_{i+1}}{p_i} - 1$ gibt an, wie oft zwischen zwei $i+1$ -ten Maßnahmen die i -te Maßnahme stattfindet. Dies wird dann durch die Zeitspanne dazwischen geteilt. Fällt die Teilbarkeitsbedingung weg, so ist der Ausdruck $\frac{p_{i+1}}{p_i} - 1$ nicht mehr ganzzahlig. Dies bedeutet, dass entweder die Einteilung p_{i+1} durch p_i nicht mehr zu einer Überlappung der Maßnahmeumfänge führt, oder dass die Abstände zwischen den p_i variieren.

Um die Teilbarkeitsbedingung der Periodendauern aufzuheben, ist es erforderlich, alle Terme von der Gestalt $\frac{1}{p_i} - \frac{1}{p_{i+1}}$ zu ersetzen. Es wird eine Dreiecksmatrix aufgebaut, die Aufschluss darüber gibt, wie oft eine kleinere Periodendauer eine größere Periodendauer unterteilt. Für die nächstkleinere wird hierbei einfach das bisherige Ergebnis $\frac{p_{i+1}}{p_i} - 1$ aufgerundet. Ab der übernächsten Periode ist es erforderlich, mit Resttermen zu rechnen, also wie oft die übernächste Periode den Restanteil unterteilt, der keine ganze nächstkleinere Periode darstellt. Dies geschieht in Form von zwei gegenläufigen Schleifen, einer äußeren Schleife, bei der die größere Periode immer größer wird, und einer inneren Schleife, die jeweils eine Periode unterhalb der äußeren Schleife anfängt und nach unten zählt. Als Ergebnis werden immer die Restterme betrachtet. Anschließend werden die Produkte der Restterme so

aufsummiert, dass sich die Gesamtanzahl der enthaltenen Perioden ergibt. Hierbei wird als erstes die Zerlegung der größten Periode berechnet, um sich in Richtung kleinste vorzuarbeiten.

Auf diese Weise wird die Teilbarkeitsbedingung umgangen und eine sinnvolle Optimierung ermöglicht.

7.2.4 Verwendung von Teilfunktionen

Neben der Gesamtkostenabschätzung werden in der Optimierung auch die einzelnen Teilfunktionen der Gebrauchskosten verwendet. Diese dienen dazu, die Unterschiedlichkeit von verschiedenen Lösungen zu bewerten. Die Unterschiedlichkeit ist für den Algorithmus sehr schwer zu bewerten, insbesondere weil die Chromosomen durch die mit Hilfe des Zwischenschritts entkoppelten Informationen nur teilweise in den endgültigen Instandhaltungsplänen wiederzufinden sind. Das heißt, auch wenn die Individuen für den Algorithmus unterschiedlich sind, können sie für die Bewertung identisch sein. Deswegen erfolgt die Unterscheidung aus der Perspektive der Bewertungsfunktion. Die hierzu herangezogenen Teile der Gebrauchskosten sind bereits in Abschnitt 7.1.8 erwähnt worden:

- Gebrauchskostenanteil für außerplanmäßige Stillstandsdauern (GKS-DA)
- Gebrauchskostenanteil für außerplanmäßige Maßnahmen (GKIHA)
- Gebrauchskostenanteil für planmäßige Stillstandsdauern (GKSDP)
- Gebrauchskostenanteil für planmäßige Maßnahmen (GKIHP)
- $\frac{1}{\text{Zeitverfügbarkeit}}$
- $\frac{1}{1 - \text{geplante Zeitnichtverfügbarkeit}}$
- $\frac{1}{1 - \text{ungeplante Zeitnichtverfügbarkeit}}$

Genau wie die gesamten Gebrauchskosten sind diese Zwischenergebnisse zu minimieren, um besser bezüglich der Zielfunktion zu werden. Für die Unterscheidung der Lösungsansätze werden sie jedoch nicht absolut betrachtet, sondern im Verhältnis zu den gesamten Gebrauchskosten. Es wird also

ein negativer Reduktionsterm g gebildet, der das Verhältnis der m -ten Zwischenergebnisse zu den gesamten Gebrauchskosten wiedergibt und mit dem derzeitigen Optimum vergleicht.

$$g_m = \frac{\text{Teilbewertung}_{m, \text{ aktuell}}}{\text{gesamte Gebrauchskosten}_{\text{aktuell}}} - \frac{\text{Teilbewertung}_{m, \text{ optimal}}}{\text{gesamte Gebrauchskosten}_{\text{optimal}}} \quad (7.10)$$

Eine Verbesserung der Selektionsbewertung erfolgt, wenn die betrachtete Lösung in einem Teilaspekt besser ist als die insgesamt optimale Lösung. Hierzu wird die auf den Gebrauchskosten basierende Selektionsbewertung mit dem Reduktionsterm reduziert. Alle Zwischenergebnisse, in denen keine lokale Verbesserung vorliegt ($g_m > 0$), werden ignoriert. Die $g_m < 0$ gehen in eine Bewertung $bw(x)$ für die Selektion ein, bei der es darum geht, die am schlechtesten bewerteten Lösungsansätze zu löschen. Die Bewertung läuft dann wie folgt ab:

1. Übernahme der Gebrauchskosten als Startwert
2. Bewertung des aktuellen Optimums zu Null setzen
3. Berechnung der g_m
4. Für jedes $g_m < 0$ wird die Bewertung $bw(x)$ verbessert:

$$bw(x) = bw(x) \cdot \underbrace{(1 + g_m)}_{g_m < 0} - bw(x_{opt}) \cdot \underbrace{g_m}_{g_m < 0} \quad (7.11)$$

5. Im Fall, dass es eine Lösung x_* geschafft hat, $bw(x_*)$ negativ werden zu lassen, erfolgt eine Korrektur. Alle Lösungen bis auf das Optimum werden um $1 - bw(x_*)$ erhöht.

Die so erhaltene Funktion $bw(x)$ wird nun in der Selektion dazu verwendet, die schlechtesten Lösungen zu löschen.

7.2.5 Startansatz für die Abnutzungsbereiche

Die Zuordnung der Abnutzungseinheiten zu den Abnutzungsbereichen erfolgt, wie in den vorhergehenden Abschnitten erläutert, anhand von Wünschen für die Perioden, die im Zwischenschritt in eine Zuordnung zu einem Abnutzungsbereich umgewandelt werden. Einen Ansatz für die Startwerte

liefern hierbei die individuell optimalen Inspektionsperioden "TKO" und die individuellen Erneuerungsperioden "TPO". Die individuell optimale Inspektionsperiode (aus [Bec94]) berechnet sich anhand der stochastischen Parameter, sowie der Kostengrößen des Abnutzungsbereichs. Für die Darstellung als Formel werden folgende Parameterkürzel benötigt:

Spalte	Definition
CPO	Kosten einer Erneuerung
CKO	Kosten einer Inspektion
CMO	Kosten einer Schadensbeseitigung
CBO	Kosten einer Befundinstandsetzung
MATP	Material- und Personalkosten (Fremdpersonal) für planmäßige Erneuerung
AKHP	Stundenaufwand einer planmäßigen Erneuerung
ISDP	Instandhaltungsdauer einer planmäßigen Erneuerung
MATK	Material- und Personalkosten (Fremdpersonal) einer Inspektion
AKHK	Stundenaufwand einer Inspektion
ISDK	Dauer einer Inspektion
MATM	Material- und Personalkosten (Fremdpersonal) einer mittleren Schadensbeseitigung
AKHM	Stundenaufwand einer mittleren Schadensbeseitigung
ISDM	Dauer einer mittleren Schadensbeseitigung
A	Weibull-Exponent (α in Abschnitt 3.2.3)
B	Weibull-Dehnungskoeffizient (β in Abschnitt 3.2.3)
GAM	Weibull-Verschiebungsparameter (γ in Abschnitt 3.2.3)
TH	Diagnose Wirkungsgrad bei Inspektionen
WKF	Wirksamkeitsfaktor - Einfluss der Komponente auf die Verfügbarkeit des Stranges
NK	Anzahl der Teile aus denen die Abnutzungseinheit besteht
ZEE	Zeiteinheit als Umrechnungsfaktor hinterlegt
ADAUERP	planmäßige An- und Abfahrdauer
ADAUERAP	außerplanmäßige An- und Abfahrdauer
AKOST	Anfahrkosten

Spalte	Definition
VERLUSTP	Kostenbewertung einer planmäßigen Stillstandsstunde
VERLUSTH	Kostenbewertung einer außerplanmäßigen Stillstandsstunde
LOHNP	Selbstkostenverrechnungssatz (Stundenlohn eigenes Personal und Gemeinkosten) für planmäßige Tätigkeiten
LOHNH	Selbstkostenverrechnungssatz (Stundenlohn eigenes Personal und Gemeinkosten) für außerplanmäßige Tätigkeiten

Tabelle 7.1: Liste der notwendigen Parameter und Zwischenergebnisse für die Berechnung von TKO und TPO

Zunächst werden die Zwischenergebnisse CPO, CKO, CMO und CBO berechnet, aus denen die TKO und TPO gebildet werden.

$$CPO = MATP + AKHP \cdot LOHNP + 0.2 \cdot ((ISDP \dots + ADAUERP) \cdot VERLUSTP \cdot WKF + AKOST) \quad (7.12)$$

$$CKO = \begin{cases} MATK + AKHK \cdot LOHNP & \text{für } ISDK = 0 \\ MATK + AKHK \cdot LOHNP \dots & \text{sonst} \\ \dots + 0.2 \cdot ((ISDK + ADAUERP) & \end{cases} \quad (7.13)$$

$$CMO = MATM + AKHM \cdot LOHNH + WKF \cdot ((ISDM \dots + ADAUERAP) \cdot VERLUSTH + AKOST) \quad (7.14)$$

$$CBO = \frac{1}{2} \cdot \left[MATM + AKHM \cdot LOHNP + WKF \dots \dots \cdot ((ISDM + ADAUERP) \cdot VERLUSTP + AKOST) \right] \quad (7.15)$$

Die Werte 0.2 und 0.5 drücken die Gleichzeitigkeit mehrerer Maßnahmen aus, für ihren Ursprung sei hier auf [Gro76] verwiesen. Der Wirksamkeitsfaktor WKF drückt aus, wie wesentlich die Komponente für die Funktion des Stranges ist.

Anschließend werden hieraus TKO und TPO berechnet:

$$b_{Hilf} = \frac{B}{\sqrt[A]{NK}} \quad (7.16)$$

$$TKO = ZEE \cdot b_{Hilf} \cdot \sqrt[A]{\frac{CKO}{(A-1) \cdot TH \cdot (CMO - CBO)}} \quad (7.17)$$

$$TPO = ZEE \cdot b_{Hilf} \cdot \sqrt[A]{\frac{CPO - CKO}{(A-1) \cdot ((1-TH) \cdot CMO + TH \cdot CBO)}} \quad (7.18)$$

Die lokale Variable b_{Hilf} dient dazu, den Dehnungsparameter der Weibullverteilung an die Anzahl der Bauteile in der betrachteten Einheit anzupassen⁴. Die "individuell optimale Inspektionsperiode der Abnutzungseinheit ohne Betrachtung der Gesamtanlage" (TKO) wird gemäß Große⁵ aus der integrierten Ausfallrate der Komponenten hergeleitet. Hierbei wird von einem Ansatz zur Kostenbewertung der Periodendauern von Inspektion T_k und Erneuerung T_p (für $\gamma = 0$) ausgegangen:

$$\Lambda(t) = \int_{\tau=0}^t \lambda(\tau) d\tau = \int_{\tau=0}^t \frac{A \cdot \tau^{A-1}}{b_{Hilf}^A} d\tau = \left(\frac{t}{b_{Hilf}} \right)^A \quad (7.19)$$

$$\begin{aligned} K(T_k, T_p) &= \frac{1}{T_p} \{CPO - CKO + [(1-TH)CMO + TH \cdot CBO] \Lambda(T_p)\} \\ &+ \frac{1}{T_k} \{CKO + TH \cdot (CMO - CBO) \Lambda(T_k)\} \end{aligned} \quad (7.20)$$

$$TKO \rightarrow \frac{\partial K}{\partial T_k}(TKO) = 0 \quad (7.21)$$

$$TPO \rightarrow \frac{\partial K}{\partial T_p}(TPO) = 0 \quad (7.22)$$

$$\frac{\partial K}{\partial T_k}(TKO) = 0 \quad (7.23)$$

$$0 = \frac{d}{dt} \left(\frac{1}{t} (CKO + TH(CMO - CBO) \Lambda(t)) \right) \Big|_{t=TKO} \quad (7.24)$$

$$0 = \frac{d}{dt} \left(\frac{CKO}{t} + (TH(CMO - CBO) \frac{t^{A-1}}{b_{Hilf}^A}) \right) \Big|_{t=TKO} \quad (7.25)$$

⁴siehe Beckmann, Marx "Instandhaltung" Seite 63

⁵Größe "Instandhaltungsstrategien für einfache und komplexe Systeme mit Berücksichtigung periodischer Kontrollen" Dissertation Zittau 1976

$$0 = -\frac{CKO}{TKO^2} + TH(CMO - CBO)(A - 1)\frac{TKO^{A-2}}{b_{Hilf}^A} \quad (7.26)$$

$$TKO \neq 0 \text{ Multiplikation zulässig!} \quad (7.27)$$

$$0 = -CKO + TH(CMO - CBO)(A - 1)\frac{TKO^A}{b_{Hilf}^A} \quad (7.28)$$

$$\left(\frac{TKO}{b_{Hilf}}\right)^A = \frac{CKO}{(A - 1) \cdot TH \cdot (CMO - CBO)} \quad (7.29)$$

$$\frac{TKO}{b_{Hilf}} = \sqrt[A]{\frac{CKO}{(A - 1) \cdot TH \cdot (CMO - CBO)}} \quad (7.30)$$

$$TKO = b_{Hilf} \cdot \sqrt[A]{\frac{CKO}{(A - 1) \cdot TH \cdot (CMO - CBO)}} \quad (7.31)$$

Die Inspektion wäre also empfehlenswert, sobald die integrierte Ausfallrate $\Lambda(t)$ die A -te Wurzel des Verhältnisses von zusätzlichen Instandhaltungskosten zu Einsparungen durch die Instandhaltung (bei einer vorliegenden Schädigung) erreicht.

Die TKO ist bei Beckmann verbindlich für die Bildung der Abnutzungsbereiche. Im Rahmen der genetischen Algorithmen wird sie für den Startwert der Wunscheinteilung herangezogen, wobei der Startwert um bis zu 25% zufällig abweichen kann. Das experimentelle Verschieben der Wunscheinteilung, weg von der TKO, ist insofern sinnvoll, als es unter Umständen günstiger ist, bestimmte Abnutzungseinheiten zusammen instandzuhalten. Dies findet im Rahmen der Optimierung statt.

7.3 Verfügbarkeitsprognose

Die Verfügbarkeitsprognose wird neben ihrer eigenständigen Nutzung dazu eingesetzt, das Verhalten komplexer Baugruppen zu prognostizieren, die in der Instandhaltungsplanung als eine Abnutzungseinheit angesehen werden. Thematisch ist die Verfügbarkeitsprognose in der Nähe der Instandhaltungsplanung anzusiedeln. Dies äußert sich unter anderem darin, dass die Eingangsdaten in beiden Fällen formal ähnliche Kenngrößen (z.B.: Parameter von Verteilungsfunktionen) umfassen, nur mit einem anderen Detaillierungsgrad. Der wesentliche Unterschied ist die Zielsetzung. Während bei der Verfügbarkeitsprognose das Ziel in einer möglichst genauen Simulation des zukünftigen Verhaltens eines bestehenden Systems besteht, ist das Ziel der

Instandhaltungsoptimierung eine Verbesserung dieses Systems, oder zumindest seiner Wirtschaftlichkeit.

Verfügbarkeitsmodell

Das hier eingesetzte Verfügbarkeitsmodell verwendet zur Prognose der Zeit- und Arbeitsverfügbarkeit die sogenannten Monte-Carlo-Simulationen (siehe Kapitel 6.3). Das heißt, statt die Wahrscheinlichkeitsfunktionen der einzelnen Komponenten umständlich analytisch zusammenzufassen, werden, basierend auf den einzelnen Komponenten, deren Verhaltensweise für mehrere Durchläufe der Beobachtungszeit simuliert. Aus den Verhaltensweisen der Komponenten lässt sich relativ einfach das Verhalten des Gesamtsystems ableiten. Dieses wird dann über alle Simulationen gemittelt und als Ergebnis ausgegeben.

Bei dieser Implementation der Monte-Carlo-Simulationen basierend auf [Men03] wird während der Initialisierung die Modellstruktur erfasst. Anschließend werden vorab die unmittelbaren Folgen des Ausfalls genau einer Komponente für alle Komponenten mit Ausfallverhalten ermittelt. Diese im Vorfeld erzeugten Daten werden später zur Abhandlung (ohne weitere Berechnungen) von Situationen mit nur einem Ausfall verwendet. Bei der eigentlichen Simulation werden, wie es bei der Monte-Carlo-Simulation üblich ist, Ausfallzeiten über die Umkehrfunktion der Ausfallrate erzeugt. Beim Ablauf der einzelnen Simulationen wird nicht eine kontinuierliche Zeitachse abgearbeitet, sondern es wird immer zum nächsten Zeitpunkt, an dem ein Ereignis auftritt, gesprungen. Dies spart Rechenzeit. Liegt nur ein einziger Ausfall vor, so kann auf die im voraus berechneten Ausfallfolgen dieser Komponente zurückgegriffen werden, ansonsten müssen die Folgen des Ausfalls während der laufenden Simulation berechnet werden. Anschließend wird eine Reparaturzeit bestimmt, die ebenfalls in die Liste der anzuspringenden Zeitpunkte gehört. Sobald der nächste Ereigniszeitpunkt größer als die Simulationsdauer wäre, wird der Durchlauf beendet und ausgewertet. Die Monte-Carlo-Simulation liefert als Ergebnis des jeweiligen Durchlaufs zum einen das Ergebnis der Simulation und zum anderen den Mittelwert der bisherigen Ergebnisse. An dem Verlauf des Mittelwertes über der Zeit lässt sich erkennen, ob die Anzahl der Simulationen ausreicht, um einen stabilen Mittelwert zu bilden. Dieser Mittelwert ist nach Abschluss aller Monte-Carlo-Simulationen gleichzeitig das Endergebnis.

7.4 Speicherarten

Der Begriff des Speichers ist im Rahmen dieser Arbeit sehr allgemein gefasst und wie folgt zu definieren: "Eine Menge von etwas wird eingebracht, um später entnommen zu werden." Hierbei kann es sich um einen Massenspeicher handeln, wie z.B. einen Kohlebunker. Es ist jedoch auch eine Speicherung von Energie, wie z.B. in der Rotation eines schwingungsmassebehafteten Turbine-Generator-Satzes denkbar.

Auf Grund des hohen Abstraktionsgrades der Speicherbetrachtung in dieser Arbeit ist es möglich, das Verhalten eines Massenspeichers ohne weiteres auf einen Energiespeicher zu übertragen. Im Folgenden werden daher die Eigenschaften eines Speichers exemplarisch an einem Massenspeicher aufgezeigt, ohne näher auf Energiespeicher einzugehen.

Die Speicherung von Daten wird in dieser Arbeit nicht betrachtet, da Daten nicht physisch vorhanden sind. Bei der Datenspeicherung handelt es sich vielmehr um einen Kopiervorgang. Dabei werden die Daten aus dem Speicher abgerufen und sie sind danach immer noch im Speicher.

Damit sind die Definitionen für einen Speicher im Sinne dieser Arbeit gegeben und sein grundsätzliches Verhalten beschrieben.

Eigenschaften eines Speichers

Ein Massenspeicher mit dem Füllstand m_{ist} lässt sich zunächst einfach über die Integrale von Zuflüssen m_{zu} und Abflüssen m_{ab} beschreiben, siehe 7.32.

$$m_{ist} = \int_0^t m_{zu} dt - \int_0^t m_{ab} + m_{t0} dt \quad (7.32)$$

Dabei gelten noch folgende Nebenbedingungen:

1. Nicht-negativer Inhalt

Es ist nicht möglich Masse aus einem Speicher zu entnehmen, der keine Masse enthält.

2. Maximales Speichervolumen

Der Speicher ist in seinem Fassungsvermögen $m_{ist,max}$ begrenzt. Demzufolge kann ohne eine entsprechende Masseentnahme das Integral über den Massezufluss nicht beliebig groß werden. Es müssen in der Regel Überdruckventile oder vergleichbare Notabflüsse für den Massenstrom vorgesehen werden.

3. Füllstand zu Beginn

Der Füllstand zum Zeitpunkt $t=0$ wirkt sich direkt auf die ersten Kontakte mit den eben genannten Begrenzungen aus. Angenommen, der Zulauf sei bei fehlender Entnahme konstant, so bestimmt der Anfangszustand, wie schnell der Speicher in die Begrenzung fährt.

Insgesamt ergibt sich für die Nebenbedingungen eine der folgenden mathematischen Formulierungen:

- Bis das erste Mal eine Begrenzung erreicht wurde:

$$0 < \int_0^t m_{zu} dt - \int_0^t m_{ab} dt + m_{t0} < m_{ist,max} \quad \forall t \quad (7.33)$$

- Wenn der Speicher zum Zeitpunkt t_{leer} leer war und seit dem keine Begrenzung erreicht wurde:

$$0 < \int_{t_{leer}}^t m_{zu} dt - \int_{t_{leer}}^t m_{ab} dt < m_{ist,max} \quad \forall t \geq t_{leer} \quad (7.34)$$

- Wenn der Speicher zum Zeitpunkt t_{voll} bis zum Maximum gefüllt war und seit dem keine Begrenzung erreicht wurde:

$$0 < \int_{t_{voll}}^t m_{zu} dt - \int_{t_{voll}}^t m_{ab} dt + m_{ist,max} < m_{ist,max} \quad \forall t \geq t_{voll} \quad (7.35)$$

7.5 Ansätze zur Speichermodellierung

Integration der Zu- und Abflüsse

Eine der einfachsten Betrachtungsweisen für einen Speicher als Anlagenkomponente ist die Modellierung als Totzeit T . Ist der Speicher maximal gefüllt und ein vorgelagerter Anlagenteil fällt aus, wobei die Speicherzufuhr unterbrochen wird, so versorgt der Speicher die nachgelagerten Anlagenteile bis nach Ablauf der Totzeit T das Integral

$$\int_{t_{Ausfall}}^t m_{ab} dt \text{ den Wert } m_{ist,max} - m_{ist,min}$$

erreicht und der Speicher nicht mehr ausreichend gefüllt ist, um die nachfolgenden Anlagenteile zu versorgen.

Diese Modellierung hat den Nachteil, dass die Totzeit in Wahrheit nicht vom Maximalfüllstand abhängt, sondern von dem tatsächlichen, momentanen Füllstand. Außerdem sind die Aufladephasen häufig nicht durch eine Verzögerung beim Wiederaufstart, sondern durch einen erhöhten Aufladestrom gekennzeichnet. Des Weiteren kann der Füllstand des Speichers während des Ausfalls durchaus unter $m_{ist,min}$ fallen. Dies führt zu einer längeren Aufladephase.

Auf Grund der Abhängigkeit vom Füllstand ist eine Einbeziehung dieses Zustandes in die Speichermodellierung unumgänglich.

Einsatz eines Markov-Graphen

Einer der interessantesten Ansätze zur Modellierung des Speicherverhaltens ist der Markov-Graph (siehe Abschnitt 6.2.3) zur kombinierten Darstellung von Füllstand und Füllstandsänderung, den Surkow in [Sur99] verwendet. Die Zustände bilden in diesem Graphen alle möglichen Kombinationen der Quantisierungsstufen von Füllstand und Füllstandsänderung ab. Auf diese Weise wird ein Trend im Zustand mit ausgedrückt. Natürlich ergibt sich so eine wesentlich größere Menge an Zuständen, was einen Anstieg des Rechenaufwandes bedeutet. Surkow nutzt diese Erhöhung jedoch zur Verbesserung seiner adaptiven Füllstandsregelung. Genau hier liegen jedoch die Unterschiede zwischen dem Anwendungsgebiet Surkows und dem dieser Arbeit:

- Die fehlende Prognose für die konkrete zukünftige Realisierung der Zufallsvariablen, sprich der Ausfallzeitpunkte bei konventionellen Kraftwerken.
- Die Beschränkung der Speichermodellierung auf einen Frequenzbereich, was einer einzigen MTTF entspricht, ist bei komplexeren Anlagen nicht haltbar.

Fehlende Prognose

In [Sur99] wurden Windprognosen des Wetterdienstes eingesetzt, um eine effiziente Speichernutzung für eine Wind-Biogas-Hybrid-Anlage zu erreichen. Da bei einem Kohle-Kraftwerk ein sich im Vorfeld ankündigender Ausfall im allgemeinen durch rechtzeitige Wartungs- und Instandhaltungsarbeiten vermieden wird, bzw. zu einem geplanten Stillstand führt, stehen keine ähnlichen

Prognosewerte zum Ausfallverhalten (Windflauten / Stürme) zur Verfügung. Somit sind keine systematischen dynamischen Aspekte bei der Füllstandsregelung zu berücksichtigen. An dieser Stelle vereinfacht sich somit die Problematik gegenüber Surkow.

Es verbleibt dafür der zufallsbedingte Ausfall.

Beschränkung auf einen Frequenzbereich

Ein Markov-Graph ist ein zeitdiskretes System, welches die Übergangswahrscheinlichkeiten vom Zeitpunkt t zum Zeitpunkt $t + T$ darstellt, wobei T die (einmalig frei wählbare) Abtastzeit ist. Gemäß dem Abtasttheorem lassen sich mit einer solchen Abtastrate nur Vorgänge mit einer Periodendauer größer $2T$ darstellen. Da der Markov-Graph zusätzlich nur ein begrenztes Gedächtnis besitzt (momentaner Füllstand und momentane Füllstandsänderung = Ist-Wert und ein Vergangenheitswert) kann er auch keine Periodendauern oberhalb von $2T$ darstellen.

Markov-Graphen 1. Ordnung stellen die Übergangswahrscheinlichkeiten nur in Abhängigkeit des aktuellen Zustandes, ohne Betrachtung von weiter zurückliegenden Zuständen dar. Da alle Frequenzen mit einer Periodendauer größer $2T$ erst mit Hilfe von weiteren Vergangenheitswerten dargestellt werden können, ist es nicht möglich Prozesse mit einer Periodendauer größer $2T$ mit einem Markov-Graphen darzustellen. Somit lassen sich mit einem Markov-Graphen nur Schwingungen mit einer Periodendauer in der Umgebung von $2T$ und stationäre Gleichanteile erfassen. Genau genommen stellt der Graph sogar nur Schwingungen mit einer Periodendauer von exakt $2T$ dar. Aber da es sich um eine stochastische Darstellung mit Übergangswahrscheinlichkeiten handelt kann es zu einem Sprung in der Schwingung kommen, der bei dieser niedrigen Abtastrate zu einer Frequenzverschiebung führt. Daher wird das Endergebnis in der Umgebung von $2T$ liegen.

Laut Surkow spielen für seine Betrachtungen nur Windflauten, die in einem bestimmten Frequenzbereich liegen eine Rolle. Damit ist für seine Arbeit die Einschränkung auf einen Frequenzbereich akzeptabel.

Die Bedeutung des festgelegten Frequenzbereichs für die Anwendung auf eine Kohle-Kraftwerksanlage ist hingegen nicht zu vernachlässigen, da in diesem Fall jede interessante MTTF und MTTR einem relevanten Frequenzbereich entspricht. Somit könnte mit einem Markov-Graphen nur das stationäre Ausfallverhalten der Komponenten einer Kraftwerksanlage modelliert werden, was einer Exponentialverteilung der Ausfall- und Reparaturzeiten ent-

spricht. Zusätzlich kann durch die Ableitungen, die einen zusätzlichen Freiheitsgrad darstellen, noch eine bestimmte Störfrequenz modelliert werden. Die Verwendung einer anderen Ausfallverteilung, die die typische Badewannenkurve besser annähert, ist nicht möglich. Eine Erweiterung um zusätzliche Freiheitsgrade, also mehr Ableitungen oder Vergangenheitswerte, ist mit einer Verdoppelung der Modellgröße je Freiheitsgrad verbunden.

Vergleich der Ansätze

Der Markov-Ansatz wurde von Surkow [Sur99] für seine Arbeit gewählt, weil er sich davon Vorteile für eine realistische Modellierung des Füllstands bei Windflauten im Bereich der dominanten Frequenz versprach. Diese setzte er für eine auf Windprognosewerten basierende optimale Füllstandsregelung der Biogastanks ein.

Bei einem konventionellen Kohle-Kraftwerk liegen keine Prognosewerte über die Störungen im Zuflussbereich des Speichers vor. Somit ändert sich der für die Anlage optimale Füllstand nicht. Außerdem werden im stationären Betrieb, der in dieser Arbeit betrachtet wird, keine dynamischen, sondern stationäre Füllstandsregelungen verwendet. Eine dominante Frequenz gibt es auf Grund der vielen verschiedenen Zeitkonstanten im Ausfallverhalten der unterschiedlichen Komponenten auch nicht. Die Möglichkeit andere Verteilungsfunktionen einzusetzen, wie z.B. die Weibull-Verteilung, wäre sinnvoll.

Somit hat obiger Ansatz aus [Sur99] für die Anwendung auf ein konventionelles Kraftwerk im stationären Arbeitspunkt keinerlei Vorteile gegenüber der Integrationsmethode, bringt jedoch einen stark erhöhten Rechenaufwand mit sich.

7.6 Implementation des Speichers

Integration über die Ein- und Ausgangsgrößen

Wie bereits erwähnt, ist der Speicher mathematisch betrachtet eine Integration mit Nebenbedingungen. Zu Beginn der Simulation muss der Anfangsfüllstand m_{t_0} in die Initialisierung mit einbezogen werden. Anschließend kann der Füllstand des Speichers über eine einfache Integration über die Ein- und Ausgangsgrößen verfolgt werden. Dabei muss lediglich auf die Einhaltung der Randbedingungen "Speicher leer" und "Speicherüberlauf" geachtet wer-

den, die Sonderfälle darstellen. Tritt einer der beiden Sonderfälle ein, so wird die Integration neu gestartet, mit einem neuen verschobenen Zeitindex t' , sowie mit einem neuen Anfangsfüllstand $m_{t'_0}$. Daraus ergibt sich das bereits in den Gleichungen 7.32 bis 7.35 dargestellte Modell.

Speicherverluste

Bei einem realen Speicher müssen zusätzlich eventuell noch Speicherverluste berücksichtigt werden. Hierbei können zwei Verlustgruppen unterschieden werden:

1. *Verluste die beim Aufladen und Entladen entstehen:*

Hierbei handelt es sich meist um systematische Verluste. Diese sind in der Regel von der Größe der Zu-, bzw. Abflüsse abhängig. Sie treten vor allem bei Energiespeichern auf, da bei den heutigen Energiespeicherungsmethoden beim Ein- und Ausspeichern immer ein (systematischer) Verlust in Form von Abwärme auftritt.

2. *Verluste die während der Speicherung auftreten:*

Diese können bei Flüssigkeiten durch eventuelle Leckagen und bei Feststoffen durch Ablagerungen an der Speicherwand zustande kommen. Sie sind füllstandsabhängig.

Die Speicherverluste des ersten Typs können mit den Zu- und Abflüssen am Speicher verrechnet werden. Füllstandsabhängige Verluste sind etwas komplizierter und werden daher später in Abschnitt 7.8 gesondert betrachtet.

Die Gleichungen 7.32 bis 7.35 lassen sich nun, wie eingangs erwähnt, ohne Schwierigkeit auf die anderen in dieser Arbeit betrachteten Speicherarten übertragen.

Ein Problem hierbei ist die Füllstandsregelung des Speichers. Neben einer möglichen Beeinflussung von Komponenten im Zuflussbereich des Speichers, die im Folgenden als vernachlässigbar angenommen wird, ist der Füllstand des Speichers selbst massiv von dessen Regelung beeinflusst. Natürlich gibt es Füllstandsregelungen, die den Füllstand möglichst schnell auf ein Sollniveau fahren und dort halten. Es werden aber auch sehr viele Zweipunkt-Regler eingesetzt, die den Füllstand zwischen zwei Niveaus oszillieren lassen.

Zweipunkt-Regler sind ein weit verbreiteter Ansatz zur Füllstandsregelung. Das Regelprinzip ist denkbar einfach: Wenn der Füllstand unter die untere Regelschwelle fällt wird der Massezufluss eingeschaltet, steigt er über

die obere Regelschwelle wird der Zufluss abgeschaltet. Dies führt zu einem Oszillieren des Füllstands zwischen den Schwellwerten.

7.7 Füllstandsregelung

Realer Fall

1. Unabhängig von der Art der Füllstandsmodellierung ist eine unterlagerte Regelung des Füllstands erforderlich, da der Speicherfüllstand sonst wie in [Sur99] beschrieben wegdriftet.
2. Inwieweit diese Regelung einen deutlichen Einfluss auf die Verfügbarkeit der vorgelagerten Komponenten hat, hängt von der Größe des Regeleingriffs ab. Wenn sich beim Befüllen des Speichers beispielsweise der Durchfluss durch die vorgelagerten Komponenten verdoppeln würde, so sind Veränderungen der Komponentenparameter vorgelagerter Anlagenteile möglich.
3. Die Bestimmung des Sollfüllstands ist ein Optimierungsproblem in Abhängigkeit der Kosten eines Speicherleer-, bzw. Speicherüberlaufs, gegebenenfalls unter Einbeziehung der Kosten für das Speichervolumen.
4. Eines der häufigsten, da robustesten Regelungsprinzipien in der Kraftwerkstechnik ist der Zweipunktregler mit Hysterese. Hierbei werden ein oberer und ein unterer Grenzwert gesetzt, die beim Erreichen ein Umschwenken der Füllstandsänderung bedeuten. Somit oszilliert der Füllstand im Normalbetrieb zwischen diesen Grenzwerten.

Vereinfachungen

1. *Notwendigkeit der Füllstandsregelung*
Wie bereits angeführt, ist eine unterlagerte Füllstandsregelung unumgänglich. Dies bedeutet jedoch nicht, dass der Füllstand über die Zeit permanent mitberechnet werden muss. Für eine grobe Einteilung in "leer" und "nicht leer" reicht es aus, zu dem Zeitpunkt an dem der

Speicherzufluss ausfällt, in der Lage zu sein, die Füllstandsänderung rückwirkend zu berechnen. Hierbei ist es sinnvoll die Zeit, die dieser Füllstand den Betrieb der nachfolgenden Komponenten sichert, mitzubestimmen. Erst bei der Rückkehr zum Normalbetrieb muss der Füllstand dann erneut berechnet werden.

2. *Einfluss auf die Verfügbarkeit der vorgelagerten Komponenten*

Da eine solche dynamische Rückwirkung in einem stationären Modell nicht zu berücksichtigen ist, wird sie im folgenden entweder vernachlässigt oder durch eine permanente zusätzliche Belastung angenähert. Letzteres führt zu einer "Worst-Case"-Abschätzung.

3. *Auslegung des Speichers*

Die Auslegung des Speichers ist nicht direkt Gegenstand dieser Simulation. Sie kann lediglich zur experimentellen Überprüfung der Auslegung herangezogen werden.

4. *Zweipunktregler*

Es ist prinzipiell möglich, den Füllstand des Zweipunktreglers als oszillierende Größe zu modellieren. Jedoch würden sich dabei kleine Ungenauigkeiten aufsummieren, wie beispielsweise eine vernachlässigte Hysterese des Reglers. Somit würde das Modell in der Simulation sich immer weiter von dem realen Anlagenverhalten entfernen. Um Rechenaufwand einzusparen, wurde daher ein anderer Weg gewählt. Falls der Speicher leer ist, benötigt er, wie ein auf einen konstanten Füllstand geregelter Speicher, eine Phase, in der der Füllstand kontinuierlich steigt. Diese hält an bis er die untere Grenze erreicht. Danach wird angenommen, dass der Füllstand auf einen konstanten Wert eingeregelt wird, der zufällig zwischen den Grenzwerten gewählt wird. Resultierend wird also ein neuer Maximal-Füllstand für den momentanen Auffüllvorgang bestimmt und die Speicherregelung versucht ihn, durch Integration der Zuflüsse, zu erreichen.

7.8 Füllstandsabhängige Verluste

Wie bereits in Abschnitt 7.4 erwähnt, ist die Einbeziehung füllstandsabhängiger Verluste f_V [%/s] komplizierter. Unter Beibehaltung der Begrenzungen

aus den Nebenbedingungen, siehe Gleichung 7.36, ergibt sich für den eigentlichen Füllstand eine Differential-Gleichung:

$$m_{ist,max} \geq m_{ist} \geq 0 \quad (7.36)$$

$$m_{ist} = \int_0^t (m_{zu} - m_{ab}) dt - f_V \int_0^t m_{ist}(\tau) d\tau + m_{ist,0} \quad (7.37)$$

Mit Hilfe von Gleichung 7.37 lässt sich nun eine rekursive Differenzgleichung für die Berechnung des Füllstands erstellen. Dies hat den Nachteil, dass es nicht möglich ist, wie bisher, von einem interessierenden Zeitpunkt zum nächsten zu springen und den Füllstand nachträglich zu aktualisieren. Der Hauptgrund hierfür ist die aus dieser Gleichung nicht ablesbare Ausfallzeit, verbunden mit der Tatsache, dass eine Rekursion erforderlich ist, die dem bisherigen Programmablauf ebenfalls im Wege stünde. Eine geschlossene, nicht rekursive Darstellungsform als Funktion der Zeit ist gesucht. Der Ansatz 7.38 führt zu der Gleichung 7.39.

$$m_{ist}(t) = c_1 e^{-c_2 t} + c_3 \quad (7.38)$$

$$m_{ist}(t) = \left(m_{ist,0} - \frac{m_{zu} - m_{ab}}{f_V} \right) e^{-f_V t} + \frac{m_{zu} - m_{ab}}{f_V} \quad (7.39)$$

Aus Gleichung 7.39 lässt sich neben einer Umkehrfunktion $t(m_{ist})$ auch ein Grenzwert $m(t \rightarrow +\infty)$ bestimmen:

$$t(m_{ist}) = \frac{-1}{f_V} \ln \left(\frac{m_{ist}(t) - \frac{m_{zu} - m_{ab}}{f_V}}{m_{ist,0} - \frac{m_{zu} - m_{ab}}{f_V}} \right) \quad (7.40)$$

$$m_{ist}(t \rightarrow +\infty) = \frac{m_{zu} - m_{ab}}{f_V} \quad (7.41)$$

Der Grenzwert entsteht hierbei dadurch, dass die füllstandsabhängigen Speicherverluste bei einem überdimensionierten Speicher sich mit der Zeit immer weiter an die Zuflüsse annähern, bis sich ein Gleichgewicht einstellt. Folglich ist ein Speicher / Puffer mit einer Maximalgröße, die größer als dieser Grenzwert ist, nicht sinnvoll, da er nie ausgelastet werden kann.

Zur Validierung der Gleichung 7.40 wird eine Beispielrechnung für einen Speicher durchgeführt (siehe Bild 7.5). Hierbei ist deutlich zu sehen, wie mit Hilfe der Umkehrfunktion von einem interessanten Punkt zum nächsten gesprungen werden kann. Der Speicher ist auf eins normiert, und wird über

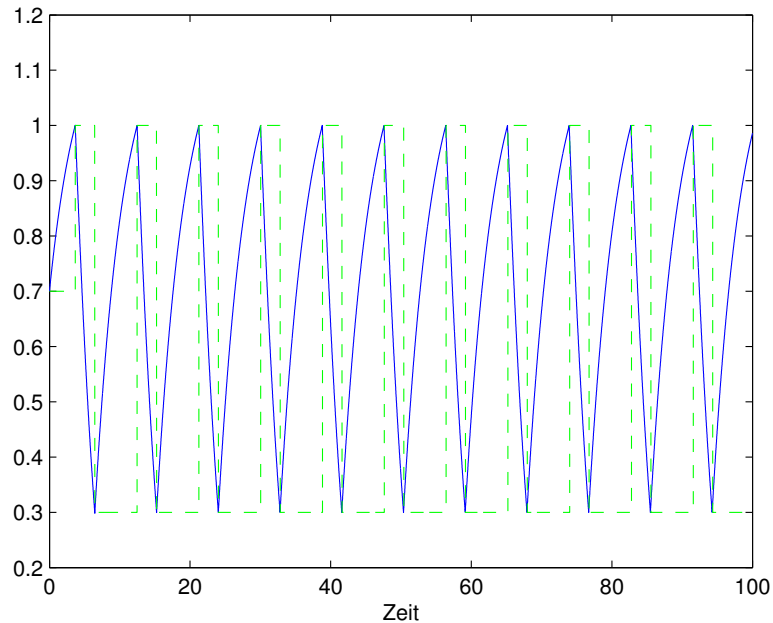


Abbildung 7.5: Vergleich der interessierenden Zeitpunkte (Regelgrenzen) für verlustbehaftete Speicher bei der rekursiven Berechnung (—) und der Berechnung über die Umkehrfunktion (- -)

einen Zweipunktregler zwischen 0,3 und 1 hin- und hergefahren. Während die rekursive Berechnungsmethode die gesamte Füllstandstrajektorie berechnen muss, um die Umschaltzeitpunkte des Zweipunktreglers zu bestimmen, kann mit der Umkehrfunktion direkt der nächste Umschaltzeitpunkt berechnet werden. Dies führt zu einer Rechteckfunktion (siehe Abb.7.5), was eine akzeptable Vereinfachung darstellt, da die Füllstände zwischen den interessierenden Zeitpunkten nicht bekannt sein müssen. In der Simulation ist gut zu erkennen, dass die Berechnung der Umschaltzeitpunkte über die Umkehrfunktion die gleichen Ergebnisse liefert, wie die umständliche rekursive Füllstandsberechnung.

Damit ist es möglich, die füllstandsabhängigen Verluste in das bestehende Modell zu integrieren. Lediglich für den Fall $f_V = 0$ (keine füllstandsabhängigen Verluste) ist eine Sonderbehandlung erforderlich, da bei der Füllstandsberechnung sonst eine Division von Null durch Null auftritt, die nicht definiert ist. Anstelle einer Grenzwertbetrachtung ist es hier einfach möglich

die Gleichungen für füllstandsunabhängige Speicherverluste anzuwenden, die bereits zu Beginn des Kapitels bestimmt wurden.

7.9 Ablauf der Monte-Carlo-Simulationen

Simulink als Umgebung

Die in dieser Arbeit verwendeten Monte-Carlo-Simulationen sind unter Matlab-Simulink⁶ implementiert. Matlab ist eine mathematisch orientierte Programmiersprache, die auf die Verwendung von Vektoren optimiert ist. Matlab bietet ein umfangreiches Basispaket an mathematischen Standardfunktionen, darunter einfache Funktionen wie die Sinus-, Fakultäts- oder Gammafunktion, aber auch komplexere wie automatische Lösungsverfahren für Gleichungssysteme. Über Toolboxen lässt sich der Funktionsumfang erweitern, zum Beispiel um Simulink, eine graphisch Oberfläche, unter der Blockschaltbilder erstellt werden können, die sich mit Funktionen hinterlegen lassen. Während der Simulation werden dann in jedem Zeitschritt Informationen von den Ausgängen über die Verknüpfungen der Blöcke an die Eingänge der Folgeblöcke weitergegeben, wo sie dann als Eingangsgrößen der dort hinterlegten Funktion dienen. Auch für die Monte-Carlo-Simulationen existiert in Matlab Simulink eine vorgefertigte Funktion. Bei der Anwendung der Monte-Carlo-Methode auf die Verfügbarkeit ergeben sich jedoch sehr spezielle Synergieeffekte, die bei einer Standardfunktion für allgemeine Modelle nicht berücksichtigt werden. Aus diesem Grunde wurde am Lehrstuhl Kraftwerkstechnik ein eigener Ansatz zur aufwandsreduzierten Monte-Carlo-Methode entwickelt, der im Rahmen dieser Arbeit erweitert wurde.

7.9.1 Aufwandsreduzierte Monte-Carlo-Methode

Die Monte-Carlo-Methode basiert allgemein darauf, mehrere Simulationen durchzuführen, die sich nur in der Realisierung der Zufallswerte unterscheiden. Über diese Werte wird dann ein Mittelwert und eventuell noch eine Varianz gebildet, die dann auch schon das eigentliche Ergebnis widerspiegeln.

⁶Matlab und Simulink sind eingetragene Warenzeichen von "The MathWorks Inc." seit 1994. Die Software wird kontinuierlich weiterentwickelt, im Regelfall erscheinen 2 Versionen pro Jahr.

Der hier verwendete Ansatz zur Aufwandsreduktion (Rechenzeiterparnis) nutzt die Tatsache aus, dass das Verhalten der einzelnen Komponenten in Verfügbarkeitsbetrachtungen binär ist. Es gibt demzufolge einen Zeitpunkt, an dem die Komponente von einem Zustand in den anderen springt. Vor und nach dem Zustandswechsel ist ihr Zustand jedoch konstant. Es gilt also nur die Auswirkungen der Sprünge zu berechnen und bis zum nächsten Sprung zu warten. Hierbei gibt es zwei Haupteinsparpotentiale:

- Zum einen kommt es häufig vor, dass nur eine Komponente in der Anlage ausfällt, ohne dass Wechselwirkungen mit anderen Ausfällen auftreten. Für diese Fälle werden einmal zu Beginn der Simulationen für jede Komponente die minimalen Ausfallfolgen bestimmt. Auf diese Weise muss bei den einfachen Standardsituationen nicht jedesmal von neuem die Wirkung eines Ausfalls dieser Komponente bestimmt werden. Mehrfache Ausfälle bieten für diese Betrachtung leider zu viele Variationsmöglichkeiten.
- Zum anderen spielt der Zeitpunkt, zu dem die Realisierungen der Zufallsgrößen bestimmt werden, keine nennenswerte Rolle. Es ist ohne weiteres möglich, die Zufallszeitpunkte der Ausfälle im Vorfeld zu bestimmen. Dies wiederum ermöglicht es, entlang der Zeitachse von einem zum nächsten Zeitpunkt zu springen, ohne die vielen Zeitschritte der kontinuierlichen Zeitachse mitzumachen. Davon ausgehend, dass es für die Verfügbarkeit notwendig wäre, mindestens eine Auflösung von einer Stunde zu wählen und die mittlere Zeit zwischen zwei Ereignissen deutlich größer 10 Stunden ist, wären über 90% der Zeitschritte der Simulationen überflüssiger Rechenaufwand.

Veranschaulicht wird diese Vorgehensweise in Abbildung 7.6:

Zum Zeitpunkt T_0 werden für alle Komponenten Ausfallzeiten T_A berechnet. Diese stellen die ersten Ereignisse dar, die auf dem Zeitstrahl angesprungen werden. Beim Ausfall zum Zeitpunkt T_A wird ein korrespondierender Reparaturzeitpunkt T_R erzeugt. Beim Reparaturzeitpunkt wird dann wiederum ein neuer Ausfallzeitpunkt erzeugt, usw.

Für das diskontinuierliche Springen auf der Zeitachse ist es erforderlich, neben der eigentlichen Simulink-Zeitachse, eine eigene Zeitachse für die Monte-Carlo-Simulationen einzuführen. Die Simulink-Zeit wird in den Simulationen wie folgt belegt:

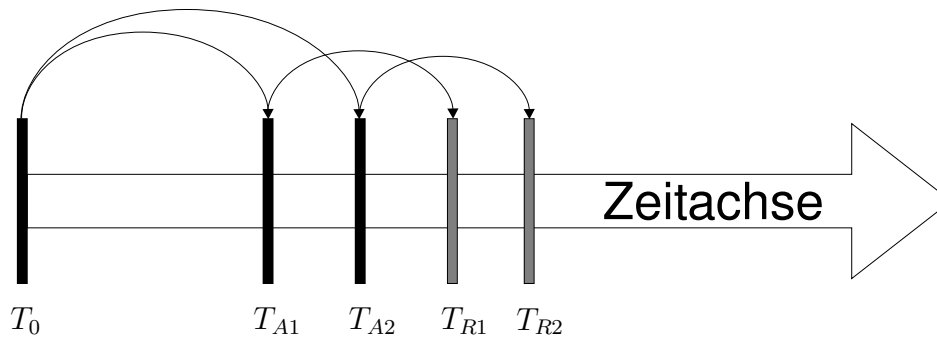


Abbildung 7.6: Funktionsweise der springenden Betrachtungszeit

- $t = -1$ Initialisierung
Die Simulink-Zeit ist -1 und die Blöcke des Blockschaltbildes werden initialisiert. Simulink vergibt mit einer nicht dokumentierten, also für den Benutzer zufälligen, Systematik eindeutige Block-ID-Nummern. Diese werden für die Monte-Carlo-Methode eingelesen und über die Blockausgänge an die nachfolgenden Blöcke weitergegeben. Außerdem werden die stochastischen Parameter mit der Block-ID in einem globalen Variablenkonstrukt abgelegt.
- $t = 0$ Strukturerrfassung
Im Zeitschritt 0 werden die Eingänge eingelesen und ebenfalls in das globale Konstrukt eingetragen.
- $t = 1$ Start der Monte-Carlo-Simulationen
In diesem Zeitschritt sind alle Daten aus den Blöcken in die globale Datenstruktur eingegliedert und die Blöcke selbst sind irrelevant. Sobald der erste Block den Wechsel der Zeit von $t = 0$ auf $t = 1$ meldet, startet die Vorbereitung der eigentlichen Simulationen. Die restlichen Blöcke haben dann bei der Abarbeitung keine Funktion mehr.

Die Struktur des Blockschaltbildes wird analysiert. Hierzu existiert ein spezieller Ausgabeblock, der nicht Teil der betrachteten Anlage ist. Er dient dazu, den Bezugspunkt für die Verfügbarkeitsermittlung festzulegen. Sein Eingang hängt am Ausgang der betrachteten Komponente. Anschließend wird rekursiv ein Ausdruck aufgebaut, der die Abhängigkeit der Blöcke von ihren Vorgängern in der Schaltung, den Vorgängern der Vorgänger, usw. darstellt. Ein Block kann hierbei nicht von sich selbst abhängen (implizit über die Ausfallverteilungen berücksich-

tigt), da sonst Rückführungen zu einer Endlosschleife führen würden. Um dies zu überprüfen, wird eine Historie als Stapel aller auf dem aktuellen Weg bereits erreichten Blöcke angelegt. Wird eine Sackgasse erreicht, werden auf dem Weg zurück zur letzten Abzweigung die passierten Blöcke wieder gelöscht (oberstes Element löschen). Ist ein Block schon in der Historie enthalten, so wird er nicht mehr beachtet, da sonst eine Endlosschleife entsteht.

Es entsteht so ein einziger Ausdruck, der von den Eingangsblöcken, die keine Abhängigkeiten besitzen, bis zu dem Ausgabeblock alle für dessen Verfügbarkeit wesentlichen Blöcke enthält.

Es werden die oben erwähnten Einzelausfälle berechnet und in die global Datenstruktur eingetragen.

Die eigentlichen Monte-Carlo-Simulationen werden gestartet. In jeder einzelnen Simulation werden als allererstes die Ausfallzeitpunkte der Komponenten berechnet. Danach wird zum ersten Ereignis T_{A1} gesprungen und ein Reparaturzeitpunkt wird über eine Reparaturzeitverteilung erzeugt. Die Verfügbarkeit des Ausgabeblocks wird mit der ermittelten Formel bestimmt. Anschließend wird zum nächsten Ereignis weitergesprungen, bis die Betrachtungszeit erreicht ist. Danach startet die nächste Simulation. Während der Simulationen läuft eine Mittelwertbildung über die Simulationsdurchläufe parallel mit. Hier wird auch die Varianz des Mittelwertes ausgegeben. Es ist möglich, die Simulationen über einen extra dafür vorgesehenen Knopf vorzeitig zu beenden, wenn die Genauigkeit ausreicht.

7.9.2 Integration des Speichermodells in die aufwandsreduzierte Monte-Carlo-Methode

Die Möglichkeit, wie das Verhalten des Speichermodells für die Zukunft vorhergesagt werden kann, wurde in Abschnitt 7.6 bereits vorgestellt. Für die Integration des Speichers in die Simulationsumgebung waren drei wesentliche Änderungen erforderlich:

1. *Auftrennung der Netzwerkstruktur am Speicher*

Vorrangiger Zweck von Speichern im Verfügbarkeitsschaltbild ist die Aufrechterhaltung des Betriebes nachgelagerter Anlagenteile beim Ausfall der Speicherspeisung. Dadurch entsteht prinzipiell so etwas wie eine

Normaler Durch- und Abfluss
Ladezufluss im Normalbetrieb
Bei Zweipunktregelung untere Schranke
Maximaler Füllstand
Mindestfüllstand
Prozentualer Speicherverlust (Verdunstung, Leckage)
Anfangsfüllstand

Tabelle 7.3: Liste der voreingestellten Parameter

Totzeit in der Auswertefunktion, die die Verfügbarkeit des Ausgabeblocks bestimmt. Da die Logik der Auswertefunktion aus sich heraus nicht in der Lage ist Zeitverzögerungen zu berücksichtigen, ist es erforderlich, den Netzwerkgraphen am Speicher aufzutrennen. Dadurch entstehen im ersten Schritt aus einem Speicher zwei Speicherteilblöcke, von denen der eine den Eingang und der andere den Speicher selbst inklusive Ausgang darstellt. Es ist sogar möglich, dass das betrachtete System in zwei Teilsysteme zerfällt, wenn keine andere Verbindung besteht.

2. Einführung einer zusätzlichen Datenstruktur

Als Folge der Auftrennung der Speicherkomponente in der Auswertefunktion wird eine weitere Verknüpfungsebene benötigt, in der die Verbindungen zwischen Speichereingang und -ausgang hergestellt werden. Dafür wird im Arbeitsspeicher eine Relation angelegt, die besagt, welche Komponente den Speicher mit der Block-ID xy versorgt, die von Simulink automatisch generiert wurde. Außerdem werden neben den voreingestellten Parametern (siehe Tabelle 7.3) auch ein Zeitindex und eine binäre Variable "Zufluss da?" im Arbeitsspeicher angelegt. Der Zeitindex gibt dabei den Zeitpunkt der letzten Aktualisierung des Speicherfüllstands an. Zusammen mit der Information, ob der Zufluss in der Zwischenzeit vorhanden war, lässt sich hieraus, mit den in Abschnitt 7.6 beschriebenen Gleichungen, der aktuelle Füllstand nachträglich berechnen. Die Neuberechnung des Füllstands muss mindestens bei jeder Zustandsänderung des Zuflusses stattfinden. Weitere Neuberechnungen sind möglich, aber nicht zwingend erforderlich.

3. Manipulationen des Ereignishorizontes

Fällt nun eine Nicht-Speicher-Komponente aus, so wird nach der Berechnung der Ausfallfolgen überprüft, ob dies den Ausfall eines bisher vorhandenen Speicherzuflusses nach sich zieht. Ist das der Fall, wird der Füllstand aktualisiert und der Zeitpunkt des voraussichtlichen Leerlaufens des Speichers bestimmt.

Der damit verbundene Ausfallzeitpunkt des Speicherausgangs wird in die Ereignisliste eingetragen. Wird dieser Eintrag in der Liste der Ausfallzeitpunkte erreicht, fällt, zusätzlich zum bereits ausgefallenem Speichereingang, noch der restliche Speicherblock inklusive Speicherausgang aus. Wird der Zufluss jedoch wieder hergestellt, bevor der in der Liste eingetragene Zeitpunkt erreicht wird, so wird der Ausfallzeitpunkt gelöscht das heißt, auf einen Zeitpunkt jenseits der Betrachtungszeit gesetzt. Der Ausgang des Speichers fällt dann nicht aus.

Veranschaulicht wird die Integration des Speichers in die springende Zeitachse in Abbildung 7.7:

Zum Zeitpunkt T_0 werden für alle Komponenten mit Ausnahme der Speicher Ausfallzeiten T_A berechnet. Diese stellen die ersten Ereignisse dar, die auf dem Zeitstrahl angesprungen werden. Ist eine Komponente wesentlich für den Zufluss eines Speichers, wird bei ihrem Ausfall neben dem Reparaturzeitpunkt T_R auch ein Ausfallzeitpunkt für den Speicher T_{AS} erzeugt. Dieser gibt an, ab wann der Speicher die nachfolgenden Komponenten nicht mehr versorgen kann. Wird der Zufluss durch eine Reparatur zum Zeitpunkt T_R wiederhergestellt, wird auch der Speicher "repariert", das heißt, ein Teil des Zuflusses versorgt sofort die nachgelagerten Komponenten, während der Speicher sich langsam wieder auffüllt.

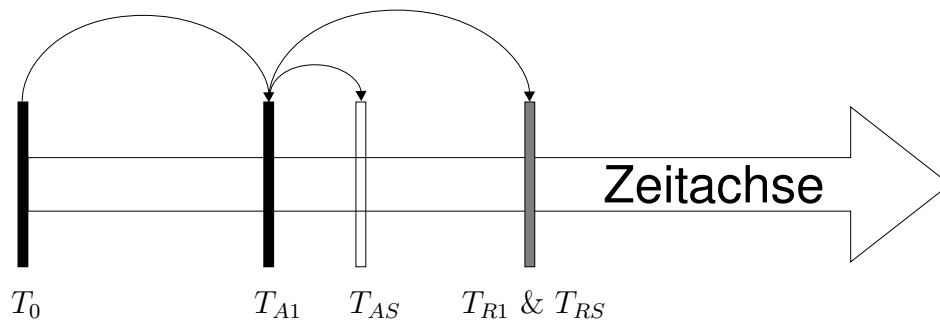


Abbildung 7.7: Springende Zeitachse mit Speicherelement

Kapitel 8

Anwendung

8.1 Optimierung mit angepassten Operatoren

Die Variante der genetischen Optimierung mit an das Problem angepassten Operatoren besitzt aus den in Abschnitt 7.1.1 erläuterten Gründen (starke Wechselwirkung der Parameter untereinander) keinen Crossover-Operator. Dieser ist für den Ablauf der Optimierung jedoch auch nicht zwingend notwendig. Zwingend erforderlich ist nur der Mutations-Operator, ohne den der Algorithmus nie über eine Rekombination der Startwerte hinauskommt.

Bei den Testrechnungen mit dieser Variante zeigte sich nicht nur, dass der Rechenaufwand erheblich höher ist, auch werden verstärkt solche Lösungen entwickelt, die keine praktische Anwendung haben, da sie sich auf lokale Ungenauigkeiten der Näherungsfunktionen fokussieren. Die Ergebnisse hatten augenscheinlich keinerlei Praxisbezug, da die Teilbarkeit der Perioden in unsinniger Weise nicht erfüllt wurde. So wurde zum Beispiel ein "1 / 6 / 7"- Jahresplan erstellt, obwohl die Kombination einer sechs- mit einer siebenjährigen Periode keinerlei praktische Relevanz hat. Diese Variante stellt augenscheinlich eine grobe Verletzung der Teilbarkeitsbedingung dar, was dazu führt, dass sie die möglichen Synergieeffekte nur unzureichend berücksichtigen kann. Bei einer genaueren Betrachtung zeigte sich, dass die Inhalte der Abnutzungsbereiche ebenfalls nicht sinnvoll waren.

Der Algorithmus bewegte sich auf der Suche nach einem Optimum immer weiter in Bereiche der schlechten Approximation durch die Näherungsfunktionen für die Gebrauchskosten hinein. Da er sich damit vom Gebiet der

plausiblen Lösungen entfernte, wurden bessere plausible Lösungen nicht gefunden.

8.2 Optimierung mit Interpretationsschritt

Als Resümee der ersten Erfahrungen mit der genetischen Optimierung zeigte sich, dass das Optimierungsproblem dazu tendierte, in zwei Teilaufgaben zu zerfallen, die Optimierung der Perioden und die Optimierung der Inhalte der zugehörigen Abnutzungsbereiche. Dies führt dazu, dass die Optimierung der Periodendauern noch damit beschäftigt ist, die Perioden zu verbessern, während die Inhalte bereits auf die bestehende Periodeneinteilung optimiert sind. Um diese kontraproduktive Kopplung aufzulösen, wurde ein Interpretationsschritt eingeführt (Abschnitt 7.1.2). In diesem Schritt werden die im Chromosom eingetragenen Parameter auf die Eingangsgrößen der Gebrauchsostenabschätzung umgerechnet. Eingangsgrößen für den Interpretationsschritt sind:

- Vektor mit den Periodendauern
- Den Komponenten zugeordnete Wunschinspektionsperioden
- Erneuerungsperioden der Komponenten
- Betrachtungszeit

Folgende Aufgaben werden in diesem Interpretationsschritt abgehandelt:

1. Entfernung von Perioden, die doppelt oder größer als die Betrachtungszeit sind.
2. Jede Komponente wird entsprechend ihrer Wunschinspektionsperiode der nächst größeren Periode zugerechnet.
3. Jede Komponente wird entsprechend ihrer Erneuerungsperiode der nächst größeren Periode zugerechnet.
4. Leere Perioden werden gelöscht.

Zurückgegeben werden vom Zwischenschritt folgende Parameter:

- Vektor mit den tatsächlichen Periodendauern

- Für jede Periode ein Vektor mit den Komponentenindizes der inspizierten Komponenten
- Für jede Periode ein Vektor mit den Komponentenindizes der erneuerten Komponenten

Diese Entkopplung führt dazu, dass Änderungen an den Wunschinspektionsperiodenlängen unter Umständen nach dem Interpretationsschritt keine Wirkung haben. Die an dieser Stelle verlorengangene Information betraf jedoch die Zuordnung von Abnutzungseinheiten zu vorläufigen Abnutzungsbereichen und war ursächlich an der Problematik der unterlagerten Optimierung auf vorläufige Perioden beteiligt.

Die Optimierung wurde auf einen niederredundanten braunkohlegefeuerten 1000 MW Beispielkraftwerksblock mit Rauchgasverschiebesystem (RVS) bei einer geplanten Betriebszeit von 40 Jahren angewandt. Die zu dem Modell gehörende Datenbasis wurde im Laufe der Arbeit einmal aktualisiert, wobei sich signifikante Unterschiede im Ergebnis einstellten. Hierauf wird später noch näher eingegangen.

Konvergenzverhalten

Für genetische Algorithmen als stochastisches Optimierungsverfahren lässt sich das Konvergenzverhalten nicht deterministisch, sondern nur als Wahrscheinlichkeit beschreiben. Durch das Beibehalten der besten bisher gefundenen Lösung lässt sich lediglich sicherstellen, dass der Algorithmus nicht divergiert. Davon abgesehen ist eine Konvergenz zum Optimum lediglich wahrscheinlich, aber nicht sicher.

Die allerersten Optimierungsdurchläufe wurden mit einer Populationsgröße von 4 000 Individuen (Instandhaltungspläne) über 4 000 Generationen (Iterationen) durchgeführt, deren Startwerte willkürlich gewählt wurden. In Abbildung 8.1 ist eine normierte Gebrauchskostenabschätzung über der Generationenanzahl aufgetragen. Der Verlauf der Kurve kann grob in zwei Bereiche unterteilt werden. Es gibt einen Anfangsbereich, in dem sich die Gebrauchskosten noch ungefähr in der Größenordnung der zufälligen Startwerte bewegen. Daneben gibt es einen Endbereich, in dem die Werte der Gebrauchskostenfunktionen deutlich niedriger sind, der Abfall bei weiteren Generationen jedoch eher flach. Bei einer Populationsgröße von 4 000 Individuen findet der sprunghafte Wechsel meist zwischen Generation 1 000 und 2 500 statt.

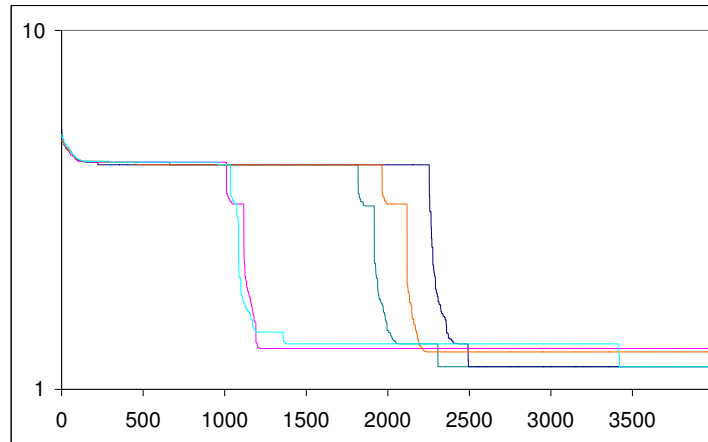


Abbildung 8.1: Optimierungsdurchläufe mit einer Populationsgröße von 4000 und 4000 Generationen mit der alten Datenbasis (Auf der x-Achse sind die Generationen aufgetragen, die y-Achse ist ein logarithmischer normierter Gebrauchskostenwert.)

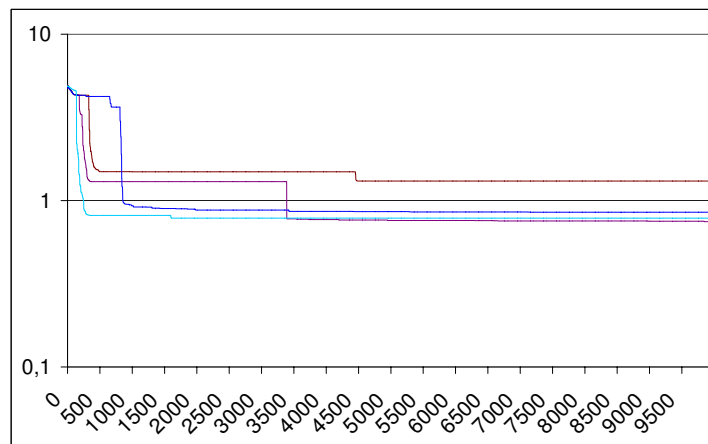


Abbildung 8.2: Optimierungsdurchläufe mit einer Populationsgröße von 10 000 und 10 000 Generationen mit der alten Datenbasis (Darstellung: normierte Gebrauchskosten über Generationen)

Die Optimierungsdurchläufe mit 4 000 Individuen dienen vorrangig einem Vergleichszweck. Das Verhalten der Optimierung bei geringer Variation der Optimierungsprobleme oder mit anderen Simulationsparametern vergleichen zu können. Auf diese Weise wird die Optimierungsmethode an sich noch einmal auf ihre Funktionsweise hin überprüft. Für die eigentliche Optimierung wurden 10 000 Generationen mit je 10 000 Individuen betrachtet, siehe Abbildung 8.2. Hierbei trat der charakteristische große Abfall der Gebrauchskosten früher auf. Ebenfalls gut zu erkennen ist, dass es nicht möglich ist, Konvergenz zum globalen Optimum sicherzustellen, da ein Optimierungsdurchlauf in einem Nebenoptimum hängen geblieben ist, das sich deutlich von den übrigen Ergebnissen abhebt. Der Optimierungsalgorithmus hat es trotz einer großen noch folgenden Anzahl an Generationen nicht geschafft, das Nebenminimum zu verlassen. Ansonsten lässt sich beobachten, dass der sprunghafte Wechsel zwischen Startbereich und Endbereich durch die größere Population deutlich früher stattfindet, nämlich in der Regel schon vor der tausendsten Generation.

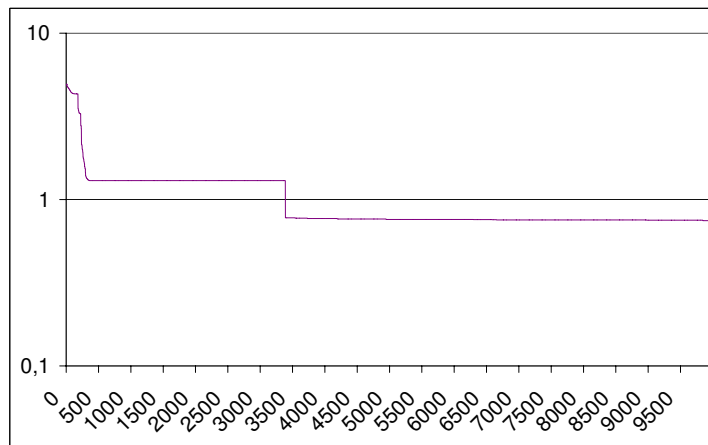


Abbildung 8.3: Bester Optimierungsdurchlauf mit einer Populationsgröße von 10 000 und 10 000 Generationen mit der alten Datenbasis (Darstellung: logarithmisch normierte Gebrauchskosten über Generationen)

Für die detaillierte Betrachtung wird nur die beste Lösung (Abb. 8.3) ausgewählt. Während in der Anfangsphase die Lösungen sich noch stetig ändern

Generationen (von bis)	Periodenlängen
274 - 3388	2 / 8 / 16 Jahre
3389 - 4191	1 / 2 / 8 Jahre
4192 - 9999	1 / 2 / 10 Jahre

Tabelle 8.1: Änderungen der optimalen Periodendauern im Verlauf der Optimierung

und ein Trend nicht abzusehen ist, so gibt es nach Generation 274 nur noch 2 Wechsel der Periodenlängen, wie in Tabelle 8.1 zu sehen ist. Interessant dabei ist unter anderem, wie sich trotz der Aufhebung der expliziten Teilbarkeitsforderung durch die Bewertung mit den erweiterten Gebrauchskostenfunktionen eine implizite Teilbarkeitsforderung einstellt. Ohne die Vorgabe, dass sinnvolle Ergebnisse die Teilbarkeitsregel erfüllen müssen, hat der Algorithmus Lösungen gesucht, bei denen dies der Fall ist.

In Tabelle 8.2 findet sich zu diesem "1 / 2 / 10"-Plan die Zuordnung der Abnutzungseinheiten zu den Abnutzungsbereichen, wie sie am Ende der Optimierung entworfen war.

Tabelle 8.2: Inhalte der Abnutzungsbereiche eines auf der alten Datenbasis entwickelten Instandhaltungsplanes

In allen Perioden enthalten
Nassentschlacker Frischluftgebläse Saugzug RVS-System HD-Reduzierventil Rotor-Drehvorrichtung ND-Umleitstationen Kühlwasserhauptpumpen Armaturen allgemein Pumpen allgemein
In den 2 und 10 Jahres-Perioden enthalten
Anlagen zentrale Leittechnik Generator Betriebserrregung

Tabelle 8.2: Inhalte der Abnutzungsbereiche eines auf der alten Datenbasis entwickelten Instandhaltungsplanes

Gebertechnik diverse
Nur in der 10 Jahres-Periode enthalten
kaltes ZÜ-Leitungssystem HD-Turbine und Ventile MD-Turbine und Ventile Gesamtlagerung MD-Armaturen Verdampfer Überhitzer diverse Abschnitte Zwischenüberhitzer
Risikoorientierte Instandhaltung (keine Inspektionen)
Generatorschalter Maschinentransformator Eigenbedarfstransformatoren Eco Rauchgas-Rücksaugung Brenner/Staubsystem Nachbrennrost Zündbrennersystem Luvo Elektrofilter Rauchgas-Leerzug Reingassystem Rauchgaswäsche Absorptionskreisläufe Gips-, Feinteilausschleusung Entgasungs- und Speisewasserbehälter Speisewasser-Leitungssystem E-Speisepumpen T-Speisepumpensystem Vorwärmung HD-Einspritzkühler MD-Einspritzkühler

Tabelle 8.2: Inhalte der Abnutzungsbereiche eines auf der alten Datenbasis entwickelten Instandhaltungsplanes

FD(Leitung,Schieber),HD-Absperrventil Heiße Schiene+ZÜ-Sicherheitsventil Anzapfleitungen HD Anzapfleitungen ND Hauptkondensat-Leitungen Hauptkondensat-Pumpen ND-Vorwärmung ND-Turbine Kondensationsanlage Stopfbuchs-/Evakuierungssystem Turbinenregelung Kühlwasserleitungssystem AggregatschlompC(Rest) HD-Armaturen "Fehlbedienung" (für die Kostenabschätzung erforderlich)
--

Die Einheiten des Dampferzeugers wurden nach der Optimierung, wegen der gesetzlichen Vorschriften, der Periode zugeordnet, die am nächsten an neun Jahren lag. Ansonsten wäre die Einheit des Dampferzeugers im risikoorientierten Instandhaltungsregime enthalten gewesen. Damit ist der "1 / 2 / 10"-Plan nur eine Anregung und kein Plan, der exakt umzusetzen wäre. Nach einer Erneuerung der Datenbasis für das Modell (Optimierungsdurchläufe in Abbildung 8.4) trat jedoch das Problem auf, dass keine der vorgesehenen Perioden in der Nähe der gesetzlichen Bestimmungen lag und der Dampferzeuger nach wie vor risikoorientiert instandgehalten würde.¹ Fast alle Optimierungsdurchläufe fanden als Optimum einen "1 / 2"-Jahresplan, lediglich einmal wurde ein etwas schlechter bewerteter Plan, der nur eine jährliche Inspektion vorsieht, gefunden. Bei all diesen Plänen lassen sich die gesetzlichen Vorgaben, wie bereits gesagt, nicht nachträglich berücksichtigen.

¹Die gesetzliche Vorgabe zur Inspektion des Dampferzeugers ist hierbei eher exemplarisch zu sehen, da gesetzliche Vorgaben nicht in der ursprünglichen Datenbasis enthalten waren. Diese mussten also nachträglich eingepflegt werden, wobei kein Anspruch auf Vollständigkeit erhoben wird.

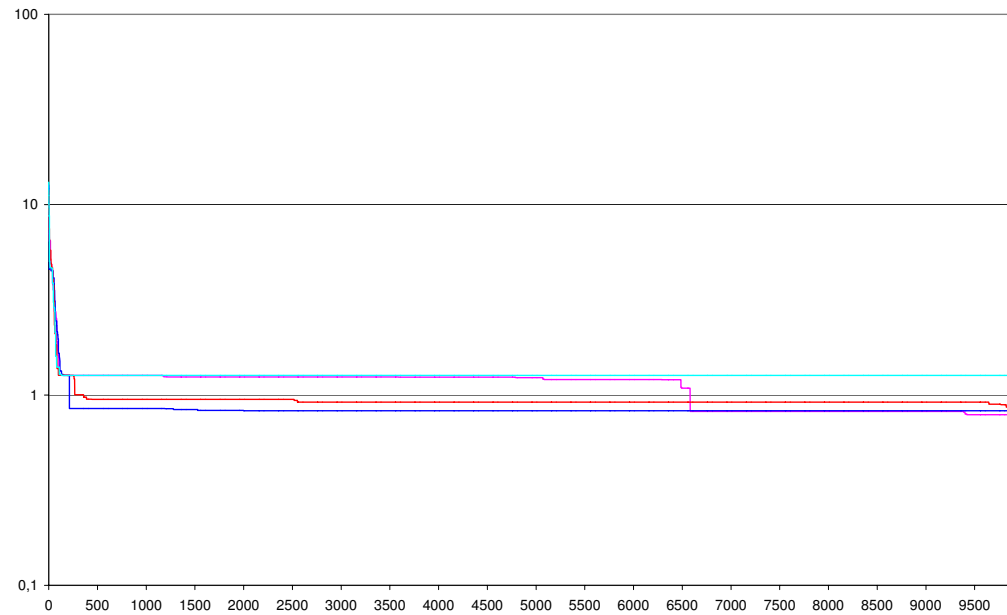


Abbildung 8.4: Nach der Erneuerung der Datenbasis hat sich das Konvergenzverhalten der Optimierung verbessert. Es gibt anscheinend keine Nebenoptima die sehr weit von der endgültig gefundenen Lösung abweichen. Allerdings zeigt sich bei einer Detailbetrachtung der Optimierungsergebnisse, dass es für diese Datenbasis erforderlich ist, die gesetzlichen Rahmenbedingungen verstärkt während der Optimierung zu berücksichtigen, da dies im Nachhinein nicht immer sinnvoll möglich ist. (Darstellung: normierte Gebrauchskosten über Generationen)

An dieser Stelle ist es unabdingbar, eine Berücksichtigung der gesetzlichen Rahmenbedingungen bereits während der Optimierung zu implementieren. Dies geschah über einen Strafterm, der proportional zu der Anzahl der Jahre, die der Dampferzeuger zu spät inspiziert wird das Ergebnis um mehrere Zehnerpotenzen verschlechtert. Als gesetzlich vorgeschriebene maximale Instandhaltungsperiode für alle Teile des Dampferzeugers wurden einheitlich neun Jahre angenommen. Die Optimierungsdurchläufe unter Berücksichtigung der gesetzlichen Rahmenbedingungen, die in Abbildung 8.5 dargestellt sind, liefern interessanterweise ein Ergebnis, das knapp innerhalb der Schwankungsbreite der Durchläufe ohne Berücksichtigung der gesetzlichen Vorgaben liegt.

Mit dieser Modifikation der Bewertung lieferte die Optimierung einen "1 / 5 / 9"-Plan. Dieser Plan verletzt offensichtlich die Teilbarkeitsforderung. Um ihn genauer zu betrachten, ist es erforderlich, sich erst einmal über die praktische Bedeutung dieser Verletzung klar zu werden. Die Interpretation der größten Periode ist auf den ersten Blick einleuchtend, sie findet alle neun Jahre statt, also in den Jahren 9, 18, 27, 36. Aber die Lage der Fünf-Jahres-Periode ist interpretationsfähig. Im Rahmen dieser Optimierung ist ihr Bezug die nächst größere Periode. Damit findet die zweite Periode nicht in den Jahren 5, 10, 15, ... statt, sondern immer fünf Jahre nach der Neun-Jahres-Periode also in den Jahren 5, 14, 23 und 32. So gesehen hat sie einen Vorteil gegenüber "3 / 9"-Plänen, da bei diesen die Drei-Jahres Periode einmal mehr pro Neun-Jahres-Periode ausgeführt wird. Damit weicht das Ergebnis zwar von der in den ursprünglichen Gebrauchskostenfunktionen vorausgesetzten Form ab, ist aber genauer betrachtet plausibel. Also ist davon auszugehen, dass es sich um ein Optimum handelt, dass mit den ursprünglichen Formulierungen der Gebrauchskostenfunktionen gar nicht erfasst werden konnte, da diese eine Teilbarkeit der Perioden voraussetzte. Eine Auflistung der Vorhabeninhalte eines "1 / 5 / 9"-Jahresplanes wird in Tabelle 8.3 gezeigt.

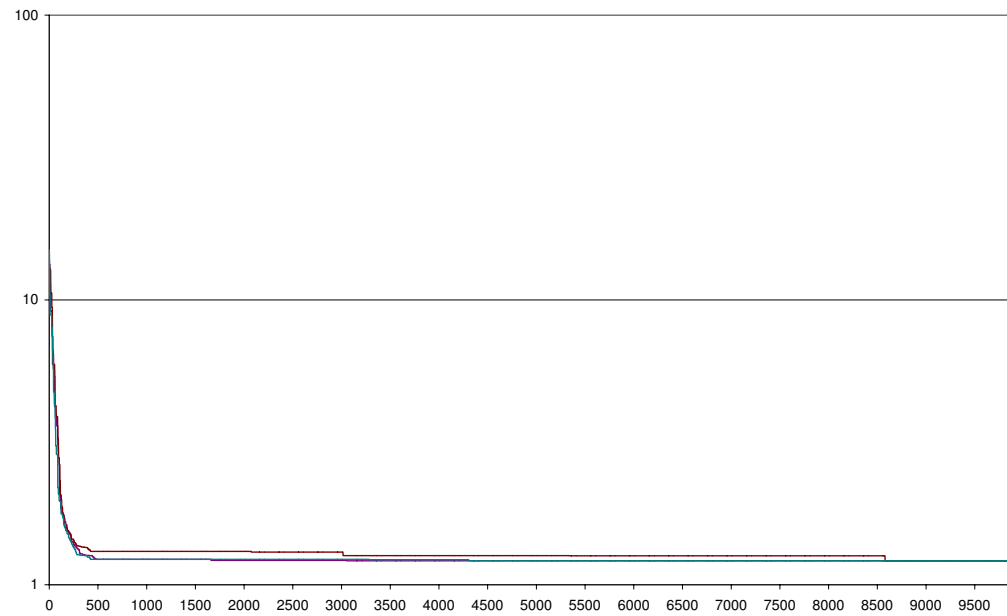


Abbildung 8.5: Zu sehen sind die neuen Durchläufe mit der neuen Datenbasis und einer Berücksichtigung gesetzlicher Rahmenbedingungen während der Optimierung. (Darstellung: normierte Gebrauchskosten über Generationen)

Tabelle 8.3: Inhalte der Abnutzungsbereiche eines auf der neuen Datenbasis entwickelten Instandhaltungsplanes, unter Berücksichtigung einer gesetzlich vorgeschriebenen Inspektionsperiode von 9 Jahren für den Dampferzeuger

In allen Perioden enthalten
Anlagen zentrale Leittechnik Brenner/Staubsystem Nachbrennrost Gebertechnik Temperatur Gebertechnik Druck Menge/Stand Geber Analysenmessung
In den 5 und 9 Jahres-Perioden enthalten
Maschinentransformator Eigenbedarfstransformatoren Naßentschlacker Rauchgas-Rücksaugung Zündbrennersystem Luvo Saugzug Rauchgas-Leerzug Reingassystem RVS-System Rauchgaswäsche Absorptionskreisläufe Gips-, Feinteilausschleusung Entgas/Speisewasserbehälter Speisewasser-Leitungssystem E-Speisepumpen T-Speisepumpensystem HD-Reduzierventile Anzapfleitungen HD Anzapfleitungen ND Hauptkondensat-Leitungen

Tabelle 8.3: Inhalte der Abnutzungsbereiche eines auf der neuen Datenbasis entwickelten Instandhaltungsplanes, unter Berücksichtigung einer gesetzlich vorgeschriebenen Inspektionsperiode von 9 Jahren für den Dampferzeuger

Hauptkondensat-Pumpen ND-Vorwärmung Kondensationsanlage Stopfbuchs-/Evakuierungssyst Rotordrehvorrichtung ND-Umleitstationen Turbinenregelung Kühlwasserleitungssystem Geber elektrisch AggregatschlompC(Rest) MD-Armaturen HD-Armaturen Armaturen allgemein Pumpen allgemein
Nur in der 9 Jahres-Periode enthalten
Generatorschalter Eco Verdampfer 00-49 Überhitzer1 50-69 Überhitzer2 70-89 Überhitzer3 90-99 Überhitzer4 00-24 Zwischenüberhitzer1 30-93 Zwischenüberhitzer2 Frischluchtgebläse Elektrofilter HD-Einspritzkühler MD-Einspritzkühler Kühlwasserhauptpumpen
Risikoorientierte Instandhaltung

Tabelle 8.3: Inhalte der Abnutzungsbereiche eines auf der neuen Datenbasis entwickelten Instandhaltungsplanes, unter Berücksichtigung einer gesetzlich vorgeschriebenen Inspektionsperiode von 9 Jahren für den Dampferzeuger

Vorwärmung
FD(leitung,schieber),HD-Absperr
Heiße Schiene+ZÜ-Sicherheitsv
Kaltes ZÜ-Leitungssystem
HD-Turbine+Ventile
MD-Turbine+Ventile
ND-Turbine
Gesamtlagerung
Generator
Betriebserregung
Anlagentechnik
"Fehlbedienung" (für die Kostenabschätzung erforderlich)

8.3 Optimierungserfahrungen im Überblick

Es war im Vorfeld der Optimierung sinnvoll, die Teilbarkeit der Periodenlängen nicht mehr zwingend vorzugeben, um die Darstellung der Perioden unabhängig von einander zu ermöglichen.

Es hat sich gezeigt, dass die Anpassung der Operatoren an die Näherungsfunktionen der Bewertung erhebliche Schwierigkeiten mit dem Verlassen lokaler Optima hat und auch vom Rechenaufwand her ungünstig ist.

Besser ist es, einen Interpretationsschritt einzuführen, der entkoppelte unabhängige Optimierungsparameter auf deterministische Weise in die gekoppelten Parameter eines Instandhaltungsplanes überführt. Hierbei erwies es sich als notwendig, die Näherungsfunktionen um einen Strafterm für die Missachtung gesetzlicher Auflagen zu erweitern.

Mit diesen Erweiterungen liefert die Optimierung mit Interpretationsschritt auch mit geänderter Datenbasis plausible Ergebnisse.

8.4 Verfügbarkeitsprognose

Beim Aufbau eines Datenmodells für die Optimierung der Instandhaltungsplanung werden Verteilungsparameter für die Ausfall- und Reparaturzeiten von Abnutzungseinheiten benötigt. Diese Abnutzungseinheiten können aus vielen verschalteten Komponenten bestehen. Diese Verschachtelungen können mit der Verfügbarkeitsprognose besonders leicht zusammengefasst werden. Menke zeigt in seiner Arbeit [Men03], die auf diesem Gebiet als Grundlage der vorliegenden Arbeit dient, dass die von ihm verwendete Darstellung von Komponenten noch keine ausreichende Berücksichtigung für Komponenten mit Speicherverhalten enthielt. Diese Weiterentwicklung ist im Rahmen der vorliegenden Arbeit erfolgt.

Grundsätzlich wird für die Prognose der Verfügbarkeit die Monte-Carlo-Methode eingesetzt, das heißt aus vielen einzelnen simulierten Durchläufen der Betrachtungszeit wird das voraussichtliche Verhalten der Anlage durch Mittelung bestimmt. Bei der hier verwendeten aufwandsreduzierten Variante der Monte-Carlo-Methode wird zusätzlich Rechenaufwand gespart, indem statische Bereiche der Zeitachse übersprungen werden.

8.5 Integration des Speichermodells

Im Ablaufschema der Monte-Carlo-Simulation werden die Zeitpunkte der Ausfälle und Reparaturfertigstellungen im Voraus berechnet, um von einem Ereignis zum nächsten springen zu können. Dies ist bei einem Speicher komplizierter, da seine Ausfallzeitpunkte von den Ausfällen der vorgelagerten Komponente abhängen. Für das Springen von Ereignis zu Ereignis ist es also erforderlich, dass die vorgelagerte Komponente sich des nachfolgenden Speichers "bewusst" ist und im Falle ihres Ausfalls die Berechnung des Ausfallzeitpunkts des Speichers auslöst. Umgekehrt muss der Ausfallzeitpunkt bei der Reparatur der Vorgängerkomponente auch wieder aus der Ereignisliste gelöscht werden, beziehungsweise der Speicher wird synchron als repariert angesehen.

Um dieses "Bewusstsein" zu gewährleisten, wird während der Topologieanalyse des Blockschaltbildes eine Variable angelegt, die eine "wird gepuffert von"-Beziehung wiedergibt. Zusätzlich werden die Speicherparameter, inklusive Anfangsfüllstand eingelesen.

Bei jedem Ausfall wird nun der Eintrag in der "wird gepuffert von"-Beziehung überprüft. Gibt es einen Eintrag, so wird für den Speicher der Füllstand aktualisiert. Hierzu besitzen die Speicherparameter einen Zeitstempel, der den Beginn des bis zum Ausfall andauernden Befüllungsvorgangs angibt. Unter Annahme des maximalen Zulaufs wird berechnet, ob der Speicher sein Maximalvolumen erreicht hat, oder wie voll er zum Zeitpunkt des Ausfalls ist. Es werden der Füllstand und der Zeitstempel der Speichereigenschaften aktualisiert. Mit dem aktualisierten Füllstand wird berechnet, wie lange es dauert, bis der Mindestfüllstand für die Funktion der nachfolgenden Anlagenteile unterschritten wird. Dieser Zeitpunkt wird als Ausfallzeitpunkt in die Liste der Ereignisse eingetragen.

Kommt es zum Ausfall des Speichers, so werden neue Reparatur- und Ausfallzeitpunkte für den Speicher erzeugt. Diese werden hinter das Ende der Simulationszeit gelegt. Eine selbstständige Reparatur, also eine spontane Selbstbefüllung, findet somit nicht statt. Stattdessen erfolgt die "Reparatur" in dem Moment, in dem die Vorgängerkomponente wieder den Betrieb aufnimmt. Das bedeutet, dass der Zulauf gleich durchgereicht wird und lediglich der zusätzliche Ladestrom, der eine Überproduktion der Vorgängerkomponente im Vergleich zum Bedarf der nachfolgenden Komponenten darstellt, zum Wiederauffüllen verwendet wird. Es wird berechnet wie weit der Füllstand während des Ausfalls abgesunken ist, und ein neuer Speichereigenschafteneintrag erzeugt, inklusive Zeitstempel. Der Reparatureintrag wird gelöscht. Damit ist alles wieder im Ausgangszustand und ein nächste Ausfall kann verarbeitet werden.

Zur Überprüfung der Modellierung wurde eine Vergleichsrechnung mit AvSim 9.0 von Isograph Inc. (www.isograph.com) durchgeführt. Hierbei handelt es sich um eine kommerzielle Software, die die Prognose der Zeit- und Arbeitsverfügbarkeit mit optionalen Kostenbetrachtungen für Ausfälle, Ersatzteile und Personalkosten verbindet. Der Speicher wird hierbei als eine Komponente angesehen, die nach einer Zeit t_a ausfällt und dann eine Zeit t_b benötigt, um sich zu regenerieren. Hierbei wird der Speicher nicht als in Reihe geschaltet betrachtet, sondern als parallele kalte Redundanz. Mit Hilfe verschiedener Fehlermodelle wurde zunächst die bestehende Simulati-

onsumgebung verifiziert, wobei der Schwerpunkt auf Komponenten lag, deren Ausfallverhalten sich durch Weibull-Verteilungen beschreiben ließ und deren Reparaturverhalten einer Exponential-Verteilung gehorchte. Anschließend wurde eine relativ unzuverlässige Komponente angenommen, mit den Weibull-Parametern $\alpha = 2$, $\beta = 90 h$ und $\gamma = 0$, deren Reparaturverhalten durch eine Exponentialverteilung mit $\lambda = 100 h$ beschrieben wurde. Die Zeitverfügbarkeit dieser Komponente liegt ohne Speicher bei 46,821 %. Diese sollte nun mit einem Speicher verbessert werden. Hierzu wurden zwei Auslegungen des Speichers getestet. Die simulierte Betriebszeit betrug 1000 h.

Die erste Auslegung sah in AvSim so aus, dass die Zeit bis zum Ausfall des Puffers $t_a=300 h$, die Zeit zum Wiederauffüllen $t_b=600 h$ betrug. Die Simulationszeit betrug 1000 h. In der Eigenentwicklung wurde ein Durchsatz von $1 kg/s$ (=Abfluss) und ein zusätzlicher Speisestrom von $0,5 kg/s$ (=Auffüllstrom) angenommen. Um auf die selben Zeiten wie in AvSim zu kommen wurden der Maximal- und der Anfangsfüllstand zu $1\,080\,000 kg$ ($= 300 h * 3600 s/h * 1 kg/s$) gewählt. Als Zeitverfügbarkeit liefert AvSim einen Wert von 90,275 % und die selbstprogrammierte Lösung einen Wert von 91,100 %. Die Simulationszeit ist hierbei von besonderer Bedeutung, wie leicht nachzuvollziehen ist, da der Speicher sich schneller entleert als er sich füllt und die Ladezeiten kürzer als die Bedarfszeiten sind. Somit läuft der Speicher allmählich leer, wodurch es mit fortschreitender Simulationsdauer zu Ausfällen kommt. Somit würde die Verfügbarkeit bei einer größeren Simulationsdauer weiter absinken.

Um zu überprüfen, ob die Ergebnisse der speicherbehafteten Systeme prinzipiell relativ nah beieinander liegen wurde ein weiterer Vergleichstest gemacht, bei dem der Speicher anders dimensioniert wurde. In AvSim wurde die Zeit bis zum Ausfall des Puffers t_a als $60 h$ definiert und die Zeit zum Wiederauffüllen t_b als $30 h$ eingestellt. Die übrigen Parameter blieben unverändert. In dem Matlab/Simulink-Modell wurde der Durchsatz auf $5 kg/s$ erhöht und der Speisestrom auf $10 kg/s$. Mit diesen Einstellungen sollte ein stationärer Pufferbetrieb simuliert werden, wobei der Puffer bei einer durchschnittlichen Ausfalldauer von 100 Stunden bei den meisten Ausfällen leer läuft. Als Ergebnis lieferte AvSim eine Zeitverfügbarkeit von 72,52 % die Eigenentwicklung liefert eine Verfügbarkeit von 72,69 %.

8.6 Speicher mit Zweipunktregler

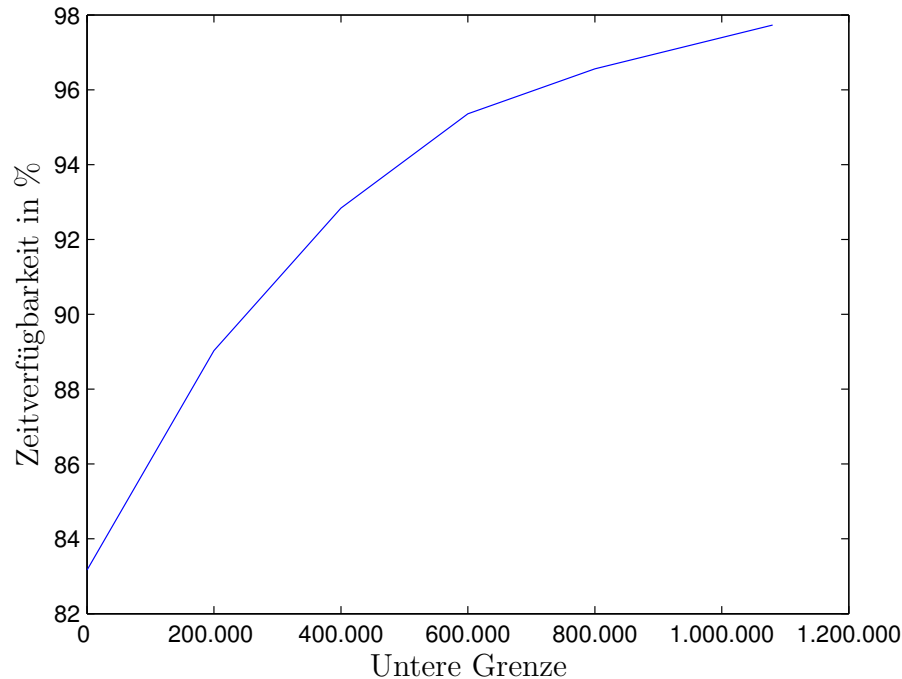


Abbildung 8.6: Auswirkungen der unteren Grenze des Zweipunktreglers auf die Zeitverfügbarkeit des Speicherausgangs (die obere Grenze war 1 080 000)

Für den Speicher mit Zweipunktregler steht kein vergleichbares Modell in AvSim+ zur Verfügung. Die Ergebnisse sind also unabhängig auf Plausibilität zu bewerten. Hierzu wurde die gleiche Anordnung aus einer unzuverlässigen Komponente gefolgt von einem Speicher betrachtet. Die unzuverlässige Komponente ist gleich geblieben, das Ausfallverhalten ist weibullverteilt, mit den Parametern $\alpha = 2$, $\beta = 90 h$ und $\gamma = 0$, deren Reparaturverhalten durch eine Exponentialverteilung mit $\lambda = 100 h$ beschrieben wurde. Die Zeitverfügbarkeit dieser Komponente liegt, wie bereits erwähnt, ohne Speicher bei 46,821 %. Der Speicher wurde mit einer maximalen Kapazität von 1 080 000 kg modelliert, wobei der Zufluss bei einem funktionierendem Vorfeld 2 kg/s betrug, der Abfluss 1 kg/s. Die obere Regelgrenze lag immer bei 1 080 000 kg die untere wurde in Schritten von 200 000 kg variiert (Abb. 8.6).

8.7 Modellierung einer Trocknerkaskade

Im Zuge der Umsetzung weiterer umweltfreundlicher Technologiekonzepte zur Reduktion des Schadstoff- und CO₂-Ausstoßes kommt es in letzter Zeit immer wieder zur Absenkung des Anlagenwirkungsgrads. Um die Auswirkungen dieser Entwicklung zu kompensieren, werden die Forschungsbemühungen bei Technologien, die eine Wirkungsgradsteigerung ermöglichen erhöht. Eine dieser Technologien ist die Vortrocknung von Braunkohlen.

Braunkohle besitzt einen hohen Wassergehalt von bis zu 60 %, was dazu führt, dass bei der Verbrennung ein Teil der Energie dazu aufgewendet wird, das Wasser zu verdampfen, nachdem es, ebenfalls unter Energieaufwendung, vom Kohlekorn gelöst wurde. Diese Energie ist thermisch nicht weiter nutzbar. Wenn stattdessen ein Teil der Energie zum Vortrocknen der Kohle eingesetzt wird, so sinkt der durch das Wasser bedingte Energieverlust ab. Bei einigen Entwürfen ist geplant, dafür Prozessdampf zu verwenden, um den Wirkungsgrad noch weiter zu erhöhen. Die nach dem Trocknen 130 bis 150 °C heiße Kohle kann anschließend ohne Unterbrechung direkt in die Brennkammer eingeleitet werden, was zusätzlich den Wirkungsgrad erhöht.

Allerdings stellt die getrocknete heiße Braunkohle ein nicht unerhebliches Gefahrenpotential dar, zumal sie Glutnester enthalten kann, die zum Ausbrechen eines Feuers führen können. Gängige Methoden die Entflammbarkeit zu reduzieren sind die Verwendung einer aus N₂ oder Rauchgas bestehenden Schutzatmosphäre oder das Ausblasen mit kaltem O₂. Beide Varianten haben den Nachteil, dass das Verfeuern beim Erreichen der Brennkammer energetisch ungünstiger wird. Außerdem besteht vor allem beim Ausblasen mit kaltem O₂ ein Restrisiko, dass das Feuer erst richtig angefacht wird, falls eine Störung in der Anlage auftritt.

Um beim Ein- und Austrag in den Trockner eine möglichst geringe Menge Falschluff mitzunehmen, werden meist Zellradschleusen eingesetzt. Das namensgebende Zellrad ist hierbei eine rotierende Stahlachse, die mit Vertiefungen, den sogenannten "Taschen", versehen ist. Diese Achsen drehen sich in einem Gehäuse, das zwei Anschlüsse besitzt und dicht an der Achse anliegt. Die Taschen werden auf der einen Seite mit Braunkohle gefüllt. Durch die Drehung der Achse wird die Tasche mitsamt der Braunkohle auf die andere Seite geschleust, wo sie entleert wird. Diese Konstruktion ist mechanisch aufgrund der hohen Scherkräfte beim Wegdrehen der Mulde von der Zufuhrseite sehr anfällig, bereits ein kleiner Gesteinsbrocken oder eine Schraube

reichen aus, um einen Totalausfall auszulösen. Außerdem ist der Verschleiß auf Grund der Reibung der Achse am Gehäuse hoch, wobei kleine Braunkohlekrümel hierbei für zusätzliche Reibung sorgen.

Um auch bei Ausfällen, die einen Stillstand der Trocknung mit sich bringen, genug Trockenbraunkohle zum Wiederaufstart zu haben, sind Trockenbraunkohlespeicher vorgesehen, die abgekühlte Braunkohle in einer N_2 Atmosphäre enthalten. Bei besonders kurzen Ausfällen können sie zur Überbrückung genutzt werden, um die nachgelagerten Teile der Anlage in Betrieb zu halten. Einen Teil ihres Inhalts müssen sie jedoch für das Wiederaufstart zurückhalten.

Sowohl die erhöhte Brandgefahr als auch die Zentralschleusen stellen wesentliche Ausfallrisiken für die Anlage dar. Sie spielen im Verfügbarkeitsmodell eine wesentliche Rolle. Etwas abgesetzt vom restlichen Verfügbarkeitsmodell der Trocknung befinden sich die Speicher, die einen Komponentenausfall kurzzeitig auffangen können.

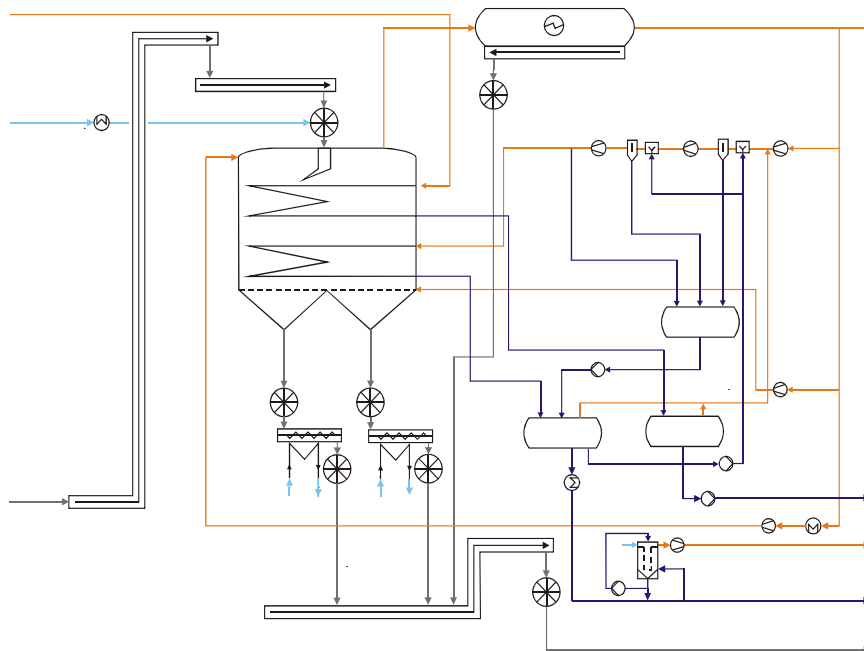


Abbildung 8.7: Fließbild zur atmosphärischen Trocknung

Es gibt zwei Gruppen von Verfahren zur Wirbelschichttrocknung von Braunkohle, die druckaufgeladene und die atmosphärische Trocknung. Ob-

wohl am Lehrstuhl Kraftwerkstechnik der BTU Cottbus vorwiegend die druckaufgeladene Trocknung betrachtet wird [Mar07],[Kaß06], kam es, im Zusammenhang mit einer Fallstudie, zur Betrachtung der Verfügbarkeit der atmosphärischen Trocknung zu Vergleichszwecken.

Somit war eine der ersten Anwendungen für das Speichermodell die Modellierung einer Trocknerkaskade für die atmosphärische Trocknung, wie sie für den Einsatz in einem 1000 MW Trockenbraunkohleblock geplant ist. Hierbei wurden 4 Trockner und 2 Speicher à 8 Stunden vorgesehen (Abb. 8.8).

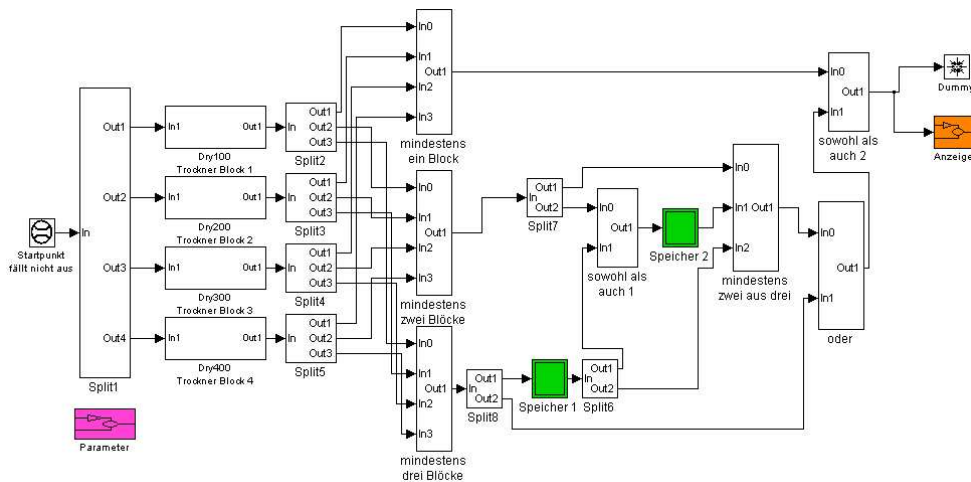


Abbildung 8.8: Überblick über das Gesamtmodell der Trocknerkaskade, links die vier Trocknerlinien, rechts deren Verschaltung mit den Speichern

Für Zellradschleusen und Komponenten im Brüdenbereich wurden basierend auf Expertenwissen Abschätzungen für das Ausfall- und Reparaturverhalten getroffen, siehe Tabelle 8.4.

	Weibull-Parameter Ausfallverhalten		Exponentialvert.-Parameter Reparaturverteilung
	α	β	λ
Zellradschleusen	2	8000 h	48 h
Brüdenkomponenten	2	8000 h	24 h

Tabelle 8.4: Fehlermodelle im Trocknerbereich

	Vorhaltezeit der Speicher				
	0 h	4 h	8 h	12 h	16 h
3 von 4 Linien erforderlich	99,46%	99,67%	99,78%	99,86%	99,90%
Differenzen bei 3 von 4	0,317%		0,119%		
4 von 4 Linien erforderlich	90,04%	92,14%	93,65%	94,70%	95,71%
Differenzen bei 4 von 4	3,604%		2,054%		

Tabelle 8.6: Zeitverfügbarkeitsergebnisse für die Trocknerkaskade

Die mittlere Zeitverfügbarkeit einer einzelnen Trocknerlinie liegt bei 97,07%. Für die Anzahl der mindestens zum Betrieb benötigten Trocknerlinien wurde erst angenommen, dass alle vier Linien benötigt werden und dann zum Vergleich noch der Fall betrachtet, bei dem nur drei Linien erforderlich sind. Ein Speicher war so geplant, dass er einen Trocknerausfall für acht Stunden überbrücken kann. Beide sind so geschaltet, dass sie entweder einen ausgefallenen Trockner für sechzehn Stunden überbrücken können, oder zwei verschiedene Trocknerausfälle für je acht Stunden. Speicherverluste wurden nicht angenommen. Da die genaue Anzahl der unbedingt benötigten Trocknerlinien in diesem Entwurfsstadium noch nicht bekannt ist, wurden sowohl Simulationen mit mindesten drei von vier Linien, als auch Simulationen mit mindestens vier Linien durchgeführt. Die Zeitverfügbarkeiten sind in Tabelle 8.6 dargestellt. Neben der geplanten Vorhaltezeit von acht Stunden wurden auch die Vorhaltezeiten null und sechzehn Stunden betrachtet. Null Stunden entspricht der Trocknerkaskade ohne Speicher. Während die Auswirkungen der Speicher bei einer Auslegung der Kaskade, die einen Betrieb mit drei Linien ermöglicht, einen eher geringen Effekt hat, so sind die Auswirkungen in

dem Fall, dass alle vier Trocknerlinien benötigt werden wesentlich deutlicher.

Die Verbesserung der Verfügbarkeit betrug bei drei von vier erforderlichen Trocknerlinien bei der Einführung des Speichers 0,317% und bei seiner Verdoppelung 0,119%, wie Tabelle 8.6 zu entnehmen ist. Bei vier erforderlichen Linien bringt die Einführung des Acht-Stunden-Speichers einen Verfügbarkeitsgewinn von 3,604% und die Verdoppelung auf sechzehn Stunden nochmals 2,054% zusätzliche Verfügbarkeit.

8.8 Speichermodellierung im Überblick

Für ein extra entwickeltes, besonders einfaches Modell mit einem Speicher wurde ein Vergleich mit der weniger flexiblen kommerziellen Software "Av-Sim+" durchgeführt. Hierbei wurden übereinstimmende Ergebnisse erzielt. Es wurden Simulationen durchgeführt, um den Einfluss der Füllstandsregelung zu bestimmen. Des Weiteren wurde in einer praxisnahen Simulation mit einem Trocknermodell untersucht, welche Wirkung Speicher in einem realitätsnahen Umfeld haben. Wie zu erwarten, zeigte sich hierbei, dass Speicher gerade bei niedrig redundanten Anlagen (vier von vier Linien erforderlich) einen deutlichen positiven Einfluss auf die Verfügbarkeit haben.

Kapitel 9

Zusammenfassung und Ausblick

In der vorliegenden Arbeit wurde primär ein neuer Ansatz für die Optimierung der Instandhaltungsplanung entwickelt. Nachdem festgestellt wurde, dass klassische Optimierungsverfahren dieses Problem der Instandhaltungsoptimierung nicht zufriedenstellend lösen können, wurde eine Lösung auf Basis von "Genetischen Algorithmen" entwickelt.

Diese setzen jedoch voraus, dass die zu optimierenden Informationen näherungsweise unabhängig voneinander sind. Bei dem in dieser Arbeit bearbeiteten Problem lag hingegen eine starke Kopplung einiger Parameter vor.

Um die genetischen Algorithmen dennoch erfolgreich anzuwenden, war es erforderlich, entweder den Algorithmus an die Kopplung anzupassen oder die Aufgabenstellung weitestgehend zu entkoppeln. Diesem Sachverhalt Rechnung tragend wurden zwei Varianten für die genetische Optimierung getestet: eine erste Variante mit unterlagerter nicht-genetischer Feinoptimierung (Anpassung des Algorithmus) und eine zweite mit Interpretationsschritt (Entkopplung der Problemstellung). Sowohl die unterlagerte Optimierung als auch der Interpretationsschritt wurden im Rahmen dieser Arbeit als neue problemspezifische Ansätze entwickelt.

Nach mehreren Durchläufen zeigte sich, dass die zweite Variante mit dem Interpretationsschritt bei wesentlich weniger Rechenaufwand bessere praxisnähere Ergebnisse liefert, als die erste Variante mit unterlagerter Optimierung. Infolgedessen ist die Variante mit Interpretationsschritt zu bevorzugen.

Neben der prinzipiellen Entscheidung, wie der genetische Algorithmus auf das Problem anzuwenden ist, gab es noch folgende Weiterentwicklungen der Näherungsfunktionen für die Gebrauchskosten, die für einen reibungslosen Ablauf der Gesamtoptimierung hilfreich oder sogar notwendig waren:

- *Aufhebung der Teilbarkeitsbedingung für die Periodenlängen*

In den ursprünglichen Gebrauchskostenabschätzungen steckte implizit die Annahme, dass die Periodenlängen ganzzahlige Vielfache voneinander sind. Dies führt dazu, dass die Periodenlängen entweder in Abhängigkeit voneinander dargestellt werden müssen, oder dass der Definitionsbereich nur solche Kombinationen zulässt, die diese Regel erfüllen. Dies erschwert die Optimierung erheblich. Da sich die implizite Teilbarkeitsannahme auf einige wenige Terme beschränkte, war es einfacher, diese Terme durch andere zu ersetzen, die den Definitionsbereich der Gebrauchskostenabschätzung auf nicht durcheinander teilbare Perioden ausdehnten. Für den Fall der exakten Teilbarkeit aller Perioden gehen beide Varianten ineinander über.

- *Korrektur der Gebrauchskostenabschätzung oder des Definitionsbereiches am Rand des Wertebereiches*

Da der Algorithmus keine Vorgabe hat, wo er im Definitionsbereich suchen muss, findet er auch optimale Lösungen am Rande des Definitionsbereiches. Da die Gebrauchskostenabschätzung aus der praktischen Betrachtung hervorgegangen ist, handelt es sich bei solchen Randoptima meist um Fehler im Extrapolationsverhalten. Eine Prüfung der zugehörigen Lösungen auf Plausibilität war erforderlich, wobei sich zeigte, dass es sich nicht um in der Praxis brauchbare Ansätze (Instandhaltungspläne) handelte. In diesen Fällen musste entweder der Definitionsbereich angepasst werden, oder eine Korrektur der Gebrauchskosten vorgenommen werden, um diese Lösungen auszuschließen.

- *Einführung einer Ähnlichkeitsbewertung*

Unter Zuhilfenahme von Zwischenergebnissen der Gebrauchskostenfunktionen wurde eine Ähnlichkeitsbewertung vorgenommen, um ein "Zusammenbrechen der Population" hinauszuzögern und es, sobald es trotzdem eintritt, zu detektieren. In diesem Fall wurde der redundante Teil der Population gelöscht und neu erzeugt. (siehe 7.1.8) Die Verwendung einer Ähnlichkeitsfunktion ist ein Ansatz, der in verschiedenen Literaturquellen verfolgt wurde. Allerdings werden dort in der Regel zusätzliche Funktionen entwickelt und berechnet, was mit einem erhöhten Rechenaufwand verbunden ist. Die Verwendung von Zwischenergebnissen als Maß für die Ähnlichkeit war ein Ansatz, der im Rahmen der Arbeit entwickelt wurde.

- *Möglichkeit zur Vorgabe von maximalen Perioden*

Im Rahmen der Arbeit wurde eine Möglichkeit geschaffen, die Periodendauer einer Maßnahme nach oben zu begrenzen. Der Sinn einer solchen Vorgabe liegt in der Berücksichtigung externer Nebenbedingungen, wie z.B. Gesetzen und Garantiauflagen. Eine solche Nebenbedingung ist eine Beschränkung des Definitionsbereichs für die Lösungen. Hierdurch kann das globale Optimum der Planung ohne Nebenbedingungen außerhalb des Definitionsbereichs liegen, was zu einer Verschlechterung des globalen Optimums führt.

Gleichzeitig zur Instandhaltungsoptimierung wurde aufbauend auf den Arbeiten von Menke [Men03] die Methodik der Verfügbarkeitsprognose komplexer kraftwerkstechnischer Anlagen weiterentwickelt und um die neue Komponente "Speicher" (ggf. mit Verlusten) erweitert. Mit dem Speichermodell wird die Verhaltensweise eines Speichers in die aufwandsreduzierte Monte-Carlo-Methode integriert. Zur Verifikation wurden am Anfang einige einfache Testbeispiele modelliert. Danach wurden die Speicher in komplexeren Schaltungen eingesetzt, wie zum Beispiel bei der modellierten Trocknungsanlage eines 1 000 MW Braunkohle-Kraftwerksblocks. Dieses war insofern von Bedeutung, da durch das Verfügbarkeitsprognosetool wichtige Ausgangsdaten ermittelt werden konnten. Weniger von Interesse waren dabei die Verfügbarkeitsdaten der Einzelkomponenten, die oftmals sehr zahlreich vorlagen, sondern die Wechselwirkungen bei der Verknüpfung der einzelnen Komponenten. Hierbei wurden viele Erfahrungen gesammelt, die sich auch bei weiteren Arbeiten positiv auswirken werden.

Im Laufe dieser Dissertation ergaben sich immer wieder neue Ansatzpunkte und Ideen für die Instandhaltungsoptimierung und die Verfügbarkeitsprognose. Im Rahmen dieser Arbeit konnten sie aber nicht alle verfolgt werden.

Einige seien hier zur Anregung für zukünftige Arbeiten genannt:

- *Budgetrestriktionen der Anlagenbetreiber als externe Restriktionen*

Diese Restriktionen sind im allgemeinen etwas flexibel, trotzdem sollte es möglich sein, bei Planungen eine Budgetvorgabe zu berücksichtigen.

- *Unterschiedliche Genauigkeit der Komponentendaten*

Die Ungenauigkeit, mit der die Komponentendaten in die Modelle einfließen, ist ebenfalls eine für die Optimierung interessante Größe. Es

gibt einige Bauteile, die in einer so großen Anzahl in einem oder mehreren Kraftwerken vorhanden sind, dass ihr Abnutzungsverhalten sehr genau bestimmt werden kann. Aber es gibt auch Abnutzungseinheiten, die in sehr geringer Stückzahl nur eingesetzt werden, so dass ihr Abnutzungsverhalten nicht exakt genug bestimmt werden kann. Dies trifft natürlich und vor allem auch auf neue Anlagenteile in Kraftwerken zu, wie zum Beispiel die Kohletrockner in Braunkohlekraftwerken. Das eine Unsicherheit in den Eingangsdaten existiert und immer bestehen wird, sollte jedem stets bewusst sein. Die Frage, die sich daran anschließt, ist: Kann man die Auswirkungen der Unsicherheiten der Eingangsdaten auf das Endergebnis größenmäßig erfassen und beziffern oder in einer abgeschwächten Form, die Auswirkungen auf das Endergebnis begrenzen?

Die Risiken sind absehbar. Wenn ein großer Instandhaltungsposten durch Ungenauigkeiten in den Eingangsdaten einer anderen Abnutzungsperiode zugeordnet wird, könnte es zu einem anderen nicht optimalen Endergebnis führen.

- *Bündelung von mehreren Komponenten zu einer Abnutzungseinheit*
Ein weiteres Problem, das ähnlich zum vorgenannten ist, ist die Ermittlung der Abnutzungswerte von Abnutzungseinheiten, die aus einzelnen Bauteilen bestehen. Je nachdem, wie die Bauteile logisch miteinander verschaltet sind, ob Redundanzen mit beteiligt sind, nimmt die mittlere Ausfallzeit einen anderen Wert an. Hierzu wurde bisher eine externe Verfügbarkeitsprognose durchgeführt. Ist es sinnvoll, diese Funktionalität in die Instandhaltungsoptimierung zu integrieren?
- *Spezielle Bewertung für Kurzstillstände*
Eine weitere Idee ist es, eine spezielle Bewertung für Kurzstillstände in die Instandhaltungsoptimierung mit einzubeziehen. So werden manchmal an Wochenenden Kraftwerksblöcke heruntergefahren, weil nur eine geringe Leistung im Netz nachgefragt wird. Das Kraftwerk ist in Bereitschaft und muss im Fall eines Abrufs der Leistung mit einer vertraglich festgelegten Zeitverzögerung ans Netz gehen. Ist diese Verzögerung größer als die Anfahrzeit, könnte man die Zeitdifferenz nutzen, um kleinere Reparaturen oder auch Inspektionen durchzuführen. Dies wurde und wird auch so in der Praxis umgesetzt. Da der Kraftwerksblock ohnehin außer Betrieb ist und weiter "in Bereitschaft" ist, würden keine Erlöseinbußen entstehen.

Als Resumee ist erkennbar, dass die Instandhaltungsoptimierung von Großkraftwerken mit genetischen Algorithmen das Potential hat, die Instandhaltungsplanung voranzubringen. Dabei können auch neue Planungen und Entwicklungen, wie die vorgeschaltete Kohletrocknung, untersucht werden. Durch das Verfügbarkeitsprognosetool kann die Instandhaltungsoptimierung mit entsprechendem Dateninput unterlegt werden. Die Gebrauchskostenabschätzungen in ihrer jetzigen Form ermöglichen es, auch ausgefallene Instandhaltungspläne zu betrachten und mit einem Referenzplan zu vergleichen.

Zur Zeit ist die Anwendbarkeit der Kostenabschätzung auf braunkohlefeuerte Kraftwerke begrenzt, was größtenteils an der zur Verfügung stehenden Datenbasis liegt. Mit einer geeigneten Datenbasis und ggf. der Berücksichtigung von Besonderheiten anderer Anlagen in den Gebrauchskosten, ist es aber möglich, das Verfahren auf andere Anlagentypen zu übertragen.

Literaturverzeichnis

- [Abe90] ABEL D.: *Petri-Netze für Ingenieure*. Springer, 1990
- [Al-95] AL-RADHI M., HEUER J.: *Total Productive Maintenance*. Hanser Verlag, 1995. – ISBN 3-446-18232-2
- [Ana03] ANATOLY LISNIANSKI, GREGORY LEVITIN: *Multi-State System Reliability*. World Scientific, 2003 (Series on Quality, Reliability & Engineering Statistics). – ISBN 981-238-306-9
- [And02] ANDERSON S. A.: Applying and implementing risk-based inspection programs. In: *Hydrocarbon Processing* (2002), January, S. 43–46
- [Arn03] ARNO MEYNA, BERNHARD PAULI ; BRUNNER, Franz J. (Hrsg.): *Taschenbuch der Zuverlässigkeits- und Sicherheitstechnik*. Hanser Verlag, 2003. – ISBN 3-446-21594-8
- [Bal00] BALZER G., BRAND M.: Die benötigte Verfügbarkeit von Leistungsschaltern als Kriterium für deren Instandhaltungsbedarf. In: *Elektrie* (2000), Nr. 54, S. 149–158
- [Bar90] BARBER S. H. : RAM models for fossil generators. In: *Industrial and Commercial Power Systems Technical Conference*. Detroit (USA), 1990, S. 30–35
- [Bec94] BECKMANN G., MARX D.: *Instandhaltung von Anlagen — Methoden, Organisation, Planung*. Dt. Verlag für Grundstoffindustrie, 1994. – ISBN 3-342-00427-4
- [bec02] *Creative Evolutionary Systems*. Morgan Kaufmann Publishers, 2002. – ISBN 1-55860-673-4

- [Ber95] BERNSTEIN, W.: Zuverlässigkeit von Kraftwerksanlagen — ein Schwerpunkt der angewandten Hochschulforschung. In: *Forschung in der Kraftwerkstechnik* VGB, 1995, S. 1–18
- [Bey01] BEYER H.-G.: *The Theory of Evolution Strategies*. Springer Verlag, 2001. – ISBN 3–540–67297–4
- [Bov00] BOVERT, Ernst-Martin v.: *Modellerstellung zur Verfügbarkeitsprognose komplexer Förder- und Lagersysteme*, Universität Dortmund, Diss., 2000
- [Bro99] BRONSTEIN, SEMENDJAJEW, MUSIOL, MÜHLIG: *Taschenbuch der Mathematik*. Verlag Harri Deutsch, 1999. – ISBN 3–8171–2014–1
- [Bun05] BUNDESREPUBLIK DEUTSCHLAND (Hrsg.): *Verordnung über den Zugang zu Elektrizitätsversorgungsnetzen*. Bundesgesetzesblatt Jahrgang 2005 Teil 1 Nr. 46. Bundesrepublik Deutschland, Juli 2005
- [Cle99] CLEMENS, G.: Zuverlässigkeitsorientiertes Zusammenwirken von Netz- und Kraftwerksbetreibern im Verteilungssektor. In: *Aachener Beiträge zur Energieversorgung* Bd. 60. Klinkenberg Verlag Aachen, 1999, S. 1–91
- [Cor81] CORMICK, Norman J. M.: *Reliability and Risk Analysis*. Academic Press, 1981. – ISBN 0–12–482360–2
- [Dah04] DAHLITZ TH., HEROLD M., MUTZE D., NEUMANN H.: Verfügbarkeitsanalyse zur Offenlegung von Einsparpotentialen bei der Instandhaltung am Beispiel des Braunkohlekraftwerkes Schwarze Pumpe. In: *VGB PowerTech* (2004), 1/2, S. 91–94
- [Deu07] DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMIERUNG: DIN 6779-10. In: *Deutsche Industrienorm* (2007)
- [Ell02] ELLMER G., WIERICK H., FRITZE B., ALTMANN D.: Verantwortung des Service-Anbieters bei outgesourcter Instandhaltung. In: *VGB PowerTech* (2002), 11, S. 40–43
- [Fip99] FIPPER, Michael: *Zuverlässigkeitstechnische Bewertung von Instandhaltungsstrategien für elektrische Verteilnetze*. Klinkenberg

- Verlag, 1999 (Aachener Beiträge zur Energieversorgung 58). – ISBN 3-934318-01-0
- [Fis95] FISHMAN, Georg S.: *Monte Carlo — Concepts, Algorithms, and Applications*. Springer Verlag, 1995 (Springer Series in Operations Research). – ISBN 0-387-94527-X
- [Gal96] GALIKOWSKY C., SIVAZLIAN B. D., CHAOVALITWONGSE P.: Optimal Redundancy for Reliability and Availability of Series Systems. In: *Microelectronic Reliability* Bd. 36, 1996, S. 1537–1546
- [Geo03] GEORG E. W., STURM F. A.: Effective Plant Management through Intelligent Diagnostics in the Power Plant. In: *VGB PowerTech* (2003), 9, S. 84–88
- [Ger04] GERDES I., KLAWONN F., KRUSE F.: *Evolutionäre Algorithmen*. Vieweg, 2004. – ISBN 3-528-05570-7
- [Gro76] GROSSE G.: *Instandhaltungsstrategien für einfache und komplexe Systeme mit Berücksichtigung periodischer Kontrollen*, Ingenieur Hochschule Zittau, Diss., 1976
- [Hen98] HENRI PROCACCIA, SPYROS P. ARSENIS, PATRICK AUFORT (Hrsg.) ; Electricité de France (Veranst.): *European Industry Reliability Data Bank*. Crete University Press, 1998 (3). – ISBN 2-950909-2-0-5
- [Hof01] HOFMANN J., MICHAELIS H.-H.: Risikobasierte Instandhaltung in Kraftwerken. In: *VGB PowerTech* (2001), 1, S. 74–78
- [htt03] *Einfache Anwendungsbeispiele — Monte-Carlo-Schätzer*.
<http://www.mathematik.uni-ulm.de/stochastik/lehre/ss03/markov/skript/node25.html>, 2003
- [Jan86] JANKALA K., LOUKO P., KIVELA M.: Methods used in the Availabillity and Risk Analysis of the Kymijarvi Coal-Fired Power Plant. In: *INTER-RAM* Bd. 13, 1986, S. 236–243
- [Kaß06] KASS H., GRIEBE S., HÖHNE O., MARTIN J. S., RISTAU H., KRAUTZ H. J.: Künftige Technologien für CO₂-freie Braunkohlenkraftwerke - Grundlagenforschung an den Technikumanlagen zur

- Verbrennung nach dem Oxyfuel-Verfahren und zur Trocknung in einer druckaufgeladenen DampfWirbelschicht der BTU. In: *Forum der Forschung* (2006), Nr. Heft 19
- [Kal01] KALAITZIS D., DALDER TH.: Zertifizierung und Instandhaltung – braucht die UInstandhaltung das Öko-Audit? (DIN EN ISO 14001 und Öko-Audit). In: *VGB PowerTech* (2001), 3, S. 66–69
- [Kal08] KALINA H., BECKMANN G., STAHR A., WARNECKE M.: Instra-Dat INSTRA+. In: *interner Gebrauch, Vattenfall Europe* (2008)
- [Kec91] KECECIOGLU, Dimitri: *Reliability Engineering Handbook*. Bd. 1. Prentice Hall (Englewood Cliffs, New Jersey), 1991. – ISBN 0–13–772294–X
- [Kel99] KELLY C. T.: *Iterativ Methods for Optimization*. Society for Industrial and Applied Mathematics, 1999 (frontiers in applied mathematics). – ISBN 0–89871–433–8
- [Kep98] KEPPLER J.: Einsatzoptimierung von Gas- und Dampfturbinenkraftwerken mit genetischen Algorithmen und Neuronalen Netzen. In: *VDI Berichte 1381 — COMPUTATIONAL INTELLIGENCE* (1998), S. 87–99
- [Kle01] KLEIN G., SCHRÖDER H. CHR.: Der Instandhaltungsprozess aus Sicht des Controlings. In: *VGB PowerTech* (2001), 2, S. 63–67
- [Kna04] KNAAK A., BUSCH H.-G.: Notwendigkeit und Gestaltung von Wartungsverträgen für Gasturbinenanlagen aus der Sicht des Versicherers. In: *VGB PowerTech* (2004), 1/2, S. 87–90
- [Lim00] LIMNIOS N., NIKULIN M. (Hrsg.): *Recent Advances in Reliability Theory — Methodology, Practice and Inference*. Birkhäuser Boston, 2000. – ISBN 0–8176–4135–1, 3–7643–4135–1
- [Lip07] LIPP H. M., BECKER J.: *Grundlagen der Digitaltechnik*. 6. Oldenbourg, 2007. – ISBN 978–3486582741
- [Mar98] MARENBACH P., HANSMANN M., FREYER S., NIEKEN U.: Genetische Programmierung zur transparenten Modellierung von Bioprocessen. In: *VDI Berichte 1381 — COMPUTATIONAL INTELLIGENCE* (1998), S. 191–201

- [Mar07] MARTIN J., HÖHNE O., LECHNER S., KRAUTZ H.J., JENTSCH N.: Druckaufgeladene Dampfwirbelschicht-Trocknung (DDWT) von Braunkohlen: Von den Betriebsergebnissen des Versuchstrockners (0,5 t/h) zur Konzeptentwicklung der Großtechnischen Versuchsanlage (GTVA, 70 t/h). In: *39. Kraftwerkstechnischen Kolloquium "Verfahren und Anlagen der Hochtemperatur-Energietechnik: Stand und Perspektiven"* TU Dresden, 2007
- [Mat02] MATYAS K.: Ganzheitliche Optimierung durch individuelle Instandhaltungsstrategien. In: *Industrie Management* (2002), Nr. 18, S. 13–16
- [Men03] MENKE, Dominik: *Verfügbarkeit von Großkraftwerken*. <http://www.dissertation.de/buch.php3?buch=2304> : dissertation.de, 2003. – ISBN 3–89825–657–X
- [Pap01] PAPADOPOULOS N., SHORES S. P., SHERIN B.: Managementstrategien zur Instandhaltung von großen Elektro-Motoren in verschiedenen Anlagenbereichen. In: *Cement-Lime-Gypsum* 54 (2001), 8, S. 440–447
- [Röb00] RÖBEN D.: Effizientes Outsourcing. In: *Verfahrenstechnik* (2000), Nr. 34, S. 70–72
- [Ric01] RICHTER T., GÖLZ K.: RAM-Analysen als Werkzeug zur Optimierung der Instandhaltung von Kraftwerksanlagen. In: *33. Kraftwerkstechnisches Kolloquium Dresden*, 2001
- [Röt99] RÖTSCH, Dietmar: *Zuverlässigkeit von Rohrleitungssystemen*. www.rohrleitungssysteme.de : Springer Verlag, 1999. – ISBN 3–540–66042–9
- [Sch00] SCHWAB E., MARZINEAK R.: Instandhaltung von Maschinen für die Kunststoffverarbeitung. In: *KU Kunststoffe* (2000), Nr. 8, S. 48–58
- [Sha87] SHARAD M. LELE: Improved Algorithms for Reservoir Capacity Calculation Incorporating Storage-Dependent Losses and Reliability Norm. In: *Water Resources Research* Bd. 23, 1987, S. 1819–1823
- [SIN97] SINTEF (Hrsg.): *OREDA — Offshore Reliability Data*. 1997

- [Ste00] STEVEN E. RIGDON, ASIT P. BASU: *Statistical Methods for the Reliability of Repairable Systems*. Wiley, 2000 (Applied Probability and Statistics Section). – ISBN 0-471-34941-0
- [Str02] STRAUSS P.: Der Hochgeschwindigkeitszug ICE 2 im Spiegel einer LifeCycleCost-Analyse. In: *EI – Eisenbahningenieur* (2002), 10, Nr. 53, S. 96–99
- [Stu96] STURM, A.: *Zustandswissen für Betriebsführung und Instandhaltung*. VGB-Kraftwerkstechnik GmbH, 1996 (Kraftwerkstechnik 10)
- [Sur99] SURKOW, Rainer: *Optimierung der Leistungsverfügbarkeit von Windenergie durch ihre Integration in Wind-Biogas-Hybridanlagen*. Stephanstr. 3, 04103 Leipzig : Selbstverlag des Instituts für Meteorologie, 1999 (Wissenschaftliche Mitteilungen aus dem Institut für Metrologie der Universität Leipzig und dem Institut für Troposphärenforschung e. V. Leipzig 14). – ISBN 3-9806117-3-6
- [The02] THEIS, Georg: Telematik-Anwendungen im Luftverkehr. In: *Internationales Verkehrswesen* (2002), 5, Nr. 54, S. 225–228
- [VDE99] VDEW / VGB: *Begriffe der Versorgungswirtschaft — Verfügbarkeit von Wärmekraftwerken*. 1999. – Teil B, Heft 3
- [Ven04] VENNEGEERTS, Hendrik: *Zuverlässigkeitstechnische und wirtschaftliche Bewertung der Instandhaltung in elektrischen Verteilungsnetzen*. Klinkenberg Verlag, 2004 (Aachener Beiträge zur Energieversorgung 99). – ISBN 3-934 318-54-1
- [VGB99] VGB (Veranst.): *ZEDB Auswertung '99*. VGB, 1999
- [Wah01] WAHL D.-J.: Zur Lage der Kraftwerksinstandhaltung im liberalisierten Energiemarkt. In: *VGB PowerTech* (2001), 1, S. 68–73
- [Wal99] WALLER H., SCHERER D.: Redundanz, Zuverlässigkeit, Verfügbarkeit — was ist wirtschaftlich vertretbar? In: *VGB Kraftwerkstechnik* (1999), Nr. 9, S. 67–71
- [Wal02] WALTER, Alt: *Nichtlineare Optimierung - eine Einführung in Theorie, Verfahren und Anwendungen*. Vieweg, 2002. – ISBN 3-528-03193-X

- [Web04] WEBER J.: PC-Software zur Lebensdauer von Rohrbögen im Zeitstandbereich. In: *VGB PowerTech* (2004), 7, S. 60–65
- [Wen93] WEN H., MOHAMMED-ZADEH Y.: Power Output Design Optimization through Availability Analysis. In: *Int. Joint Power Generation Conference* Bd. 22. Kansas City, USA, Oktober 1993 (PWR), S. 37–40
- [Zel00] ZELL, J.: *Ansätze zur betriebsergebnisgestützten Optimierung der Verfügbarkeit von Kraftwerken*. Dt. Univ.-Verl., 2000

Anhang A

Optimierungsdurchläufe

A.1 Tabellenlegende und Erläuterung

Im Folgenden finden sich mehrere Optimierungsdurchläufe in gekürzter Form. Gekürzt wurde zum einen dahin gehend, dass jeweils nur das Optimum angegeben wird. Außerdem wurden immer nur Optima, die exakt eine Generation (Iteration) bereits überlebt haben und eine Veränderung aufweisen aufgelistet. Letztere Einschränkung dient dazu, die Datenmenge ohne nennenswerte Informationsverluste etwas zu reduzieren, da jede der Tabellen ansonsten über 2000 A4-Seiten groß wäre. Verloren gehen hierbei Doppelungen und Zwischenschritte, die gleich wieder verbessert wurden. Eine Auflistung aller Optima, die neu erzeugt wurden, war nicht möglich, da nicht alle Optima gleich nach ihrer Erzeugung ausgegeben werden.

Zu den Spalten:

- Generation
Gibt an, ab welchem Iterationsschritt dies das Optimum ist.
- p_i
Dauer der i -ten Periode in Jahren
- k_j
Zuordnung der j -ten Abnutzungseinheit zu einer Periode, -1 bedeutet risikoorientierte Instandhaltung
- GK
Abschätzung der Gebrauchskosten in tausend Euro pro Stunde

- GKIH
Anteil von GK der für planmäßige Arbeiten aufgewendet wird
- GKIHA
Anteil von GK der für außerplanmäßige Arbeiten aufgewendet wird
- $1/(1-NVFP)$
NVFP ist die planmäßige Nichtverfügbarkeit
- $1/(1-NVFA)$
NVFA ist die außerplanmäßige Nichtverfügbarkeit

Die Kommazahlen haben alle die gleiche Genauigkeit, Nullen am Ende der Kommastellen wurden bei der Ausgabe abgeschnitten.

Die Abnutzungseinheiten sind in Form eines Index angegeben, hier der Schlüssel:

Index	Komponentenname
k_0	BAC Generatorschalter
k_1	BAT Maschinentransformator
k_2	BBT Eigenbedarfstransformatoren
k_3	C** Anlagen zentrale Leittechnik
k_4	HAC Eco
k_5	HAD Verdampfer
k_6	HAH 00-49 Überhitzer1
k_7	HAH 50-69 Überhitzer2
k_8	HAH 70-89 Überhitzer3
k_9	HAH 90-99 Überhitzer4
k_{10}	HAI 00-24 Zwischenüberhitzer1
k_{11}	HAI 30-93 Zwischenüberhitzer2
k_{12}	HDA Nassentschlacker
k_{13}	HFD Rauchgas-Rücksaugung
k_{14}	HHA/HHE Brenner/Staubsystem
k_{15}	HHB Nachbrennrost
k_{16}	HJA Zündbrennersystem
k_{17}	HLB Frischluftgebläse
k_{18}	HLD Luvo
k_{19}	HNC Saugzug

Index	Komponentenname
k_{20}	HQA Elektrofilter
k_{21}	HNA Rauchgas-Leerzug
k_{22}	HNA Reingassystem
k_{23}	HND+HNG RVS-System
k_{24}	HTD Rauchgaswäsche
k_{25}	HTF Absorptionskreisläufe
k_{26}	HTL Gips-,Feinteilausschleusung
k_{27}	LAA Entgas/Speisewasserbehälter
k_{28}	LAB Speisewasser-Leitungssystem
k_{29}	LAC ≤ 24 E-Speisepumpen
k_{30}	LAC ≥ 30 T-Speisepumpensystem
k_{31}	LAD+LCH Vorwärmung
k_{32}	LAE HD-Einspritzkühler
k_{33}	LAF MD-Einspritzkühler
k_{34}	LBA FD(Leitung,Schieber),HD-Absperr
k_{35}	LBB Heiße Schiene+ZÜ-Sicherheitsv
k_{36}	LBC Kaltes ZÜ-Leitungssystem
k_{37}	LBF HD-Reduzierventile
k_{38}	LBQ Anzapfleitungen HD
k_{39}	LBS Anzapfleitungen ND
k_{40}	LCA Hauptkondensat-Leitungen
k_{41}	LCB Hauptkondensat-Pumpen
k_{42}	LCC ND-Vorwärmung
k_{43}	MAA HD-Turbine+Ventile
k_{44}	MAB MD-Turbine+Ventile
k_{45}	MAC ND-Turbine
k_{46}	MAD+MKD Gesamtlagerung
k_{47}	MAG Kondensationsanlage
k_{48}	MAJ Stopfbuchs-/Evakuierungssyst
k_{49}	MAK Rotordrehvorrichtung
k_{50}	MAN ND-Umleitstationen
k_{51}	MAX Turbinenregelung
k_{52}	MKA Generator
k_{53}	MKC Betriebserregung
k_{54}	PAB Kühlwasserleitungssystem

Index	Komponentenname
k_{55}	PAC Kühlwasserhauptpumpen
k_{56}	CT* 0*/1* Gebertechnik Temperatur
k_{57}	CP* 0*/1* Gebertechnik Druck
k_{58}	CF* 0*/1*/CL0*/1* Menge/Stand
k_{59}	CQ* 0*/1* Geber Analysenmessung
k_{60}	CE* 0*/1*/CY0*/1* Geber elektrisch
k_{61}	CD* 0*/1* AggregatschlkompC(Rest)
k_{62}	AMD MD-Armaturen
k_{63}	AHD HD-Armaturen
k_{64}	AAL Armaturen allgemein
k_{65}	PAL Pumpen allgemein
k_{66}	Anlagentechnik
k_{67}	Fehlbedienung

A.2 Optimierungsverlauf "1 / 2 / 10"-Jahresplan

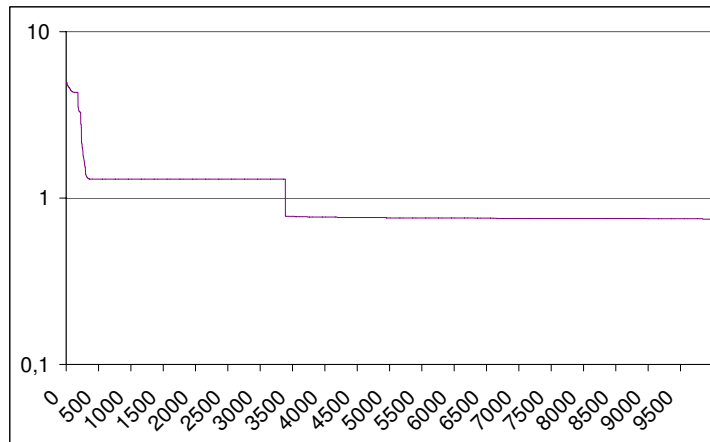


Abbildung A.1: Ein Optimierungsverlauf bei dem am Ende ein "1 / 2 / 10"-Jahresplan herauskam. (Aufgetragen sind die logarithmisch normierten Gebrauchskosten über den Generationen.)

Generation	p_1	p_2	p_3	p_4	p_5	k_0	k_1	k_2	k_3	k_4	k_5	k_6	k_7
0	1	9	41	41	41	2	3	2	1	3	3	3	3
3	1	7	41	41	41	2	3	2	1	3	3	3	3
5	1	8	41	41	41	2	3	2	1	3	3	3	3
10	1	8	41	41	41	2	3	2	1	3	3	3	3
14	1	8	41	41	41	2	3	2	1	3	3	3	3
16	1	6	41	41	41	2	3	3	1	3	3	3	3
17	1	8	41	41	41	2	3	3	1	3	3	3	3
18	1	10	41	41	41	2	3	2	1	3	3	3	3
23	1	9	41	41	41	2	3	2	1	3	3	3	3
31	1	9	41	41	41	2	3	3	1	3	3	3	3
33	1	10	41	41	41	2	3	2	1	3	3	3	3
35	1	9	41	41	41	2	3	2	1	3	3	3	3
37	1	9	41	41	41	2	3	2	1	3	3	3	3
48	1	10	41	41	41	2	3	3	1	3	3	3	3
51	1	9	41	41	41	2	3	3	1	3	3	3	3
57	1	7	41	41	41	2	3	2	1	3	3	3	3
63	1	9	41	41	41	2	3	3	1	3	3	3	3
67	1	7	41	41	41	2	3	3	1	3	3	3	3
73	1	8	41	41	41	2	3	3	1	3	3	3	3
76	1	9	41	41	41	2	3	3	1	3	3	3	3
77	1	7	41	41	41	2	3	3	1	3	3	3	3
80	1	9	41	41	41	2	3	3	1	3	3	3	3
85	1	7	41	41	41	2	3	3	1	3	3	3	3
87	1	7	41	41	41	2	3	3	1	3	3	3	3
88	1	9	41	41	41	2	3	3	1	3	3	3	3
90	1	7	41	41	41	2	3	3	1	3	3	3	3
95	1	7	41	41	41	2	3	3	1	3	3	3	3
109	1	7	41	41	41	2	3	3	1	3	3	3	3
115	1	7	41	41	41	2	3	3	1	3	3	3	3
122	1	7	41	41	41	2	3	3	1	3	3	3	3
128	1	7	41	41	41	2	3	3	1	3	3	3	3
135	1	7	41	41	41	2	3	3	1	3	3	3	3
182	1	8	41	41	41	2	3	3	2	3	3	3	3
188	1	8	41	41	41	2	3	3	2	3	3	3	3
190	2	8	41	41	41	2	3	3	2	3	3	3	3

Generation	p_1	p_2	p_3	p_4	p_5	k_0	k_1	k_2	k_3	k_4	k_5	k_6	k_7
193	1	8	41	41	41	2	3	3	2	3	3	3	3
194	2	8	41	41	41	2	3	3	2	3	3	3	3
195	2	8	41	41	41	2	3	3	2	3	3	3	3
199	2	8	41	41	41	2	3	3	2	3	3	3	3
203	2	8	41	41	41	2	3	3	2	3	3	3	3
210	2	8	41	41	41	2	3	3	2	3	3	3	3
211	2	8	41	41	41	2	3	3	2	3	3	3	3
214	2	8	41	41	41	2	3	3	2	3	3	3	3
221	2	8	41	41	41	2	3	3	2	3	3	3	3
222	2	8	41	41	41	2	3	3	2	3	3	3	3
224	1	8	13	41	41	2	4	4	2	4	4	4	4
233	1	8	13	41	41	2	4	4	2	4	4	4	4
235	2	8	24	41	41	2	4	3	2	4	4	4	4
236	1	8	24	41	41	2	4	4	2	4	4	4	4
237	2	8	24	41	41	2	4	3	2	4	4	4	4
243	2	8	24	41	41	2	4	3	2	4	4	4	4
246	2	8	24	41	41	2	4	3	2	4	4	4	4
249	2	8	24	41	41	2	4	3	2	4	4	4	4
254	2	8	24	41	41	2	4	3	2	4	4	4	4
256	1	8	16	41	41	2	4	3	2	4	4	4	4
259	1	8	16	41	41	2	4	3	2	4	4	4	4
260	2	8	16	41	41	2	4	3	2	4	4	4	4
262	2	8	16	41	41	2	4	3	2	4	4	4	4
264	2	8	16	41	41	2	4	3	2	4	4	4	4
265	2	8	16	41	41	2	4	3	2	4	4	4	4
268	2	8	16	41	41	2	4	3	2	4	4	4	4
271	2	8	16	41	41	2	4	3	2	4	4	4	4
272	2	8	16	41	41	2	4	3	2	4	4	4	4
273	1	8	16	41	41	2	4	3	2	4	4	4	4
274	2	8	16	41	41	2	4	3	2	4	4	4	4
278	2	8	16	41	41	2	4	3	2	4	4	4	4
279	2	8	16	41	41	2	4	3	2	4	4	4	4
281	2	8	16	41	41	2	4	3	2	4	4	4	4
284	2	8	16	41	41	2	4	3	2	4	4	4	4
288	2	8	16	41	41	2	4	3	2	4	4	4	4

Generation	p_1	p_2	p_3	p_4	p_5	k_0	k_1	k_2	k_3	k_4	k_5	k_6	k_7
289	2	8	16	41	41	2	4	3	2	4	4	4	4
290	2	8	16	41	41	2	4	3	2	4	4	4	4
297	2	8	16	41	41	2	4	3	2	4	4	4	4
300	2	8	16	41	41	1	4	3	2	4	4	4	4
307	2	8	16	41	41	4	4	3	2	4	4	4	4
309	2	8	16	41	41	4	4	3	2	4	4	4	4
314	2	8	16	41	41	4	4	3	2	4	4	4	4
316	2	8	16	41	41	4	4	3	2	4	4	4	4
319	2	8	16	41	41	4	4	3	2	4	4	4	4
329	2	8	16	41	41	4	4	3	2	4	4	4	4
333	2	8	16	41	41	4	4	3	2	4	4	4	4
335	2	8	16	41	41	4	4	3	2	4	4	4	4
337	2	8	16	41	41	4	4	3	2	4	4	4	4
339	2	8	16	41	41	4	4	4	2	4	4	4	4
343	2	8	16	41	41	3	4	4	2	4	4	4	4
347	2	8	16	41	41	4	4	4	2	4	4	4	4
348	2	8	16	41	41	4	4	4	2	4	4	4	4
349	2	8	16	41	41	3	4	4	2	4	4	4	4
350	2	8	16	41	41	4	4	4	2	4	4	4	4
357	2	8	16	41	41	4	4	4	2	4	4	4	4
360	2	8	16	41	41	3	4	4	2	4	4	4	4
361	2	8	16	41	41	4	4	4	2	4	4	4	4
363	2	8	16	41	41	4	4	4	2	4	4	4	4
370	2	8	16	41	41	3	4	4	2	4	4	4	4
3389	1	2	8	41	41	4	4	4	2	4	4	4	4
3541	1	2	8	41	41	4	4	4	2	4	4	4	4
3730	1	2	8	41	41	4	4	4	2	4	4	4	4
4061	1	2	8	41	41	3	4	4	2	4	4	4	4
4192	1	2	10	41	41	4	4	4	2	4	4	4	4
4947	1	2	10	41	41	4	4	4	2	4	4	4	4
6296	1	2	10	41	41	3	4	4	2	4	4	4	4
6584	1	2	10	41	41	3	4	4	2	4	4	4	4
6655	1	2	10	41	41	3	4	4	2	4	4	4	4
8977	1	2	10	41	41	3	4	4	2	4	4	4	4
9745	1	2	10	41	41	3	4	4	2	4	4	4	4

Generation	p_1	p_2	p_3	p_4	p_5	k_0	k_1	k_2	k_3	k_4	k_5	k_6	k_7
9845	1	2	10	41	41	4	4	4	2	4	4	4	4

Generation	k_8	k_9	k_{10}	k_{11}	k_{12}	k_{13}	k_{14}	k_{15}	k_{16}	k_{17}	k_{18}	k_{19}	k_{20}
0	3	3	3	3	2	3	3	2	3	1	3	2	3
3	3	3	3	3	2	3	3	2	3	1	3	2	3
5	3	3	3	3	1	3	3	2	3	1	3	2	3
10	3	3	3	3	1	3	3	2	3	1	3	2	3
14	3	3	3	3	2	3	3	2	3	1	3	2	3
16	3	3	3	3	1	3	3	3	3	1	3	1	3
17	3	3	3	3	2	3	3	3	3	1	3	2	3
18	3	3	3	3	2	3	3	3	3	1	3	1	3
23	3	3	3	3	1	3	3	2	3	1	3	2	3
31	3	3	3	3	2	3	3	2	3	1	3	1	3
33	3	3	3	3	1	3	3	2	3	1	3	2	3
35	3	3	3	3	1	3	3	2	3	1	3	2	3
37	3	3	3	3	1	3	3	2	3	1	3	2	3
48	3	3	3	3	1	3	3	3	3	1	3	2	3
51	3	3	3	3	1	3	3	3	3	1	3	1	3
57	3	3	3	3	1	3	3	3	3	1	3	1	3
63	3	3	3	3	1	3	3	3	3	1	3	2	3
67	3	3	3	3	1	3	3	3	3	1	3	1	3
73	3	3	3	3	1	3	3	3	3	1	3	2	3
76	3	3	3	3	1	3	3	3	3	1	3	2	3
77	3	3	3	3	1	3	3	3	3	1	3	1	3
80	3	3	3	3	1	3	3	3	3	1	3	2	3
85	3	3	3	3	1	3	3	3	3	1	3	1	3
87	3	3	3	3	1	3	3	3	3	1	3	2	3
88	3	3	3	3	1	3	3	3	3	1	3	2	3
90	3	3	3	3	1	3	3	3	3	1	3	2	3
95	3	3	3	3	1	3	3	3	3	1	3	2	3
109	3	3	3	3	1	3	3	3	3	1	3	2	3
115	3	3	3	3	1	3	3	3	3	1	3	2	3
122	3	3	3	3	1	3	3	3	3	1	3	2	3
128	3	3	3	3	1	3	3	3	3	1	3	2	3
135	3	3	3	3	1	3	3	3	3	1	3	2	3
182	3	3	3	3	1	3	3	3	3	1	3	2	3
188	3	3	3	3	1	3	3	3	3	1	3	2	3
190	3	3	3	3	1	3	3	2	3	3	3	1	3

Generation	k_8	k_9	k_{10}	k_{11}	k_{12}	k_{13}	k_{14}	k_{15}	k_{16}	k_{17}	k_{18}	k_{19}	k_{20}
193	3	3	3	3	1	3	3	3	3	1	3	2	3
194	3	3	3	3	1	3	3	3	3	1	3	1	3
195	3	3	3	3	1	3	3	3	3	1	3	1	3
199	3	3	3	3	1	3	3	3	3	1	3	1	3
203	3	3	3	3	1	3	3	3	3	1	3	1	3
210	3	3	3	3	1	3	3	3	3	1	3	1	3
211	3	3	3	3	1	3	3	3	3	1	3	1	3
214	3	3	3	3	1	3	3	3	3	1	3	1	3
221	3	3	3	3	1	3	3	3	3	1	3	1	3
222	3	3	3	3	1	3	3	3	3	1	3	1	3
224	4	4	4	4	1	4	4	4	4	1	4	2	4
233	4	4	4	4	1	4	4	4	4	1	4	2	4
235	4	4	4	4	1	4	4	4	4	1	4	1	4
236	4	4	4	4	1	4	4	4	4	1	4	2	4
237	4	4	4	4	1	4	4	4	4	1	4	1	4
243	4	4	4	4	1	4	4	4	4	1	4	1	4
246	4	4	4	4	1	4	4	4	4	1	4	1	4
249	4	4	4	4	1	4	4	4	4	1	4	1	4
254	4	4	4	4	1	4	4	4	4	1	4	1	4
256	4	4	4	4	1	4	4	4	4	1	4	2	4
259	4	4	4	4	1	4	4	4	4	1	4	2	4
260	4	4	4	4	1	4	4	4	4	1	4	1	4
262	4	4	4	4	1	4	4	4	4	1	4	1	4
264	4	4	4	4	1	4	4	4	4	1	4	1	4
265	4	4	4	4	1	4	4	4	4	1	4	1	4
268	4	4	4	4	1	4	4	4	4	1	4	1	4
271	4	4	4	4	1	4	4	4	4	1	4	1	4
272	4	4	4	4	1	4	4	4	4	1	4	1	4
273	4	4	4	4	1	4	4	4	4	1	4	2	4
274	4	4	4	4	1	4	4	4	4	1	4	1	4
278	4	4	4	4	1	4	4	4	4	1	4	1	4
279	4	4	4	4	1	4	4	4	4	4	4	1	4
281	4	4	4	4	1	4	4	3	4	1	4	1	4
284	4	4	4	4	1	4	4	3	4	1	4	1	4
288	4	4	4	4	1	4	4	3	4	1	4	1	4

Generation	k_8	k_9	k_{10}	k_{11}	k_{12}	k_{13}	k_{14}	k_{15}	k_{16}	k_{17}	k_{18}	k_{19}	k_{20}
289	4	4	4	4	1	4	4	4	4	1	4	1	4
290	4	4	4	4	1	4	4	4	4	1	4	1	4
297	4	4	4	4	1	4	4	4	4	1	4	1	4
300	4	4	4	4	1	4	4	4	4	1	4	1	4
307	4	4	4	4	1	4	4	4	4	1	4	1	4
309	4	4	4	4	1	4	4	4	4	1	4	1	4
314	4	4	4	4	1	4	4	4	4	1	4	1	4
316	4	4	4	4	1	4	4	4	4	1	4	1	4
319	4	4	4	4	1	4	4	4	4	1	4	1	4
329	4	4	4	4	1	4	4	4	4	1	4	1	4
333	4	4	4	4	1	4	4	4	4	1	4	1	4
335	4	4	4	4	1	4	4	4	4	1	4	1	4
337	4	4	4	4	1	4	4	4	4	1	4	1	4
339	4	4	4	4	1	4	4	4	4	1	4	1	4
343	4	4	4	4	1	4	4	4	4	1	4	1	4
347	4	4	4	4	1	4	4	4	4	1	4	3	4
348	4	4	4	4	1	4	4	4	4	1	4	1	4
349	4	4	4	4	1	4	4	4	4	1	4	1	4
350	4	4	4	4	1	4	4	4	4	1	4	1	4
357	4	4	4	4	1	4	4	4	4	1	4	1	4
360	4	4	4	4	1	4	4	4	4	1	4	1	4
361	4	4	4	4	1	4	4	4	4	1	4	1	4
363	4	4	4	4	1	4	4	4	4	1	4	1	4
370	4	4	4	4	1	4	4	4	4	1	4	1	4
3389	4	4	4	4	1	4	4	4	4	1	4	2	4
3541	4	4	4	4	1	4	4	4	4	1	4	4	4
3730	4	4	4	4	1	4	4	4	4	1	4	2	4
4061	4	4	4	4	1	4	4	4	4	1	4	2	4
4192	4	4	4	4	1	4	4	4	4	1	4	2	4
4947	4	4	4	4	1	4	4	4	4	1	4	2	4
6296	4	4	4	4	1	4	4	4	4	1	4	2	4
6584	4	4	4	4	1	4	4	4	4	1	4	4	4
6655	4	4	4	4	1	4	4	4	4	1	4	4	4
8977	4	4	4	4	1	4	4	4	4	1	4	3	4
9745	4	4	4	4	1	4	4	4	4	1	4	1	4

Generation	k_8	k_9	k_{10}	k_{11}	k_{12}	k_{13}	k_{14}	k_{15}	k_{16}	k_{17}	k_{18}	k_{19}	k_{20}
9845	4	4	4	4	1	4	4	4	4	1	4	1	4

Generation	k_{21}	k_{22}	k_{23}	k_{24}	k_{25}	k_{26}	k_{27}	k_{28}	k_{29}	k_{30}	k_{31}	k_{32}	k_{33}
0	3	3	1	2	3	3	3	3	3	3	2	3	3
3	3	3	1	2	3	3	3	3	3	3	2	2	2
5	3	3	1	2	3	3	3	3	3	3	2	2	2
10	3	3	1	2	3	3	3	3	3	3	2	2	2
14	3	3	1	2	3	3	3	3	3	3	2	2	2
16	3	3	1	2	3	3	3	3	3	3	2	2	3
17	3	3	1	2	3	3	3	3	3	3	2	2	2
18	3	3	1	2	3	3	3	3	3	3	2	3	3
23	3	3	1	2	3	3	3	3	3	3	2	3	3
31	3	3	1	2	3	3	3	3	3	3	2	3	3
33	3	3	1	2	3	3	3	3	3	3	2	3	3
35	3	3	1	2	3	3	3	3	3	3	2	3	3
37	3	3	1	2	3	3	3	3	3	3	2	3	3
48	3	3	1	2	3	3	3	3	3	3	2	3	3
51	3	3	1	2	3	3	3	3	3	3	2	3	3
57	3	3	1	2	3	3	3	3	3	3	2	2	3
63	3	3	1	2	3	3	3	3	3	3	2	3	3
67	3	3	1	2	3	3	3	3	3	3	2	2	2
73	3	3	1	2	3	3	3	3	3	3	2	2	2
76	3	3	1	2	3	3	3	3	3	3	2	3	3
77	3	3	1	2	3	3	3	3	3	3	2	2	2
80	3	3	1	2	3	3	3	3	3	3	2	3	3
85	3	3	1	2	3	3	3	3	3	3	2	2	2
87	3	3	1	2	3	3	3	3	3	3	2	2	2
88	3	3	1	2	3	3	3	3	3	3	2	3	3
90	3	3	1	2	3	3	3	3	3	3	2	2	2
95	3	3	1	2	3	3	3	3	3	3	2	2	2
109	3	3	1	3	3	3	3	3	3	3	2	2	2
115	3	3	1	2	3	3	3	3	3	3	2	3	2
122	3	3	1	2	3	3	3	3	3	3	2	2	3
128	3	3	1	2	3	3	3	3	3	3	2	3	3
135	3	3	1	2	3	3	3	3	3	3	2	3	3
182	3	3	1	2	3	3	3	3	3	3	2	2	2
188	3	3	1	2	3	3	3	3	3	3	2	2	2
190	3	3	1	2	3	1	3	3	3	3	2	2	2

Generation	k_{21}	k_{22}	k_{23}	k_{24}	k_{25}	k_{26}	k_{27}	k_{28}	k_{29}	k_{30}	k_{31}	k_{32}	k_{33}
193	3	3	1	2	3	3	3	3	3	3	2	2	2
194	3	3	1	2	3	3	3	3	3	3	2	2	2
195	3	3	1	2	3	3	3	3	3	3	2	2	2
199	3	3	1	2	3	3	3	3	3	3	2	2	2
203	3	3	1	2	3	3	3	3	3	3	2	3	2
210	3	3	1	2	3	3	3	3	3	3	2	2	2
211	3	3	1	2	3	3	3	3	3	3	2	3	2
214	3	3	1	2	3	3	3	3	3	3	2	2	2
221	3	3	1	2	3	3	3	3	3	3	2	2	2
222	3	3	1	2	3	3	3	3	3	3	2	3	2
224	4	4	1	4	4	4	4	4	4	4	2	2	2
233	4	4	1	4	4	4	4	4	4	4	2	4	2
235	4	4	1	2	4	4	4	4	4	4	2	2	2
236	4	4	1	2	4	4	4	4	4	4	2	2	2
237	4	4	1	1	4	4	4	4	4	4	2	2	2
243	4	4	1	2	4	4	4	4	4	4	2	4	2
246	4	4	1	2	4	4	4	4	4	4	2	4	4
249	4	4	1	2	4	4	4	4	4	4	4	4	4
254	4	4	1	1	4	4	4	4	4	4	4	4	4
256	4	4	1	1	4	4	4	4	4	4	2	4	2
259	4	4	1	1	4	4	4	4	4	4	2	4	4
260	4	4	1	2	4	4	4	4	4	4	2	4	4
262	4	4	1	2	4	4	4	4	4	4	2	4	4
264	4	4	1	1	4	4	4	4	4	4	2	4	4
265	4	4	1	1	4	4	4	4	4	4	2	4	4
268	4	4	1	4	4	4	4	4	4	4	2	4	1
271	4	4	1	4	4	4	4	4	4	4	2	4	4
272	4	4	1	4	4	4	4	4	4	4	2	4	4
273	4	4	1	1	4	1	4	4	4	4	2	4	4
274	4	4	1	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4
278	4	4	1	4	4	1	4	4	4	4	2	4	4
279	4	4	1	4	4	1	4	4	4	4	2	4	4
281	4	4	1	4	4	1	4	4	4	4	2	4	4
284	4	4	1	4	4	1	4	4	4	4	4	4	4
288	4	4	1	4	4	1	4	4	4	4	4	4	4

Generation	k_{34}	k_{35}	k_{36}	k_{37}	k_{38}	k_{39}	k_{40}	k_{41}	k_{42}	k_{43}	k_{44}	k_{45}	k_{46}
0	3	3	2	2	3	3	3	3	3	2	2	3	2
3	3	3	2	2	3	3	3	3	3	2	2	3	2
5	3	3	2	2	3	3	3	3	3	2	2	3	2
10	3	3	2	2	3	3	3	3	3	2	2	3	2
14	3	3	2	2	3	3	3	3	3	2	2	3	2
16	3	3	2	2	3	3	3	3	3	2	2	3	3
17	3	3	2	2	3	3	3	3	3	2	2	3	2
18	3	3	2	2	3	3	3	3	3	2	2	3	2
23	3	3	2	2	3	3	3	3	3	2	2	3	2
31	3	3	2	2	3	3	3	3	3	2	2	3	2
33	3	3	2	2	3	3	3	3	3	2	2	3	2
35	3	3	2	2	3	3	3	3	3	2	2	3	2
37	3	3	2	2	3	3	3	3	3	2	2	3	2
48	3	3	2	2	3	3	3	3	3	2	2	3	2
51	3	3	2	2	3	3	3	3	3	2	2	3	2
57	3	3	2	2	3	3	3	3	3	2	2	3	2
63	3	3	2	2	3	3	3	3	3	2	2	3	2
67	3	3	2	2	3	3	3	3	3	2	2	3	2
73	3	3	2	2	3	3	3	3	3	2	2	3	2
76	3	3	2	2	3	3	3	3	3	2	2	3	2
77	3	3	2	2	3	3	3	3	3	2	2	3	2
80	3	3	2	2	3	3	3	3	3	2	2	3	2
85	3	3	2	2	3	3	3	3	3	2	2	3	2
87	3	3	2	2	3	3	3	3	3	2	2	3	2
88	3	3	2	2	3	3	3	3	3	2	2	3	2
90	3	3	2	2	3	3	3	3	3	2	2	3	2
95	3	3	2	2	3	3	3	3	3	2	2	3	2
109	3	3	2	3	3	3	3	3	3	2	2	3	2
115	3	3	2	3	3	3	3	3	3	2	2	3	2
122	3	3	2	2	3	3	3	3	3	2	2	3	2
128	3	3	2	2	3	3	3	3	3	2	2	3	2
135	3	3	2	3	3	3	3	3	3	2	2	3	2
182	3	3	3	3	3	3	3	3	3	2	2	3	2
188	3	3	3	3	3	3	3	3	3	2	2	3	2
190	3	3	3	3	3	3	3	3	3	2	2	3	2

Generation	k_{34}	k_{35}	k_{36}	k_{37}	k_{38}	k_{39}	k_{40}	k_{41}	k_{42}	k_{43}	k_{44}	k_{45}	k_{46}
193	3	3	3	3	3	3	3	3	3	2	2	3	2
194	3	3	1	3	3	3	3	3	3	2	2	3	2
195	3	3	2	3	3	3	3	3	3	2	2	3	2
199	3	3	2	3	3	3	3	3	3	2	2	3	2
203	3	3	2	3	3	3	3	3	3	2	2	3	2
210	3	3	2	3	3	3	3	3	3	2	2	3	2
211	3	3	2	3	3	3	3	3	3	2	2	3	2
214	3	3	2	1	3	3	3	3	3	2	2	3	2
221	3	3	2	1	3	3	3	3	3	2	2	3	2
222	3	3	2	1	3	3	3	3	3	2	2	3	2
224	4	4	4	2	4	4	4	4	4	2	2	4	3
233	4	4	4	2	4	4	4	4	4	2	2	4	3
235	4	4	2	2	4	4	4	4	4	2	2	4	2
236	4	4	3	4	4	4	4	4	4	2	2	4	4
237	4	4	1	2	4	4	4	4	4	2	2	4	2
243	4	4	2	2	4	4	4	4	4	2	2	4	2
246	4	4	2	2	4	4	4	4	4	2	2	4	2
249	4	4	2	2	4	4	4	4	4	2	2	4	2
254	4	4	2	2	4	4	4	4	4	2	2	4	2
256	4	4	2	1	4	4	4	4	4	2	2	4	4
259	4	4	2	1	4	4	4	4	4	2	2	4	4
260	4	4	2	2	4	4	4	4	4	2	2	4	2
262	4	4	2	2	4	4	4	4	4	2	2	4	2
264	4	4	2	1	4	4	4	4	4	2	2	4	2
265	4	4	2	2	4	4	4	4	4	2	2	4	2
268	4	4	2	2	4	4	4	4	4	2	2	4	2
271	4	4	2	1	4	4	4	4	4	2	2	4	2
272	4	4	2	1	4	4	4	4	4	2	2	4	2
273	4	4	4	1	4	4	4	4	4	2	2	4	2
274	4	4	1	1	4	4	4	4	4	2	2	4	2
278	4	4	2	1	4	4	4	4	4	2	2	4	2
279	4	4	2	1	4	4	4	4	4	2	2	4	2
281	4	4	4	1	4	4	4	4	4	2	2	4	2
284	4	4	4	1	4	4	4	4	4	2	2	4	2
288	4	4	1	1	4	4	4	4	4	2	2	4	2

Generation	k_{34}	k_{35}	k_{36}	k_{37}	k_{38}	k_{39}	k_{40}	k_{41}	k_{42}	k_{43}	k_{44}	k_{45}	k_{46}
289	4	4	4	1	4	4	4	4	4	2	2	4	2
290	4	4	1	1	4	4	4	4	4	2	2	4	2
297	4	4	1	1	4	4	4	4	4	2	2	4	2
300	4	4	1	1	4	4	4	4	4	2	2	4	2
307	4	4	1	1	4	4	4	4	4	2	2	4	2
309	4	4	1	1	4	4	4	4	4	2	2	4	2
314	4	4	3	1	4	4	4	4	4	2	2	4	2
316	4	4	1	1	4	4	4	4	4	2	2	4	2
319	4	4	1	1	4	4	4	4	4	2	2	4	2
329	4	4	1	1	4	4	4	4	4	2	2	4	2
333	4	4	1	4	4	4	4	4	4	2	2	4	2
335	4	4	1	1	4	4	4	4	4	2	2	4	2
337	4	4	3	1	4	4	4	4	4	2	2	4	2
339	4	4	3	1	4	4	4	4	4	2	2	4	2
343	4	4	3	1	4	4	4	4	4	2	2	4	2
347	4	4	3	1	4	4	4	4	4	2	2	4	2
348	4	4	3	1	4	4	4	4	4	2	2	4	2
349	4	4	3	1	4	4	4	4	4	2	2	4	2
350	4	4	3	1	4	4	4	4	4	2	2	4	2
357	4	4	3	1	4	4	4	4	4	2	2	4	2
360	4	4	3	1	4	4	4	4	4	2	2	4	2
361	4	4	3	1	4	4	4	4	4	2	2	4	2
363	4	4	3	1	4	4	4	4	4	2	2	4	2
370	4	4	3	1	4	4	4	4	4	2	2	4	2
3389	4	4	4	1	4	4	4	4	4	3	3	4	3
3541	4	4	4	1	4	4	4	4	4	3	3	4	3
3730	4	4	4	1	4	4	4	4	4	3	3	4	3
4061	4	4	4	1	4	4	4	4	4	3	3	4	3
4192	4	4	3	1	4	4	4	4	4	3	3	4	3
4947	4	4	3	1	4	4	4	4	4	3	3	4	3
6296	4	4	3	1	4	4	4	4	4	3	3	4	3
6584	4	4	3	1	4	4	4	4	4	3	3	4	3
6655	4	4	3	1	4	4	4	4	4	3	3	4	3
8977	4	4	3	1	4	4	4	4	4	3	3	4	3
9745	4	4	3	1	4	4	4	4	4	3	3	4	3

Generation	k_{34}	k_{35}	k_{36}	k_{37}	k_{38}	k_{39}	k_{40}	k_{41}	k_{42}	k_{43}	k_{44}	k_{45}	k_{46}
9845	4	4	3	1	4	4	4	4	4	3	3	4	3

Generation	k_{47}	k_{48}	k_{49}	k_{50}	k_{51}	k_{52}	k_{53}	k_{54}	k_{55}	k_{56}	k_{57}	k_{58}	k_{59}
0	3	3	3	2	2	1	2	3	1	1	1	1	1
3	3	3	3	1	2	1	2	3	1	2	2	1	1
5	3	3	3	2	2	2	2	3	1	2	2	1	2
10	3	3	3	2	2	1	2	3	1	2	2	1	1
14	3	3	3	2	2	1	2	3	1	1	2	2	2
16	3	3	2	2	2	1	2	3	2	2	1	2	2
17	3	3	3	2	1	1	2	3	1	1	1	2	1
18	3	3	3	2	2	1	2	3	1	2	2	1	2
23	3	3	3	1	2	1	2	3	1	2	2	1	1
31	3	3	3	1	3	1	2	3	1	2	1	1	2
33	3	3	3	2	3	1	2	3	1	2	1	2	1
35	3	3	3	2	3	1	2	3	1	1	2	1	1
37	3	3	3	2	3	1	2	3	1	2	2	1	1
48	3	3	3	2	2	1	2	3	1	1	1	1	2
51	3	3	3	2	2	1	2	3	1	1	2	2	2
57	3	3	1	2	2	1	2	3	1	2	2	2	1
63	3	3	3	2	3	1	2	3	1	2	2	1	1
67	3	3	3	2	3	1	2	3	1	2	2	2	2
73	3	3	1	2	3	1	2	3	1	2	2	1	1
76	3	3	1	2	3	1	2	3	1	2	2	2	2
77	3	3	1	2	3	1	2	3	1	2	1	1	2
80	3	3	1	2	3	1	2	3	1	3	2	1	2
85	3	3	1	2	3	1	2	3	1	2	2	1	3
87	3	3	3	2	3	1	2	3	1	3	2	2	2
88	3	3	1	2	3	1	2	3	1	3	2	2	2
90	3	3	1	1	3	1	2	3	1	3	2	1	2
95	3	3	1	2	3	1	2	3	1	3	3	1	2
109	3	3	1	2	3	1	2	3	1	3	2	2	2
115	3	3	1	2	3	1	2	3	1	3	2	3	2
122	3	3	1	2	3	1	2	3	1	3	3	2	2
128	3	3	1	2	3	1	2	3	1	3	3	2	2
135	3	3	1	2	3	1	2	3	1	3	3	2	2
182	3	3	1	2	3	1	2	3	1	3	3	2	2
188	3	3	1	2	3	1	2	3	1	3	2	2	2
190	3	3	1	1	2	1	2	3	1	3	1	1	1

Generation	k_{47}	k_{48}	k_{49}	k_{50}	k_{51}	k_{52}	k_{53}	k_{54}	k_{55}	k_{56}	k_{57}	k_{58}	k_{59}
193	3	3	1	2	3	1	2	3	1	2	2	2	2
194	3	3	1	1	3	1	2	3	1	3	1	1	1
195	3	3	1	1	3	1	2	3	1	3	1	1	1
199	3	3	1	1	3	1	2	3	1	2	1	1	1
203	3	3	1	1	3	1	2	3	1	2	1	1	1
210	3	3	1	1	3	1	1	3	1	2	2	1	1
211	3	3	1	1	3	1	1	3	1	2	2	1	1
214	3	3	1	1	3	1	1	3	1	2	2	1	1
221	3	3	1	1	3	1	2	3	1	2	2	1	1
222	3	3	1	1	3	1	2	3	1	2	2	1	1
224	4	4	1	1	2	4	2	4	1	2	2	2	2
233	4	4	1	1	2	4	2	4	1	2	2	2	2
235	4	4	1	1	4	1	2	4	1	1	2	1	1
236	4	4	1	1	2	2	2	4	1	2	2	2	2
237	4	4	1	1	1	1	2	4	1	2	2	1	1
243	4	4	1	1	4	1	1	4	1	2	2	1	1
246	4	4	1	1	4	1	1	4	1	2	2	1	1
249	4	4	1	1	4	1	1	4	1	2	2	1	1
254	4	4	1	1	4	1	1	4	1	2	2	1	1
256	4	4	1	1	2	2	2	4	1	2	2	2	2
259	4	4	1	1	2	2	2	4	1	2	2	2	2
260	4	4	1	1	4	1	1	4	1	2	2	1	1
262	4	4	1	1	4	1	1	4	1	2	2	1	1
264	4	4	1	1	4	1	2	4	1	2	2	1	1
265	4	4	1	1	4	1	2	4	1	2	2	1	1
268	4	4	1	1	4	1	2	4	1	2	2	1	1
271	4	4	1	1	1	1	2	4	1	2	2	1	1
272	4	4	1	1	1	1	2	4	1	2	2	1	1
273	4	4	1	1	4	2	2	4	1	2	2	2	2
274	4	4	1	1	1	1	2	4	1	2	2	1	1
278	4	4	1	1	4	1	2	4	1	2	2	1	1
279	4	4	1	1	1	1	2	4	1	2	2	1	1
281	4	4	1	1	1	1	2	4	1	2	2	1	1
284	4	4	1	1	1	1	2	4	1	2	2	1	1
288	4	4	1	1	1	1	2	4	1	1	2	1	1

Generation	k_{47}	k_{48}	k_{49}	k_{50}	k_{51}	k_{52}	k_{53}	k_{54}	k_{55}	k_{56}	k_{57}	k_{58}	k_{59}
289	4	4	1	1	1	1	2	4	1	2	2	1	1
290	4	4	1	1	1	1	1	4	1	2	2	1	1
297	4	4	1	1	1	1	1	4	1	2	2	1	1
300	4	4	1	1	1	1	1	4	1	2	2	1	1
307	4	4	1	1	1	1	1	4	1	2	2	1	1
309	4	4	1	1	1	1	1	4	1	2	2	1	1
314	4	4	1	1	1	1	1	4	1	2	2	1	1
316	4	4	1	1	1	1	1	4	1	2	2	1	1
319	4	4	1	1	1	1	1	4	1	1	2	1	1
329	4	4	1	1	1	1	1	4	1	1	1	1	1
333	4	4	1	1	1	1	1	4	1	1	1	1	1
335	4	4	1	1	1	1	1	4	1	1	1	1	1
337	4	4	1	1	1	1	1	4	1	1	1	1	1
339	4	4	1	1	1	1	1	4	1	1	1	1	1
343	4	4	1	1	1	1	1	4	1	1	1	1	1
347	4	4	1	1	1	1	1	4	1	1	1	1	1
348	4	4	1	1	1	1	1	4	1	1	1	1	1
349	4	4	1	1	1	1	1	4	1	1	1	1	1
350	4	4	1	1	4	1	1	4	1	1	1	1	1
357	4	4	1	1	4	1	1	4	1	1	1	1	1
360	4	4	1	1	4	1	1	4	1	1	1	1	1
361	4	4	1	1	4	1	1	4	1	1	1	1	1
363	4	4	1	1	4	1	1	4	1	1	1	1	1
370	4	4	1	1	4	1	1	4	1	1	1	1	1
3389	4	4	1	1	4	2	2	4	1	2	2	2	2
3541	4	4	1	1	4	2	2	4	1	2	2	2	2
3730	4	4	1	1	4	2	2	4	1	2	2	2	2
4061	4	4	1	1	4	2	2	4	1	2	2	2	2
4192	4	4	1	1	4	2	2	4	1	2	2	2	2
4947	4	4	1	1	4	2	3	4	1	2	2	2	2
6296	4	4	1	1	4	2	3	4	1	2	2	2	2
6584	4	4	4	1	4	2	3	4	1	2	2	2	2
6655	4	4	1	1	4	2	3	4	1	2	2	2	2
8977	4	4	1	1	4	2	3	4	1	2	2	2	2
9745	4	4	1	1	4	2	3	4	1	2	2	2	2

Generation	k_{47}	k_{48}	k_{49}	k_{50}	k_{51}	k_{52}	k_{53}	k_{54}	k_{55}	k_{56}	k_{57}	k_{58}	k_{59}
9845	4	4	1	1	4	2	2	4	1	2	2	2	2

Generation	k_{60}	k_{61}	k_{62}	k_{63}	k_{64}	k_{65}	k_{66}	k_{67}	GK	GKIH
0	2	3	2	2	1	1	3	3	4,934403	1,713447
3	2	3	2	2	1	1	3	3	4,925564	1,680326
5	3	3	2	2	1	1	3	3	4,901482	1,674472
10	2	3	2	2	1	1	3	3	4,849931	1,716836
14	1	3	2	2	1	1	3	3	4,835012	1,709311
16	2	3	2	2	1	1	3	3	4,806954	1,648364
17	2	3	2	2	1	1	3	3	4,795747	1,658767
18	1	3	2	2	1	1	3	3	4,76912	1,687192
23	1	3	2	2	1	1	3	3	4,728756	1,697904
31	1	3	2	2	1	1	3	3	4,692395	1,635975
33	1	3	2	2	1	1	3	3	4,67825	1,697767
35	1	3	2	2	1	1	3	3	4,641933	1,666185
37	1	3	2	2	1	1	3	3	4,631647	1,658582
48	1	3	2	2	1	1	3	3	4,610168	1,678143
51	1	3	2	2	1	1	3	3	4,56497	1,62419
57	1	3	2	2	1	1	3	3	4,519326	1,500278
63	1	3	2	2	1	1	3	3	4,482157	1,598368
67	1	3	2	2	1	1	3	3	4,437476	1,559453
73	1	3	2	2	1	1	3	3	4,433392	1,490814
76	1	3	2	2	1	1	3	3	4,407948	1,465701
77	1	3	2	2	1	1	3	3	4,402311	1,456448
80	1	3	2	2	1	1	3	3	4,393788	1,447708
85	1	3	2	2	1	1	3	3	4,390014	1,422106
87	1	3	2	2	1	1	3	3	4,386198	1,53046
88	1	3	2	2	1	1	3	3	4,385113	1,440467
90	1	3	2	2	1	1	3	3	4,365381	1,422526
95	1	3	2	2	1	1	3	3	4,339256	1,39372
109	1	3	2	2	1	1	3	3	4,3314	1,407253
115	1	3	2	2	1	1	3	3	4,323607	1,383744
122	1	3	2	2	1	1	3	3	4,323576	1,383692
128	1	3	2	2	1	1	3	3	4,320425	1,380868
135	1	3	2	2	1	1	3	3	4,317449	1,378172
182	1	3	2	2	1	1	3	3	3,519331	0,040381
188	1	3	2	2	1	1	3	3	3,447872	0,040701
190	1	3	2	2	1	1	3	3	3,428437	0,082033

Generation	k_{60}	k_{61}	k_{62}	k_{63}	k_{64}	k_{65}	k_{66}	k_{67}	GK	GKIH
193	1	3	2	2	1	1	3	3	3,393536	0,041001
194	1	3	2	2	1	1	3	3	3,364498	0,070231
195	1	3	2	2	1	1	3	3	3,357604	0,069852
199	1	3	2	2	1	1	3	3	3,305161	0,070874
203	1	3	2	2	1	1	3	3	3,30498	0,070703
210	1	3	2	2	1	1	3	3	3,285639	0,060886
211	1	3	2	2	1	1	3	3	3,285508	0,060741
214	1	3	2	2	1	1	3	3	3,285338	0,061493
221	1	3	2	2	1	1	3	3	3,285323	0,061251
222	1	3	2	2	1	1	3	3	3,285178	0,0611
224	4	4	2	2	4	1	4	4	2,775938	0,389944
233	4	4	2	2	4	1	4	4	2,667161	0,389703
235	1	4	2	2	1	1	4	4	2,209979	0,46185
236	1	4	2	2	1	1	4	4	2,192436	0,418403
237	1	4	2	2	1	1	4	4	2,14005	0,454216
243	1	4	2	2	1	1	4	4	2,104012	0,449286
246	1	4	2	2	1	1	4	4	2,015423	0,448879
249	1	4	2	2	1	1	4	4	1,996387	0,448997
254	1	4	2	2	1	1	4	4	1,960206	0,451611
256	3	4	2	2	1	1	4	4	1,923914	0,302454
259	3	4	2	2	1	1	4	4	1,842714	0,302177
260	3	4	2	2	1	1	4	4	1,801855	0,323453
262	1	4	2	2	1	1	4	4	1,800118	0,32759
264	3	4	2	2	1	4	4	4	1,786915	0,328368
265	3	4	2	2	1	1	4	4	1,757988	0,325797
268	1	4	2	2	1	1	4	4	1,755953	0,328459
271	3	4	2	2	1	1	4	4	1,751722	0,324939
272	2	4	2	2	1	1	4	4	1,709168	0,325024
273	1	4	2	4	1	1	4	4	1,706177	0,307993
274	3	4	2	2	1	1	4	4	1,690207	0,325468
278	1	4	2	2	1	1	4	4	1,677205	0,328684
279	3	4	4	2	1	1	4	4	1,658655	0,337977
281	3	4	4	2	1	1	4	4	1,639228	0,33449
284	3	4	4	2	1	1	4	4	1,578309	0,334429
288	3	4	4	2	1	1	4	4	1,574748	0,346475

Generation	k_{60}	k_{61}	k_{62}	k_{63}	k_{64}	k_{65}	k_{66}	k_{67}	GK	GKIH
289	3	4	4	2	1	1	4	4	1,571264	0,332604
290	3	4	4	2	1	1	4	4	1,530537	0,331418
297	3	4	4	4	1	1	4	4	1,452784	0,343343
300	3	4	4	4	1	1	4	4	1,382953	0,343587
307	3	4	4	4	1	1	4	4	1,371324	0,342635
309	2	4	4	4	1	1	4	4	1,354423	0,34272
314	2	4	4	4	1	1	4	4	1,348771	0,343041
316	2	4	3	4	1	1	4	4	1,34099	0,3377
319	2	4	3	4	1	1	4	4	1,334658	0,351985
329	2	4	3	4	1	1	4	4	1,322364	0,370092
333	3	4	3	4	1	1	4	4	1,320402	0,368574
335	1	4	3	4	1	1	4	4	1,319287	0,374811
337	2	4	3	4	1	1	4	4	1,314832	0,369713
339	2	4	3	4	1	1	4	4	1,309562	0,368028
343	2	4	3	4	1	1	4	4	1,308805	0,368755
347	1	4	3	4	1	1	4	4	1,307157	0,37252
348	3	4	3	4	1	1	4	4	1,30659	0,367942
349	3	4	3	4	1	1	4	4	1,305833	0,368669
350	2	4	3	4	1	1	4	4	1,304875	0,36562
357	3	4	3	4	1	1	4	4	1,301903	0,365534
360	3	4	3	4	1	1	4	4	1,301007	0,36619
361	1	4	3	4	1	1	4	4	1,300999	0,370197
363	1	4	3	4	1	1	4	4	1,300869	0,370875
370	1	4	3	4	1	1	4	4	1,300004	0,371585
3389	2	4	4	4	1	1	4	4	0,776472	0,065136
3541	2	4	4	4	1	1	4	4	0,772958	0,065685
3730	2	4	4	4	1	1	4	4	0,769715	0,064132
4061	2	4	4	4	1	1	4	4	0,769446	0,064304
4192	2	4	4	4	1	1	4	4	0,764192	0,065214
4947	2	4	4	4	1	1	4	4	0,759084	0,064986
6296	2	4	4	4	1	1	4	4	0,7584	0,065154
6584	2	4	4	4	1	1	4	4	0,756882	0,066356
6655	2	4	4	4	1	1	4	4	0,754023	0,065732
8977	2	4	4	4	1	1	4	4	0,752185	0,065109
9745	2	4	4	4	1	1	4	4	0,751392	0,065304

Generation	k_{60}	k_{61}	k_{62}	k_{63}	k_{64}	k_{65}	k_{66}	k_{67}	GK	GKIH
9845	2	4	3	4	1	1	4	4	0,746253	0,063911

Generation	GKIHA	1/(1-NVFP)	1/(1-NVFA)
0	0,3657	1,031985	1,099911
3	0,368076	1,032444	1,100612
5	0,359166	1,034263	1,098779
10	0,349698	1,033486	1,095477
14	0,346295	1,033658	1,095078
16	0,350254	1,033087	1,096738
17	0,354233	1,032193	1,096409
18	0,336174	1,034119	1,093057
23	0,333513	1,032464	1,092012
31	0,335464	1,03208	1,093258
33	0,323085	1,033364	1,089479
35	0,326597	1,031718	1,090269
37	0,323085	1,032407	1,089753
48	0,321456	1,032388	1,088142
51	0,316665	1,032812	1,088237
57	0,3014	1,031864	1,0919
63	0,311136	1,031938	1,086508
67	0,308653	1,032574	1,085905
73	0,292087	1,031802	1,088907
76	0,282921	1,033385	1,087956
77	0,294017	1,030774	1,089648
80	0,281757	1,032205	1,088806
85	0,285592	1,031173	1,090283
87	0,299177	1,032383	1,085143
88	0,277962	1,033065	1,088239
90	0,285692	1,031117	1,089325
95	0,277557	1,030989	1,089507
109	0,277962	1,032123	1,087988
115	0,273233	1,031796	1,088803
122	0,273223	1,031798	1,088803
128	0,272655	1,031795	1,088792
135	0,272112	1,031792	1,088782
182	0,003457	1,019462	1,118297
188	0,003524	1,019548	1,115258
190	0,018258	1,00937	1,119315

Generation	GKIHA	1/(1-NVFP)	1/(1-NVFA)
193	0,003588	1,019637	1,112941
194	0,014122	1,008824	1,117498
195	0,013205	1,008891	1,117183
199	0,013447	1,008938	1,114932
203	0,013407	1,008936	1,114934
210	0,011335	1,008872	1,114581
211	0,011301	1,008869	1,114583
214	0,011393	1,008809	1,114584
221	0,011371	1,008833	1,114578
222	0,011335	1,008831	1,11458
224	0,003112	1,047521	1,05858
233	0,003093	1,047477	1,054565
235	0,017346	1,03156	1,043791
236	0,00588	1,046445	1,036767
237	0,018118	1,031956	1,041319
243	0,01513	1,031501	1,040442
246	0,015078	1,031495	1,037273
249	0,015189	1,031656	1,0365
254	0,016792	1,032107	1,034871
256	0,006628	1,041113	1,034113
259	0,006584	1,0411	1,031243
260	0,014951	1,025186	1,037535
262	0,015078	1,025086	1,03738
264	0,018289	1,02471	1,037083
265	0,016674	1,025655	1,035625
268	0,017823	1,024962	1,035834
271	0,015235	1,02512	1,035723
272	0,015235	1,02512	1,0342
273	0,008001	1,041466	1,026032
274	0,01633	1,025144	1,033496
278	0,017295	1,024937	1,03303
279	0,020808	1,025053	1,031978
281	0,019756	1,025634	1,031099
284	0,019811	1,025764	1,028878
288	0,023041	1,025104	1,028681

Generation	GKIHA	1/(1-NVFP)	1/(1-NVFA)
289	0,019363	1,025673	1,028742
290	0,019599	1,024952	1,027735
297	0,022755	1,024879	1,024626
300	0,023088	1,025514	1,021843
307	0,022579	1,024896	1,0218
309	0,022579	1,024896	1,021209
314	0,021781	1,025006	1,020943
316	0,021306	1,024965	1,02088
319	0,024261	1,025008	1,020141
329	0,028137	1,025085	1,019047
333	0,02817	1,025157	1,018994
335	0,028268	1,025063	1,018789
337	0,027028	1,025176	1,018752
339	0,026623	1,025131	1,018651
343	0,026798	1,025115	1,018608
347	0,026831	1,025119	1,018419
348	0,026623	1,025131	1,018552
349	0,026798	1,025115	1,018509
350	0,026221	1,02509	1,018594
357	0,026221	1,02509	1,018494
360	0,026379	1,025073	1,01845
361	0,026279	1,025062	1,018317
363	0,026438	1,025062	1,018289
370	0,026604	1,025046	1,018243
3389	0,007114	1,0282	1,009167
3541	0,007274	1,028208	1,009025
3730	0,005956	1,028404	1,008867
4061	0,005995	1,028393	1,008858
4192	0,005851	1,028386	1,008652
4947	0,005851	1,028385	1,008487
6296	0,00589	1,028357	1,008472
6584	0,006388	1,028522	1,008296
6655	0,006031	1,028385	1,00829
8977	0,00589	1,028357	1,008263
9745	0,005858	1,028313	1,008252

Generation	GKIHA	1/(1-NVFP)	1/(1-NVFA)
9845	0,005493	1,028434	1,008064

A.3 Optimierungsverlauf "1 / 5 / 9"-Jahresplan

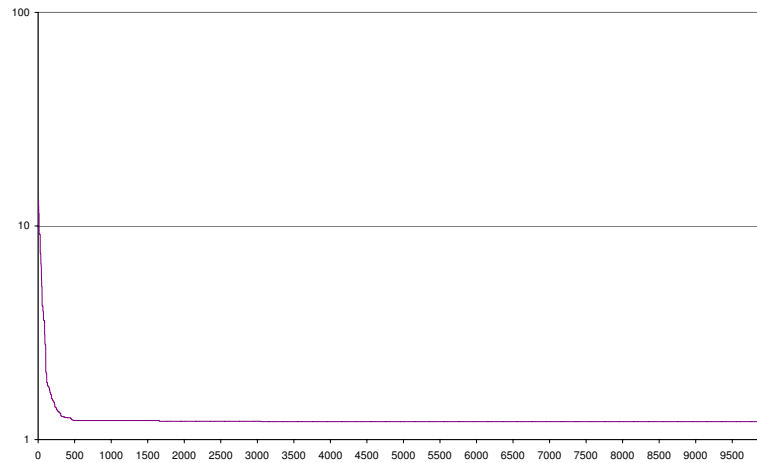


Abbildung A.2: Ein Optimierungsverlauf bei dem am Ende ein "1 / 5 / 9"-Jahresplan herauskam. (Aufgetragen sind die logarithmisch normierten Gebrauchskosten über den Generationen.)

Generation	p_1	p_2	p_3	p_4	p_5	k_0	k_1	k_2	k_3	k_4	k_5	k_6	k_7
0	1	5	8	41	41	3	3	2	1	3	3	3	2
7	1	41	41	41	41	1	1	1	1	-1	1	1	1
9	1	4	9	41	41	1	1	2	1	1	3	1	1
14	1	4	9	41	41	1	2	2	1	1	3	3	1
30	1	6	9	41	41	2	2	2	1	3	3	2	3
38	1	4	9	41	41	2	2	2	1	3	3	3	3
41	1	5	9	12	41	2	2	2	1	3	3	3	3
43	1	6	9	41	41	2	2	2	1	2	3	2	3
47	1	5	9	41	41	3	3	3	1	3	3	3	3
49	1	5	9	41	41	3	2	2	1	3	3	3	3
55	1	5	9	41	41	3	2	3	1	3	3	3	3
62	1	5	9	41	41	2	3	2	1	3	3	2	3
66	1	5	9	41	41	3	2	3	1	3	3	2	3
70	1	5	9	41	41	2	3	2	1	3	3	3	3
74	1	4	9	41	41	1	2	2	1	3	3	3	3
89	1	5	9	41	41	3	2	3	1	3	3	3	3
93	1	5	9	41	41	2	2	3	1	3	3	3	3
97	1	4	9	41	41	3	2	2	1	3	3	3	3
105	1	5	9	41	41	2	2	2	1	3	3	2	3
110	1	5	9	41	41	3	3	2	1	3	3	3	2
118	1	5	9	41	41	3	2	3	1	3	3	2	2
129	1	5	9	41	41	3	2	2	1	3	3	3	2
143	1	5	9	41	41	3	2	3	1	3	3	2	3
147	1	5	9	41	41	2	3	3	1	3	3	3	2
157	1	5	9	41	41	3	2	2	1	3	3	2	2
162	1	5	9	41	41	2	2	3	1	3	3	3	2
172	1	5	9	41	41	3	2	2	1	3	3	3	3
183	1	5	9	41	41	3	2	2	1	3	3	2	3
200	1	5	9	41	41	2	2	2	1	3	3	3	3
211	1	5	9	41	41	2	2	2	1	3	3	3	3
214	1	5	9	41	41	3	2	2	1	3	3	3	3
217	1	5	9	41	41	3	2	2	1	3	3	3	3
219	1	5	9	41	41	3	2	2	1	3	3	3	3
224	1	5	9	41	41	2	2	2	1	3	3	3	3
226	1	5	9	41	41	3	2	2	1	3	3	3	3

Generation	p_1	p_2	p_3	p_4	p_5	k_0	k_1	k_2	k_3	k_4	k_5	k_6	k_7
229	1	5	9	41	41	3	3	3	1	3	3	3	3
240	1	5	9	41	41	3	2	2	1	3	3	3	3
243	1	5	9	41	41	2	2	2	1	3	3	2	2
252	1	5	9	41	41	3	2	2	1	3	3	2	3
266	1	5	9	41	41	3	2	2	1	3	3	2	3
287	1	5	9	41	41	2	2	3	1	3	3	3	3
299	1	5	9	41	41	3	2	2	1	2	3	3	2
303	1	5	9	41	41	2	2	2	1	3	3	3	3
311	1	5	9	41	41	2	2	2	1	3	3	3	3
321	1	5	9	41	41	2	2	2	1	3	3	3	3
335	1	5	9	41	41	3	2	2	1	3	3	3	3
342	1	5	9	41	41	2	2	2	1	3	3	2	3
346	1	5	9	41	41	2	2	2	1	3	3	3	3
365	1	5	9	41	41	2	2	2	1	3	3	3	3
367	1	5	9	41	41	3	2	2	1	2	3	3	3
372	1	5	9	41	41	3	2	2	1	3	3	3	3
375	1	5	9	41	41	3	2	2	1	3	3	3	3
402	1	5	9	41	41	3	2	2	1	3	3	3	3
408	1	5	9	41	41	3	2	2	1	3	3	3	3
445	1	5	9	41	41	3	2	2	1	3	3	3	3
459	1	5	9	41	41	3	2	2	1	3	3	3	3
472	1	5	9	41	41	3	2	2	1	3	3	3	3
479	1	5	9	41	41	3	2	2	1	3	3	3	3
483	1	5	9	41	41	3	2	2	1	3	3	3	3
1661	1	5	9	41	41	3	2	2	1	3	3	3	3
3051	1	5	9	41	41	3	2	2	1	3	3	3	3
3054	1	5	9	41	41	3	2	2	1	3	3	3	3

Generation	k_8	k_9	k_{10}	k_{11}	k_{12}	k_{13}	k_{14}	k_{15}	k_{16}	k_{17}	k_{18}	k_{19}	k_{20}
0	3	3	3	2	2	-1	-1	3	2	1	2	2	2
7	1	1	1	1	-1	1	-1	-1	-1	1	-1	-1	1
9	1	3	1	2	2	-1	1	1	3	3	1	-1	-1
14	3	3	1	3	2	-1	-1	3	3	1	2	-1	-1
30	2	3	3	2	2	-1	-1	2	2	1	2	1	2
38	3	3	3	3	2	-1	-1	3	3	1	2	2	2
41	3	1	3	2	2	4	-1	2	3	1	-1	-1	3
43	2	2	2	2	1	-1	-1	2	2	1	2	1	2
47	2	3	3	3	2	-1	-1	3	2	1	3	1	2
49	2	3	3	2	2	-1	-1	2	2	1	2	2	2
55	3	2	3	3	2	-1	-1	2	3	1	2	2	2
62	2	1	3	2	1	-1	-1	2	1	1	2	-1	3
66	2	2	3	2	1	-1	-1	3	2	1	2	2	2
70	2	2	3	3	1	-1	-1	2	2	1	2	2	2
74	3	2	3	3	1	-1	-1	3	3	3	2	2	2
89	2	2	3	2	1	-1	-1	1	2	3	2	2	-1
93	3	2	3	3	1	-1	-1	2	2	3	2	2	2
97	3	3	3	3	2	-1	-1	3	2	3	2	-1	2
105	2	3	3	3	2	-1	-1	3	2	3	2	2	2
110	2	2	3	2	2	-1	-1	3	2	3	2	2	2
118	3	2	3	3	2	-1	1	2	3	3	2	2	2
129	2	2	3	2	2	-1	1	2	3	3	2	2	2
143	2	3	3	3	2	-1	1	2	2	3	2	2	2
147	3	2	3	3	2	-1	1	2	2	3	2	2	2
157	2	3	3	3	2	-1	1	2	2	3	2	2	2
162	3	3	3	2	2	1	1	2	2	3	2	2	2
172	2	3	3	3	2	1	1	2	2	3	2	2	2
183	3	3	3	3	2	1	1	3	2	3	2	2	2
200	2	3	3	2	2	1	1	2	2	3	3	2	2
211	3	3	3	3	2	1	1	2	2	3	2	2	2
214	2	3	3	3	2	1	1	2	2	3	2	2	2
217	2	3	3	3	2	1	1	1	2	3	2	2	2
219	3	3	3	2	2	1	1	1	2	3	2	2	2
224	3	2	3	3	2	1	1	3	2	3	2	2	2
226	3	3	3	2	2	1	1	2	2	3	2	2	2

Generation	k_8	k_9	k_{10}	k_{11}	k_{12}	k_{13}	k_{14}	k_{15}	k_{16}	k_{17}	k_{18}	k_{19}	k_{20}
229	3	2	3	3	2	1	1	1	2	3	2	2	2
240	3	3	3	2	2	1	1	1	2	3	2	2	2
243	3	3	3	3	2	1	1	2	2	3	2	2	2
252	3	3	3	2	2	1	1	2	2	3	2	2	2
266	2	3	3	3	2	1	1	2	2	3	2	2	2
287	3	2	3	2	2	1	1	1	2	3	2	2	2
299	3	3	3	3	2	1	1	2	2	3	2	2	-1
303	3	3	3	2	2	1	1	1	2	3	2	2	2
311	2	2	3	3	2	1	1	1	2	3	2	2	2
321	3	3	3	3	2	1	1	1	2	3	2	2	2
335	2	3	3	3	2	1	1	1	2	3	2	2	2
342	3	3	3	3	2	1	1	1	2	3	2	2	2
346	3	3	3	3	2	1	1	1	2	3	2	2	2
365	3	3	3	3	2	1	1	1	2	3	2	2	2
367	3	3	3	3	2	1	1	1	2	3	2	2	2
372	3	3	3	3	2	1	1	1	2	3	2	2	2
375	3	3	3	3	2	1	1	1	2	3	2	2	2
402	3	3	3	3	2	1	1	1	2	3	2	2	3
408	3	3	3	3	2	1	1	1	2	3	2	2	3
445	3	3	3	3	2	3	1	1	2	3	2	2	3
459	3	3	3	3	2	2	1	1	2	3	2	2	3
472	3	3	3	3	2	2	1	1	2	3	2	2	3
479	3	3	3	3	2	2	1	1	2	3	2	2	3
483	3	3	3	3	2	2	1	1	2	3	2	2	3
1661	3	3	3	3	2	2	1	1	2	3	2	2	3
3051	3	3	3	3	2	2	1	1	2	3	2	2	3
3054	3	3	3	3	2	2	1	1	2	3	2	2	3

Generation	k_{21}	k_{22}	k_{23}	k_{24}	k_{25}	k_{26}	k_{27}	k_{28}	k_{29}	k_{30}	k_{31}	k_{32}	k_{33}
229	2	2	2	2	2	2	2	3	2	2	2	3	3
240	2	2	2	2	2	2	2	3	2	2	2	3	2
243	2	2	2	2	2	2	2	3	2	2	2	3	3
252	2	2	2	2	2	2	2	3	2	2	2	3	3
266	2	2	2	2	2	2	2	3	2	2	2	3	3
287	2	2	2	2	2	2	2	3	2	2	2	3	3
299	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	3	3
303	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	3	3
311	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	3	3
321	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	3	3
335	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	3	3
342	2	2	2	2	2	2	2	3	2	2	2	3	3
346	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	3	3
365	2	2	2	2	2	2	2	3	2	2	2	3	3
367	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	3	3
372	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	3	3
375	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	3	3
402	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	3	3
408	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	3	3
445	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	3	3
459	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	3	3
472	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	3	3
479	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	3	3
483	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	3	3
1661	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	-1	3	3
3051	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	-1	3	3
3054	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	-1	3	3

Generation	k_{34}	k_{35}	k_{36}	k_{37}	k_{38}	k_{39}	k_{40}	k_{41}	k_{42}	k_{43}	k_{44}	k_{45}	k_{46}
0	2	2	2	2	3	3	2	2	3	3	3	2	3
7	-1	-1	-1	-1	-1	-1	1	-1	1	-1	-1	-1	1
9	2	2	2	3	3	3	3	-1	3	-1	3	1	-1
14	2	2	2	2	3	3	3	-1	3	-1	3	3	3
30	2	2	2	2	2	2	3	2	3	2	3	2	3
38	2	2	2	2	3	3	3	2	3	3	3	2	3
41	2	-1	2	2	2	3	3	2	3	3	3	3	3
43	2	2	2	2	2	3	2	2	3	3	3	2	3
47	2	2	2	2	3	3	3	2	3	3	3	3	3
49	2	2	2	2	3	2	3	2	3	3	3	2	-1
55	2	2	2	3	3	3	2	2	3	3	3	3	3
62	2	2	2	2	2	2	3	2	3	3	3	2	3
66	2	2	2	3	3	2	3	2	3	3	3	3	3
70	2	2	2	2	3	3	2	2	3	3	3	3	-1
74	2	2	2	2	2	3	3	2	3	3	3	3	3
89	2	2	2	2	3	3	3	3	1	3	3	2	3
93	2	2	2	2	3	3	3	2	3	3	3	3	3
97	2	2	2	2	3	3	3	3	3	3	3	3	3
105	2	2	2	2	3	3	2	2	3	3	-1	2	3
110	2	2	2	2	2	3	3	2	-1	3	3	3	3
118	2	2	2	2	2	2	3	2	3	3	3	3	-1
129	2	2	2	2	2	2	3	2	3	3	3	3	-1
143	2	2	2	2	2	2	3	2	3	3	3	3	-1
147	2	2	2	2	2	2	3	2	3	3	3	3	-1
157	2	2	2	2	3	3	3	2	3	-1	3	3	3
162	2	2	2	2	3	2	2	2	3	3	-1	2	3
172	2	2	2	3	3	2	2	2	3	-1	3	3	3
183	2	2	2	2	3	2	3	2	3	-1	-1	3	-1
200	2	2	2	2	2	2	2	2	3	-1	-1	3	-1
211	2	-1	2	2	3	3	2	2	3	-1	-1	3	3
214	2	2	-1	2	3	2	2	2	3	-1	-1	3	3
217	2	-1	2	2	3	2	3	2	3	-1	-1	3	3
219	2	-1	2	2	3	2	3	2	3	-1	-1	3	3
224	2	2	-1	2	3	3	2	2	3	-1	-1	3	3
226	2	2	-1	3	3	2	2	2	3	-1	-1	3	3

Generation	k_{34}	k_{35}	k_{36}	k_{37}	k_{38}	k_{39}	k_{40}	k_{41}	k_{42}	k_{43}	k_{44}	k_{45}	k_{46}
229	2	-1	-1	2	2	2	3	2	3	-1	-1	3	3
240	2	-1	-1	2	2	3	2	2	3	-1	-1	3	-1
243	-1	-1	-1	2	3	3	3	2	3	-1	-1	3	3
252	-1	-1	-1	2	2	2	2	2	3	-1	-1	3	3
266	-1	-1	-1	2	2	3	2	2	3	-1	-1	3	3
287	-1	-1	-1	2	3	2	2	2	3	-1	-1	3	3
299	-1	-1	-1	2	2	2	2	2	3	-1	-1	3	3
303	-1	-1	-1	2	2	2	2	2	3	-1	-1	3	3
311	-1	-1	-1	2	2	2	2	2	3	-1	-1	3	3
321	-1	-1	-1	2	2	2	2	2	3	-1	-1	3	3
335	-1	-1	-1	2	3	2	3	2	3	-1	-1	-1	3
342	-1	-1	-1	2	3	2	2	2	3	-1	-1	-1	3
346	-1	-1	-1	2	2	2	2	2	3	-1	-1	-1	3
365	-1	-1	-1	2	2	2	2	2	3	-1	-1	-1	3
367	-1	-1	-1	2	2	2	2	2	3	-1	-1	-1	3
372	-1	-1	-1	2	2	2	2	2	3	-1	-1	-1	3
375	-1	-1	-1	2	2	2	2	2	3	-1	-1	-1	3
402	-1	-1	-1	2	2	2	2	2	3	-1	-1	-1	3
408	-1	-1	-1	2	2	2	2	2	3	-1	-1	-1	3
445	-1	-1	-1	2	2	2	2	2	3	-1	-1	-1	3
459	-1	-1	-1	2	2	2	2	2	3	-1	-1	-1	3
472	-1	-1	-1	2	2	2	2	2	3	-1	-1	-1	-1
479	-1	-1	-1	2	2	2	2	2	2	-1	-1	-1	3
483	-1	-1	-1	2	2	2	2	2	2	-1	-1	-1	-1
1661	-1	-1	-1	2	2	2	2	2	2	-1	-1	-1	-1
3051	-1	-1	-1	2	2	3	2	2	2	-1	-1	-1	-1
3054	-1	-1	-1	2	2	2	2	2	2	-1	-1	-1	-1

Generation	k_{47}	k_{48}	k_{49}	k_{50}	k_{51}	k_{52}	k_{53}	k_{54}	k_{55}	k_{56}	k_{57}	k_{58}	k_{59}
0	2	3	2	2	2	1	2	2	2	1	1	1	1
7	-1	-1	-1	-1	1	-1	-1	-1	1	-1	-1	1	-1
9	-1	-1	2	1	2	1	1	3	1	1	1	1	2
14	-1	3	2	1	2	1	2	2	2	1	1	1	1
30	3	2	2	2	2	2	2	2	2	1	1	1	1
38	3	3	3	2	2	2	2	2	2	1	1	1	1
41	2	-1	2	2	2	2	2	3	2	2	2	1	1
43	3	2	2	2	2	2	2	3	2	2	1	1	2
47	3	2	2	2	2	2	2	3	2	1	1	2	1
49	2	2	3	2	2	2	2	2	2	1	1	1	2
55	3	3	2	2	2	2	2	3	2	1	1	1	1
62	2	3	2	2	2	2	2	3	2	1	1	1	1
66	2	2	2	2	2	2	2	3	2	1	1	1	1
70	2	2	2	2	2	2	2	2	2	1	1	1	1
74	3	-1	2	2	2	2	2	2	2	1	1	1	1
89	2	2	2	2	2	2	2	3	2	2	1	1	1
93	3	-1	2	2	2	2	2	2	2	1	1	1	1
97	3	3	2	2	2	2	2	2	2	1	1	1	1
105	3	3	2	2	2	2	2	2	2	1	1	1	1
110	3	2	2	2	2	2	2	2	2	1	1	1	1
118	3	3	2	2	2	2	2	2	2	1	1	1	1
129	2	2	2	2	2	2	2	3	2	1	1	1	1
143	2	3	2	2	2	2	2	2	2	1	1	1	1
147	2	3	2	2	2	2	2	2	2	1	1	1	1
157	3	3	2	2	2	2	2	2	2	1	1	1	1
162	2	3	2	2	2	2	2	2	2	1	1	1	1
172	3	3	2	2	2	2	2	2	2	1	1	1	1
183	2	2	2	2	2	2	2	2	2	1	1	1	1
200	3	2	2	2	2	2	2	2	3	1	1	1	1
211	2	2	2	2	2	2	2	2	2	1	1	1	1
214	2	2	2	2	2	2	2	3	2	1	1	1	1
217	2	2	2	2	2	2	2	2	2	1	1	1	1
219	2	2	2	2	2	2	2	2	2	1	1	1	1
224	2	2	2	2	2	2	2	2	3	1	1	1	1
226	3	2	2	2	2	2	2	2	3	1	1	1	1

Generation	k_{47}	k_{48}	k_{49}	k_{50}	k_{51}	k_{52}	k_{53}	k_{54}	k_{55}	k_{56}	k_{57}	k_{58}	k_{59}
229	2	2	2	2	2	2	2	2	3	1	1	1	1
240	2	2	2	2	2	2	2	2	3	1	1	1	1
243	2	2	2	2	2	2	2	-1	2	1	1	1	1
252	2	2	2	2	2	2	2	2	3	1	1	1	1
266	2	2	2	2	2	-1	2	2	3	1	1	1	1
287	2	2	2	2	2	2	2	2	3	1	1	1	1
299	2	2	2	2	2	2	2	2	3	1	1	1	1
303	2	2	2	2	2	2	2	2	3	1	1	1	1
311	2	2	2	2	2	-1	2	2	3	1	1	1	1
321	2	2	2	2	2	-1	2	2	3	1	1	1	1
335	2	2	2	2	2	-1	2	2	3	1	1	1	1
342	2	2	2	2	2	-1	2	2	3	1	1	1	1
346	2	2	2	2	2	-1	2	2	3	1	1	1	1
365	2	2	2	2	2	-1	2	2	3	1	1	1	1
367	2	2	2	2	2	-1	2	2	3	1	1	1	1
372	2	2	2	2	2	-1	2	2	3	1	1	1	1
375	2	2	2	2	2	-1	2	2	3	1	1	1	1
402	2	2	2	2	2	-1	2	2	3	1	1	1	1
408	2	2	2	2	2	-1	2	2	3	1	1	1	1
445	2	2	2	2	2	-1	2	2	3	1	1	1	1
459	2	2	2	2	2	-1	2	2	3	1	1	1	1
472	2	2	2	2	2	-1	2	2	3	1	1	1	1
479	2	2	2	2	2	-1	2	2	3	1	1	1	1
483	2	2	2	2	2	-1	2	2	3	1	1	1	1
1661	2	2	2	2	2	-1	2	2	3	1	1	1	1
3051	2	2	2	2	2	-1	-1	2	3	1	1	1	1
3054	2	2	2	2	2	-1	-1	2	3	1	1	1	1

Generation	k_{60}	k_{61}	k_{62}	k_{63}	k_{64}	k_{65}	k_{66}	k_{67}	GK	GKIH
0	2	2	2	2	1	1	-1	-1	13,280042	10,057433
7	-1	-1	-1	1	1	1	-1	-1	12,375731	4,116459
9	2	1	1	2	1	1	-1	-1	11,423547	5,525147
14	2	1	1	2	1	1	-1	-1	9,155472	4,314695
30	2	2	2	2	1	1	-1	-1	7,440138	5,076787
38	2	3	2	2	1	1	-1	-1	6,668117	4,525626
41	2	3	2	2	1	2	-1	-1	6,561183	3,490247
43	2	2	2	2	1	2	-1	-1	6,451571	3,732499
47	2	3	2	2	1	2	-1	-1	5,572846	3,065635
49	2	2	2	2	1	2	-1	-1	5,218657	3,095447
55	1	3	2	2	1	2	-1	-1	4,22093	2,36808
62	2	3	2	2	1	2	-1	-1	4,220798	2,211373
66	1	2	2	2	1	2	-1	-1	4,007346	2,311807
70	1	2	2	2	1	2	-1	-1	3,967366	2,30358
74	1	3	2	2	1	2	-1	-1	3,616847	1,818224
89	2	2	2	2	1	2	-1	-1	3,110163	1,69455
93	1	2	2	2	1	2	-1	-1	2,794009	1,679926
97	1	3	2	2	2	2	-1	-1	2,79104	1,074395
105	1	3	2	2	2	2	-1	-1	2,080398	0,820738
110	2	2	2	2	2	2	-1	-1	2,041249	0,788866
118	2	2	2	2	2	2	-1	-1	1,849013	0,717408
129	1	2	2	2	2	2	-1	-1	1,782109	0,700591
143	1	2	2	2	2	2	-1	-1	1,778991	0,703753
147	1	2	2	2	2	2	-1	-1	1,745198	0,694718
157	2	2	2	2	2	2	-1	-1	1,704622	0,666613
162	1	2	2	2	2	2	-1	-1	1,662585	0,683841
172	1	2	2	2	2	2	-1	-1	1,623551	0,669595
183	1	2	2	2	2	2	-1	-1	1,552063	0,648616
200	1	2	2	2	2	2	-1	-1	1,516899	0,601988
211	1	2	2	2	2	2	-1	-1	1,514089	0,641177
214	1	2	2	2	2	2	-1	-1	1,494534	0,643419
217	1	2	2	2	2	2	-1	-1	1,493698	0,631946
219	1	2	2	2	2	2	-1	-1	1,493568	0,631816
224	1	2	2	2	2	2	-1	-1	1,468722	0,604807
226	2	2	2	2	2	2	-1	-1	1,467887	0,602955

Generation	k_{60}	k_{61}	k_{62}	k_{63}	k_{64}	k_{65}	k_{66}	k_{67}	GK	GKIH
229	1	2	2	2	2	2	-1	-1	1,420786	0,603195
240	1	2	2	2	2	2	-1	-1	1,413425	0,59241
243	2	2	2	2	2	2	-1	-1	1,408483	0,644228
252	1	2	2	2	2	2	-1	-1	1,378742	0,609692
266	1	2	2	2	2	2	-1	-1	1,358003	0,617099
287	1	2	2	2	2	2	-1	-1	1,336598	0,582701
299	1	2	2	2	2	2	-1	-1	1,335869	0,595189
303	1	2	2	2	2	2	-1	-1	1,324054	0,574868
311	2	2	2	2	2	2	-1	-1	1,291628	0,563189
321	1	2	2	2	2	2	-1	-1	1,283827	0,576685
335	1	2	2	2	2	2	-1	-1	1,282941	0,583473
342	1	2	2	2	2	2	-1	-1	1,28144	0,578929
346	1	2	2	2	2	2	-1	-1	1,275498	0,574766
365	2	2	2	2	2	2	-1	-1	1,272712	0,568727
367	2	2	2	2	2	2	-1	-1	1,271961	0,566583
372	2	2	2	2	2	2	-1	-1	1,270611	0,569686
375	2	2	2	2	2	2	-1	-1	1,26857	0,568657
402	2	2	2	2	2	2	-1	-1	1,267844	0,572624
408	2	2	2	2	2	2	-1	-1	1,265814	0,571594
445	2	2	2	2	2	2	-1	-1	1,252526	0,547302
459	2	2	2	2	2	2	-1	-1	1,238285	0,540842
472	2	2	2	2	2	2	-1	-1	1,23625	0,540294
479	2	2	2	2	2	2	-1	-1	1,230051	0,535901
483	2	2	2	2	2	2	-1	-1	1,228149	0,535387
1661	2	2	2	2	2	2	-1	-1	1,217557	0,53777
3051	2	2	2	2	2	2	-1	-1	1,214082	0,545883
3054	2	2	2	2	2	2	-1	-1	1,213791	0,542197

Generation	GKIHA	1/(1-NVFP)	1/(1-NVFA)
0	2,272838	1,043492	1,093125
7	4,047509	1	1,379899
9	1,905191	1,068538	1,193893
14	1,457434	1,058929	1,151648
30	1,218431	1,043896	1,059717
38	1,155082	1,045935	1,050413
41	0,918373	1,055119	1,080501
43	0,909903	1,038384	1,076335
47	0,813462	1,03742	1,06876
49	0,792616	1,03533	1,055491
55	0,636493	1,033545	1,04652
62	0,619281	1,033933	1,052052
66	0,57696	1,032998	1,041104
70	0,567347	1,032949	1,039985
74	0,532438	1,044216	1,038822
89	0,492699	1,039318	1,02776
93	0,45418	1,029996	1,022081
97	0,398838	1,042213	1,036935
105	0,265465	1,029911	1,027221
110	0,326269	1,028667	1,027626
118	0,276068	1,028748	1,023349
129	0,258868	1,02879	1,021581
143	0,256447	1,028786	1,021365
147	0,244062	1,028815	1,02049
157	0,227793	1,028708	1,020113
162	0,203212	1,028926	1,017948
172	0,200498	1,028808	1,017154
183	0,173486	1,028837	1,0154
200	0,158188	1,028764	1,015832
211	0,178026	1,028488	1,014532
214	0,173264	1,028595	1,01373
217	0,174391	1,028645	1,014068
219	0,174335	1,028645	1,014068
224	0,15971	1,028561	1,014186
226	0,16314	1,028451	1,014278

Generation	GKIHA	1/(1-NVFP)	1/(1-NVFA)
229	0,164885	1,028437	1,012664
240	0,163747	1,028388	1,012807
243	0,178627	1,028082	1,011027
252	0,166798	1,028179	1,011141
266	0,173914	1,028026	1,010262
287	0,152719	1,028221	1,010603
299	0,154065	1,028144	1,010193
303	0,149575	1,028191	1,010458
311	0,153787	1,027897	1,009904
321	0,1502	1,028037	1,009108
335	0,152596	1,028037	1,008848
342	0,150682	1,028044	1,008948
346	0,148281	1,028037	1,008891
365	0,149632	1,027891	1,009076
367	0,15205	1,027867	1,009136
372	0,151365	1,027872	1,008982
375	0,150337	1,027872	1,008948
402	0,152536	1,027851	1,008799
408	0,151507	1,027851	1,008765
445	0,150853	1,02786	1,009134
459	0,146004	1,027847	1,008877
472	0,145456	1,027847	1,008826
479	0,142942	1,027865	1,008756
483	0,142428	1,027865	1,008709
1661	0,143361	1,027764	1,008321
3051	0,146507	1,02771	1,007956
3054	0,145961	1,027718	1,008067