View metadata, citation and similar papers at core.ac.uk
brought to you by CORE
provided by Technische Universität Dresden: Qucosa

Optimierung der Instandhaltung und Zuverlässigkeitsstruktur von Kraftwerksanlagen

–

Entwicklung einer Lösungsmethodik und Untersuchungen an einem Heizkraftwerk mit Druckwirbelschichtfeuerung sowie einer Gasturbinen-Baureihe

Von der Fakultät Maschinenwesen
der
Technischen Universität Dresden
zur
Erlangung des akademischen Grades
Doktoringenieur (Dr.-Ing.)
angenommene Dissertation

Dr.-Ing. Werner, Tilman
geb. am: 30.12.1970 in Dresden

Tag der Einreichung: 25.09.2000
Tag der Einreichung: 28.08.2001

Gutachter: Prof.Dr.-Ing.habil. W. Bernstein
Prof.Dr.-Ing.habil. P. Büchner
Prof.Dr.sc.techn. G. Beckmann

Prof.Dr.-Ing.habil. A. Dittmann
Vorsitzender der Prüfungskommision

Danksagung

Mein Dank gilt ganz ausdrücklich Prof. Bernstein für die fachliche und persönliche Unterstützung meiner Arbeit während des Studiums und der Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Lehrstuhl Kraftwerkstechnik des Institutes für Energietechnik. Weiterhin möchte ich mich bei den an den Forschungsprojekten beteiligten Mitarbeitern der Firmen DREWAG, Siemens KWU, TACR und Alstom bedanken. Dies gilt auch für Herrn Prof.Dr.sc.techn. Beckmann und Herrn Prof.Dr.-Ing. Büchner, die freundlicherweise die Begutachtung der Dissertation übernommen haben.

Nicht zuletzt will ich an dieser Stelle auch meiner Familien und meinen Freunden für die Rückendeckung danken, die ich für die mehrjährige Arbeit an dieser Dissertation erhalten habe.

Abschliessend möchte ich meinen Dank gegenüber der Deutschen Forschungsgemeinschaft ausdrücken, da wesentliche Teile der vorliegenden Arbeit im Rahmen meines von der DFG finanzierten Forschungsstudiums im Graduiertenkolleg „Lokale innovative Energiesysteme“ entstanden ist.

Inhaltsverzeichnis

Kapitel 1 Einleitung 4
1.1 Hintergrund und Motivation der Dissertation 4
1.2 Aufgabenstellung und Eingrenzung des Untersuchungsgegenstands 6
1.3 Gliederung der Arbeit 9

Kapitel 2 Lösung von RAM-Optimierungsaufgaben 10
2.1 Übersicht 10
2.2 RAM-Optimierung - Entscheidungsfindung unter Unsicherheit 12
2.3 Problemdarstellung und –analyse 15

Kapitel 3 Ermittlung der Zuverlässigkeitsstruktur und der RAM-Werte 16
3.1 Übersicht 16
3.2 Theoretische Herleitung der RAM-Werte 17
3.3 Ermittlung von Zuständen und Zuverlässigkeitsstruktur mit FMEA 20
3.3.1 Aufgaben der FMEA 20
3.3.2 Durchführung der FMEA 21
3.3.3 Definition von Zuständen 22
3.4 Modellierung der Zusammenhänge zwischen Zuständen von Einheiten 24
3.4.1 Übersicht der Modellierungsmethoden 24
3.4.2 Fehlerbaum und Zuverlässigkeits-Blockdiagramm 25
3.4.3 Markoffsche Ketten 26
3.4.4 Zusammenfassung 27

Kapitel 4 RAM-Datenquellen 29
4.1 Daten zur Bestimmung von Zustands- und Ereigniswahrscheinlichkeiten 29
4.1.1 Zuverlässigkeitsdatenbanken 30
4.1.2 Statistische Auswertung mit Weibullanalyse 31
4.1.2.1 Aufbereitung der Lebensdauerdaten und die Bestimmung der Parameter 31
4.1.2.2 Abhängigkeit der Wahrscheinlichkeitsverteilungsfunktionen vom Formfaktor 34
4.1.3 Beschreibung der Schädigungsprozesse durch den Formfaktor 37
4.1.3.1 Übersicht über Ausfallmuster 37
4.1.3.2 Frühausfälle 39
4.1.3.3 Bereiche mit annähernd konstanter Fehlerrate 40
4.1.3.4 Verschleißausfälle 41
4.1.4 Bayessche Statistik 45
4.1.4.1 Ansatz 45
4.1.4.2 Berechnung bedingter Wahrscheinlichkeiten 46
4.1.4.3 Anwendung des Bayesschen Theorems für diskrete, bivariante Verteilungen 47
4.1.4.4 Verbesserung der Parameter stetiger Verteilungen durch Bayessche Schätzung 48
4.1.4.5 Darstellung komplexer Zusammenhänge mit Bayesschen Netzwerken 51
4.2 RAM-Datenbanken für Kraftwerksanlagen 52
4.2.1 NERC 52

4.2.1.1 Inhalt und Umfang der Datenbank 52
4.2.1.2 Vordefinierte Zustände und Zustandsübergänge 53
4.2.1.3 Verwendete RAM-Kennwerte und Auswertung der Datenbank 53
4.2.2 VGB 55
4.2.2.1 Inhalt und Umfang der Datenbank 55
4.2.2.2 Vordefinierte Zustände, Zustandsübergänge und Einheiten 56
4.2.2.3 Verwendete RAM-Kennwerte und Auswertung der Datenbank 56
4.2.3 Gegenüberstellung von NERC und VGB 57

Kapitel 5 Untersuchungen zur Gasturbine V64.3 59
5.1 Problemanalyse 59
5.2 Informationserfassung und -auswertung 60
5.2.1 Übersicht 60
5.2.2 Statistische Auswertung mit Weibullanalyse 61
5.2.3 Analyse betriebsbedingter Schädigungen, konstruktiver und menschlicher Einflüsse 66
5.2.4 Aussagen zur Instandhaltung 68
5.2.5 Grundlegende Kostenverläufe pro Revisionsintervall 70
5.3 Randbedingungen der Instandhaltungsstrategien 75
5.3.1 Einsatzplanung 75
5.3.2 Schaufelbestand und –management 75
5.4 Optimierungsmodell, Umsetzung und Ergebnisse 75
5.5 Empfehlungen für weiterführende Untersuchungen 76

Kapitel 6 Untersuchungen zum DWSF-HKW Cottbus 81
6.1 Einleitung 81
6.2 RAM-Analyse des HKW Cottbus 81
6.2.1 Zielstellung 81
6.2.2 Anlagenbeschreibung 82
6.2.3 Verfügbare RAM-Datenquellen und deren Auswertung 83
6.2.4 Modellierung der Zuverlässigkeitsstruktur 84
6.3 Entwicklung einer Instandhaltungsstrategie für das HKW Cottbus 85
6.3.1 Zielstellung 85
6.3.2 Entwurf einer zustandsorientierten Instandhaltungsstrategie 85
6.3.3 Entwicklung einer Systematik zur Bewertung der realen Verfügbarkeit 87
6.3.4 RAM-Benchmarking 87
6.4 Zusammenfassung und Empfehlungen für weiterführende Untersuchungen 87

Kapitel 7 Erweiterung der Modellierung durch Unschärfeansatz 89

Kapitel 8 Zusammenfassung 94

Literaturverzeichnis 97

Bildverzeichnis 101

Tabellenverzeichnis 104

Abkürzungen und Symbole 105

Anlagen 112

Kapitel 1 Einleitung

1.1 Hintergrund und Motivation der Dissertation

Die durchgeführten Untersuchungen beziehen sich direkt auf die aktuellen Entwicklungen auf dem Gebiet der Kraftwerkstechnik und des Energiemarktes, die sich innerhalb von nur wenigen Jahren teilweise dramatisch beschleunigt haben. Vor allem die Liberalisierung des Energiemarktes übt in Hinsicht auf die Anforderungen an Effizienz, Flexibilität und kurzfristiger Amortisation einen enormen Druck auf Hersteller und Betreiber aus /1/. Für alle Beteiligten auf dem Gebiet der Energieerzeugung besteht die unbedingte Notwendigkeit, nach Optimierungspotentialen zu suchen und diese auch konsequent zu verwirklichen.

Die derzeit zu beobachteten Maßnahmen, die in erster Linie durch Re-Strukturierung und Auslagerung auf Einsparungen bei Personal- und den Einkaufskosten ausgerichtet sind, zielen vor allem auf eine kurzfristig zu erreichende Kostenreduzierung ab. Es ist jedoch abzusehen, dass dieses Potential bald erschöpft ist, weshalb in Zukunft langfristig ausgerichtete Lösungen, die vor allem im Bereich der Technik liegen, zu entwickeln sind.

Dieser Grundgedanke hat dazu geführt, dass bei der Betrachtung von Kraftwerksanlagen zunehmend der gesamte Lebenszyklus einbezogen wird und mit Hilfe von probabilistischen Methoden schon im Vorfeld von Projekten die Kosten kalkuliert werden. Damit soll erreicht werden, die Invest-, Betriebs- bzw. Lebenszyklus-Kosten so zu steuern, dass die spezifischen Erzeugungskosten gesenkt werden können.

Folgende, teils gegensätzliche Tendenzen sind in diesem Zusammenhang zu beobachten:

- Einerseits ein zunehmender Innovationsdruck, um die Betriebsparameter und damit den Wirkungsgrad anzuheben, andererseits aber die Überlegung von Betreibern, durch gezielte Absenkung einen Lebensdauergewinn zu erzielen;

- Hersteller und Betreiber gehen zwar langfristige Beziehungen auf der Basis von umfassenden Verträgen über Betrieb und Instandhaltung (O&M[1]) ein, aber gleichzeitig hat sich dabei ein Preisgefüge entwickelt, durch das verstärkt Produzenten von nicht-Herstelleroriginalen (sog. non-OEM[2]) Ersatzteilen als alternative Partner den Markt betreten /2/;

- Als ein Weg zur Kostensenkung wird verstärkt auf die Standardisierung und Modularisierung von Kraftwerksanlagen orientiert, wobei jedoch durch die Globalisierung im Einkauf und Vertrieb die Randbedingungen beim Betrieb und der Wirtschaftlichkeit von Anlagen sehr stark differieren können. Dazu gehört auch die Vielzahl möglicher Betreibermodelle, die teilweise zu ganz anderen Konstellationen führen, als die bisherige Eigentümer- bzw. Betreiberstruktur, die in Deutschland noch vorherrscht. Allerdings betreten auch hier zunehmend unabhängige Energieerzeuger (sog. IPP[3]) den Markt und Energieversorgungsunternehmen (EVU) ordnen ihr Geschäft neu;

- Für die Organisation von Anlagenbetrieb und –instandhaltung steht eine ständig steigende Zahl von Software-Lösungen (Betriebsführungssysteme) zur Verfügung, die breit eingesetzt werden. Die damit auch gleichzeitig wachsende Informations- und Datenmenge

---

[1] Operation and Maintenance

[2] Original Equipment Manufacturer

[3] Independent Power Producer

muss jedoch auch entsprechend aufbereitet und ausgewertet werden, um daraus das Wissen zu generieren, mit dem Entscheidungsprozesse entsprechend unterstützt werden können. Personalabbau im technischen Bereich und Auslagerung von Serviceleistungen führen jedoch eher dazu, dass dieses Potential nicht nur ungenutzt bleibt, sondern zudem auch firmeninterne Technikkompetenz verloren geht.

Die oben aufgeführten Punkte bilden die Motivation dafür, die Zuverlässigkeit, Verfügbarkeit und Instandhaltbarkeit[4] (engl. Reliability, Availability, Maintainability; i.A. abgekürzt als RAM) von Kraftwerken und ihren Baugruppen näher zu untersuchen. Ausgehend von der technischen Anlagenausführung, der Betriebsweise, dem resultierenden Abnutzungs- bzw. Ausfallverhalten und den jeweiligen Randbedingungen wird zunehmend nach Möglichkeiten gesucht, entsprechende Potentiale unter den heutigen Marktbedingungen zu erkennen und nutzbar zu machen. Dabei ist festzustellen, dass Faktoren, die eher über längere Zeiträume die Wirtschaftlichkeit von Kraftwerksanlagen beeinflussen, aufgrund des sog. „Eisberg-Effekts“ (Bild 1) bisher oft unberücksichtigt blieben. Der verschärfte Wettbewerb, mit dem sowohl Betreiber als auch Hersteller konfrontiert sind, erfordert daher die systematische und zielgerichtete Analyse der Anlage, ihres Betriebes und Instandhaltung, um RAM-Größen mit dem Ziel der Wirtschaftlichkeitssteigerung zu optimieren. Diese Zielstellung lässt sich unter dem Lebenszykluskosten-Ansatz so interpretieren, dass die Rentabilität einer Anlage durch eine Anzahl von bestimmten Entscheidungssituationen beeinflusst wird, mit denen der Hersteller bzw. Betreiber einer Anlage im Laufe des Lebenszyklus einer Anlage konfrontiert ist und deren langfristig optimale Lösung unterstützt werden soll (siehe Anlage 1).

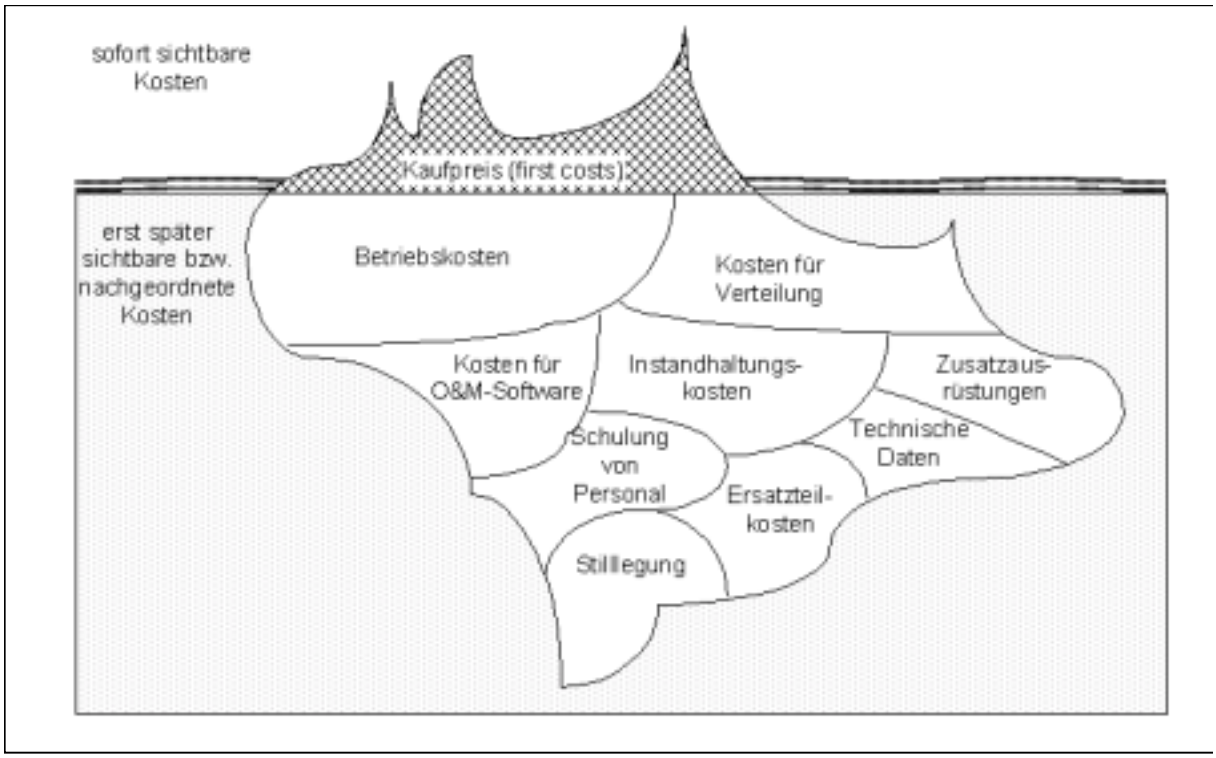


Bild 1 Gesamtheit und Sichtbarkeit von Kosten; aus /3/

[4] Definition der Begriffe und ihrer englischen Entsprechungen ist in /14/ gegeben.

1.2 Aufgabenstellung und Eingrenzung des Untersuchungsgegenstands

Wie in Bild 2 dargestellt ist, existieren eine Vielzahl technischer, betrieblicher und organisatorischer Einflussmöglichkeiten, aus denen sich vor dem erläuterten Hintergrund ein sehr umfangreicher Komplex von Aufgabenstellungen allein für Kraftwerksanlagen ergibt. Eine umfassende, alle diese Aspekte abdeckende Untersuchung, würde bei weitem das übersteigen, was im Rahmen einer Dissertation bearbeitbar ist. Deshalb wurde die vorliegende Arbeit auf die beiden, im Folgenden kurz erläuterten Zielstellungen ausgerichtet.

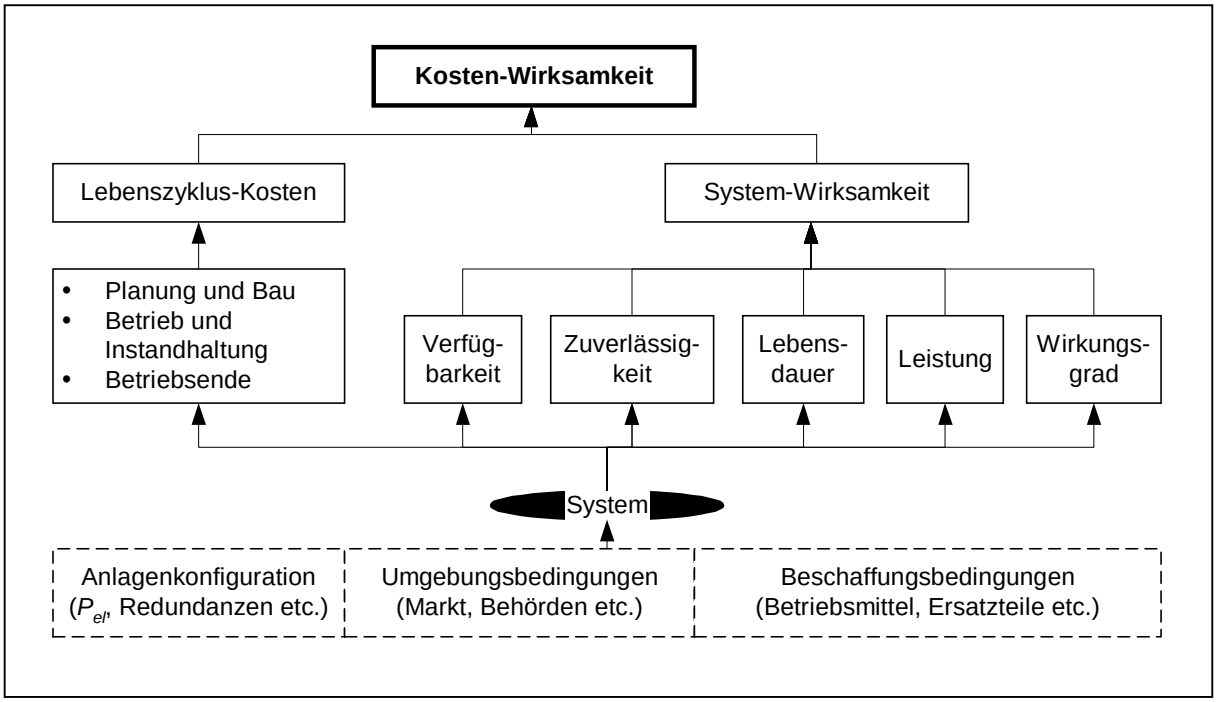


Bild 2 Elemente, welche in die Kostenwirksamkeit einzubeziehen sind; nach /3/

Die eine Aufgabe war, in Projekten gemeinsam mit Industriepartnern, konkrete Untersuchungen zur Zuverlässigkeit, Verfügbarkeit und Instandhaltung von Kraftwerksanlagen durchzuführen, welche zu deren Optimierung beitragen sollen. Da die vorliegende Arbeit im Rahmen des Forschungskollegs „Lokale innovative Energiesysteme“ durchgeführt worden ist, wurden dazu Technologien bzw. Komponenten ausgewählt, für die aufgrund ihrer Fortschrittlichkeit noch keine umfassenden Betriebserfahrungen vorliegen. Ein weiterer Grund dafür war, dass sich zunehmend die Produktzyklen im Vergleich zur Länge des späteren Anlagenbetriebs verkürzen, und damit für die Generierung des für eine umfassende Reifmachung erforderlichen Anlagenwissens immer weniger Zeit zur Verfügung steht. Dies ist insbesondere unter dem Gesichtspunkt kritisch, dass diese Betriebserfahrungen über einen Anlagentyp benötigt werden, um einzelne Anlagen einer solchen Flotte schon in den Phasen zu optimieren, in denen ein überwiegender Teil der längerfristigen Kosten festgeschrieben wird, aber dafür nur wenig Anlagen-spezifisches Wissen zur Verfügung steht (Bild 3).

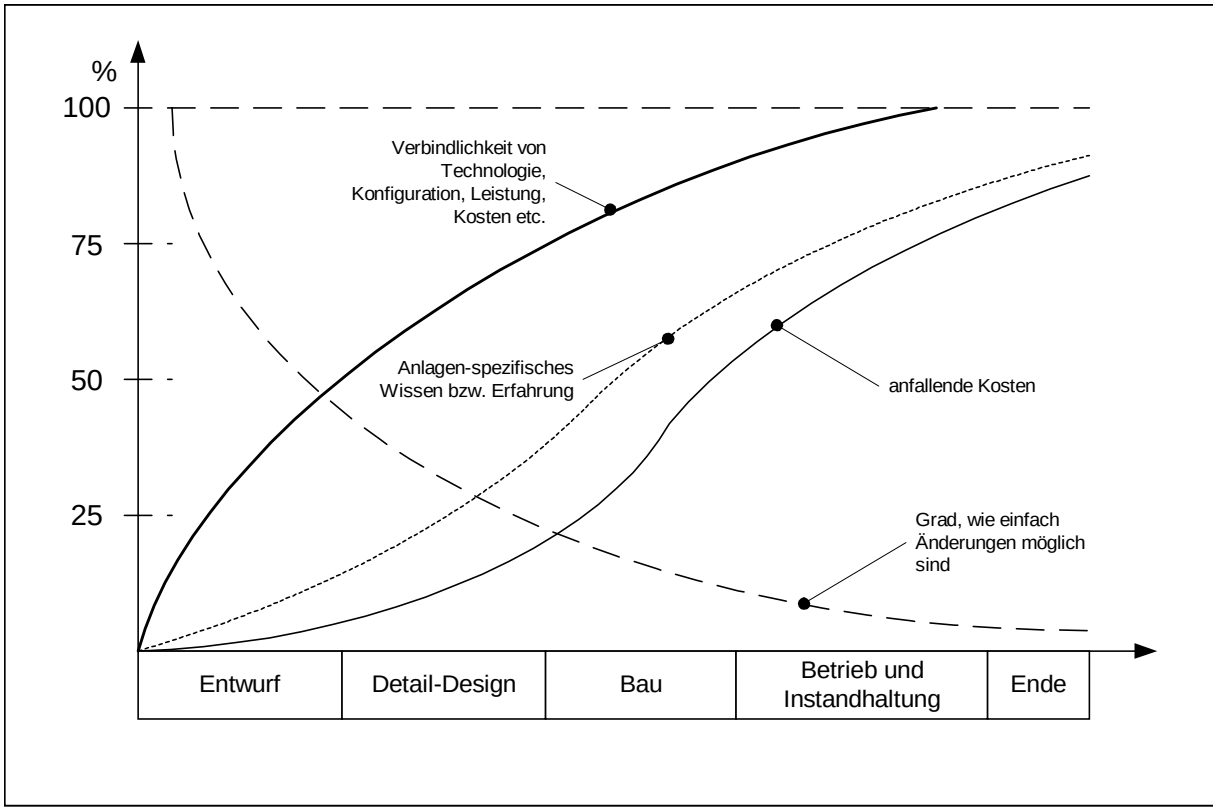


Bild 3 Verlauf von Beeinflussbarkeit, Festschreibung und Höhe anfallender Kosten sowie Anlagen-spezifischem Wissen; aus /3/

Das andere Ziel bestand darin, eine Methodik zu entwickeln, welche die systematische Optimierung der Zuverlässigkeitsstruktur und Instandhaltung von Kraftwerksanlagen (wird im Folgenden als RAM-Optimierung bezeichnet) unterstützt. Aufbauend auf dem ingenieurtechnischen Wissen und den Betriebserfahrungen über konstruktive Beeinflussungsmöglichkeiten, den Erhalt, die Wiederherstellung und den Verlust der Funktionsfähigkeit[5], soll ein technikbasierter Beitrag zur Erreichung von Wirtschaftlichkeitssteigerungen geleistet werden.

Den in der Literatur zu findenden, überwiegend als Einzellösungen zu bezeichnenden Fällen, die zum einen nur unzureichend im Gesamtkonzept einer Anlage integriert und zum anderen auf andere Optimierungsprobleme nicht einfach genug übertragbar scheinen, soll eine Systematik gegenübergestellt werden, die aufgrund ihres formalen Charakters in diesen Punkten Vorteile aufweist. Da die Komplexität der Thematik an sich kein einfaches Lösungsschema ermöglicht, konnte nur ein entsprechender Rahmen für derartige Optimierungsprobleme erarbeitet werden. Dabei waren einerseits Methoden der RAM-Analyse und –Modellierung, die als Stand der Technik angesehen werden können[6], und andererseits Datenquellen zu verwenden, die weitestgehend unproblematisch zugänglich sind. Damit soll sichergestellt werden, dass die in die Methodik einbezogenen Werkzeuge relativ breit zur Verfügung stehen und somit auch praktisch für die Verbesserung der Kostenwirksamkeit angewendet werden können.

Bei der Methodik wurde von der Idee ausgegangen, dass sich die zu optimierenden RAM-Größen einer Anlage grundsätzlich auf die Kosten für die Gewährleistung (Anlagenkonfiguration, Herstellungs- und Montagequalität, Wartungsarbeiten) und die Wiederherstellung (Re-

[5] DIN 40041: Funktionsfähigkeit ist die Eignung einer Einheit, eine geforderte Funktion unter vorgegebenen Anwendungsbedingungen zu erfüllen.

[6] siehe auch Ausführungen zum Zuverlässigkeitsmanagement in DIN IEC 300 (Anlage 2)

paratur, Revisionen) und durch den Verlust von Funktionsfähigkeit (Stillstand, Schadensfolgekosten) des jeweiligen Systems zurückführen lassen. Die Funktionsfähigkeit ist dabei keine statische Größe, die allein durch Konstruktion und Qualität der Ausführung festgeschrieben wird. Vielmehr ist sie aufgrund der physischen Belastungen und damit verbundenen Verschleißvorgänge ein in Abhängigkeit von den realen Betriebs- und Ausgangsbedingungen sich ändernder Zustand. Der Ausgangszustand, die Geschwindigkeit von Zustandsänderungen aufgrund von Betriebsbelastungen durch die jeweilige Fahrweise der Anlage, sowie Zeitpunkt und Umfang von Maßnahmen zur Wiederherstellung eines bestimmten Zustandes haben daher einen großen Einfluss auf die:

- ***fixen Kosten***: d.h. die Investitions- bzw. Kapitalkosten, die insbesondere durch den Aufwand für qualitativ höherwertige und damit i.A. zuverlässigere Komponenten, für Redundanzen und für Monitoring- und Diagnose-Systeme bestimmt werden.

- ***variablen Kosten***: d.h. in diesem Zusammenhang vor allem die direkten (Kosten für Personal und Material) und indirekten (Stillstandskosten durch geplante Nichtverfügbarkeit) Instandhaltungskosten, die Stillstandskosten durch ungeplante Nichtverfügbarkeit, Schäden und deren Folgen, sowie erhöhte Betriebskosten durch Abnutzungserscheinungen.

Es wurde ebenfalls vorausgesetzt, dass sich einerseits ein erheblicher Teil der für fossil gefeuerte Kraftwerksanlagen relevanten Aufgabenstellungen systematisieren lassen; und andererseits, dass die Zuverlässigkeitsstruktur der relevanten Anlagen überwiegend relativ einfach ist, da meist Hauptkomponenten betrachtet werden sollen, bei denen sowohl die Zahl der vorkommenden Redundanzen wie auch die der Elemente selber überschaubar ist. Wie festgestellt wurde, gilt dies allerdings umso weniger, je tiefer die Betrachtungsebene gliedert wird.

Die entwickelte Methodik fasst die für Kraftwerksanlagen relevanten RAM-Optimierungsprobleme als zu lösende Entscheidungssituationen auf, deren Bewältigung entsprechend unterstützt werden sollen. Aufgrund des Wahrscheinlichkeits-Charakters von RAM-Werten handelt es sich dabei um Entscheidungsfindungen unter Unsicherheit, was innerhalb der Entscheidungstheorie als Spieltheorie bezeichnet wird. Die Schwerpunkte waren hier die Auswertung und Verwaltung der Informationen und Daten, die Modellbildung und der Vergleich von Handlungsalternativen. Weiterhin soll dabei berücksichtigt werden, dass für die Behandlung und Lösung von Aufgaben im Rahmen der Planung und des Betriebs von Kraftwerksanlagen in zunehmendem Maße computergestützte, probabilistische Methoden angewendet werden. Diese Anforderungen bedingen hinsichtlich der Anpassungsfähigkeit eine große Offenheit der Methodik, so dass für die vorliegende Arbeit eine weitere Eingrenzung notwendig ist. Der Anwendungsbereich der Untersuchungen bezieht sich damit zusammenfassend auf die folgenden Gesichtspunkte:

- ***Anlagentechnik***: Es sollen vor allem die mechanischen bzw. elektro-mechanischen Baugruppen fossil gefeuerter Kraftwerksanlagen berücksichtigt werden. Das besondere Interesse gilt Komponenten, von denen bisher nur Einzelanlagen oder maximal Kleinserien im Bereich bis ca. 50 Stück ausgeführt wurden, und die sich somit mehr oder weniger noch in andauernder Entwicklung befinden. Daraus ergibt sich ein relativ begrenzter Erfahrungs- bzw. Datenbestand, der zur Auswertung zur Verfügung steht, weshalb die für größere Serien bzw. Massenprodukte entwickelten und angewendeten Methoden der Zuverlässigkeitsanalyse nur eingeschränkt übertragbar sind.

- ***Optimierungsprobleme***: Schwerpunkte werden in Hinblick auf die zustandsbezogene Instandhaltung, die Erstellung der notwendigen Wissensbasis und den Vergleich von strategischen Alternativen durch eine technisch-wirtschaftliche Bewertung gesetzt. Diese Arbeit steht zwar auch in der inhaltlichen Verbindung zur Störfallbetrachtung und dem Komplex der Versorgungssicherheit, diese Themen werden jedoch ausdrücklich nicht behandelt.

1.3 Gliederung der Arbeit

Wie in Bild 4 dargestellt ist, gliedert sich die Dissertation in 2 Komplexe, die im Wesentlichen mit den oben erläuterten Zielstellungen identisch sind. Auf der einen Seite steht die Erarbeitung der umrissenen Methodik. Ausgangspunkt in Kapitel 2 ist das Zurückführen der RAM-Optimierung auf die Methoden der allgemeinen Problemlösung und der Entscheidungsfindung und in ihrer Spezifikation für den Aufgabenbereich der Kraftwerkstechnik, was den formalen Rahmen der Methodik bildet. In Kapitel 3 wird auf die zur Verfügung stehenden Werkzeuge, d.h. auf die Rechengrößen und Verfahren für die Analyse und Modellierung, eingegangen, einerseits in allgemeiner Form und andererseits unter dem Gesichtspunkt ihrer Systematisierung. Die für die Quantifizierung der Modelle heranziehbaren Datenquellen sind Gegenstand von Kapitel 4. Dies beinhaltet die statistische Auswertung, die Betrachtung der zu Grunde liegenden Abnutzungsprozesse und die Einbeziehung von vorliegenden Informationen zur Verbesserung der Verteilungsparameter. Während -wie erläutert- die Methodik weitestgehend auf etablierte Techniken aufbaut, wird in Kapitel 7 auf Ansätze eingegangen, die theoretisch leistungsfähiger erscheinen und in Zukunft auch in die Methodik integrierbar sein könnten.

Die andere Seite bilden die praktischen Ergebnisse aus den bearbeiteten Industrieprojekten. In Kapitel 5 wird dazu über die Untersuchungen zur Gasturbinenreihe V64.3 und in Kapitel 6 zum Heizkraftwerk mit Druckwirbelschichtfeuerung (DWSF-HKW) in Cottbus berichtet. Es wird jeweils kurz auf die Problemstellung, den Lösungsweg und die wichtigsten Ergebnisse eingegangen. Weitere Details zu den einzelnen Projekten finden sich in den jeweiligen Arbeitsberichten, die jedoch der Vertraulichkeit unterliegen.

Die Ergebnisse und Erfahrungen, die aus den theoretischen und praktischen Untersuchungen gewonnen werden konnten, sind in Kapitel 8 zusammengefasst. Dabei wird verglichen, inwieweit die formulierten Ziele in der vorliegenden Dissertation verwirklicht werden konnten, welche Einschränkungen hierbei zu machen waren und worauf diese zurückzuführen sind. Es werden ebenfalls die aus der Sicht des Autors zu ziehenden Schlußfolgerungen für weitere Forschungen und Projekte dargestellt.

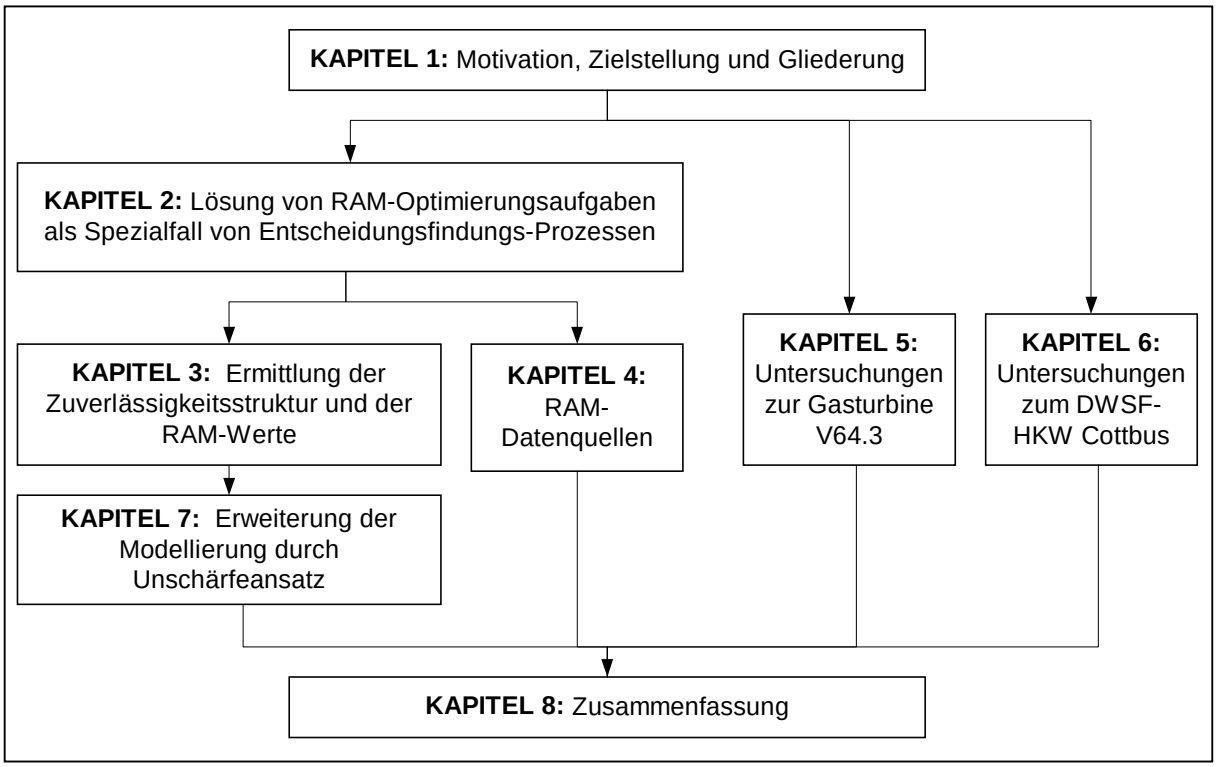


Bild 4 Übersicht über Aufbau der Dissertation

Kapitel 2 Lösung von RAM-Optimierungsaufgaben

2.1 Übersicht

Es ist voranzustellen, dass zum einen bei RAM-Optimierungsaufgaben der Satz: *Viele Wege führen nach Rom* uneingeschränkt gültig ist, wenn allein der Umfang der Literatur betrachtet wird, welche die Optimierung von Instandhaltung und Zuverlässigkeit aus theoretischer und/oder praktischer Sicht behandelt. Zum anderen lässt sich jedoch die Behandlung der Aufgaben, die sich innerhalb des Kraftwerksanlagen-Lebenszyklus ergeben (Anlage 1), mit der allgemeinen Problemlösungsmethodik bei Entscheidungssituationen strukturieren (Bild 5).

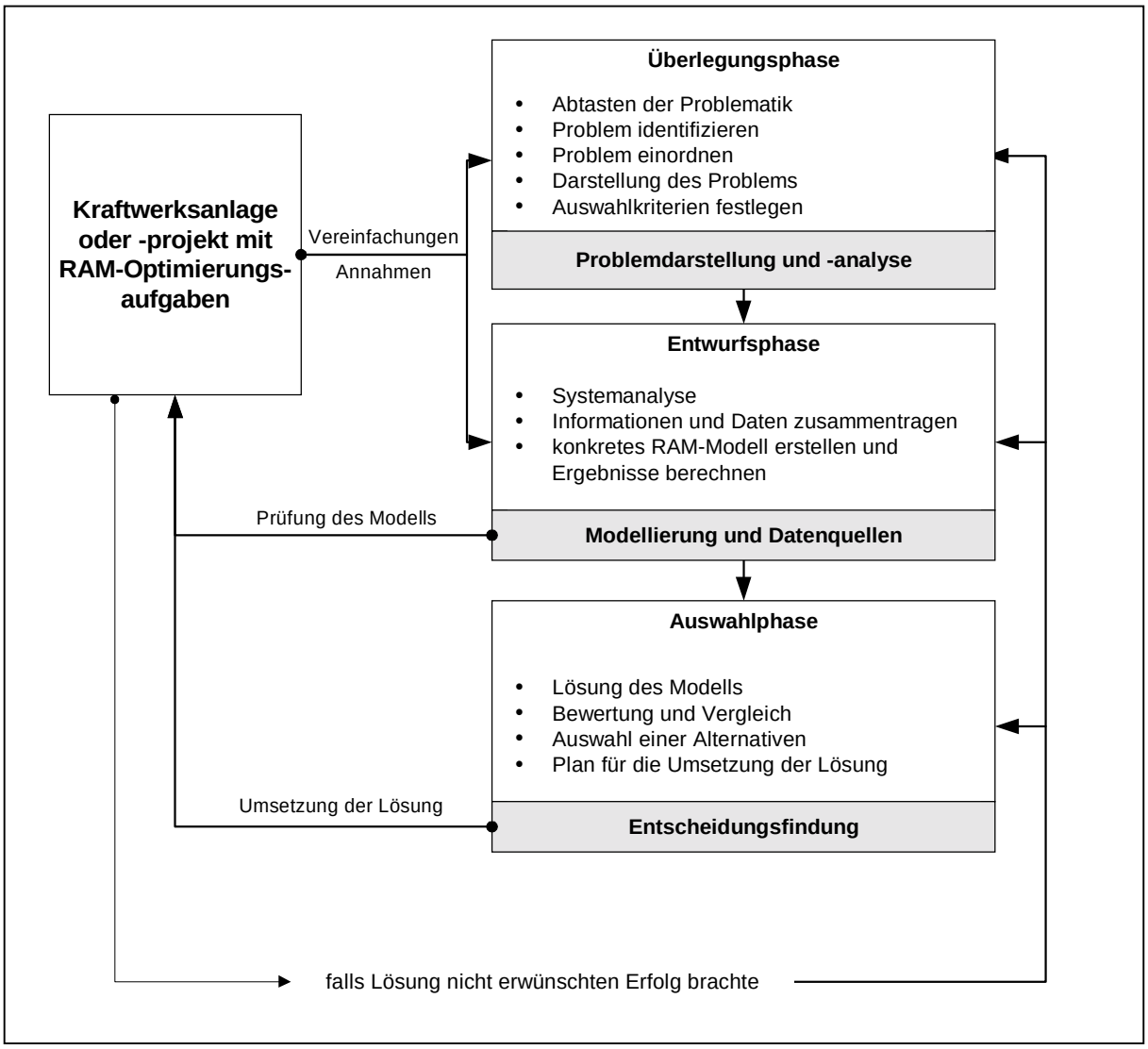


Bild 5 Allgemeine Darstellung der Vorgehensweise bei der Modellierung und Lösung von Entscheidungssituationen; in Anlehnung an /4/

Für eine systematische Herangehensweise an die einzelnen in Anlage 1 aufgeführten Problemstellungen lassen sich folgende Forderungen formulieren, die bei der Optimierungsmethodik zu berücksichtigen sind:

1. Hinter den sog. RAM-Werten, mit denen entsprechende Eigenschaften eines Kraftwerks quantifiziert werden, stehen immer Komponenten mit einer bestimmten Belastbarkeit. Sie

unterliegen konkret feststellbaren Beanspruchungen, die zu Abnutzung und schließlich Störungen bzw. Ausfällen führen. Die Anzahl der Ausfälle, die erforderlichen Reparaturzeiten etc. sind zwar messbar, die resultierenden RAM-Werte haben jedoch statistischen Charakter. Sie stellen Aufenthalts- und Übergangswahrscheinlichkeiten dar, die aus dem jeweils zugrunde gelegten Modell abgeleitet werden, d.h.:

- Konstruktion, Werkstoffe, Instandhaltungsweise etc. bestimmen die Aufenthalts- und Übergangswahrscheinlichkeiten. Betriebserfahrung und ingenieurtechnisches Wissen sind nicht nur für deren Bestimmung, sondern auch zur Bewertung der statistischen Resultate erforderlich. Deshalb sind verfügbare Informationen bzw. Expertenschätzungen möglichst umfassend in die Bestimmung der Wahrscheinlichkeiten einzubeziehen (siehe 4.1.3 und 4.1.4).

- Eine gute statistische Absicherung erfordert umfangreiches Datenmaterial, das entsprechend auszuwerten ist (siehe 4.1.2). Meist sind jedoch auch Zusatzinformationen erforderlich, die Aufschluss über konstruktive Merkmale, Betriebsweise etc. geben.

- Die RAM-Untersuchungen basieren auf Wahrscheinlichkeitsgrößen, bei denen die zugrundeliegende Verteilung und ihre Parameter entscheidend sind. Damit haben die daraus abgeleiteten Handlungsempfehlungen zur Wirtschaftlichkeitssteigerungen generell probabilistischen Charakter.

2. Hinter den RAM-Werten eines Kraftwerks stehen konkrete Kosten, die beispielsweise für Bauteile mit entsprechend hoher Qualität, für Redundanzen oder eine schnelle Instandhaltung (erfordert Ersatzteilvorrat und Personal) anfallen. In die Bewertung von Handlungsalternativen sollten diese Aufwendungen eingehen.

3. Es muss klar sein, wie die RAM-Werte in die Bewertung eingehen. Beispielsweise können neben den äquivalenten Kosten als weitere Kriterien die Verfügbarkeit mit einem unteren Schwellenwert und die Anzahl der Stillstände mit einem oberen Schwellenwert verwendet werden, falls sich diese RAM-Werte nicht monetär erfassen lassen. Die angesprochenen Kosten, die hinter der Realisierung der jeweiligen RAM-Werte stehen, sollten hingegen selbstverständlich in den äquivalenten Kosten enthalten sein.

4. Innerhalb der Problemanalyse und der Formulierung von Handlungsalternativen sind klar die Einflussmöglichkeiten auf Zuverlässigkeit, Verfügbarkeit bzw. Instandhaltung der Anlage zu definieren, d.h. welche der Komponenten und welche ihrer RAM-Werte unterliegen wirklich der Kontrolle desjenigen, der die Optimierung durchzuführen hat:

   - Der Grundsatz sollte immer lauten, dass das, was nicht als eine freie Variable bezeichnet werden kann, auch nicht Gegenstand der Optimierung ist. Das klingt zwar zunächst trivial, wird aber häufig übersehen, z.B. wenn die Konstruktion und die Betriebsweise einer Einheit feststehen, ist die Zuverlässigkeit keine freie Variable mehr, die Verfügbarkeit hingegen insofern, als unterschiedliche Instandhaltungsstrategien möglich sind. Ist zusätzlich noch das Zeitfenster fest, ist z.B. nur noch die Entscheidung zwischen minimaler Instandhaltung und Austauschinstandsetzung (/12/ S.72 f.) frei.

   - Auch die Eingrenzung der zu untersuchenden Einheiten kann ein Problem sein. Umfasst der Untersuchungsgegenstand eine Vielzahl von Bauelementen, resultieren daraus auch entsprechend viele freie Variablen. Deshalb sollten in einer Vorab-Analyse (Aufschlüsselung der Instandhaltungskosten, Ablaufplanung der Instandhaltung mit Netzplantechnik, FMECA) die wichtigsten Einheiten festgestellt und eingegrenzt werden.

5. Je nachdem welche Bauelemente als Einheit betrachtet werden, ergeben sich die relevanten Betrachtungsebenen, auf der die RAM-Werte als freie Variablen variiert werden können. Dazu ist anzumerken:

   - Alle in die Optimierung einbezogenen Einheiten sollten sich möglichst auf der gleichen Betrachtungsebene befinden. Ist die Zahl der Einheiten relativ groß, wird entweder die Zahl der Einheiten begrenzt oder auf einer dann höher angeordneten Betrachtungsebene zusammengefasst.

   - Befinden sich die Einheiten hingegen auf verschiedenen Betrachtungsebenen (z.B. bei Zuverlässigkeitsmodellierung sind die Ausfälle von wenigen kritischen Bauteilen zu erfassen, während die anderen in größeren Einheiten zusammengefasst werden können), so sind diese von der niedrigsten beginnend schrittweise auf jeweils höher angeordneten Betrachtungsebenen zusammenzufassen. Das Variieren und die Berechnung der RAM-Werte erfolgen auf dem selben Lösungsweg.

In dem folgenden Abschnitt wird ein Ansatz vorgestellt, der die aufgeführten Punkte berücksichtigen soll und sich dabei der Spieltheorie anlehnt. Anschließend wird kurz auf Methoden für die sog. Überlegungs- bzw. Auswahlphase, also die Vor- bzw. Nachbereitung eingegangen, die ebenfalls wichtig für den Erfolg von RAM-Optimierungen ist, in der Praxis aber eher etwas vernachlässigt wird. Sowohl die klare Problemdarstellung und -analyse als auch die systematische Entscheidungsfindung bekommen besonders für die Transparenz und die Vermittlung der Ziele und Ergebnisse des RAM-Projektes, bzw. für die bessere Integration des Zuverlässigkeitsmanagements in das technisch-wirtschaftliche Gesamtvorhaben, eine zunehmende Bedeutung.

Abschließend ist festzustellen, dass überwiegend iterativ vorzugehen ist, da bei jedem Schritt Probleme auftauchen können, die eine Änderung bzw. Anpassung innerhalb der vorhergehenden Schritte notwendig machen. Nicht zuletzt kann sich beispielsweise beim Vergleich der Alternativen zeigen, dass gegebenenfalls weitere Größen in die Betrachtung oder Bewertung einzubeziehen sind.

2.2 RAM-Optimierung - Entscheidungsfindung unter Unsicherheit

Der Ansatz hat das Ziel, Handlungsempfehlungen für eventuelle konstruktive, betriebliche bzw. Instandhaltungsmaßnahmen zu geben, bei denen die damit beeinflussbaren RAM-Werte zu einer optimalen Lösung führen. Diese Lösung kann mit der Handlungsalternative $A_{opt.}$ bzw. der Summe von Maßnahmen gleichgesetzt werden, die zur besten Bewertung innerhalb der betrachteten Handlungsalternativen A_i unter den in Frage kommenden Zukunftsszenarien F_j führt.

Diese probabilistische Bewertung verschiedener Alternativen A_i bei einer Entscheidungssituation bzw. Problemstellung berücksichtigt die Eintrittswahrscheinlichkeiten P_j verschiedener Zukunftsszenarien F_j. Kann die Bewertung der Alternativen A_i anhand eines einzelnen, äquivalenten Kriteriums E erfolgen, z.B. die spezifischen Kosten, die Gebrauchskosten, der jährliche äquivalente Gewinn etc., kann eine sog. Entscheidungs-Bewertungs-Matrix (Tabelle 1) mit folgenden Größen aufgestellt werden:

A_i = für die Entscheidungssituation in Frage kommende Alternative (Konfiguration der Anlage, Instandhaltungsstrategie, O&M-Verträge etc.);

F_j = mögliches Zukunftsszenario, das nicht beeinflussbar ist (Entwicklung des Energiemarktes, Brennstoffkosten, Mitbewerber, Kundenstruktur);

P_j = Wahrscheinlichkeit, dass das jeweilige Zukunftsszenario eintreten wird (Schätzung anhand von Tendenzen, Marktbeobachtung, Planspielen, Expertenbefragung);

E_{ij} = Bewertungsgröße, welche die Handlungsalternative A_i unter dem entsprechenden Zukunftsszenario F_j betrachtet (Wirtschaftlichkeits-, RAM-Kennwerte etc.)

Tabelle 1 Entscheidungs-Bewertungs-Matrix für ein einzelnes Kriterium

P_j / F_j / A_i	P_1 / F_1	P_2 / F_2	.... /	P_n / F_n
A_1	E_{11}	E_{12}	....	E_{1n}
A_2	E_{21}	E_{22}	....	E_{2n}
:	:	:	:	:
:	:	:	:	:
A_m	E_{m1}	E_{m2}	....	E_{mn}

In /3/ wird für die Ermittlung der Bewertungsgrößen E_{ij} die allgemeine Form empfohlen:

$$E = f\left(X, Y_d, Y_i\right) \tag{1.1}$$

X = vom Entscheidungsträger frei wählbare Variablen, die entweder die Anlagenkonfiguration ($P_{el.}$, Stromkennzahl, Komponentenauswahl etc.), den Betrieb (Fahrweise, Startzahl, Brennstoff etc.) oder die Instandhaltung (Revisionsintervall, Ersatzteilvorrat etc.) betreffen;

Y_d = vom Entscheidungsträger nicht direkt kontrollierbare Variablen, welche direkt von den gewählten Variablen X abhängig sind (Zuverlässigkeit, Verfügbarkeit und Instandhaltungskennwerte);

Y_i = vom Entscheidungsträger nicht direkt kontrollierbare Variablen, welche aber von den gewählten Variablen X unabhängig sind und durch die sog. Umgebungsbedingungen bestimmt werden (erzielbare Strompreise, Stundenlöhne, Zinsniveau etc.).

Aus der Entscheidungs-Bewertungs-Matrix muss die über alle Zukunftsszenarien beste Alternative bestimmt werden, was durch verschiedene Verfahren (MaxMin-, MaxMax- oder Laplace-Verfahren) geschieht, die von der Grundeinstellung (optimistisch/pessimistisch) des Entscheidungsträgers abhängen. Bei der Verwendung des sog. Hurwicz-Kriterium bietet sich dabei die Möglichkeit, die jeweils beste Alternative bei einer gleitenden Auswertung über das gesamte, kontinuierliche Intervall von extrem optimistischer zu extrem pessimistischer Betrachtung durchzuführen. Die Justierung zwischen diesen beiden Polen findet mit dem sog. Optimismus-Index α statt, welcher die Lösung der allgemeinen Hurwicz-Regel bestimmt.

$$\max_i \left\{ \alpha \left[\max_j E_{ij} \right] + \left(1-\alpha\right) \left[\min_j E_{ij} \right] \right\} \tag{1.2}$$

Das MaxMin- und MaxMax-Verfahren sind dabei Sonderfälle der allgemeinen Hurwicz-Regel, wenn von $\alpha = 0$ bzw. $\alpha = 1$ ausgegangen wird.

$$\max_i \left\{ 0 \left[\max_j E_{ij} \right] + (1-0) \left[\min_j E_{ij} \right] \right\} = \max_i \left[\min_j E_{ij} \right] \tag{1.3}$$

$$\max_i \left\{ 1 \left[\max_j E_{ij} \right] + (1-1) \left[\min_j E_{ij} \right] \right\} = \max_i \left[\max_j E_{ij} \right] \tag{1.4}$$

Dieses Verfahren bietet zum einen den Vorteil einer feinen Justierung und der Anzeige, wie unabhängig die favorisierte Alternative von der Grundeinstellung des Entscheiders ist, und zeigt zum anderen, wann ein Wechsel in der Favoritenrolle stattfindet.

Häufig tritt bei Entscheidungen die Situation auf, dass neben relativ klar angebbaren Kostenstellen bzw. spezifischen Kosten noch weitere Faktoren als relevante Kriterien berücksichtigt werden müssen bzw. sollten. Dies führt zu der sog. *multiple criteria* Bewertung, für die es verschiedenen Ansätze und auch entsprechende Softwareprodukte gibt.

Da sich verschiedene Anlagen oder Alternativen nur sinnvoll in Relation zueinander bewerten lassen kann (Bild 2), wird z.B. eine graphische Darstellung für die Gegenüberstellung (Bild 6) verwendet. Die Alternativen werden dem Hauptkriterium nach geordnet (z.B. als Ergebnis der Entscheidungs-Bewertungs-Matrix) und deren Prognose- bzw. Schätzwerte in Bezug auf die weiteren Kriterien mit eingetragen. In vielen Fällen dürfen dabei bestimmte Grenzwerte oder Einschätzungen nicht unter- oder überschritten werden, z.B. Verfügbarkeit, Investitionskosten, Versicherbarkeit /8/, /9/, /10/, was bei der Auswahl der favorisierten Alternative zu berücksichtigen ist. Da es sich meist um Kriterien handelt, die oft auf Expertenschätzung beruhen, sind hier sinngemäß die Ansätze aus Kapitel 7 ebenfalls anwendbar.

Abschließend ist anzumerken, dass die konkrete Berechnung von äquivalenten Kosten bzw. Gewinnen auch die Zeitpunkte und Randbedingungen berücksichtigen muss, wann diese anfallen bzw. realisiert werden. Dafür stehen verschiedene Wirtschaftlichkeitsberechnungsverfahren zur Verfügung, die beispielsweise in /11/ und /3/ S.169 ff. ausführlich dargestellt sind, so dass an dieser Stelle nicht darauf eingegangen wird.

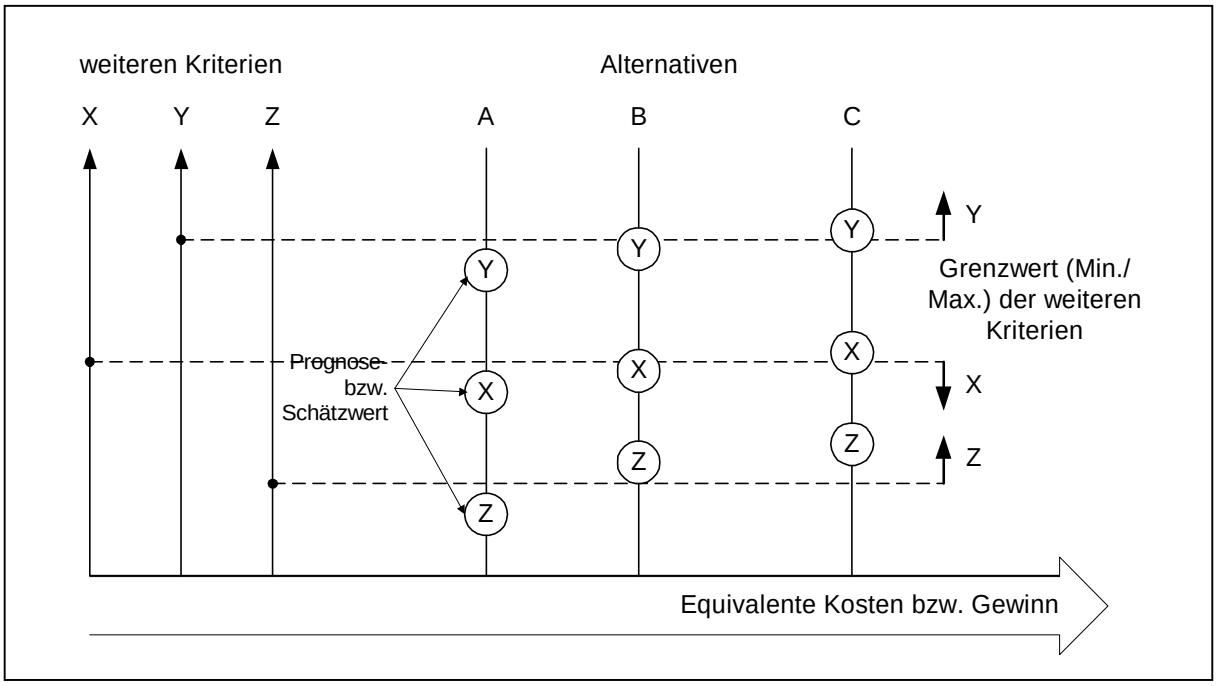


Bild 6 Graphische Gegenüberstellung von Alternativen bei Bewertung anhand mehrerer Kriterien; aus /3/

2.3 Problemdarstellung und –analyse

Graphische Verfahren dienen sehr gut der Problemanalyse, d.h. der Analyse der qualitativen Zusammenhänge und Abhängigkeiten, und der Darstellung des RAM-Optimierungsproblems /4/ S.145 ff., /5/, /6/.

- Entsprechende Methoden haben sich bereits umfassend im Managementbereich etabliert, und dies ist zunehmend auch im technischen Bereich der Fall. Damit stehen reichlich Literatur, Fallbeispiele und Software zur Verfügung.

- RAM-Optimierungen erfordern die Zusammenarbeit zwischen einer Reihe von mehr oder weniger stark am Projekt beteiligten Personen. Über Problem, Zielstellung und Lösungsansatz muss sich dementsprechend verständigt werden, was graphisch meist am besten möglich ist. Zunehmend ist dafür auch Software verfügbar, mit der dies über elektronische Kommunikation möglich ist, was die Vorbereitungsphase sogar bei Einbeziehung eines größeren Personenkreises deutlich verkürzen kann.

- Der Aspekt der Dokumentation ist sowohl während, als auch insbesondere nach Abschluß eines Projektes wichtig, um nachvollziehen zu können, wovon bei der Entscheidungsfindung ausgegangen wurde. Vor allem, wenn eine Lösung keinen Erfolg zeigt, können später so gegebenenfalls Fehler bei der Analyse der Problematik identifiziert werden.

Die aus der Sicht des Autors wichtigsten Techniken für RAM-Optimierungen sind:

- ***Abhängigkeitenanalyse-Diagramm:*** Darstellung funktionaler Abhängigkeiten, Ein- und Ausgangsgrößen können mit Formeln bzw. Funktionen miteinander verknüpft werden. Bei den Untersuchungen wurde beispielsweise das Programm *Analytica* verwendet.

- ***Entscheidungsbaum:*** Er zeigt die Werte möglicher Alternativen und zu welchen Resultaten sie mit welcher Wahrscheinlichkeit führen; die Eintrittswahrscheinlichkeiten der End-Fälle basieren auf den Wahrscheinlichkeiten der Ereignisse der zugehörigen Zweige, d.h. der Umsetzung des Bayesschen Statistik.

Kapitel 3 Ermittlung der Zuverlässigkeitsstruktur und der RAM-Werte

3.1 Übersicht

Die praktische Umsetzung der oben erläuterten, generellen Verfahrensweise bei RAM-Optimierungen erfordert eine Reihe von Grundlagen. Es handelt sich dabei konkret um folgende Punkte:

1. RAM-Werte werden einerseits als Variablen (frei, kontrollierbar bzw. nicht kontrollierbar) von bestimmten Einheiten verwendet, andererseits sind sie jeweils Resultate bis hin zur obersten Betrachtungsebene. Da in der Praxis eine Vielzahl davon verwendet werden, die bei ähnlicher Bezeichnung jedoch teilweise anders definiert sind, muss klar und eindeutig nachvollziehbar sein, was der jeweilige RAM-Wert eigentlich dargestellt und wie er ermittelt wird. Deshalb wird in 3.2 die theoretische Herleitung wichtiger Größen dargestellt. Dabei wird von den grundlegenden Definitionen und Zustandsbetrachtungen ausgegangen, die eine gemeinsame Basis bilden, die auch den Vergleich und die gegenseitige Überführung unterschiedlicher RAM-Werte ermöglichen sollen.

2. Da i.A. die RAM-Werte als Variablen von Einheiten auf verschiedenen Betrachtungsebenen auftreten, müssen die logischen Zusammenhänge zwischen Ausfall bzw. Funktion von Einheiten von der jeweils untersten bis obersten Betrachtungsebene analysiert werden. Dies erfordert die Analyse von Zuständen und Kriterien, d.h. der Zuverlässigkeitsstruktur von Einheiten, wofür die Methode der Fehlermöglichkeits- und Einfluß-Analyse (FMEA) zur Verfügung steht (siehe 3.3).

3. Da die Optimierung als solche gleichbedeutend mit Änderungen der RAM-Werte der freien Variablen ist, muss die bei der FMEA analysierte Zuverlässigkeitsstruktur in Modellen erfasst werden, welche die logischen Zusammenhänge mathematisch wiedergeben, um insbesondere die resultierenden Änderungen der RAM-Werte auf der obersten Betrachtungsebene berechnen zu können. In 3.4 wird auf den hierarchischen Aufbau der Betrachtungsebenen und die in Abhängigkeit der Zahl der Elemente und freien Variablen verfügbaren bzw. anzuwendenden Modellierungsmethoden eingegangen.

3.2 Theoretische Herleitung der RAM-Werte

Als Ausgangspunkt für die Herleitung bietet sich die Definition der Zuverlässigkeit an, für die jedoch verschiedene Formulierungen existieren:

> DIN 55350: Zuverlässigkeit ist die Beschaffenheit einer Einheit bezüglich ihrer Eignung, während oder nach vorgegebenen Zeitspannen bei vorgegebenen Anwendungsbedingungen die Zuverlässigkeitsforderungen (Qualitätsforderung nach Zweckerfüllung) zu erfüllen.

> IEC 56: Zuverlässigkeit ist die Wahrscheinlichkeit, mit der ein Erzeugnis innerhalb festgelegter Zeitgrenzen und Umgebungsbedingungen eine Aufgabe erfüllt.

In den Definitionen lassen sich die Aspekte finden, aus denen die Herleitung des RAM-Wertes Zuverlässigkeit *R*, und anschließend weiterer Größen erfolgt.

Die Unterteilung danach, im welchem Zustand[7] sich eine Einheit befindet, richtet sich allgemein nach der Erfüllung von Forderungen. Wird davon ausgegangen, dass hier keine Abstufung möglich ist, gibt es damit nur 2 Zustände: Z („Forderungen erfüllt“ bzw. Funktion) und $\overline{Z}$ („Forderungen nicht erfüllt“ bzw. Ausfall); Bild 7.

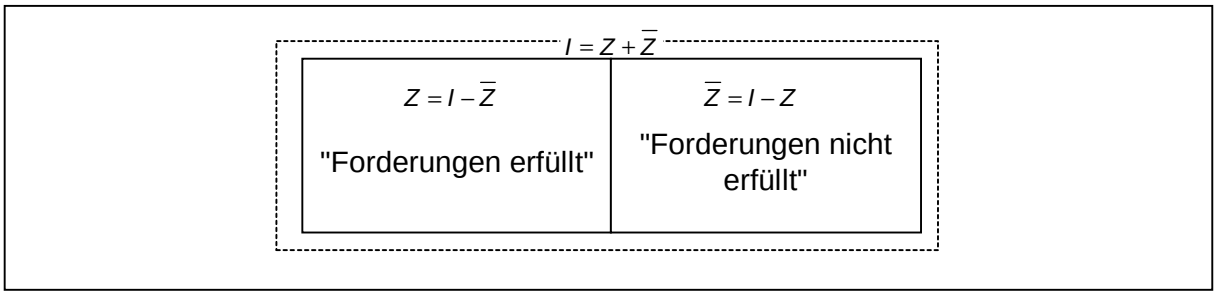


Bild 7 Menge der Zustände bei binärer Betrachtungsweise

Wird der Zustand Z_i der Einheit zum Zeitpunkt *t* und zum Zeitpunkt $t+\Delta t$ betrachtet, lässt sich eine Übergangsmatrix erstellen, in der entweder formal nur die Zustände und Ereignisse eingetragen werden, oder in der die jeweiligen Zustands- und Ereigniswahrscheinlichkeiten einzutragen sind.

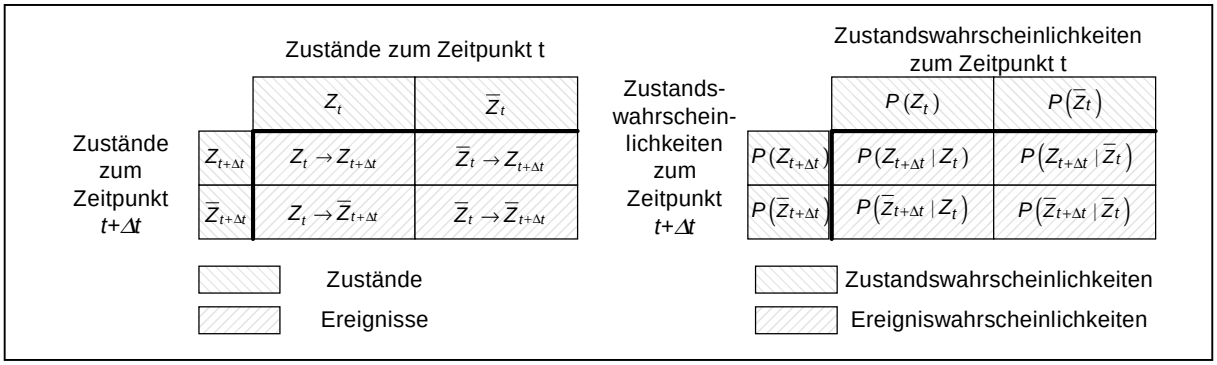


Bild 8 Matrix mit den Zuständen und Ereignissen sowie deren Wahrscheinlichkeiten bei binärer Betrachtungsweise

---

[7] DIN 40041: Zustand ist die Beschaffenheit einer Einheit zum Betrachtungszeitraum.

Bei den nachfolgenden RAM-Werten zur Zuverlässigkeitsbewertung (im Gegensatz zu der Verfügbarkeitsbewertung) werden ausschließlich die Ereignisse $Z_t \rightarrow Z_{t+\Delta t}$ bzw. $Z_t \rightarrow \overline{Z}_{t+\Delta t}$ betrachtet. Weiterhin wird von nachstehenden Voraussetzungen ausgegangen:

- Es existiert immer ein Ausfallzeitpunkt t_x, für den gilt: $0 < t_F < \infty$. Der Ausfallzeitpunkt t_F ist eine Zufallsgröße und damit sein wahrer Wert unbekannt.
- Aus $0 < t_F < \infty$ ergibt sich $R(t=0)=1$ und $R(t=\infty)=0$.

Die Zuverlässigkeit *R(t)*[8] ist damit eine monoton fallende Verteilungsfunktion, welche die Wahrscheinlichkeit angibt, dass der Ausfallzeitpunkt t_F später als t ist:

$$R(t) = P(t < t_F) = P(Z_t) \tag{2.1}$$

Die Ausfallwahrscheinlichkeit *F(t)* wird entsprechend aus dem Zustand $\overline{Z}$ abgeleitet:

$$F(t) = P(t \geq t_F) = P(\overline{Z}_t) = 1 - R(t) \tag{2.2}$$

Aus dem Anstieg der Ausfallwahrscheinlichkeit im Zeitintervall Δt wird die Ausfallwahrscheinlichkeitsdichte *f(t)*[9] berechnet:

$$\begin{aligned} f(t) &= \lim_{\Delta t \to 0} \frac{P([t+\Delta t] \geq t_F) - P(t \geq t_F)}{\Delta t} = \lim_{\Delta t \to 0} \frac{F(t+\Delta t) - F(t)}{\Delta t} \\ &= \frac{dF(t)}{dt} = \frac{d[1-R(t)]}{dt} = -\frac{dR(t)}{dt} \end{aligned} \tag{2.3}$$

$$R(t) = \int_t^{\infty} f(t)\,dt \tag{2.4}$$

Der Grenzwert der Ereigniswahrscheinlichkeit $P(\overline{Z}_{t+\Delta t} \mid Z_t)_{\Delta t \to 0}$ ergibt die Ausfallrate[10] $\lambda(t)$:

$$\lambda(t) = \lim_{\Delta t \to 0} \frac{P([t+\Delta t] \geq t_F) - P(t \geq t_F)}{\Delta t} \cdot \frac{1}{P(t < t_F)} = \frac{f(t)}{R(t)} = \frac{f(t)}{1-F(t)} \tag{2.5}$$

$$R(t) = \exp\left[-\int_0^t \lambda(t)\,dt\right] \tag{2.6}$$

Weiterhin wird aus *f(t)* der sog. Erwartungswert für die Zeit bis zum Ausfall (Mean Time to Failure; *MTTF*[11]) berechnet:

$$MTTF = \int_0^{\infty} t\,f(t)\,dt = \int_0^{\infty} R(t)\,dt \text{ [12]} \tag{2.7}$$

---

[8] *R(t)* wird auch als Überlebenswahrscheinlichkeit bezeichnet.

[9] Die Bildung einer entsprechenden Überlebenswahrscheinlichkeitsdichte ist nicht üblich.

[10] Im englischen Sprachraum wird zunehmend der Begriff „hazard rate“ bevorzugt, da ja das jeweils aktuelle Risiko eines Ausfalls angegeben werden soll; siehe dazu auch /13/.

[11] nähere Erläuterungen in DIN 40041

[12] Umformung erfolgt durch partielle Integration; ausführliche Darstellung siehe Vorlesungsskript Prof. Weiß

Bei den bisher definierten RAM-Werten *R*, *F*, *f*, λ und *MTTF* wird die Reparatur bzw. Wiederherstellung der Funktionsfähigkeit der Einheit nicht berücksichtigt. Instandhaltungsmaßnahmen haben damit keinen Einfluss auf diese Werte.

Bei reparierbaren Einheiten sind neben den obigen, natürlich die RAM-Werte von Bedeutung, mit denen sich die Auswirkungen bzw. der Erfolg von Instandhaltung quantifizieren lassen, mit denen die Ereignisse $\overline{Z}_t \rightarrow Z_{t+\Delta t}$ bzw. $\overline{Z}_t \rightarrow \overline{Z}_{t+\Delta t}$ in Bezug auf den Reparaturzeitpunkt t_R ausgewertet werden.

Entsprechend der Definition der Ausfallwahrscheinlichkeit *F(t)* wird eine sog. Reparaturwahrscheinlichkeit *M(t)* definiert:

> IEC 56: Wahrscheinlichkeit, dass die Instandhaltung eines Elementes im Zeitintervall (t_1, t_2) abgeschlossen und die Funktionsfähigkeit wieder hergestellt wird.

$$M(t_1,t_2) = \int_{t_1}^{t_2} m(t)dt \tag{2.8}$$

Hierbei wird die Wahrscheinlichkeitsdichtefunktion *m(t)* der Reparaturzeiten verwendet, die wie folgt aus den Zustandswahrscheinlichkeiten berechnet wird:

$$m(t) = \lim_{\Delta t \to 0} \frac{P([t+\Delta t] \geq t_R) - P(t \geq t_R)}{\Delta t} = \lim_{\Delta t \to 0} \frac{M(t+\Delta t) - M(t)}{\Delta t} = \frac{dM(t)}{dt} \tag{2.9}$$

Die Reparaturrate $\mu(t)$ wird äquivalent zur Ausfallrate $\lambda(t)$ definiert:

$$\mu(t) = \lim_{\Delta t \to 0} \frac{P([t+\Delta t] \geq t_R) - P(t \geq t_R)}{\Delta t} \cdot \frac{1}{P(t < t_R)} = \frac{m(t)}{1 - M(t)} \tag{2.10}$$

Der Erwartungswert für die Zeit t_R bis zur Reparatur (Mean Time to Repair; *MTTR*) wird berechnet aus:

$$MTTR = \int_0^\infty t\, m(t)dt = \int_0^\infty 1 - M(t)dt \text{ [13]} \tag{2.11}$$

Aus den Erwartungswerten der Ausfall- und Reparaturzeiten wird der Erwartungswert der Zeit zwischen zwei Ausfällen (Mean Time between Failures; *MTBF*) berechnet:

$$MTBF = MTTF + MTTR \tag{2.12}$$

Bei der Ermittlung bzw. Verwendung von Verfügbarkeitsangaben ist zu unterscheiden:

> ***Momentane Verfügbarkeit A(t)[14]:*** Wahrscheinlichkeit, eine Einheit zu einem vorgebenen Zeitpunkt der geforderten Anwendungsdauer in einem funktionsfähigen Zustand anzutreffen /14/. Im Fall konstanter Ereigniswahrscheinlichkeiten μ und λ kann sie berechnet werden aus:

$$A(t) = \frac{MTTF}{MTTR + MTTF} + \frac{MTTR}{MTTR + MTTF} e^{-\left(\frac{MTTR+MTTF}{MTTR \cdot MTTF}\right)t} \tag{2.13}$$

und

> ***Stationäre Verfügbarkeit A:*** asymptotischer Grenzwert der momentanen Verfügbarkeit *A(t)*:

$$A = \frac{MTTF}{MTTR + MTTF} = \frac{MTTF}{MTBF} \tag{2.14}$$

---

[13] auch als Mittlere Störungsdauer, Mean Down Time (MDT), Mean Time to Restoration bezeichnet

[14] engl.: instantaneous availability

Bei der Quantifizierung der Lebensdauer von Einheiten ist zuerst nach der Reparaturfähigkeit zu unterscheiden:

nicht-instandsetzbare Einheit: Die Lebensdauer ist die Betriebsdauer vom Anwendungsbeginn bis zum Zeitpunkt des Versagens;

instandsetzbare Einheit: Die Lebensdauer ist keine feste Größe, sondern der Zeitpunkt der Aussonderungen ist von ökonomischen Überlegungen abhängig, d.h. Gegenstand von Wirtschaftlichkeitsoptimierungen.

Die definierten RAM-Werte beschreiben zwar das Ausfallverhalten, lassen sich aber nicht als solche messen, sondern nur ableiten. Messbare Größen für den Übergang $Z \rightarrow \overline{Z}$ sind allein die festgestellten Ausfallzeitpunkte (Time to Failure) TTF_i der einzelnen Einheiten, die statistisch ausgewertet werden können, woraus aber nicht ohne weiteres die genannten Wahrscheinlichkeitsgrößen berechnet werden können, wenn nicht weitere Annahmen bzw. Vereinfachungen über das Ausfallverhalten verwendet werden.

Zum einen wird meist über einen bestimmten Zeitraum $\Delta t = t_2 - t_1$ die durchschnittliche Ausfallrate $\overline{\lambda}$ aus der Anzahl n der betrachteten Elemente und der Anzahl N der Ausfälle berechnet:

$$\overline{\lambda} = \frac{N}{\sum_{i=1}^{n} TTF_i} = \frac{1}{t_1 - t_2} \int_{t_1}^{t_2} \lambda(t)\,dt \tag{2.15}$$

Zum anderen wird anstelle der stationären Verfügbarkeit häufig vereinfachend die sog. operative Verfügbarkeit A_o berechnet:

$$A_o = \frac{\mu}{\lambda + \mu} \tag{2.16}$$

Dabei werden einerseits konstante Ausfall- und Reparaturraten angenommen, und andererseits bleibt $t_{Betrieb} \ll \infty$ unberücksichtigt.

In Anlage 3 ist eine Übersichtsdarstellung gegeben, welche die Zusammenhänge zwischen den RAM-Werten zeigt.

3.3 Ermittlung von Zuständen und Zuverlässigkeitsstruktur mit FMEA

3.3.1 Aufgaben der FMEA

Aus den Ausführungen zur RAM-Optimierung und der Herleitung der bei den Alternativen A_i als Variablen zu verwendenden bzw. in die Bewertungsgröße E eingehenden RAM-Werte lassen sich die beiden folgenden Aufgaben ableiten:

- Für die Einheiten, deren RAM-Werte Variablen bei der Optimierung sind, sowie für die Einheiten der obersten Betrachtungsebene sind die Zustände Z bzw. $\overline{Z}$ und deren Übergänge zu analysieren und anhand entsprechender Kriterien zu definieren.

- Die logischen Zusammenhänge zwischen Zuständen bzw. Ereignissen auf unteren Betrachtungsebenen und den auf oberen (bis hin zur obersten) Betrachtungsebenen ist

zu analysieren, um daraus ein Modell zu bauen, in dem die entsprechenden Auswirkungen von Änderungen der Variablen festzustellen sind.

Für die Lösung dieser Aufgaben bietet sich die FMEA-Methode an, die seit Jahren in verschiedenen Industriebereichen angewendet und weiterentwickelt wird. Diese Analysetechnik wird folgendermaßen definiert:

> DIN IEC 300: Die Ausfalleffektanalyse (Fehler-Möglichkeits- und Einfluss--Analyse; FMEA) ist ein induktives, in der unteren Ebene beginnendes qualitatives Verfahren zur Analyse der Zuverlässigkeit. Es ist auf die Untersuchungen der Werkstoffe, der Elemente und der Gerätefehler sowie deren Auswirkungen und Mechanismen auf die nächsthöhere Systemfunktionsebene ausgerichtet. Das schrittweise Vorgehen (Feststellen einzelner Fehlerarten und Bewerten ihrer Auswirkungen auf die nächsthöhere Systemebene) führt schließlich zur Bestimmung aller einzelnen Fehlerarten des Systems.

Für die Durchführung stehen umfangreichen Anleitungen zur Verfügung /15/, /16/, die insbesondere die Verwendung von standardisierten Eingabeformularen beinhalten. Außerdem wurden für die Erstellung, Auswertung und Dokumentation eine Reihe von Softwareprodukten[15] entwickelt.

3.3.2 Durchführung der FMEA

An dieser Stelle soll nur kurz auf das Verfahren selbst und einige Aspekte eingegangen werden; zur Vertiefung wird auf die oben erwähnte Literatur verwiesen.

Ausgangspunkt der FMEA ist die Definition und klare Abgrenzung der Funktions- und Ausfall-Zustände eines Elementes auf der untersten Betrachtungsebene. Dafür ist aus den Unterlagen bzw. Planungen herauszufinden, welche Funktion bzw. welche Funktionen ein Element zu erfüllen hat. Zu jeder dieser Funktionszustände gibt es einen oder mehrere sog. Fehlerzustände (Failure Modes, unerwünschtes Ereignis), die insgesamt einen möglichst vollständigen Zustandsraum bilden sollten. D.h. dass unter dem Kriterium einer bestimmten Funktionserfüllung die Zustände in Funktion und Ausfall möglichst eindeutig und vollständig unterteilt werden sollten.

Weiterhin sind die Ursachen zu hinterfragen, weshalb ein Element vom Funktions- zum Ausfallzustand übergeht. Dazu gehören zum einen determinierte Schädigungen als Folge normaler Betriebsbeanspruchung, Folgeschäden die durch das Versagen anderer Elemente hervorgerufen wurden, Bedien- und Montagefehler sowie nicht vorhersagbare Umwelteinflüsse. Während bei der FMEA diese Ursachen nur qualitativ angegeben werden, erfordert die sog. FMECA die Angabe von Ereigniswahrscheinlichkeiten und eines Schweregrades[16], der ausdrücken soll, wie kritisch die Ausfallfolgen auf das Gesamtsystem zu beurteilen sind. Die Bestimmung der Eintrittswahrscheinlichkeit und die Folgenabschätzung bilden die Grundlage für die Analyse der Kritizität (Quantifizierung des Risikos), die Anhaltspunkte für die relativen Prioritäten der Fehlerarten, z.B. in Bezug auf fehlerbehebende Handlungen, Instandhaltung etc. gibt.

Die umfassende Durchführung der FMEA/FMECA beinhaltet weiterhin die Analyse der Feststellbarkeit von Fehlern bzw. der verursachenden Schädigungen und die Möglichkeiten zur präventiven bzw. akuten Fehlerbehebung. In 0 ist dazu einerseits eine Übersichtsdarstellung zum Abarbeitungsprozess, in Anlage 5 zu den Datenquellen und Nutzern der FMEA/FMECA

---

[15] Relex FMEA/FMECA; FMeasy; FailMode von ITEM; MS-Excel Add-In von XYFit

[16] alternative Bezeichnungen: severity factors bzw. classes; Beispiele siehe Anlagen

und in Anlage 6 ein entsprechendes standardisiertes Eingabeformular angegeben, mit dem diese Analyse-Methode üblicherweise durchgeführt wird.

Es ist eine insgesamt geeignete Methode zur Zuverlässigkeitsdokumentation von Anlagen, sogar wenn diese sich noch in der Projektphase befinden. Durch ihre standardisierte Form kann sie mit Datenbankprogrammen gekoppelt werden, um so eine Wissensbasis über Erhalt und Verlust der Funktionsfähigkeitszustände zu erstellen, die neben der Modellierung auch für die konstruktive Weiterentwicklung, Fehleranalyse etc. verwendet werden kann.

3.3.3 Definition von Zuständen

Zwar ist die FMEA primär auf die Analyse von Ausfallzuständen ausgerichtet, beinhaltet aber genauso wichtige Informationen in Bezug auf die definierte Funktion von Bauelementen bzw. Einschränkungen hinsichtlich der Funktionsfähigkeit, die jedoch nicht zum Ausfall führen. Veränderungen der Parameter einzelner Kriterien, z.B. die Verschlechterung des Wirkungsgrades, Leistungsminderung durch Ausfall einzelner Bauteile der Einheit etc., führen zu einem immer wieder auftretenden Problem der Zuverlässigkeitsbetrachtungen:

- In der Praxis kann sich eine Einheit in wesentlich mehr als zwei, konkret eingrenzbaren Zuständen befinden. Je höher die für die RAM-Optimierung relevante Betrachtungsebene ausgewählt wurde, desto zahlreicher sind meist die sinnvoll definierbaren Zustände, die jeweils signifikante Unterschiede in der Funktionsfähigkeit der entsprechenden Einheit repräsentieren.

- Die in 3.2 hergeleiteten RAM-Werte basieren auf der binären Betrachtung mit den ausschließlichen Zuständen Z bzw. $\overline{Z}$.

Es existieren unterschiedliche Möglichkeiten, wie diesem Widerspruch begegnet werden kann:

- Aufstellung von Regeln bzw. einer Regelmenge auf Grundlage der Boolschen Algebra. Hierbei ist jedoch zu beachten, dass nicht die Vereinfachungsmethoden der Schaltalgebra angewendet werden können, da diese nur Z bzw. $\overline{Z}$ kennt.

- Die Modellierung mit Markoffschen Ketten.

- Die Verwendung sog. unscharfer Mengen für die Zustände (siehe Kapitel 7).

Weiterhin gibt es für den Bereich kraftwerkstechnischer Anlagen speziell vordefinierte Zustände, auf denen eine RAM-Kennwertsystematik aufgebaut wird. Es handelt sich dabei um die Zuverlässigkeitsdatenbanken des Verbandes der Großkraftwerkbetreiber (VGB) und des North American Electric Reliability Council (NERC), die in 4.2 erläutert werden.

In welche unterschiedlichen Zustände Z_i die Funktionsfähigkeit einer Einheit unterteilt werden kann, richtet sich nach den Kriterien K_i, mit denen die der Zuverlässigkeitsdefinition zugrunde liegende Erfüllung von Forderungen charakterisiert werden kann. Eine Untergliederung in ca. 3 bis 7 Zustände Z_i ist für praktische Problemstellungen meist vollkommen ausreichend. Eine wesentlich feinere Untergliederung würde eine höhere Genauigkeit vorspiegeln, als es mit den realen Methoden der Befundung an Anlagen der Kraftwerkstechnik überhaupt möglich und sinnvoll ist. Im Rahmen von Untersuchungen zu Expertensystemen wurde zudem festgestellt, dass die jeweiligen Personen bei der Bewertung technischer Größen im Schnitt nicht mehr als 5 Bereiche verwenden. Die Kriterien K_i (z.B. Leistungsparameter, Wirkungsgrad, Werkstoffeigenschaften etc) liefert beispielsweise die der FMEA zugehörige Analyse der Ausfallerkennung. Die Zuordnung lautet demnach:

$$\left[K_1;K_2;\ldots;K_m\right] \rightarrow \left[Z_1;Z_2;\ldots;Z_n\right] \tag{2.17}$$

Handelt es sich nur um 2-3 Kriterien K_i, dann können sie in Matrixform miteinander kombiniert werden (Bild 9). Die Einteilung bzw. Gruppierung der resultierenden Kombinationen κ in Zustände Z_i ist von der konkreten Problem- bzw. Zielstellung abhängig, und richtet sich nach folgenden Forderungen:

- ***Normzustand (Z_N):*** Dieser Gruppe sind alle Kombinationen κ zuzuordnen, die nicht oder nur insoweit vom ursprünglichen Auslegungszustand abweichen, dass irgendwelche Maßnahmen bzw. Entscheidungen über eventuelle Maßnahmen zu treffen sind.

- ***Entscheidungszustände (Z_E):*** Sie ergeben sich aus der Über- oder Unterschreitung einzelner oder mehrerer Kriterien, die jedoch nicht automatisch zum Ausfall des Systems führen. Es soll sich dabei ausschließlich um Zustände handeln, bei denen Maßnahmen bzw. Entscheidungen über eventuelle Maßnahmen zu treffen sind, die wiederum jeweils mit direkten oder indirekten Kosten verbunden sind. Typische Entscheidungszustände betreffen insbesondere Instandhaltungsmaßnahmen (Wartung, Reparatur bzw. Inspektionen).

- ***Ausfallzustände (Z_A):*** Bei einem System sollten nur dann mehrere Ausfallzustände betrachtet werden, wenn dabei jeweils unterschiedliche Maßnahmen zu treffen sind (z.B. bei einer 2-aus-4-Schaltung der Ausfall der letzten Redundanz bzw. bei einem gleichzeitigen Ausfall aller Redundanzen durch gemeinsame Ausfallursache). Weiterhin sollte nach sicheren und unsicheren Ausfallzuständen unterschieden werden, falls dies im Rahmen der FMEA festgestellt wurde.

Der Autor geht jedoch davon aus, dass bei RAM-Optimierungen i.A. ebenfalls meist eine Anzahl von ca. 3-7 für die Gruppierung der theoretisch möglichen Kombinationen κ ausreicht. Für das Beispiel in Bild 9 erfolgt eine Einteilung in die Zustände Z_i:

$$Z_N = \{\kappa_7, \kappa_8, \kappa_9, \kappa_{10}, \kappa_{11}, \kappa_{12}\};\ Z_{E1} = \{\kappa_5, \kappa_6\};\ Z_{E2} = \{\kappa_2, \kappa_3, \kappa_4\};\ Z_A = \{\kappa_1\}$$

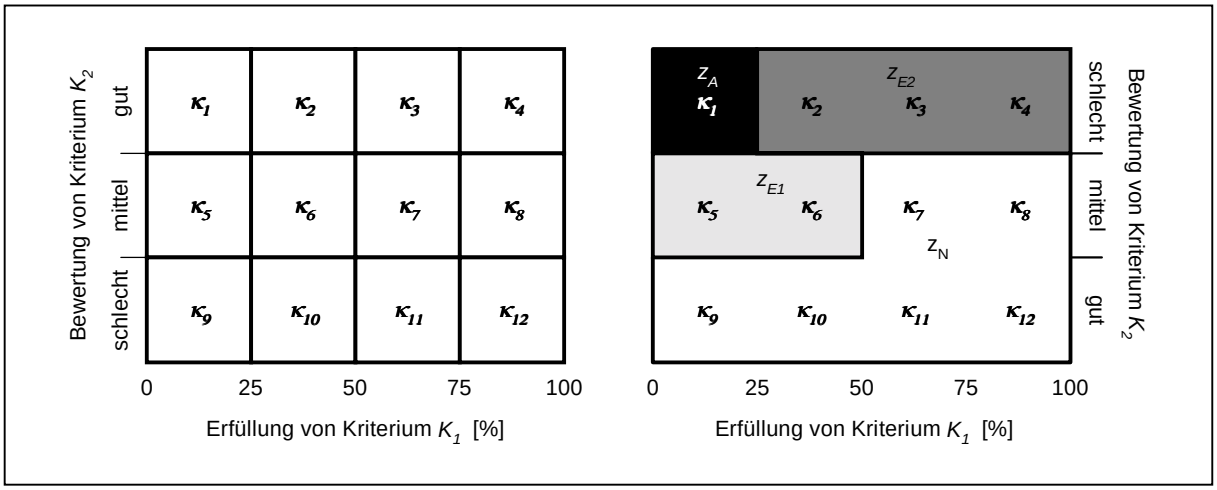


Bild 9 theoretisch mögliche Kombination κ und deren Gruppierung in Zustände z_i

Weiterhin ist zu beachten, dass für die Berechnung von Werten wie $R(t)$, $f(t)$ oder $\lambda(t)$ ebenfalls eine Zuordnung notwendig ist, nämlich die der Zustände Z_i auf Z bzw. $\overline{Z}$.

$$\left[z_1;z_2;\ldots;z_n\right] \rightarrow \left[Z;\overline{Z}\right] \tag{2.18}$$

Die Zuordnungen sind von verschiedenen Randbedingungen und nicht zuletzt von Erfahrung und Sichtweise der jeweiligen Person abhängig, so dass auch meist mehrere Möglichkeiten denkbar sind. Deshalb sind die entsprechenden Zuordnungen eindeutig zu beschreiben bzw. zu dokumentieren, so dass sie nachvollziehbar sind und u.U. anderen Randbedingungen angepasst werden können.

3.4 Modellierung der Zusammenhänge zwischen Zuständen von Einheiten

3.4.1 Übersicht der Modellierungsmethoden

Die hier erläuterten RAM-Modellierungsmethoden haben generell die Aufgabe, den Systemzustand aus den Zuständen seiner Einheiten über die Zuverlässigkeitsstruktur des Systems, die z.B. mit der FMEA analysiert wurde, zu ermitteln.

Bei der Aufstellung von Regeln („wenn-dann“) werden im „wenn“-Teil die Zustände Z_i der Einheiten durch Operatoren der Boolschen Algebra (UND, ODER, NICHT etc.) miteinander verknüpft, um im „dann“-Teil auf den Zustand des Systems zu schließen. Für die Darstellung und Auswertung der kausalen Beziehungen wurden die Methoden des Zuverlässigkeitsblockdiagramms („dann“-Teil: Z_N) und des Fehlerbaumes („dann“-Teil: Z_A) entwickelt.

Bei den Markoffschen Ketten werden hingegen Zustände und Ereignisse gleichermaßen erfasst, so dass Prozesse als Folge von Ereignissen modelliert werden können. Die Berechnung erfolgt unter Verwendung der Ereigniswahrscheinlichkeiten $P\left(Z_{j,t+\Delta t} \mid Z_{i,t}\right)$, mit denen die zeitabhängige Berechnung von Zustandswahrscheinlichkeiten bzw. RAM-Werten möglich ist.

Da sich die Zuverlässigkeitsstruktur hierarchisch gliedern lässt, indem jeweils eine Anzahl von Bauteilen bzw. Funktionen als Einheiten der einzelnen Betrachtungsebenen zusammengefasst werden (Bild 10), können bei der Modellierung des Systems entweder durchgängig eine Methode oder auf verschiedenen Betrachtungsebenen auch jeweils unterschiedliche Methoden verwendet werden. Eine solche kombinierte Modellierung ist in 3.4.4 beispielhaft dargestellt.

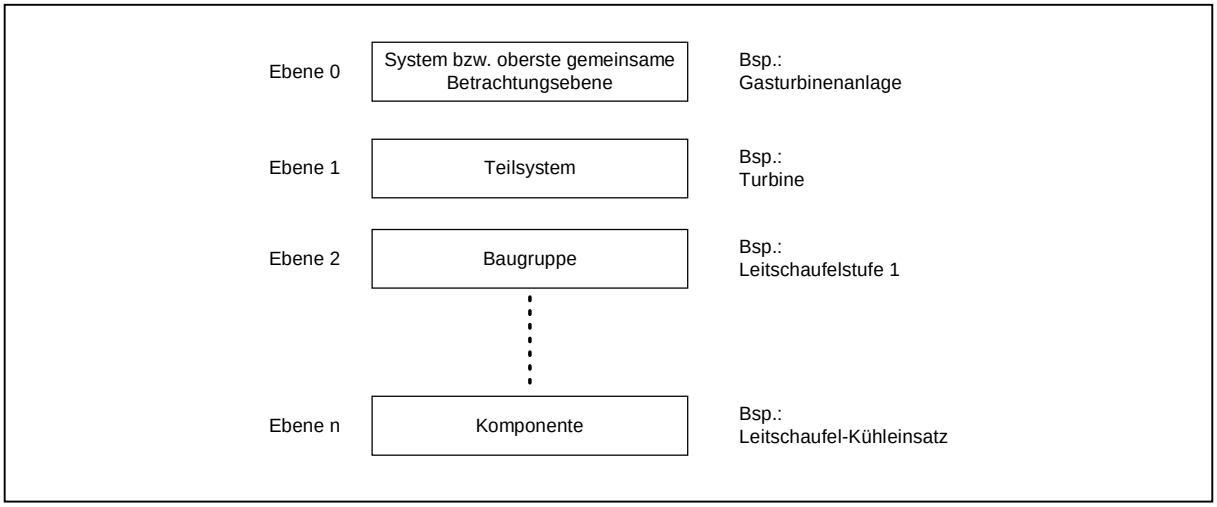


Bild 10 Hierarchie möglicher Betrachtungsebenen

3.4.2 Fehlerbaum und Zuverlässigkeits-Blockdiagramm

Da der Schwerpunkt dieser Arbeit nicht in der Erläuterung der gebräuchlichen Modellierungsverfahren liegt, sondern in ihrer Einbindung in die entwickelte Methodik, werden diese auch nur kurz vorgestellt; ansonsten wird auf weiterführende Quellen verwiesen. Einen guten Überblick geben an sich schon die Definitionen nach DIN IEC 300:

> „Die Fehlerbaummethode[17] ist ein deduktives, von einer höheren Systemebene zu einer niedrigeren Systemebene gerichtetes Verfahren zu der Analyse der Systemzuverlässigkeit. Mit ihr sind solche Bedingungen und Einflüsse feststellbar und untersuchbar, die das Eintreten eines bestimmten, unerwünschten Ereignisses bewirken oder dazu beitragen. Dieses Ereignis beeinträchtigt in signifikanter Weise das Systemverhalten, die Sicherheit, die Wirtschaftlichkeit oder andere geforderte Merkmale. Ausgehend vom Hauptereignis werden in der nächst niedrigeren funktionalen Systemebene die möglichen Ursachen einer Störung oder die für das Hauptereignis verantwortlichen Fehlerarten ermittelt. So wird schrittweise weiteres unerwünschtes Systemverhalten in tieferen Ebenen ermittelt, bis die niedrigste Systemebene erreicht ist. In dieser tiefsten Ebene werden Störungen meist durch Fehler in den Elementen verursacht. Die Ergebnisse dieser Analyse werden graphisch in einem Störungsbaum dargestellt.“

> „Die Analyse der Zuverlässigkeit anhand von Blockdiagrammen ist ein deduktives, von einer höheren Systemebene zu einer niedrigeren Systemebene gerichtetes Verfahren. Ein Zuverlässigkeits-Blockdiagramm ist eine graphische Darstellung der funktionalen Struktur eines Systems durch seine Teilsysteme und Elemente. Anhand dieses Blockdiagramms können Wege durch das System ermittelt werden, die eine erfolgreiche Erfüllung der Systemfunktion kennzeichnen. Die logische Verbindung der Blöcke (Teilsysteme, Elemente) wird im Diagramm dargestellt.“

Die Berechnung basiert ausschließlich auf der Verwendung der Zustandswahrscheinlichkeiten $P(Z_i)$; die RAM-Werte des Systems können deshalb nicht zeitabhängig berechnet werden. Als Eingabewerte sind sowohl konstante Ausfall- bzw. Reparaturraten, *MTTF* bzw. *MTTR* als auch stationäre Verfügbarkeits- bzw. Nichtverfügbarkeitswerte möglich.

Wenn die Einheiten des Systems nur zwei Zustände Z_1 und Z_2 besitzen, sind mit einem der beiden Verfahren erstellte Modelle über die Regeln von De Morgan theoretisch jeweils in die andere Darstellungsform überführbar. Allerdings setzt das voraus, dass für jede Einheit gilt, Z_1 und Z_2 sind disjunkt, da sonst $Z_{Einheit} = 1 - \overline{Z_{Einheit}}$ nicht erfüllt ist. Wie sich aber bei realen Anlagen zeigt, ist dies nur selten der Fall, so dass hier entsprechende Vorsicht geboten ist.

Die typischen Anwendungsbereiche der beiden Modellierungsmethoden sind:

- Fehlerbaum /17/, /18/, /19/: Wahrscheinlichkeitsabschätzung von sicherheitsrelevanten Ausfällen; Ursachenforschung von Nichtverfügbarkeitsereignissen; Wissensbasis bei der Analyse von Störungen
- Zuverlässigkeitsblockdiagramme /20/, /21/: Einrichtung von Zuverlässigkeitszielen; Bewertung des Einflusses von Komponentenausfällen auf das System; Aufteilung der Zuverlässigkeitsforderungen; Konfigurationsvergleich

Beide Verfahren führen bei realen Anlagen zu umfangreichen Modellen, zu deren Erstellung und Berechnung entsprechende Software (siehe 3.4.4) benötigt wird.

---

[17] auch als Störungsbaumanalyse bezeichnet

3.4.3 Markoffsche Ketten

Beim Verfahren der Markoffschen Ketten werden mit Hilfe von mathematischen Modellen die Zustandswahrscheinlichkeiten der Systemelemente (Teilsysteme, Elemente) bewertet. Dies sind Aussagen zu einzelnen Funktionszuständen oder zum Eintritt von Ereignissen zu bestimmten Zeitpunkten oder innerhalb von Zeitintervallen.

> DIN IEC 300: Die Markoffanalyse ist im Wesentlichen ein induktives, von einer niedrigeren Systemebene zu einer höheren Systemebene gerichtetes Verfahren zur Analyse der Zuverlässigkeit. Es ist gut geeignet zur Bewertung komplexer Strukturen und komplexer Instandhaltungsstrategien.

Zu Anfang müssen alle interessierenden Zustände Z_i, einschließlich der Übergangsraten (Ausfallraten oder Instandsetzungsraten der Elemente) von einem in einen anderen Zustand festgelegt werden. Üblicherweise wird von konstanten und von der Zeit oder von früheren Ereignissen unabhängigen Übergangsraten ausgegangen. Es gibt zwar auch das sog. Semi-Markoff-Verfahren, mit dem auch zeitabhängige Übergangsraten modelliert werden können; die dafür notwendige Software kann aber für ihre Anwendung im Bereich der RAM-Optimierung noch nicht als Stand der Technik bezeichnet werden (siehe Kapitel 7).

Für die qualitative Analyse müssen alle möglichen Zustandsübergänge in einer sog. Übergangsmatrix ermittelt werden, deren Informationen später auch graphisch dargestellt werden können. Mit Hilfe der Übergangsraten und von Übergangsdiagrammen abgeleiteten Informationen zur Systemstruktur kann ein mathematisches Modell in Form eines Differentialgleichungssystems erstellen werden, mit dem die Zuverlässigkeitskenngrößen des Systems zu berechnen sind. Deren analytische bzw. Simulationslösung erfordert jedoch leistungsfähige Soft- und Hardware, was die breite Anwendung der Markoffschen Ketten für größere Modelle in der Vergangenheit behindert hat.

Beim Markoff-Prozess ist der Zustand zum Zeitpunkt t_{n+1} vom Zustand zum Zeitpunkt t_n, und ausschließlich von diesem abhängig. Das sog. Gedächtnis des Systems beschränkt sich auf diese Betrachtungsweise. Das bedeutet beispielsweise, dass die aktuelle Wahrscheinlichkeit des Ausfalls einer sich in Betrieb befindlichen Anlage nur in Abhängigkeit von diesem Betriebszustand, nicht aber von vorher liegenden Instandhaltungsmaßnahmen, dem Fertigungs- bzw. Montageprozess etc. betrachtet wird. Ein vollständiger Zustandsraum würde hingegen den gesamten vorangegangenen Prozess von der Initiierung des Systems bis zum aktuellen Zeitpunkt berücksichtigen, d.h. die gesamte Reihenfolge aller relevanten Ereignisse. Eine den Markoff-Prozessen ähnliche Methode für die Behandlung vollständiger Zustandsräume ist dem Autor anhand der ausgewerteten Literatur nicht bekannt.

Nach dem Erstellen des Zustandsdiagramms sind die Wahrscheinlichkeiten der einzelnen Zustände zu bestimmen. Andere Kenngrößen werden von diesen Wahrscheinlichkeiten abgeleitet. Die Wahrscheinlichkeiten für die einzelnen Zustände werden durch Lösung der Übergangsmatrizen oder der Differentialgleichungen erhalten. Mit dem Markoff-Verfahren werden in erster Linie folgende Kenngrößen ermittelt:

- Auswertung der Funktionsfähigkeit: Das Zustandsdiagramm zur Auswertung der Funktionsfähigkeit enthält mindestens einen absorbierenden Zustand[18]. Die Wahrscheinlichkeit, dass das System sich zu einem Zeitpunkt t in einem bestimmten Zustand befindet, wird durch die vorher erwähnten mathematischen Verfahren bestimmt. Wenn der Zeitpunkt t ins Unendliche verschoben wird, geht die Wahrscheinlichkeit für jeden funktionsfähigen Zustand gegen Null, die der absorbierenden Zustände gegen Eins. Die Kenngröße für die Funktionsfähigkeit ist üblicherweise die mittlere Zeitspanne

[18] Ein Zustand aus dem, falls er einmal eingetreten ist, keine weiteren Ubergänge mehr möglich sind.

bis zum ersten Ausfall (*MTTFF*[19]). Bei der Auswertung des Zustandsdiagramms ist die mittlere Zeitspanne bis zum ersten Ausfall die Summe aller der Zeitspannen, die das System in funktionsfähigen Zuständen war, bevor es den Übergang zum absorbierenden Zustand erreichte.

- Auswertung der Verfügbarkeit und der Instandsetzbarkeit: Diese Zustandsdiagramme enthalten keine absorbierenden Zustände. Wenn der Zeitpunkt *t* ins Unendliche verschoben wird, geht die Wahrscheinlichkeit für jeden Zustand gegen einen festen Wert. Die Verfügbarkeit des Systems geht ebenfalls gegen einen festen Wert $A(\infty)$, der gleich der Summe aller Wahrscheinlichkeiten für die funktionsfähigen Zustände ist.

Da das generelle Ziel der Auswertung von Zustandsdiagrammen ist, die Kenngrößen für die Funktionsfähigkeit, die Verfügbarkeit und die Instandhaltbarkeit des betroffenen Systems zu bestimmen, sind alle die in den vorhergehenden Abschnitten erwähnten Anwendungen denkbar. Zusätzlich bieteten sich Markoff-Prozesse für die Planung von Instandhaltungsstrategien, insbesondere die der zustandsorientierten Instandhaltung, an.

3.4.4 Zusammenfassung

Die oben erwähnte Kombinierbarkeit der Modellierungsmethoden soll kurz anhand eines einfachen Beispiels dargestellt werden.

<u>Beispiel:</u>

Für die Berechnung der stationären Verfügbarkeit eines Systems wird auf der obersten Betrachtungsebene (Ebene 0) eine Reihenparallelschaltung aus den Teilsystemen I bis III als RBD modelliert.

Das Teilsystem III (Ebene 1) besteht wiederum aus einer parallelen Schaltung der Baugruppen A und B von denen jeweils mindestens eine in Funktion sein muss. Da hier durch Änderungen der Instandhaltungsaufwendungen (Ersatzteilvorhaltung, Wartungspersonal) die Reparaturrate beeinflusst werden kann, wird diese Ebene als Markoffsche Kette modelliert.

Um die Ereigniswahrscheinlichkeit $P(z_3|z_1)$ zu berechnen, wird die Ausfallwahrscheinlichkeit von B benötigt, d.h. der Ausfall von B ist das unerwünschte Hauptereignis auf der Ebene 2, das als Fehlerbaum modelliert wird. Daraus lässt sich beispielsweise der Einfluss der Fehlerrate von Bauteil c auf die Baugruppe B analysieren.

Die Vor- und Nachteile von Zuverlässigkeits-Blockdiagramm, Fehlerbaum und Markoffschen Ketten sind in DIN IEC 300 zusammengestellt. Der Autor hat diese Auswertung in Anlage 7 übernommen und verzichtet deshalb auf weitere Ausführungen dazu.

Beschreibungen und Vergleiche von RAM-Software finden sich nur relativ selten in der Literatur /22/, insbesondere da ständig neue Produkte bzw. verbesserte Programme angeboten werden. Deshalb ist aus Sicht des Autors das Internet[20] die beste Möglichkeit, sich nicht nur zu informieren, sondern auch anhand der oft verfügbaren Testversionen die Eignung zum Lösen der konkreten Problemstellung festzustellen.

---

[19] Mean Time to First Failure

[20] z. B. http://www.plant-maintenance.com/maintenance_software_availability.shtml; http://rac.iitri.org/DATA/RMST/ bzw. http://www.enre.umd.edu/vendors.htm

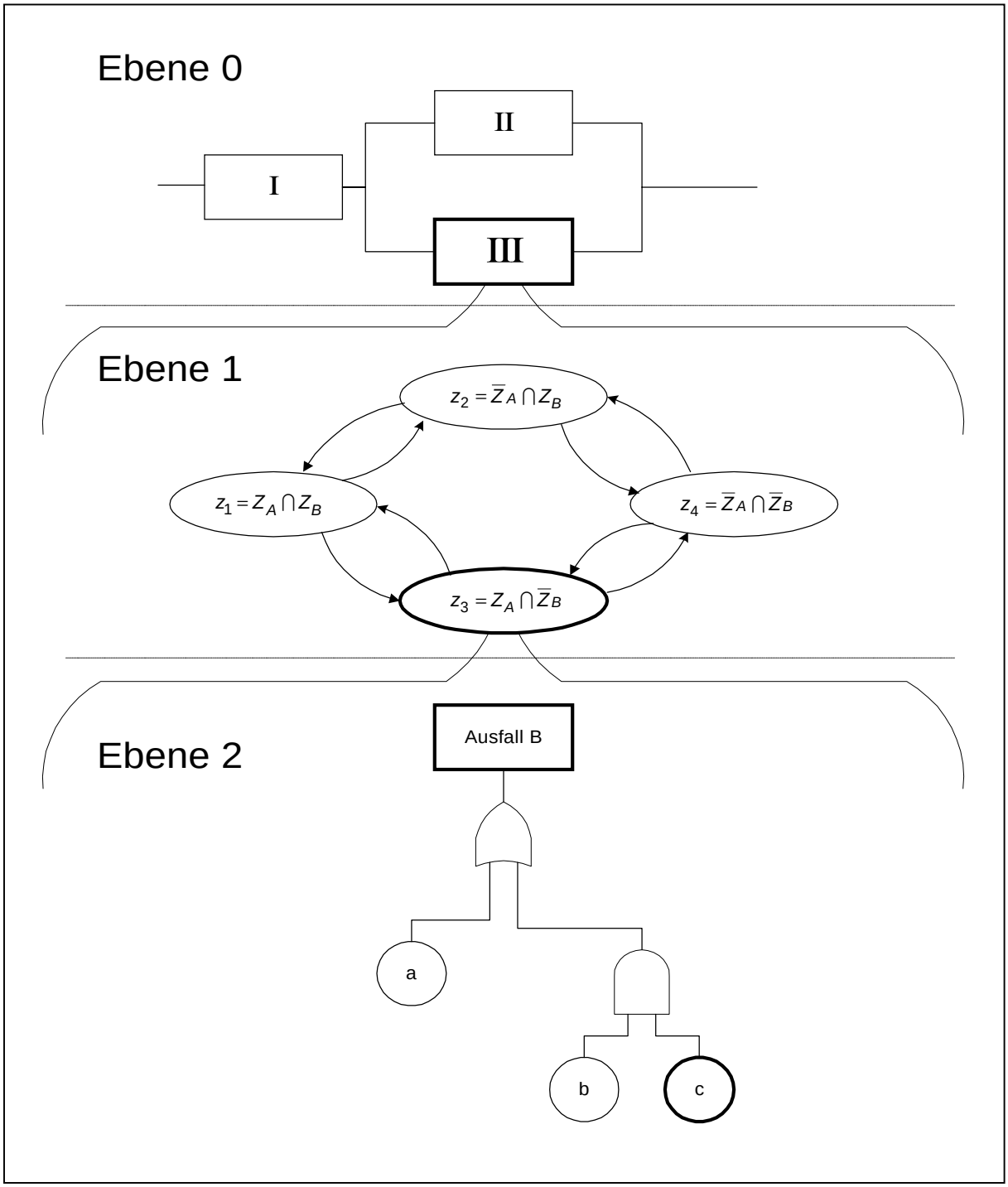


Bild 11 Beispiel für die Kombination von Modellierungsmethoden

Kapitel 4 RAM-Datenquellen

4.1 Daten zur Bestimmung von Zustands- und Ereigniswahrscheinlichkeiten

Für die Durchführung von RAM-Optimierungen werden Zustands- und Ereigniswahrscheinlichkeitsdaten benötigt. Das Hauptproblem ist nicht das Sammeln von Daten an sich, sondern der für das Modell (Zustände und Ereignisse) statistisch relevanten Daten. In diesem Zusammenhang muss jedoch zunächst darauf hingewiesen werden, dass es in Bezug auf die Verwendung von statistischen Daten unterschiedliche Ansichten gibt, teilweise sogar grundlegend andere. Die beiden sich gegenüberstehenden Standpunkte kommen auch in den unterschiedlichen, parallel verwendeten Zuverlässigkeitsdefinitionen zum Ausdruck. Der Autor vertritt aber der Meinung, dass hier jedoch die Möglichkeit einer sinnvollen gegenseitigen Ergänzung existiert.

Die Definition nach DIN 55350 arbeitet mit Begriffen wie *Beschaffenheit*, *vorgegebene Anwendungsbedingungen* und *Zuverlässigkeitsforderungen*, die auf den determinierenden Einfluss von bestimmten Faktoren auf die Zuverlässigkeit hinweisen. Damit soll angedeutet werden, dass es ursächliche[21] Prozesse gibt, die für Zustandsänderungen vom Ausgangszustand zum Ausfallzustand verantwortlich sind. Das Hauptproblem bei dieser Herangehensweise ist, dass es außer bei Extremfällen[22] für die Zuverlässigkeit praktisch keinen strengen Determinismus gibt, d.h. dass bei Kenntnis aller Start- und Randbedingungen der Zeitpunkt des Ausfalls nicht exakt im voraus bestimmt werden kann bzw. feststeht. In /24/ gibt es dazu eine ausführliche Diskussion, in der die Feststellung getroffen wird, dass Variabilität die Quelle von Nichtzuverlässigkeit ist.

Nach IEC 56 bildet hingegen der Begriff *Wahrscheinlichkeit* den Mittelpunkt bei der Definition der Zuverlässigkeit. Nach /25/ ist die Wahrscheinlichkeit eine Maßzahl für ein Zufallsgeschehen, d.h. dass beim Vorliegen des sog. reinen Zufalls jedes Ereignis die uneingeschränkte (indeterminierte) Chance des Eintreffens hat. Die Bestimmung von Wahrscheinlichkeiten erfolgt durch die Statistik, die nach /25/ als *Gesamtheit der Methoden, die für die Gewinnung und Verarbeitung empirischer*[23] *Informationen* bezeichnet wird. Obwohl teilweise bei Zuverlässigkeitsbetrachtungen vereinfachend von der Existenz des reinen Zufalls ausgegangen wird, ist zumeist angestrebt, den realen Einfluss durch Umwelt- und Betriebsbedingungen bzw. vorangegangene Ereignisse durch bedingte Wahrscheinlichkeiten zu berücksichtigen. Die Crux dabei ist, die entscheidenden Abhängigkeiten zu erfassen, z.B. die Korrelation zwischen Ausfallrate und verwendetem Brennstoff oder anderen Betriebsbedingungen. Da die realen Verhältnisse meist ziemlich komplex und zudem nicht umfassend bekannt sind, besteht immer die Gefahr, dass der eigentliche Verursacher eines Ereignisses falsch zugeordnet wird.

Da der eine Ansatz sozusagen die *in-the-box* und der andere die *out-of-the-box* Sichtweise ist, liegt es nahe, beide zu kombinieren, um die jeweils zur Verfügung stehenden Informationen so zusammenzuführen, dass sie ein möglichst in sich konsistentes und das reale Zuverlässigkeitsverhalten wiedergebendes Gesamtbild ergeben. Aus der Sicht des Autors sind dazu folgende Punkte einzubeziehen:

---

[21] Deshalb wird häufig auch von kausaler im Gegensatz zu akausaler Betrachtung gesprochen.

[22] Z.B. bei gezielter Überlastung von Bauteilen mit genau bekannten Werkstoffkennwerten und Spannungsverhältnissen.

[23] Empirie: auf Erfahrung beruhende Erkenntnis; abgeleitet aus dem Begriff „Versuch, Probe“; /23/

- Zuverlässigkeitsdatensammlungen bzw. –datenbanken ⇒ 4.1.1
- Statistische Auswertung von Lebensdauerdaten unter Berücksichtigung der zugrunde liegenden Ausfallmuster ⇒ 4.1.2 und 4.1.3
- Nutzung von Zusatzinformationen zur Anpassung der Verteilungsparameter ⇒ 4.1.4

4.1.1 Zuverlässigkeitsdatenbanken

Generell beinhalten Konzepte zum Aufbau von Zuverlässigkeitsdatenbanken, wie z.B. in /26/ (Anlage 8), folgende Punkte:

- Vorbereitung der Erstellung, d.h. welche Daten sind verfügbar und für die zu lösenden Aufgabenstellungen relevant;
- Erfassung und Systematisierung der Daten;
- Verarbeitung und Darstellung der Ergebnisse;
- Verwaltung und Pflege der Datenbank.

Externe Datenquellen sind dabei mehr oder weniger frei zugängliche bzw. verfügbare Informationsquellen, aus denen Werte über die Zuverlässigkeit und Verfügbarkeit von Bauelementen und Anlagen bezogen werden können. Dabei sind die Daten insbesondere auf ihre Übertragbarkeit (Umwelt, Qualität, Wartungsbedingungen, Fahrweise) zu prüfen bzw. kritisch zu hinterfragen. Neben den speziellen Datensammlungen für den Bereich Kraftwerkstechnik (4.2) kann u.U. auf weitere Quellen zurückgegriffen werden, die jedoch nur indirekt für den Untersuchungsgegenstand dieser Arbeit relevant sind:

- Center for Chemical Process safety [24]: Chemische Verfahrensanlagen
- Hazard and Reliability Information System: Nukleare, militärische und chemische Anlagen
- Nuclear Power Engineering Comitee: Kernkraftwerke (IEEE Standard 500)
- Militärische Datensammlungen: z.B. MIL-C-39014, 39006, MIL-C-39001, etc.

Generell werden häufig zu RAM-Softwarepaketen Datensammlungen als erweiterbarer Grundstock mitgeliefert. Als weitere externe Datenquellen sind vor allem Betreiber vergleichbarer Anlagen und Hersteller denkbar, i.A. ist ein derartiger Informationsaustausch jedoch in der Praxis leider nicht der Normalfall. Einzelne Datenangaben finden sich zwar auch in der Literatur /27/ bzw. im Internet[25], aber Zahl und Umfang solcher Veröffentlichungen ist eher gering.

Wesentliche betreiberinterne Datenquellen sind hingegen die Unterlagen zur Dokumentation der Anlage, ihres Betriebes und ihrer Instandhaltung, wobei die elektronische Datenerfassung und Verarbeitung innerhalb von Betriebsführungs-, Monitoring- & Diagnose- und Instandhaltungs-Organisationssystemen zunehmende Bedeutung gewinnen. Da es sich hierbei um eine sehr weite Thematik handelt, zu der es auch umfangreiche Literatur gibt, soll an dieser Stelle nur auf einige Quellen verwiesen werden:

---

[24] http://www.aiche.org/ccps/

[25] z.B. Weibullparameter von Bauteilen unter http://www.barringer1.com/wdbase.htm

- /20/: Anlagenwissen (S.19 ff.), Organisation der Instandhaltung (S.113 ff.);
- /28/: Techniken für die Zustandsüberwachung (S.323 ff.);
- /12/: Planung und Ablauf von Instandhaltungsvorhaben (S.144 ff.), Instandhaltungscontrolling (S.175 ff.);
- sowie /26/, /29/, /30/, /31/.

Im Rahmen dieser Dissertation werden Erfassung, Systematisierung und Auswertung betreiberinterner Daten im Rahmen der durchgeführten Projekte untersucht und diskutiert (5.2 bzw. 6.2.3).

4.1.2 Statistische Auswertung mit Weibullanalyse

4.1.2.1 Aufbereitung der Lebensdauerdaten und die Bestimmung der Parameter

Die Weibullverteilung ist aufgrund ihrer mathematischen Eigenschaften (/12/ S. 59 ff.) die bevorzugte statistische Beschreibung für Lebensdauerdaten. Auf ihr aufbauend wird die sog. Weibullanalyse durchgeführt, deren Bestandteile in Bild 12 dargestellt sind, und die auch bei der Verwendung anderer Verteilungen ihre Gültigkeit haben /33/, /34/.

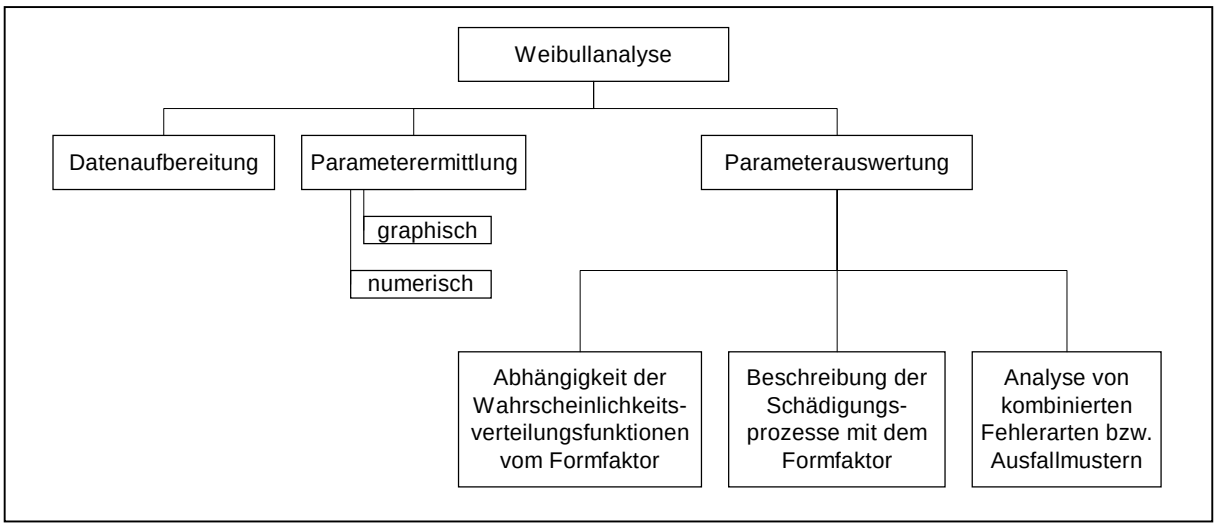


Bild 12 Übersicht zu Weibullanalyse

Aufbereitung der Daten

Betriebsdaten können generell nach folgenden Kriterien aufbereitet bzw. systematisiert werden:

- Art der Lebensdauerdaten, d.h. vollständig und unvollständig[26] erfasste Lebensdauern, die als Einzellebensdauern oder klassierte Lebensdauern ausgewertet werden;

26 Bauelemente, die sich entweder noch in Betrieb befinden oder vor der Erreichung ihres Lebensdauerendes ausgewechselte wurden; auch als suspensions bzw. censored data bezeichnet

- Differenzierung der Ausfallursachen, d.h. gemischte oder nach Ausfallursachen getrennte Betrachtung;
- Bezugsgröße der Lebensdauer[27];
- Betriebsbedingungen, Bauart bzw. Baujahr.

Unabhängig davon, wie letztlich die Parameter bestimmt werden, muss aus den aufbereiteten Daten der Verlauf der relativen und absoluten Häufigkeiten ermittelt werden, was manuell oder mit Hilfe eines Programms erfolgen kann:

- Vollständig und unvollständig erfasste Lebensdauern werden aufsteigend sortiert;
- Haben die vollständig und unvollständig erfassten Lebensdauern den gleichen Zahlenwert, so werden unvollständig erfasste Lebensdauern nach den vollständig erfassten Lebensdauern angeordnet, da der mögliche Ausfall erst nach den vollständig erfassten Lebensdauern auftritt;
- Für die vollständig erfassten Lebensdauern werden die relativen Häufigkeitssummen berechnet:

$$H_j = \frac{G_j - 0,3}{n + 0,4} \cdot 100\% ; \qquad (3.1)$$

die dazu notwendigen absoluten Häufigkeitssummen G_j ergibt sich mit dem Startwert $G_0 = 0$ zu:

$$G_j = G_{j-1} + \left(n_j \cdot \Delta G_j\right) \qquad mit\ \Delta G_j = \frac{1 + n - G_{j-1}}{1 + B_j} ; \qquad (3.2)$$

- n_j; Besetzungszahl für Rang j (Anzahl der Ausfälle)
- B_j: Bestand für Rang j; B_j ist die Anzahl der beim j-ten Rang noch vorhandenen Lebensdauerdaten (auch: $B_j = n -$ Anzahl der Lebensdauerdaten vor dem j-ten Rang).

Graphische Bestimmung der Parameter:

Für die graphische Methode ist die Verwendung des Lebensdauernetzes nach /35/ möglich. Die ermittelten relativen Häufigkeitssummen H_j werden in einem doppelt-logarithmischen Raster über die Betriebszeit t aufgetragen. Anschließend wird eine Ausgleichsgerade so eingezeichnet, dass die Punkte möglichst wenig um diese Gerade streuen. Es kann dabei durchaus vorkommen, dass der Verlauf der Häufigkeitssummen H_j einen sog. Knick zeigt und für die einzelnen Bereiche jeweils eine gesonderte Ausgleichsgerade eingezeichnet werden kann. Innerhalb der Auswertung wird ein derartiger Verlauf als ein Zeichen dafür interpretiert, dass mehrere Ausfallarten bzw. –ursachen vorhanden sind; siehe dazu 4.1.3.

---

27 z.B. Kalenderzeit, Betriebsdauer, Belastungszyklen, Abschaltungen oder Wegstrecke; Kommentar zur Auswahl des sogenannten aging parameter: “For example, does a turbine blade erode due to operating time, or time at high temperature, or hot-cold cycles ? Witout engineering knowledge to tell us which aging parameter is best, the choice is determined from Weibull plots of the alternatives. The best aging parameter is the one with the best fit compared to a straight line.” /36/

Zur Veranschaulichung können die innerhalb der V64.3-Untersuchungen mit der graphischen Methode durchgeführten Auswertungen dienen.

Aus dem sog. Weibullplot werden vor allem folgende Werte ermittelt:

- Charakteristische Lebensdauer T, Mittelwert μ (Mittlere Lebensdauer, Erwartungswert)[28], Standardabweichung σ, Formparameter β und ausfallfreie Zeit bzw. Mittellebensdauer t_0

Auch wenn die Verwendung der graphischen Methode sehr anschaulich ist, und sie damit Hinweise in Bezug auf Fehlerarten bzw. die Daten selber gibt, hat sie folgende wesentliche Nachteile:

- Die Erstellung und Auswertung ist vergleichsweise aufwendig und zeitintensiv.

- Die Ausgleichsgerade wird nach Augenmaß eingezeichnet und führt damit erfahrungsgemäß nicht zu den kleinsten quadratischen Fehlern. Außerdem sind keine Aussagen darüber möglich, ob Realwerte und Werte der Ausgleichsgeraden miteinander ausreichend korrelieren oder nicht (Signifikanztest).

- Die Dokumentation und Verwaltung der Analysen und ihrer Ergebnisse ist nur eingeschränkt möglich; eine Kombination mit anderen, software-basierten Analysetechniken ist nicht gegeben.

Numerische Bestimmung der Parameter:

Im Folgenden wird speziell auf das Programm *EXAKT* Bezug genommen, das einen begrenzten Zeitraum zum Testen zur Verfügung stand, und mit dem Verteilungsparameter numerisch bestimmt werden können. Andere Programme arbeiten in vergleichbarer Art und Weise bei der iterativen Bestimmung und anschließenden Bewertung der Verteilung.

Zu den Vorteilen, die solche Programme bieten, gehören:

- Schnelle und umfassende Auswertung, so dass verschiedene Datensätze einfach untersucht werden können.

- Beurteilung, ob die Lebensdauern überhaupt Weibull-verteilt sind. Verwendung von sog. Verteilungstests (z.B. Kolmogoroff-Smirnoff-Test).

- Berechnung der Differenzen zwischen den empirisch beobachteten und den theoretischen Werten, die sich aus den ermittelten Parametern ergeben.

- Quantitative Bestimmung der statistischen Streuung der erfassten Werte bzw. deren Unsicherheitsband.

Die Ermittlung der Weibullparameter dient zur Ermittlung der Hazardrate $h(t)$, mit dessen Hilfe zustandsorientierte Instandhaltung unterstützt werden soll.

---

28 Die zur Berechnung benötigte Lösung der Gammafunktion, kann z.B. in MS Excel bzw. aus entsprechenden Tabellen {/35/, Tabelle A4.4} ermittelt werden.

$$h(t) = \frac{\beta}{\eta}\left(\frac{t}{\eta}\right)^{\beta-1} e^{\gamma_1 K_1(t)+\ldots+\gamma_n K_n(t)} \tag{3.3}$$

$K_1(t),\ldots,K_n(t)$ sind dabei Kriterien (auch als Covariates bezeichnet), wie sie beispielsweise durch Monitoringsysteme erfasst werden (z.B. Schmierölanalyse zur Messung des Volumens metallischer Partikel - Fe, Cr, Cu, Al - als Verschleißkriterien; Schwingungsüberwachung mit Frequenz und Amplitude von Schwingungen). Mit den Parametern $\gamma_1,\ldots,\gamma_p$ werden die einzelnen sie je nach ihrem Einfluss bzw. Korrelation mit dem zeitlichen Verlauf der Hazardrate gewichtet.

Damit ist zwar ein sehr sinnvoller Ansatz für die Realisierung zustandsorientierter Instandhaltung gegeben, der auch die Bedeutung von aussagekräftigen Monitoring- und Diagnosesystemen zeigt. Die Covariates geben an, von welchen Mess- bzw. Befundgrößen der Zustand eines Bauelementes abgeleitet bzw. prognostiziert werden soll. Sie sind jedoch in den meisten Fällen keine direkten Größen, aus denen eineindeutig der Zustand ablesbar ist. Es handelt sich vielmehr um Anzeigen, die z.B. eine Tendenz der Verschlechterung erkennen lassen. Deshalb ist die Feststellung von Korrelationen zwischen den Covariates und den realen Lebensdauerdaten ein Teil der Weibullanalyse, welche die Qualität des Modells bewertet.

4.1.2.2 Abhängigkeit der Wahrscheinlichkeitsverteilungsfunktionen vom Formfaktor

Die Weibullverteilung wird u.a. oft bevorzugt, weil über den Formfaktor β der Verlauf der Wahrscheinlichkeitsverteilungsfunktionen so variiert werden kann, dass er typische Ausfallmuster wiedergibt (4.1.3). Zur Veranschaulichung des Einflusses des Formfaktors β auf $f(t)$, $F(t)$ bzw. $\lambda(t)$ wird häufig die Zeitachse mit der charakteristischen Lebensdauer T normiert.

Ausfallwahrscheinlichkeitsdichte f(t): Bild 13

- $$f(t) = \frac{dF(t)}{dt} = \frac{\beta}{T}\cdot\left(\frac{t}{T}\right)^{\beta-1}\cdot e^{-\left(\frac{t}{T}\right)^{\beta}}; \tag{3.4}$$

- $\beta \le 1$: Bei $t \to 0$ Maximalwert (mit $\beta \Downarrow$ höher) und fällt mit $t \Uparrow$ stetig (mit $\beta \Downarrow$ steiler).

- $\beta > 1$: Anstieg bis zu einem Maximalwert, der mit $\beta \Uparrow$ steigt und näher bei $t/T = 1$ liegt. Der Wert $f = 0$ wird mit $\beta \Uparrow$ zeitiger erreicht.

Ausfallwahrscheinlichkeit F(t): Bild 14

- $$F(t) = 1 - e^{-\left(\frac{t}{T}\right)^{\beta}}; \tag{3.5}$$

- $\beta < 1$: Zunächst starker Anstieg (bis ca. $t \le 0{,}5T$), flacht dann aber ab; charakteristisches Ausfallverhalten bei Frühausfällen.

- $\beta = 1$: Die Weibullverteilung geht in die Exponentialverteilung ($\lambda(t) = \lambda = konst.$) über, d.h. die Ausfallwahrscheinlichkeit steigt mit $1 - \exp(t)$.

- $\beta > 1$: Zunächst flacher Anstieg (bis ca. $t \le 0{,}5T$), steigt (mit $\beta \Uparrow$ später, dafür stärker) dann jedoch an, um schließlich zeitiger (mit $\beta \Uparrow$ zeitiger) $F = 1$ zu erreichen. Charakteristisches Ausfallverhalten bei Spät- bzw. Verschleißausfällen.

- Da $F(t=T)=1-e^{-1^b}=1-0{,}368=0{,}632$ gilt, d.h. unabhängig vom konkreten Wert der charakteristischen Lebensdauer bei $t=T$ die kumulierte Ausfallwahrscheinlichkeit 0,632 ist, sind zu diesem Zeitpunkt immer 63,2 % der Bauelemente ausgefallen.

Ausfallrate λ(t): Bild 15

- $$\lambda(t)=\frac{f(t)}{1-F(t)}=\frac{\beta}{T}\cdot\left(\frac{t}{T}\right)^{\beta-1}; \qquad (3.6)$$

- $\beta<1$: Hat bei $t\to 0$ seinen Maximalwert (mit $\beta\Downarrow$ höher) und fällt mit $t\Uparrow$ stetig (mit $\beta\Downarrow$ steiler).

- $\beta=1$: Ist konstant, d.h. zeit-unabhängig.

- $1<\beta\leq 2$: Zunächst stärkerer, dann flacherer Anstieg; bei $\beta=2$ geht die Kurve in eine Gerade mit dem Anstieg von $2/T$ über.

- $\beta>2$: Exponentieller Anstieg mit der Zeit.

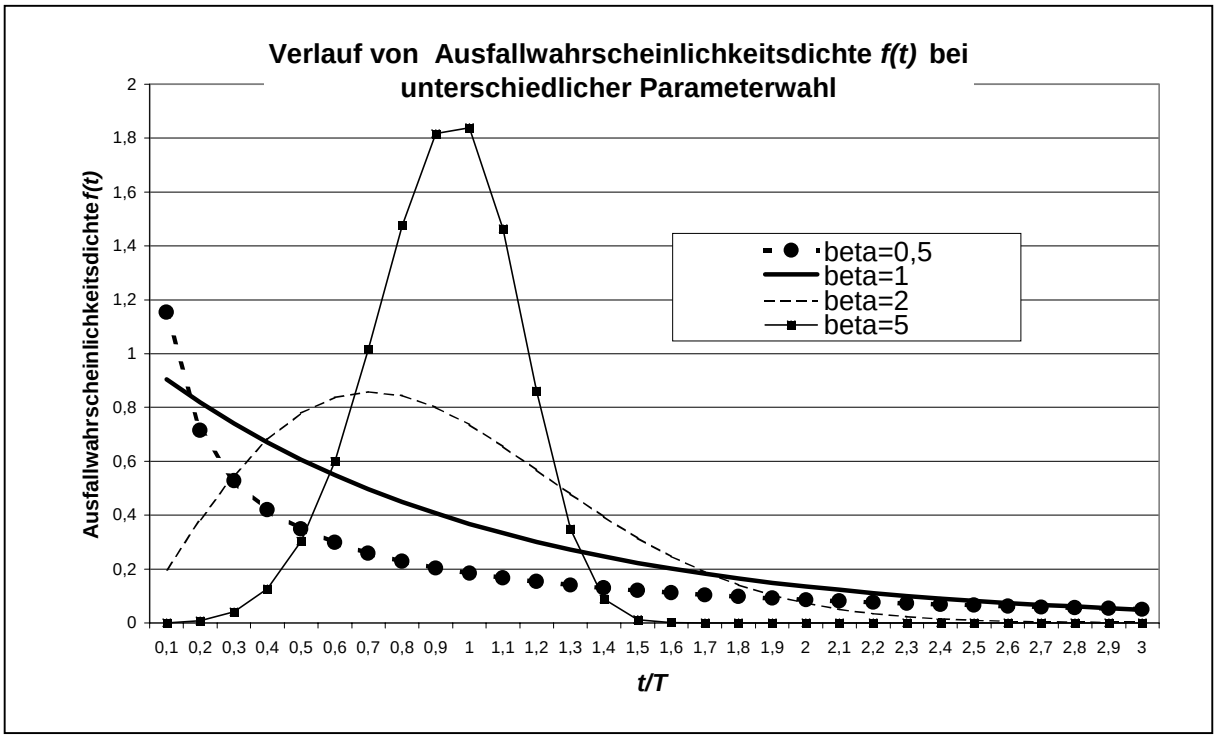


Bild 13 Ausfallwahrscheinlichkeitsdichtefunktion *f(t)*

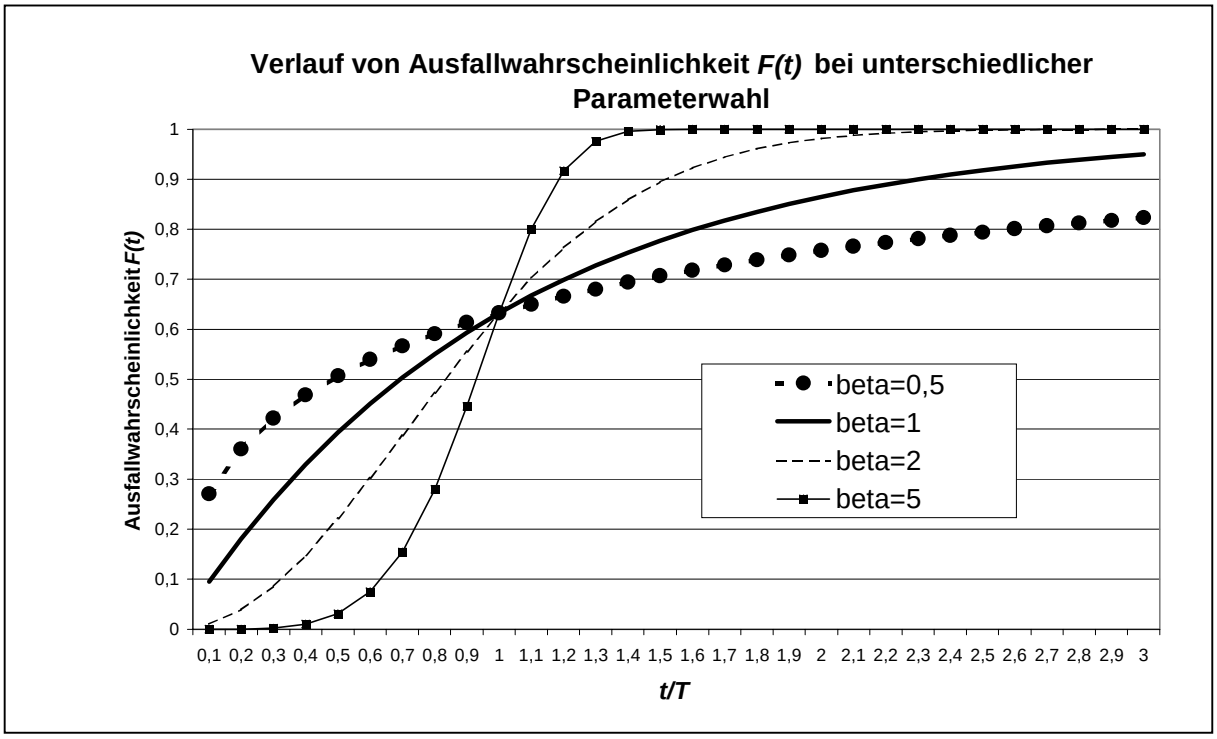


Bild 14 Ausfallwahrscheinlichkeit *F(t)*

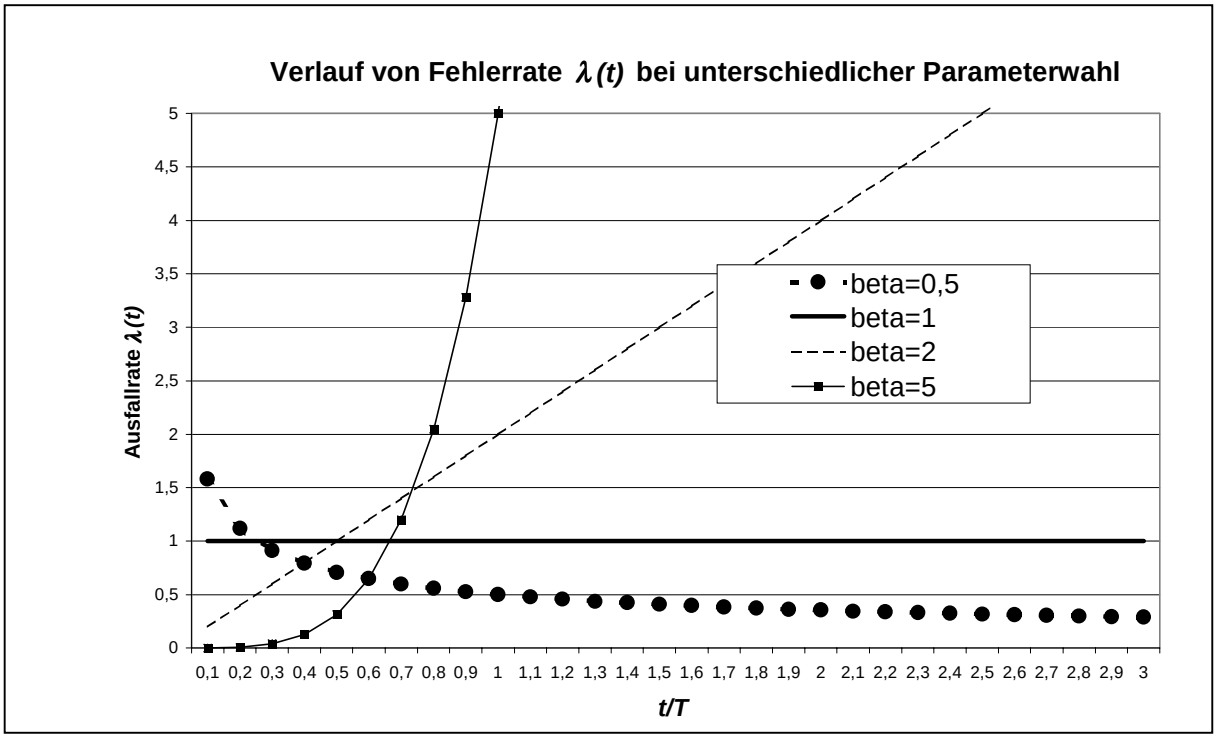


Bild 15 Ausfallrate $\lambda(t)$

4.1.3 Beschreibung der Schädigungsprozesse durch den Formfaktor

4.1.3.1 Übersicht über Ausfallmuster

Die Ausfallwahrscheinlichkeit eines Bauteils lässt sich prinzipiell aus dessen Wahrscheinlichkeitsverteilungen von Belastung und Belastbarkeit herleiten (Bild 16). Obwohl z.B. in der Auslegung ein Sicherheitsabstand berechnet wurde, der das Versagen des Bauteils verhindern soll, zeigt die probabilistische Betrachtung, dass dies nur ein mittlerer Sicherheitsabstand ist, der zudem bei Anlagen unter Verschleiß eine zeitabhängige Größe ist.

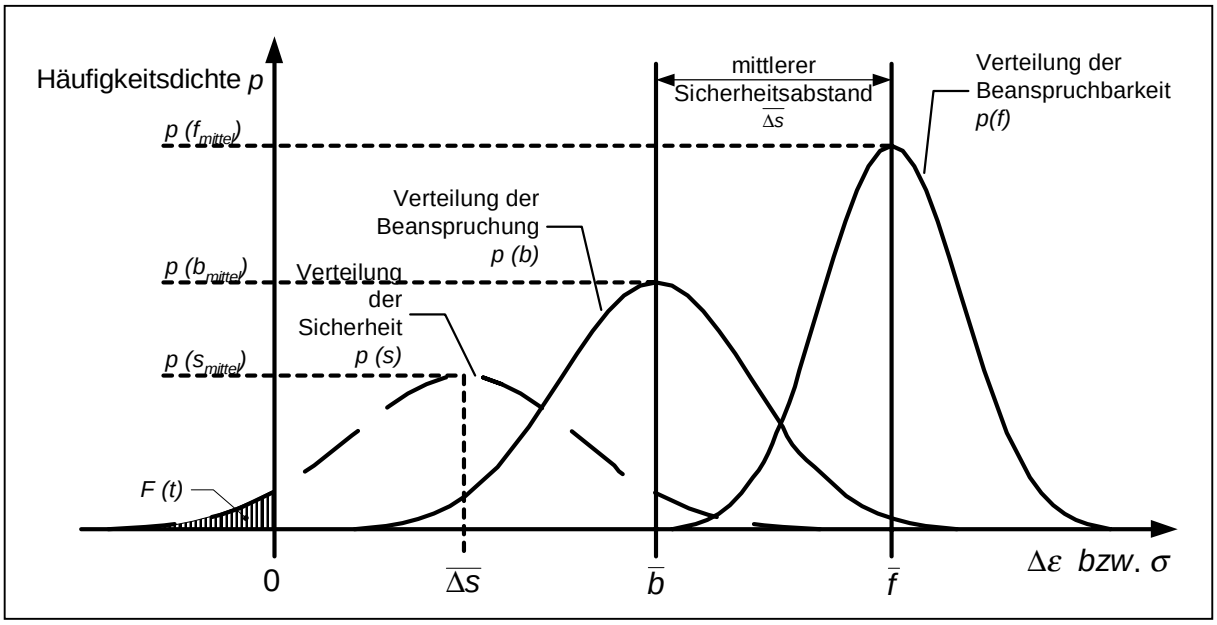


Bild 16 Häufigkeitsverteilungen zur Lebensdauerermittlung; nach /37/

Der zeitliche Verlauf der Ausfallrate und die Deutung des Formfaktors β wird in der Literatur sehr umfassend diskutiert, so dass es sich anbietet, an dieser Stelle auf die Ergebnisse und Positionen etwas ausführlicher einzugehen. Dabei ist auch auf die zu Beginn des Kapitels gemachten Ausführungen zur deterministischen und indetermistischen Betrachtung von Zuverlässigkeitsdaten zu verweisen, die hier eine wesentliche Rolle spielen.

Der Formfaktor β beschreibt einerseits die Hüllkurve der Ausfallwahrscheinlichkeitsdichte-Verteilung und damit die Schwankungsbreite der Lebensdauern bzw. Störungsintervalle. Mit steigendem Formfaktor β schwanken die Werte geringer um die charakteristische Lebensdauer, so dass hier der Beginn von Verschleißausfällen und damit die Notwendigkeit von Instandhaltungsmaßnahmen deutlicher erkennbar sind.

In Bezug auf die zustandsbezogene Instandhaltung wären demnach Schädigungsmechanismen günstig, die zwar einen gut erkennbaren Verschleißbeginn ($\beta \geq 2{,}5$) zeigen, aber trotzdem noch einen genügend großen zeitlichen Vorlauf bis zum Ausfall bieten ($\beta \leq 4$) /36/. In einem engen Zusammenhang dazu stehen die in der Literatur häufig verwendeten Begriffe des sog. PF-Intervalls[29] und des Diagnosewirkungsgrades.

[29] Das PF-Intervall ist der Zeitraum zwischen dem Erscheinen des potentiellen Versagens und dem Eintritt der Funktionsstörung.

Ein möglicher Zustandsverlauf mit resultierendem PF-Intervall ist in Bild 17 dargestellt. Dabei ist zu erkennen, dass aufgrund von Schwankungen im realen Bauteilzustand und der begrenzten Diagnosemöglichkeiten die Zeit bis zum Ausfall kürzer als das aus der Auswertung der Bauteildiagnose ermittelte PF-Intervall $t_F - t_P$ sein kann. Damit wird ein Teil der Komponenten bereits ausgefallen sein, wenn der Zeitpunkt der für die geplante Instandhaltungsmaßnahme festgesetzten Schadensgrenze erreicht ist. Dieser Teil ist identisch mit $1\text{-}P_0$, wobei P_0 die durch Art und Methode erreichte objektive Sicherheit der Diagnosen ist. Der gesamte Diagnosewirkungsgrad υ ergibt sich nach /12/ aus folgender Gleichung:

$$\upsilon = P_0 \cdot P_S \cdot P_R \quad (3.7)$$ [30]

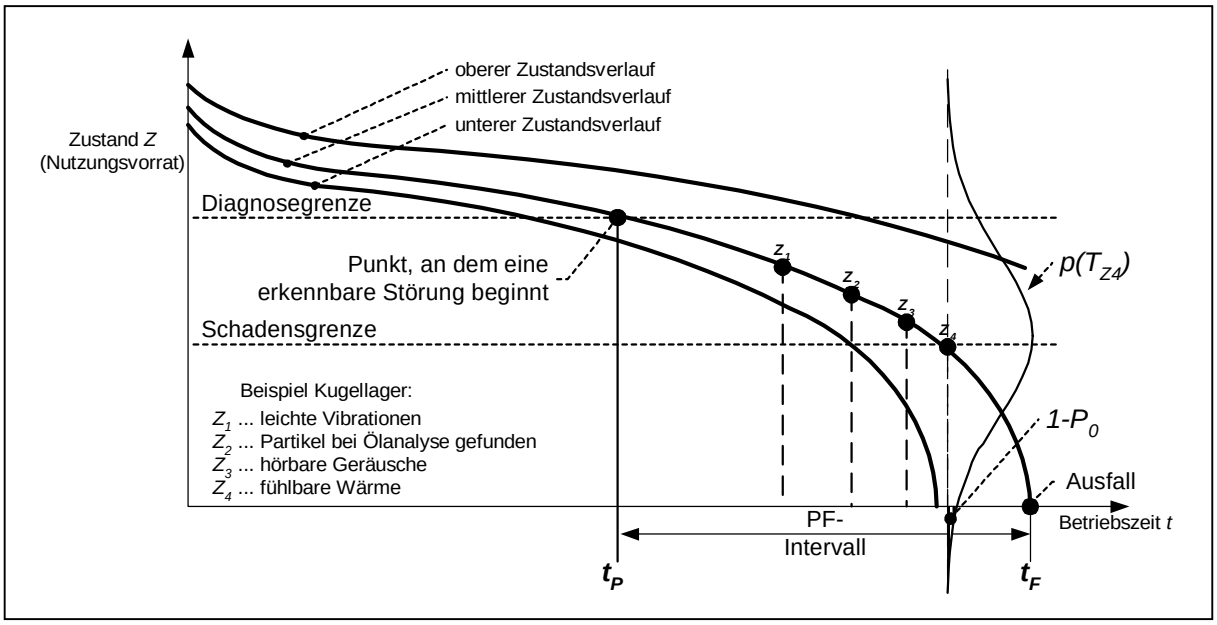


Bild 17 Darstellung von PF-Intervall, Zustandsverlauf und Diagnosesicherheit

Neben der für den Gegenstand dieser Dissertation wichtigsten Gruppe der Verschleißausfälle existieren weitere Ausfallmuster; /28/ gibt dazu sechs unterschiedliche Ausfallmuster an (Bild 18). Die sog. Badewannenkurve (Bild 19) stellt eigentlich eine Kombination der Ausfallmuster F, E und B dar. Bei Ausfallmuster C ist mit einer stetig zunehmenden Ausfallwahrscheinlichkeit zu rechnen, ohne dass sich aber eine klare Verschleißgrenze erkennen lässt (β zwischen 1 und 2).

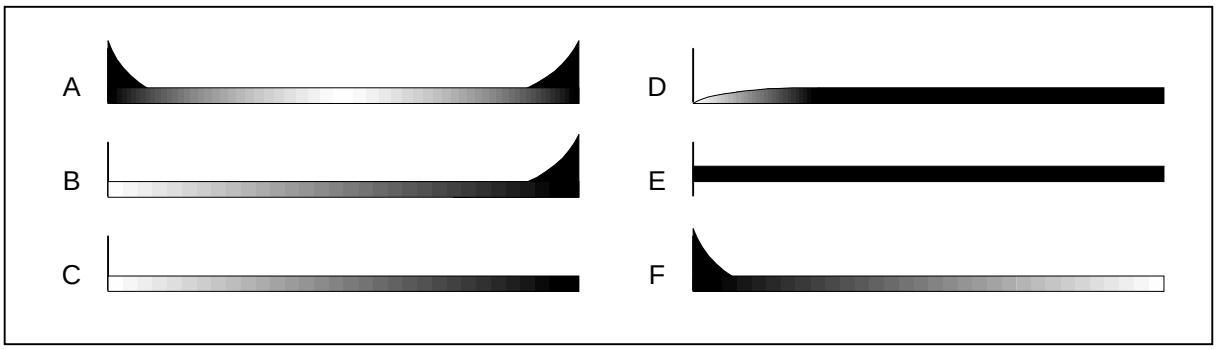


Bild 18 Ausfallmuster; aus /28/

[30] /12/: P_S = durch Entscheidungen des Kontrollpersonals erreichte subjektive Sicherheit der Diagnose; P_R = Anteil der diagnostisch erfaßten Abnutzungsteile an der Gesamtheit der Abnutzungsstellen

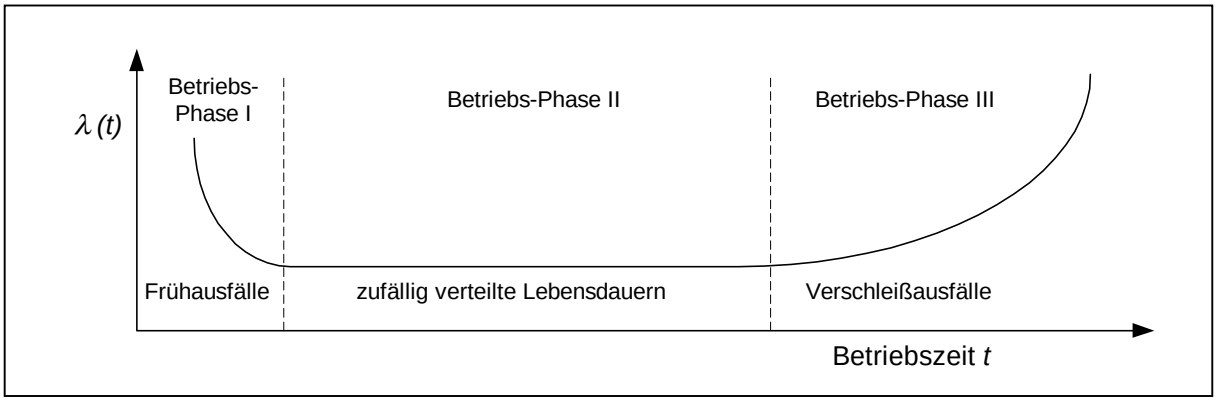


Bild 19 Verlauf der Fehlerrate bei Vorhandensein von Früh- und Verschleißausfällen

4.1.3.2 Frühausfälle

Weibull-verteilte Lebensdauern mit Formfaktor $\beta < 1$ besitzen eine mit der Betriebszeit *t* fallende Hazardrate *h (t)*, d.h. vorausgesetzt das Bauteil hat die Zeit *t* ohne Ausfall überstanden, die Wahrscheinlichkeit dafür, dass es im folgenden Zeitintervall Δt doch noch ausfällt, stetig sinkt. Dies spiegelt eine allseits bekannte Erfahrung mit neuen oder wieder in Betrieb genommenen Anlagen wider, nämlich dass sich erst nach einem bestimmten Zeitraum ein stabiler Betrieb einstellt. Die Gründe dafür werden in /28/ wie folgt angegeben:

- schlechte Konstruktion bzw. Herstellerqualität;
- unkorrekter Einbau, Instandhaltung bzw. Betrieb;
- übermäßige bzw. unnötige Instandhaltung.

Aus den Verteilungsdichten von Beanspruchung und Beanspruchbarkeit (Bild 16) können Frühausfälle darauf zurückgeführt werden, dass es entweder durch einen zu gering bemessenen mittleren Sicherheitsabstand $\overline{\Delta s}$ oder durch die oben aufgeführten Qualitätsprobleme unbewusst das Moment einer oder beider Verteilungen zu stark zum kritischen Überlappungspunkt $\Delta\varepsilon_x, \sigma_x$ hin verlagert wurde, so dass nicht mehr die angenommene Normalverteilung vorliegt.

Ein Beispiel, durch welche Maßnahmen Frühausfällen begegnet werden kann, ist in /37/ für Gasturbinen dargestellt[31]. Bild 20 und Bild 21 zeigen grundsätzliche Möglichkeiten zur Eliminierung von Frühausfällen, die jedoch zumeist erst nach dem Auftreten und der Auswertung entsprechender Fehler erkannt und umgesetzt werden können, d.h. es muss zunächst ein gewisser Umfang an Betriebserfahrungen vorliegen.

[31] siehe auch /38/ S.9

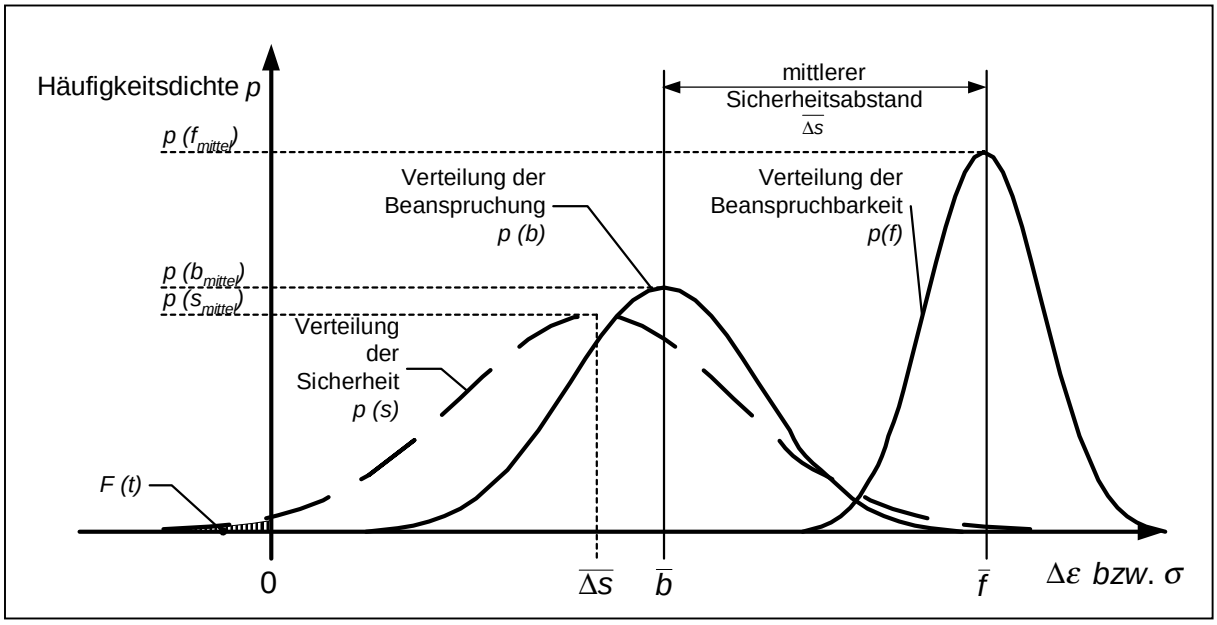


Bild 20 Erhöhung des mittleren Sicherheitsabstands bei Gasturbinen durch Verringerung des Zündsprungs; nach /37/

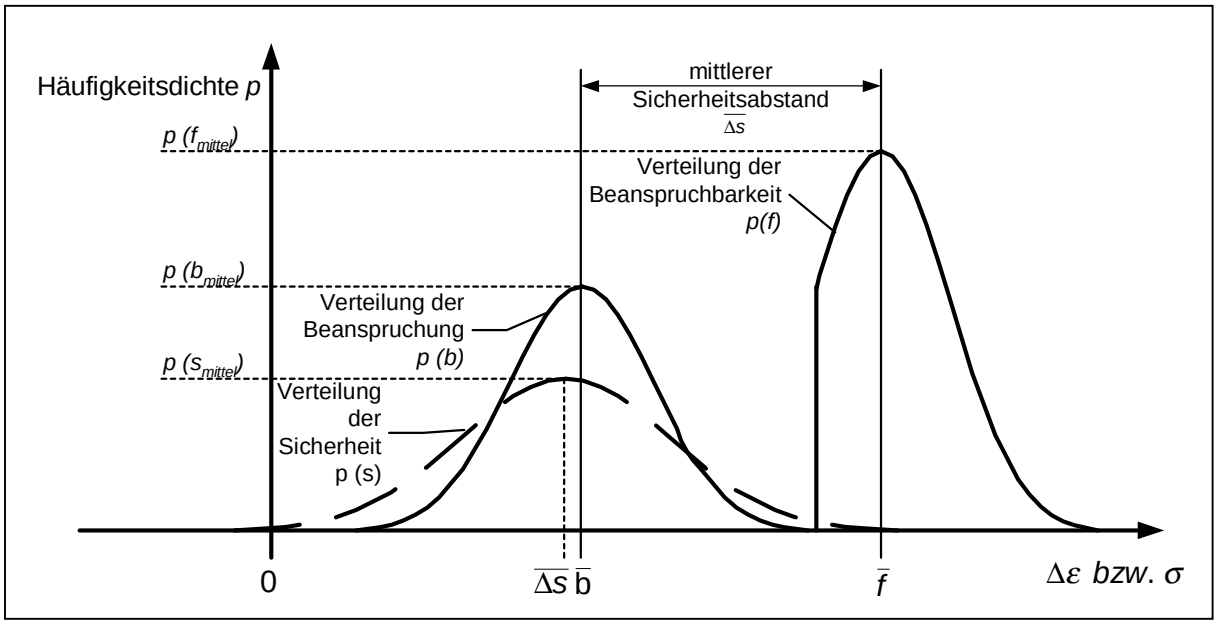


Bild 21 Schematische Darstellung der Verhinderung von Frühausfällen durch Beschneiden der unteren Werkstoffkennwerte; nach /37/

Nach /20/ ist die Länge des für Frühausfälle relevanten Zeitabschnitts zwar von der Ausrüstung abhängig, bei Großanlagen ist aber mit Zeiträumen bis zu 3 Jahren zu rechnen. Bei der Auswertung von Störungs- und Ausfalldaten ist das entsprechend zu berücksichtigen.

4.1.3.3 Bereiche mit annähernd konstanter Fehlerrate

Bei $\beta = 1$ tritt der Fall ein, dass die Wahrscheinlichkeit einer Störung im Zeitintervall Δt eines sich zum Zeitpunkt t in Betrieb befindlichen Bauteils unabhängig von der Zeit t ist. Das Ausfallverhalten entspricht somit dem Modell des Systems *ohne Gedächtnis* bzw. des reinen Zufalls. Damit gibt es auch zu keinem Zeitpunkt einen Anstieg der zustandsbezogenen Ausfallwahrscheinlichkeit, und damit einerseits keinen Anhaltspunkt, wann gegebenenfalls die In-

standhaltungsmaßnahmen durchgeführt werden können; andererseits gibt es auch keine oder nur minimale Vorwarnzeit für Störungen und Ausfälle (siehe obige Ausführungen zum PF-Intervall).

Nach /20/ sind darunter alle Fälle zu rechnen, die aus:

- Fehlhandlungen des Bedienungs- und Instandhaltungspersonals,
- Überbeanspruchungen (/20/ S.39, 42),

entstehen. In /28/ wird weiterhin darauf hingewiesen, dass durch nicht erkannte Vorschädigungen (Lastspitzen, Montagefehler etc.) ein zeitlich stark versetzter Ausfall auftreten kann, dessen eigentliche Ursache nicht mehr zurückverfolgbar ist und damit auf einen zufälligen Ausfall geschlossen wird.

Mit dem Modell zufälliger Ausfälle wird meist bei Anlagen der Schwachstromelektrotechnik und Elektronik gearbeitet, was aus folgenden Gründen gerechtfertigt ist:

- Hohe Komplexität der Baugruppen, so dass Ursache-Wirkung-Zusammenhänge nur selten erkennbar bzw. nachverfolgbar sind;
- Die verwendeten Bauteile werden vor dem Einbau einer sog. Einbrennphase unterzogen, so dass frühausfallende Komponenten entfernt werden;
- Die Bauteile sind weitestgehend verschleißfrei bzw. ein Verschleiß ist nicht nachweisbar.

Für mechanische bzw. elektromechanische Komponenten bedeutet das aber, dass eine kritische Prüfung der Übertragbarkeit der häufig in Datensammlungen angegebenen Fehlerraten bzw. *MTBF*-Werte erforderlich ist.

4.1.3.4 Verschleißausfälle

Zu den einzelnen Verschleißarten und ihrer Überwachung (/28/ S.324 ff.) gibt es umfangreiche Literatur, auf die an dieser Stelle verwiesen wird, weil eine ausführlichere Behandlung dieser Thematik den Rahmen dieser Arbeit sprengen würde. Davon abgesehen wurden jedoch innerhalb der Industrieprojekte die relevanten Schädigungsmechanismen analysiert.

Eine schematische Darstellung der Ursachen und Eintrittswahrscheinlichkeit für Ausfälle bei probabilistischer Betrachtung zeigt Bild 22. Der Zeitraum von t_0 bis t_1 ist die bei einigen Schädigungsprozessen auftretende Inkubationszeit, die identisch mit der bei der dreiparametrigen Weibullverteilung verwendeten sog. ausfallfreien Zeit ist.

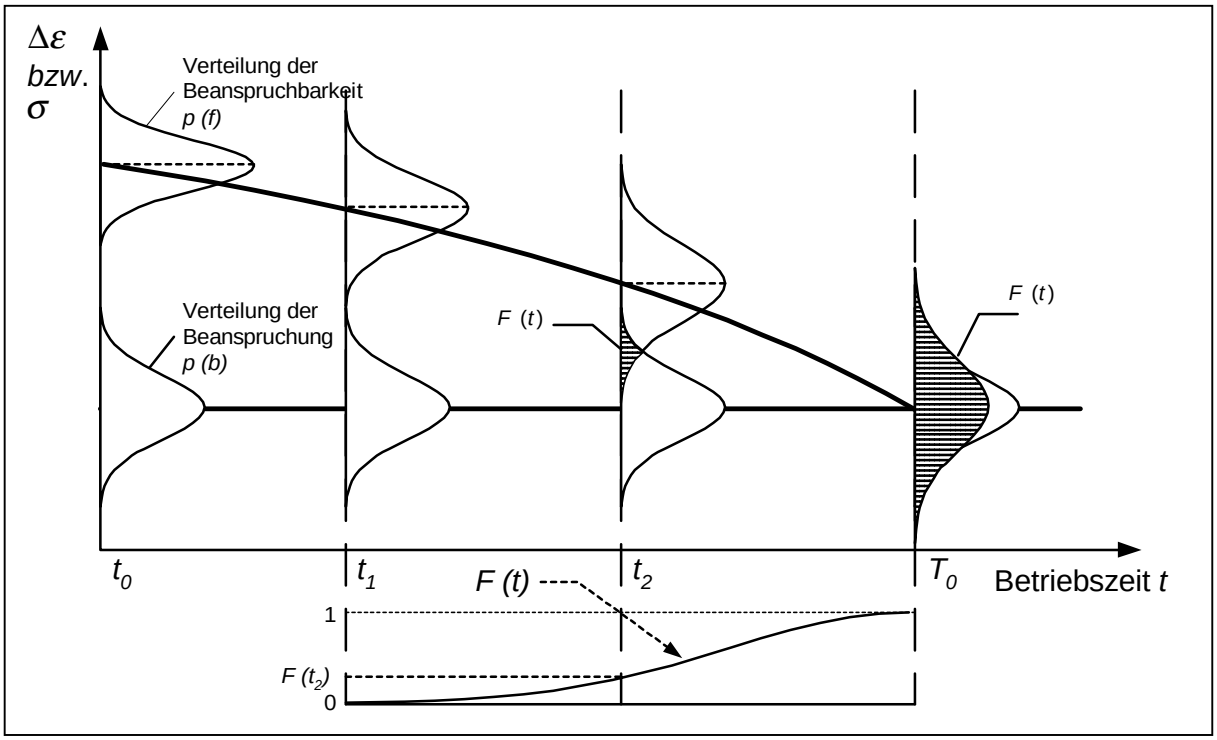


Bild 22 Probabilistische Betrachtung des Ausfallprozesses bei Schädigungen über der Betriebszeit *t*; nach /20/

Für die zugrunde liegenden Schädigungsprozesse lassen sich in der Literatur die im Folgenden aufgeführten Stellen finden, die einerseits auf deren Ursachen und andererseits auf die statistische Beschreibbarkeit der daraus resultierenden Störungen und Ausfälle eingehen.

Verschleiß: /20/ S. 42 ff.; /24/ S. 81 f.

- /12/: Allgemeine Einteilung von Verlauf und Streuung des Verschleißmaßes S bei Verschleißprozessen in vier Phasen der Betriebszeit *t* (Bild 23 bzw. Bild 24) als Grundlage für Instandhaltungs- und Diagnoseplanung. Angaben zu β: $\beta=1$ (geschmierte Teile, häufige Mischreibung), $\beta=3$ (ungeschmierte Teile, seltene Mischreibung, Erosion).
- /36/: $1.0 < \beta < 4.0$ für Erosion, $\beta > 4.0$ jedoch besonders erosive Verhältnisse

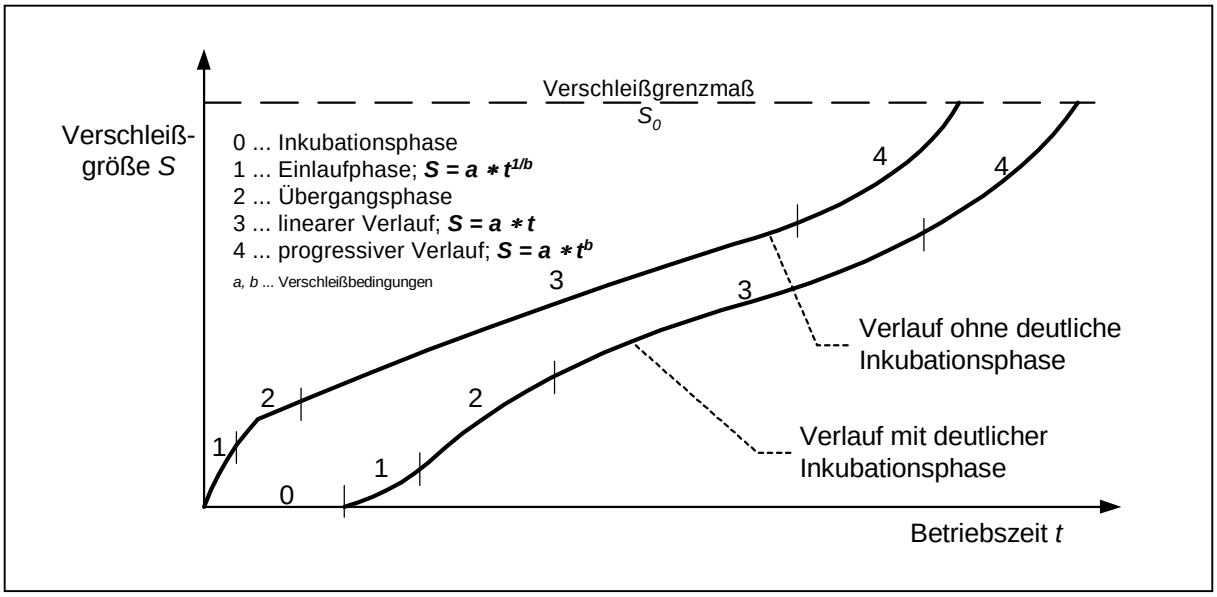


Bild 23 Allgemeiner Verlauf von Verschleißprozessen; nach /12/

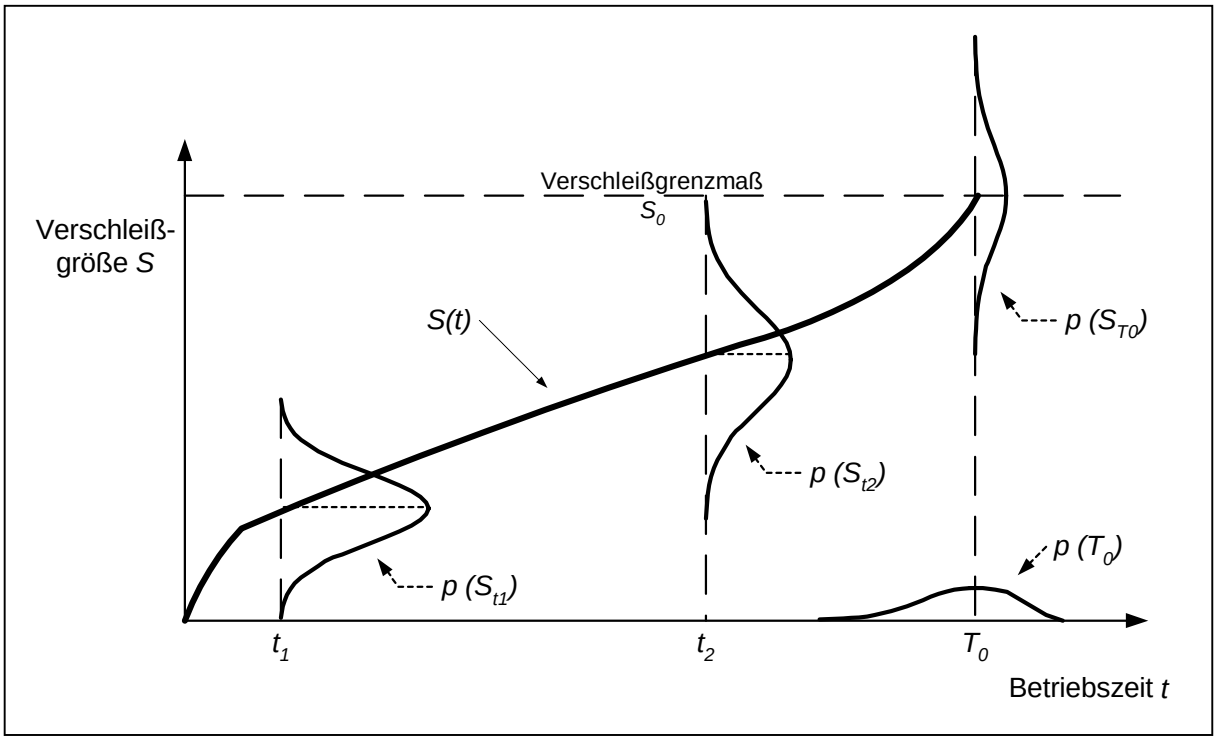


Bild 24 Verlauf der Streuung des Verschleißmaßes *S* über die Betriebszeit *t*; aus /12/

Korrosion: /20/ S. 59 f.; /24/ S. 114 f.

- /12/ S. 78 bzw. 90.: Allgemeine Korrosions- bzw. Schichtbildungsverlaufsformen über die Betriebszeit *t* (Bild 25). Angaben zu β: $\beta=2$.
- /36/: $1.0 < \beta < 4.0$ für Korrosion, außer Spannungskorrosion $\beta \approx 4{,}5$

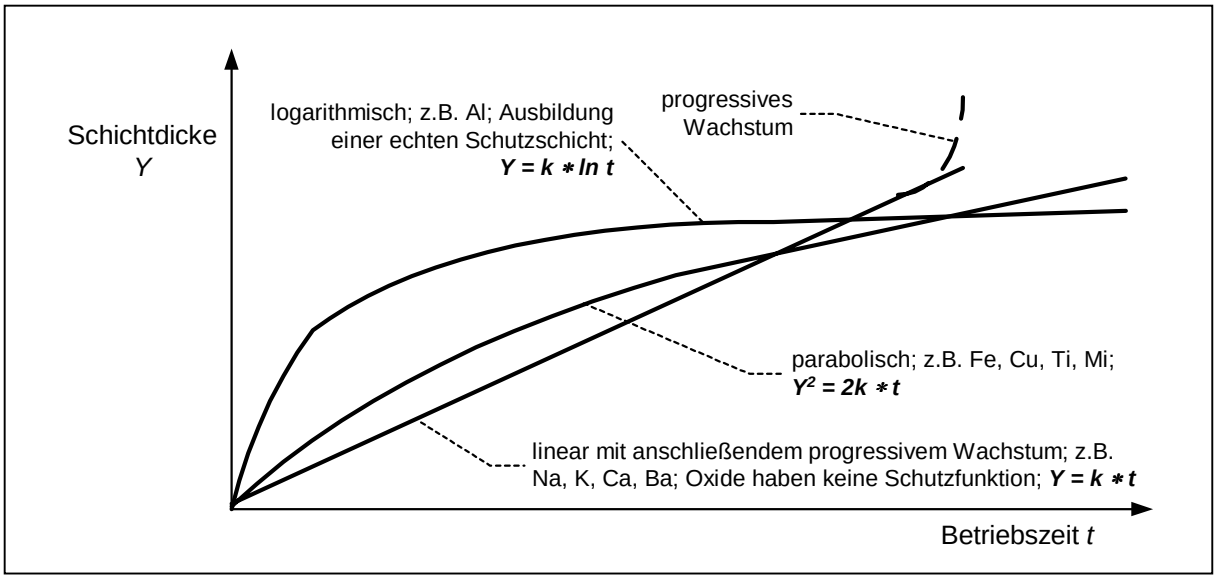


Bild 25 Verlauf der Oxidschichtbildung auf Metallen; nach /12/

Ermüdung: /12/ S. 80 f.; /24/ S.89 f.; /39/ S. 191 ff.; /20/ S. 55 f.; /24/ S. 86 ff.

- /12/ S. 70 bzw. 90.: Schwankung der Beanspruchbarkeit durch höhere Temperatur, Schädigungen und Rauhigkeit der Oberfläche, starke Streuung der Anzahl der Lastspiele bis zum Bruch auch unter Laborbedingungen; Angaben zu β: β von 2 bis 2,5.

- /40/: Die hier durchgeführten Experimente an extrem spröden Glasstäben mit genau definierter Zusammensetzung und Versuchsbedingungen führten zu Formparametern β von 7,7 bis 11,3.

- /36/: $1.0 < \beta < 4.0$ für niederzyklische Ermüdung, $\beta > 4.0$ für spröde Materialien; (Beispiel: $\beta \approx 6,9$ für Risse an Gasturbinen-Radscheibe)

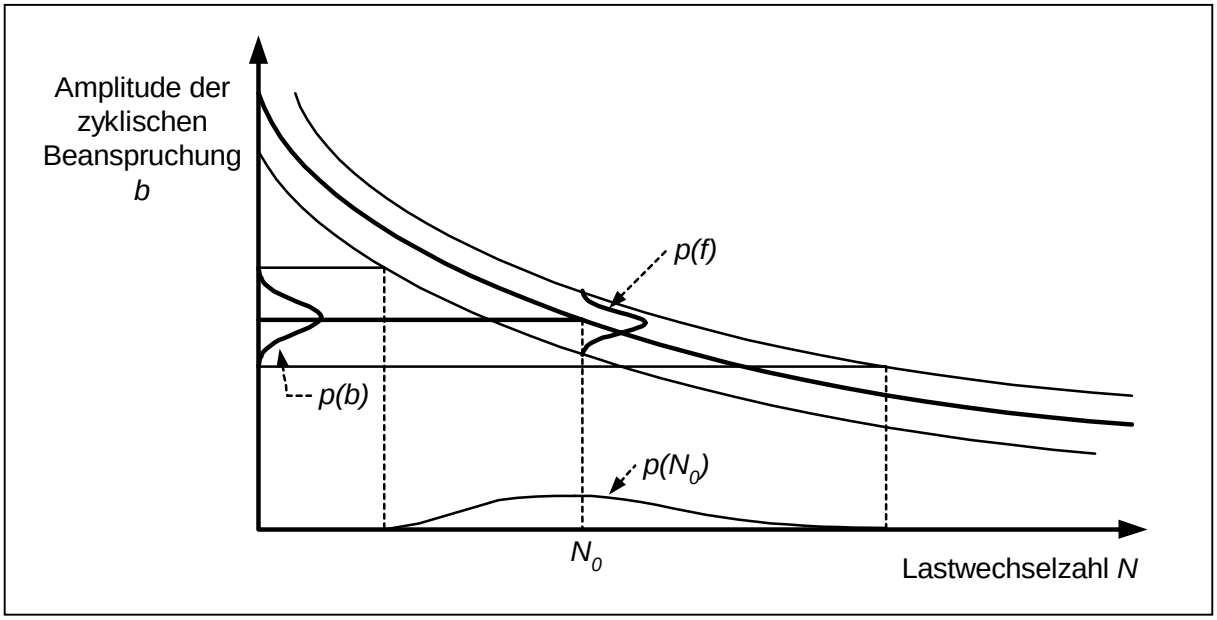


Bild 26 Typisches Verhalten bei Werkstoffermüdung unter Berücksichtigung der Häufigkeitsverteilung von Beanspruchung *b* und Beanspruchbarkeit *f*; nach /28/

Kriechen[32]***:*** /20/ S. 55 f.; /24/ S. 111 f.

- /12/ S. 82 bzw. 90.: Wesentliche Ursachen sind die Einformung bzw. der Zerfall metastabiler Gefügebestandteile und die Bildung weiterer Ausscheidungen, die eine allgemeine Entfestigung des Materials bewirken. Durch Extrapolationen und Differenzen in der Zusammensetzung der Werkstoffe streuen die Werte stark. Angaben zu β: $\beta \leq 2$.

- /36/: $\beta > 4.0$ für hochwertige Turbinenschaufeln mit engen Werkstofftoleranzen

[32] Bei ständig unter Belastung stehenden Bauteilen kommt es zu mit der Zeit abnehmenden Festigkeitswerte; Festigkeitsabnahme wird wesentlich durch Temperatur beeinflusst.

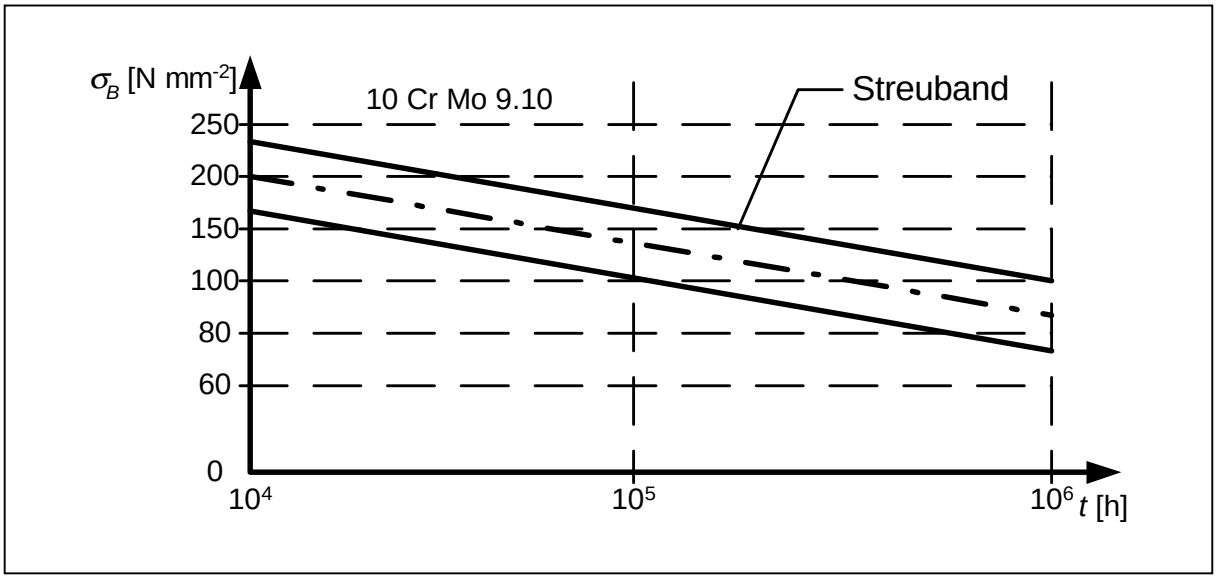


Bild 27 Streubereich der Zeitstandsfähigkeit bei Bauteilen aus 10CrMo9.10; aus /12/

Im allgemeinen werden bei der Lebensdauerberechnung die Schädigungen durch Ermüdung und Kriechen akkumuliert, d.h. als überlagerte Größen gemeinsam berechnet; siehe dazu /41/.

4.1.4 Bayessche Statistik

4.1.4.1 Ansatz

Die Bayessche Statistik ist eine Methode, vorhandenes Wissen über das Auftreten von Zuständen in Abhängigkeit von bestimmten Kriterien, für eine bessere Abschätzung der Parameter von Eintrittswahrscheinlichkeiten zu nutzen. Sie ist damit ein Ansatz, statistische Daten (indeterministisch) mit ingenieurtechnischem Wissen (deterministisch) kombinieren zu können. Im Folgenden soll kurz darauf eingegangen werden, woraus sich die Bayessche Statistik ableitet.

Wie an anderer Stelle schon ausgeführt, wird bei der Annahme des reinen Zufallsprinzips keinerlei Vorgeschichte des Systems bei der Betrachtung der Eintrittswahrscheinlichkeit von Zuständen berücksichtigt. Die Erfahrung und einfache logische Überlegungen besagen jedoch, dass es für die Eintrittswahrscheinlichkeit bestimmter Zustände eine erhebliche Rolle spielt, welche Bedingungen dabei vorgelegen haben, d.h. dass es eine direkte Abhängigkeit bzw. Proportionalität gibt.

$$P(Z|K) \propto P(K|Z)\,P(Z) \tag{3.8}$$

$P(Z|K)$ ... Eintrittswahrscheinlichkeit eines Zustandes Z bei Kriterium K

$P(K|Z)$ ... Wahrscheinlichkeit, dass das Kriterium K vorgelegen hat, als Zustand Z eingetreten ist

$P(Z)$ ... totale Eintrittswahrscheinlichkeit des Zustandes Z, d.h. unabhängig von Kriterium K

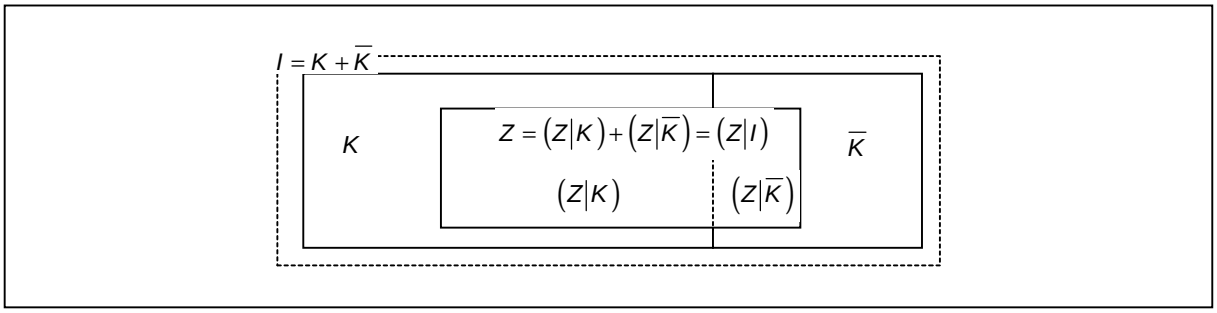


Bild 28 Totale und bedingte Eintrittswahrscheinlichkeit des Zustandes *Z*

Zwar liegen nur für wenige Komponenten oder Baugruppen so umfassende Informationen vor, dass sich daraus die bedingte Ausfallwahrscheinlichkeit unter verschiedenen Kriterien ableiten lässt. Zudem ist es meist schwierig zu sagen, welche Kriterien überhaupt erfasst und miteinander verglichen werden sollen. Aber es gibt fast immer schon Erfahrungen mit ähnlichen Anlagen, oder es reicht schon die Kenntnis der technischen Zusammenhänge aus, um zu sagen wie sich unterschiedliche Betriebsbedingungen auf das Ausfallverhalten auswirken werden. Diese Form der Schätzung aufgrund bereits vorhandener (a-priori) Informationen ist ein wesentlicher Bestandteil und Nutzen der Bayessche Statistik (/42/ S.161 /12/ S. 89-90).

4.1.4.2 Berechnung bedingter Wahrscheinlichkeiten

Ausgangspunkt der mathematischen Herleitung ist das sog. Bayessche Theorem /43/:

$$P(Z) = P(Z|K)P(K) + P(Z|\overline{K})P(\overline{K}) \tag{3.9}$$

bzw.

$$P(K) = P(K|Z)P(Z) + P(K|\overline{Z})P(\overline{Z}) \tag{3.10}$$

Die totalen und bedingten Wahrscheinlichkeiten können tabellarisch zusammengefasst werden;

Tabelle 2 bzw. Tabelle 3.

Tabelle 2 Totale und bedingte Wahrscheinlichkeiten der Kriterien *K*

		Kriterien		totale Wahrscheinlichkeit
		K (ja)	$\overline{K}$ (nein)	
Zustände	Z (ja)	$P(Z\|K)P(K)$	$P(Z\|\overline{K})P(\overline{K})$	$P(Z\|K)P(K) + P(Z\|\overline{K})P(\overline{K})$
	$\overline{Z}$ (nein)	$P(\overline{Z}\|K)P(K)$	$P(\overline{Z}\|\overline{K})P(\overline{K})$	$P(\overline{Z}\|K)P(K) + P(\overline{Z}\|\overline{K})P(\overline{K})$
totale Wahrscheinlichkeit		$P(K)$	$P(\overline{K})$	1,0

Tabelle 3 Totale und bedingte Wahrscheinlichkeiten der Zustände *Z*

		Zustände		totale Wahrscheinlichkeit
		Z (ja)	$\overline{Z}$ (nein)	
Kriterien	K (ja)	$P(K\|Z)P(Z)$	$P(K\|\overline{Z})P(\overline{Z})$	$P(K\|Z)P(Z)+P(K\|\overline{Z})P(\overline{Z})$
	$\overline{K}$ (nein)	$P(\overline{K}\|Z)P(Z)$	$P(\overline{K}\|\overline{Z})P(\overline{Z})$	$P(\overline{K}\|Z)P(Z)+P(\overline{K}\|\overline{Z})P(\overline{Z})$
totale Wahrscheinlichkeit		$P(K)$	$P(\overline{K})$	1,0

4.1.4.3 Anwendung des Bayesschen Theorems für diskrete, bivariante Verteilungen

Die Darstellung dieser Anwendungsmöglichkeit des Bayesschen Theorems soll anhand von Verfügbarkeitsdaten (*AF*) von Gasturbinen erfolgen, die aus NERC-GADS unter Verwendung des Kriteriums Elektrische Leistung *NDC* abgefragt wurden. Bei der Datenbankabfrage wurde über alle Leistungen und in 3 Leistungsbereiche unterteilt, abgefragt (

Tabelle 4). Im Allgemeinen werden die Daten so ausgewertet, dass z.B. die Wahrscheinlichkeit bestimmt wird, mit der die Verfügbarkeit einer <20MW -Gasturbine im Bereich von 80-85% liegt:

Wahrscheinlichkeit von 8,9 %, d.h. $P\left(AF_{80-85}\middle|NDC_{20}\right)=8{,}9\%$.

Wird aber z.B. in einem Artikel über eine störungsbehaftete Gasturbine berichtet, deren Verfügbarkeit im Bereich von 80-85% liegt, und es ist von Interesse, mit welcher Wahrscheinlichkeit es sich dabei um eine < 20 MW -Gasturbine handeln könnte, ergibt sich:

$$P\left(NDC_{20}\middle|AF_{80-85}\right)=\frac{P\left(AF_{80-85}\middle|NDC_{20}\right)\cdot P\left(NDC_{20}\right)}{P\left(AF_{80-85}\right)}=\frac{8{,}94\%\cdot 43\%}{7{,}25\%}=53\%$$

Im Fall, dass nur der Anteil der < 20 MW-Gasturbinen in der Statistik bekannt ist, wäre mit einer Sicherheit von 43% voraussagbar, dass es sich bei der beschriebenen Maschine um eine solche handelt. In Zusammenhang mit den Kenntnissen zur Verfügbarkeitsverteilung kann diese Aussagesicherheit auf 53% erhöht werden. In Tabelle 5 sind alle bedingten Wahrscheinlichkeiten $P\left(NDC_i\middle|AF_j\right)$ angegeben, die in dieser Art berechnet wurden. So ist beispielsweise zu erkennen: Aufgrund der zusätzlichen Informationen ergibt sich eine wesentlich höhere Wahrscheinlichkeit, dass es bei Anlagen mit $AF=70-75\%$ sich um Gasturbinen mit über 100 MW handelt, als dies aus der relativen Häufigkeit dieser Maschinen erkennbar wäre (ca. 7% vs. 1,5%).

Weitere Möglichkeiten für die Auswertung von RAM-Daten anhand bi- oder multivarianter diskreter Verteilungen sind denkbar. So z.B., dass eine Gasturbine:

- die Zahl von x Starts pro Jahr hat, bei der bedingten Wahrscheinlichkeit, dass die Nichtverfügbarkeit y% beträgt;
- eine *FOR* von x hat, bei der bedingten Wahrscheinlichkeit, dass sie pro Jahr y *SH* in Betrieb ist;
- die spezifischen Instandhaltungskosten x hat, bei der bedingten Wahrscheinlichkeit, dass die Anlage eine Leistung y hat und pro Jahr z *SH* in Betrieb ist.

Tabelle 4 Auswertung der Verfügbarkeit *AF* nach der Leistung

	Verfügbarkeit [%]							Anlagen	
Leistungsbereich	0-70	70-75	75-80	80-85	85-90	90-95	95-100	Anzahl	rel. Häufig.
$P \leq 20$ MW	3,3%	0,3%	2,3%	8,9%	17,5%	37,1%	29,8%	302	43%
$20 < P \leq 100$ MW	5,6%	1,8%	5,1%	6,0%	17,1%	32,3%	32,2%	551	55,5%
$P > 100$ MW	0%	6,9%	13,8%	10,3%	31,0%	20,7%	17,2%	29	1,5%
alle Anlagen	4,8%	1,5%	4,4%	7,2%	17,8%	34,1%	30,2%	815	100%

Tabelle 5 Bedingte Wahrscheinlichkeiten $P\left(NDC_i \middle| AF_j\right)$ des Beispiels

	0-70	70-75	75-80	80-85	85-90	90-95	95-100
$P \leq 20$ MW	$P\left(NDC_{20} \middle| AF_{0-70}\right)$ 30%	$P\left(NDC_{20} \middle| AF_{70-75}\right)$ 10%	$P\left(NDC_{20} \middle| AF_{75-80}\right)$ 23%	$P\left(NDC_{20} \middle| AF_{80-85}\right)$ 53%	$P\left(NDC_{20} \middle| AF_{85-90}\right)$ 42%	$P\left(NDC_{20} \middle| AF_{90-95}\right)$ 47%	$P\left(NDC_{20} \middle| AF_{95-100}\right)$ 42%
$20 < P \leq 100$ MW	$P\left(NDC_{20-100} \middle| AF_{0-70}\right)$ 65%	$P\left(NDC_{20-100} \middle| AF_{70-75}\right)$ 69%	$P\left(NDC_{20-100} \middle| AF_{75-80}\right)$ 64%	$P\left(NDC_{20-100} \middle| AF_{80-85}\right)$ 46%	$P\left(NDC_{20-100} \middle| AF_{85-90}\right)$ 53%	$P\left(NDC_{20-100} \middle| AF_{90-95}\right)$ 53%	$P\left(NDC_{20-100} \middle| AF_{95-100}\right)$ 59%
$P > 100$ MW	$P\left(NDC_{>100} \middle| AF_{0-70}\right)$ 0%	$P\left(NDC_{>100} \middle| AF_{70-75}\right)$ 7%	$P\left(NDC_{>100} \middle| AF_{75-80}\right)$ 5%	$P\left(NDC_{>100} \middle| AF_{80-85}\right)$ 2%	$P\left(NDC_{>100} \middle| AF_{85-90}\right)$ 3%	$P\left(NDC_{>100} \middle| AF_{90-95}\right)$ 1%	$P\left(NDC_{>100} \middle| AF_{95-100}\right)$ 1%
total[33]	95%	86%	91%	101%	98%	100%	102%

4.1.4.4 Verbesserung der Parameter stetiger Verteilungen durch Bayessche Schätzung

Eine weitere Anwendungsmöglichkeit ist die sog. Bayessche Schätzung. Diese Methode basiert auf der Kombination von objektiven und subjektiven Informationen. Unter den subjektiven Informationen sind bereits existierende Erfahrungen mit der Häufigkeit bzw. Wahrscheinlichkeitsverteilung von Kriterien (z.B. Betriebstemperaturen, Materialkennwerte, Produktionsbedingungen) zu verstehen, die einen Einfluss auf den Zustand haben werden. So wird z.B. in Bild 29 bzw. Bild 30 die geschätzte Häufigkeitsverteilung einer Zahl sich gegenseitig ausschließender Zustände betrachtet.

Die Wahrscheinlichkeit des Zustandes *Z*, die sich aufgrund der geschätzten Häufigkeitsverteilung $P(Z_i)$ ergeben würde, ist nach dem Satz der totalen Wahrscheinlichkeit:

$$\begin{aligned} P(Z) = {} & P(Z|Z_1)\cdot P(Z_1) + P(Z|Z_2)\cdot P(Z_2) + P(Z|Z_3)\cdot P(Z_3) \\ & + P(Z|Z_4)\cdot P(Z_4) + P(Z|Z_5)\cdot P(Z_5) \end{aligned} \tag{3.11}$$

[33] Die Fehler, die zu den Abweichungen von 100% führten, konnten nicht identifiziert werden, da der direkte Zugang zu den Einzeldaten der NERC-Datenbank nicht möglich ist.

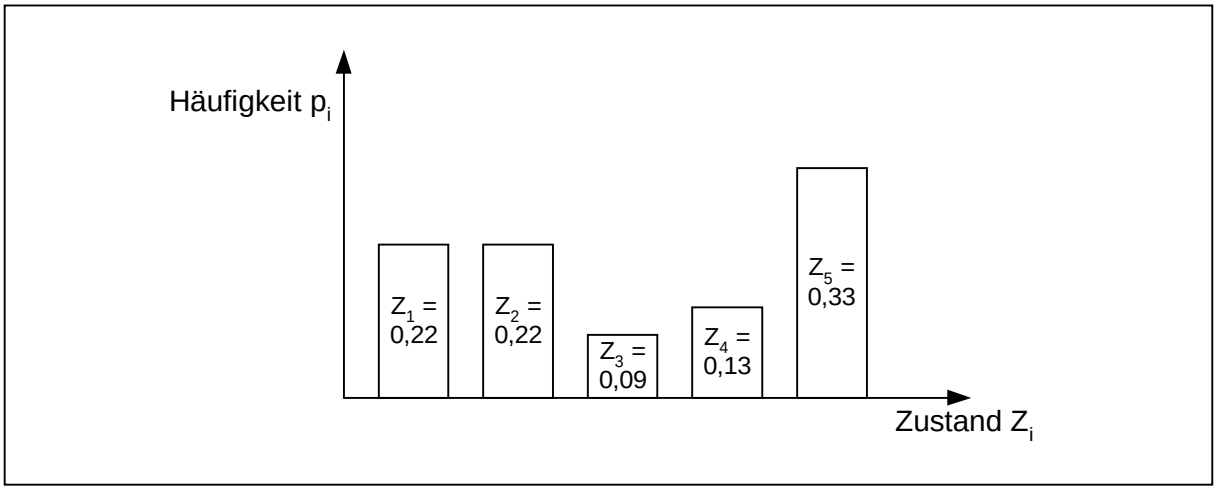


Bild 29 Geschätzte Häufigkeitsverteilung der Zustände Z_1 bis Z_5; nach /44/ S.460

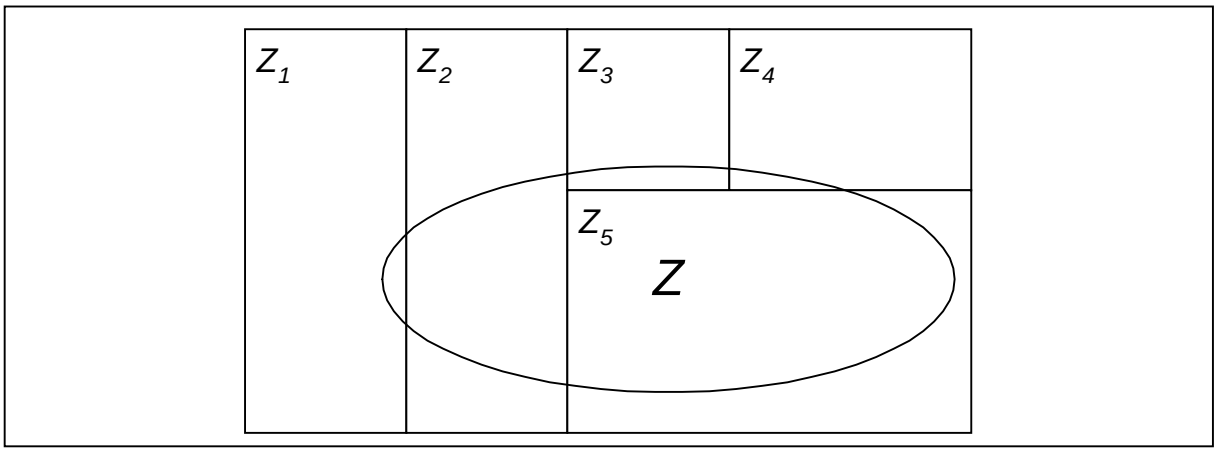


Bild 30 Geschätzte Aufteilung von Zustandsraum und die objektive Lage des Zustandes Z

Mit Hilfe des Bayesschen Theorems sollen in einer Art Umkehrschluss anhand des objektiven Zustandes *Z* die Wahrscheinlichkeiten ermittelt werden, dass die geschätzte Wahrscheinlichkeitsverteilung von $P(Z_i)$ durch die Praxis bestätigt wird, d.h die Parameter der (unbekannten) Verteilung der Grundgesamtheit möglichst genau getroffen wurden.

$$P(Z_i|Z) = \frac{P(Z|Z_i)\cdot P(Z_i)}{P(Z|Z_1)\cdot P(Z_1)+P(Z|Z_2)\cdot P(Z_2)+P(Z|Z_3)\cdot P(Z_3)+P(Z|Z_4)\cdot P(Z_4)+P(Z|Z_5)\cdot P(Z_5)} \tag{3.12}$$

Mit diesem Verfahren wird aus der ursprünglichen[34] Verteilung eine anhand der real aufgetretenen Zustände verbesserte[35] Verteilung ermittelt. In /43/ S.203 wird beispielsweise gezeigt, wie eine zunächst geschätzte Verteilung von Ausfallraten λ_i anhand der wirklich aufgetretenen Lebensdauern modifiziert wird. In Bild 31 ist die geschätzte, d.h. die a-priori Häufigkeitsdichte dargestellt, wenn der Experte von einer normal-verteilten Ausfallrate bei einem Konfidenzniveau von 95% ausgeht, wobei meist bei der Schätzung der ungünstigste, zu erwartende Wert - in diesem Fall λ_1 - mit abgefragt wird.

[34] bezeichnet auch als: geschätzte, subjektive, vor-Ereignis, vor-Experiment bzw. a-priori Verteilung

[35] bezeichnet auch als: nach-Ereignis, nach -Experiment bzw. a-posteriori Verteilung

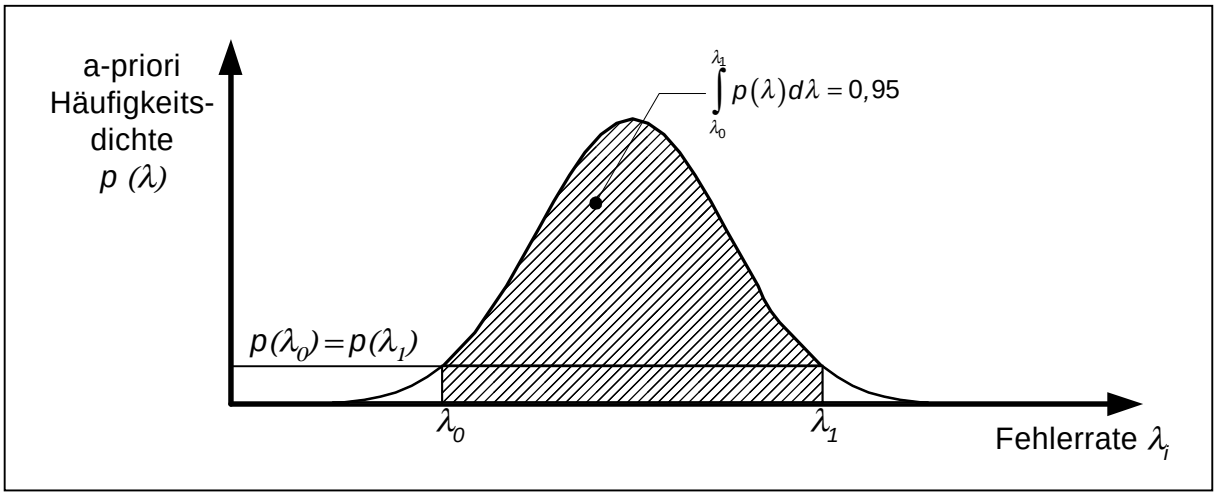


Bild 31 Beispiel für eine a-priori Häufigkeitsdichte von Ausfallraten λ_i; nach /43/

Anhand beobachteter Lebensdauern eines Tests[36] wird eine a-posteriori Verteilung abgeleitet (Bild 32). Die Auswertung führt dazu, dass die Verteilungsdichtefunktion enger wurde und der Mittelwert der Fehlerrate aufgrund der real aufgetretenen Lebensdauern als kleiner berechnet werden konnte. Es ist weiterhin möglich, diese nun zur Verfügung stehende Verteilung bei folgenden Auswertungen wiederum als Ausgangsbasis, d.h. als a-priori Verteilung, zu verwenden. So kann schrittweise durch wachsende Erfahrungen bzw. umfangreichere Informationen eine Verteilung ermittelt werden, deren Parameter möglichst gut die Grundgesamtheit, d.h. die wirkliche Wahrscheinlichkeitsverteilung widergeben.

Konkrete Beispiele für die Parameterabschätzung von Zuverlässigkeitsgrößen nach der Bayesschen Methode sind beispielsweise in /45/, /46/ und /47/ dargestellt.

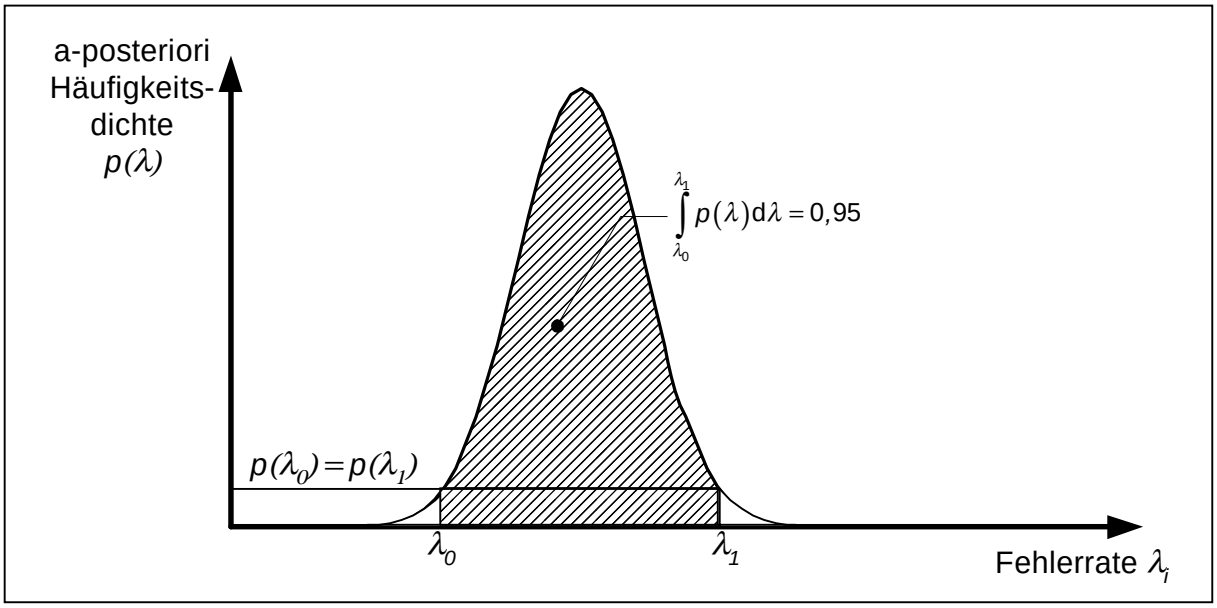


Bild 32 Beispiel für eine a-posteriori Verteilung von Ausfallraten λ_i; nach /43/

[36] Diese Methode wird häufig für den Nachweis von Zuverlässigkeitswachstum bzw. Qualitätskontrolle verwendet, wofür Tests bzw. Experimente durchgeführt werden; siehe auch obige Bezeichnungen.

4.1.4.5 Darstellung komplexer Zusammenhänge mit Bayesschen Netzwerken

Wie angedeutet, liegen bei realen Komponenten und Anlagen aufgrund der Vielzahl von Randbedingungen und Einflussfaktoren, die relevante Kriterien sein können, meist komplexe Zusammenhänge vor, für deren Analyse und Modellierung Werkzeuge benötigt werden, die sowohl bei der Berechnung helfen, als auch einen besseren Überblick geben.

Die bekannten bzw. vermuteten Zusammenhänge werden mit Abhängigkeitenanalyse-Diagrammen (2.3) dargestellt, so dass aus den geschätzten Wahrscheinlichkeitsverteilungen der Eingangsgrößen die bedingten Wahrscheinlichkeiten der Ausgangsgrößen berechnet bzw. simuliert werden. Durch den Vergleich mit objektiven Ereignissen bzw. Messgrößen kann die Verknüpfungsstruktur der relevanten Eingangsgrößen und deren Eintrittswahrscheinlichkeiten schrittweise der Realität angepasst werden, mit dem Ziel ein möglichst repräsentatives Modell eines realen Systems zu konstruieren.

Sog. Bayessche Netzwerke werden insbesondere zur Wissensdarstellung, für Expertensysteme und für Wirtschaftlichkeitsoptimierungen verwendet. Zur Durchführung derartiger Analysen stehen verschiedene Programme (*Analytica* bzw. *GeNie*) zur Verfügung. Da an dieser Stelle der umfangreiche Komplex der Bayesschen Netzwerke nicht weiter vertieft werden soll, wird die Nutzung von Internetquellen[37] für weitere Informationen empfohlen, da aufgrund der benötigten Rechentechnik ständig Fortschritte bei dieser relativ neuen, aber sehr vielversprechenden Methode zu verzeichnen sind.

[37] z.B. http://www.cs.orst.edu/~dambrosi/bayesian/frame.html;
http://http.cs.berkeley.edu/~murphyk/Bayes/bayes.html bzw. http://dsi.gsu.edu/index.html

4.2 RAM-Datenbanken für Kraftwerksanlagen

4.2.1 NERC

4.2.1.1 Inhalt und Umfang der Datenbank

Die dem Autor zugängliche Datenbank von 1997 enthält für den Betrachtungszeitraum 1982-1996 insges. 5032 Anlagen, die jedoch nicht über den gesamten Zeitraum in Betrieb gewesen sind. Die Charakterisierung der Anlagen und ihres Betriebes erfolgt nach der in Bild 33 gezeigten Übersicht, nach der z.B. die Auswahl der auszuwertenden Datensätze getroffen werden kann. In Anlage 9 sind weitere Details in Bezug auf Art und Weise der Aufschlüsselung des Datenbankinhalts als Beispiele zusammengestellt.

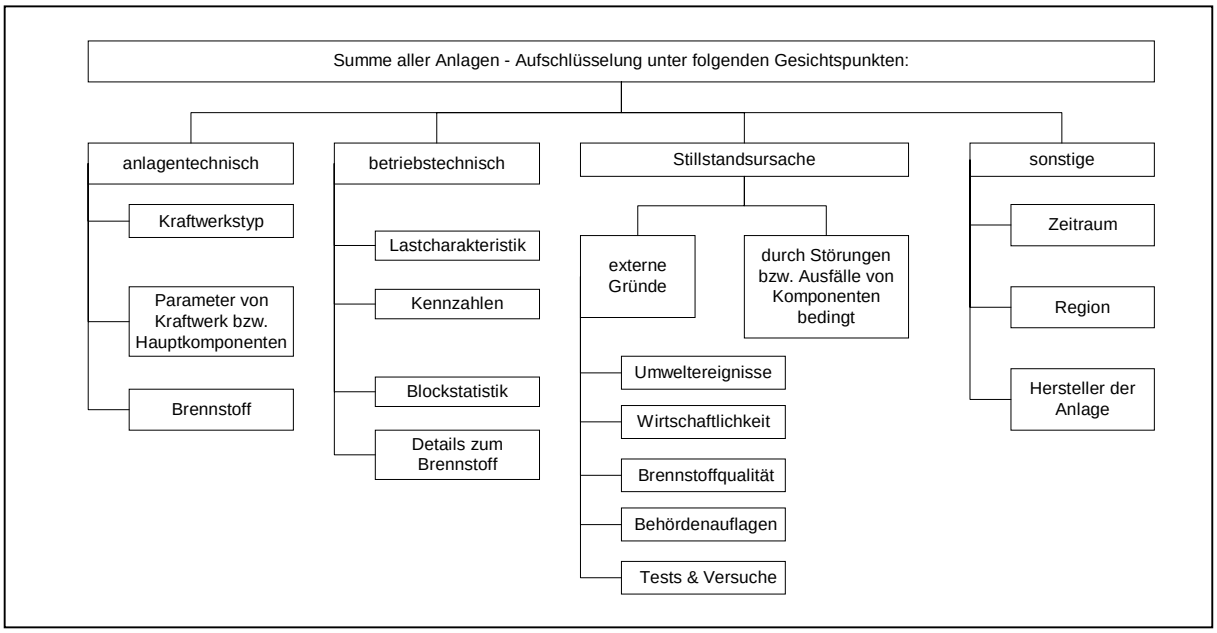


Bild 33 Übersicht über die Art der Aufschlüsselung der Datensätze bei NERC

Folgende Punkte sind vordefiniert bzw. auf Kraftwerksanlagen angepasst:

- Betrachtungsebenen: Hauptsysteme, Baugruppen und Komponenten sind über die sog. Ursachenschlüssel hierarchisch angeordnet, wobei auch eindeutig geregelt ist, welche Schlüssel für welchen Kraftwerkstyp relevant sind; z.B.: 0100-2999 (Dampferzeuger); 0200-0480 (Brennstoffsystem); 0360-0410 (Brenner); 0385 (Zündbrenner)

- Zustände und mögliche Zustandsübergänge: siehe 4.2.1.2

- RAM-Werte zur Kennzeichnung der Anlagenwirksamkeit: siehe 4.2.1.3

4.2.1.2 Vordefinierte Zustände und Zustandsübergänge

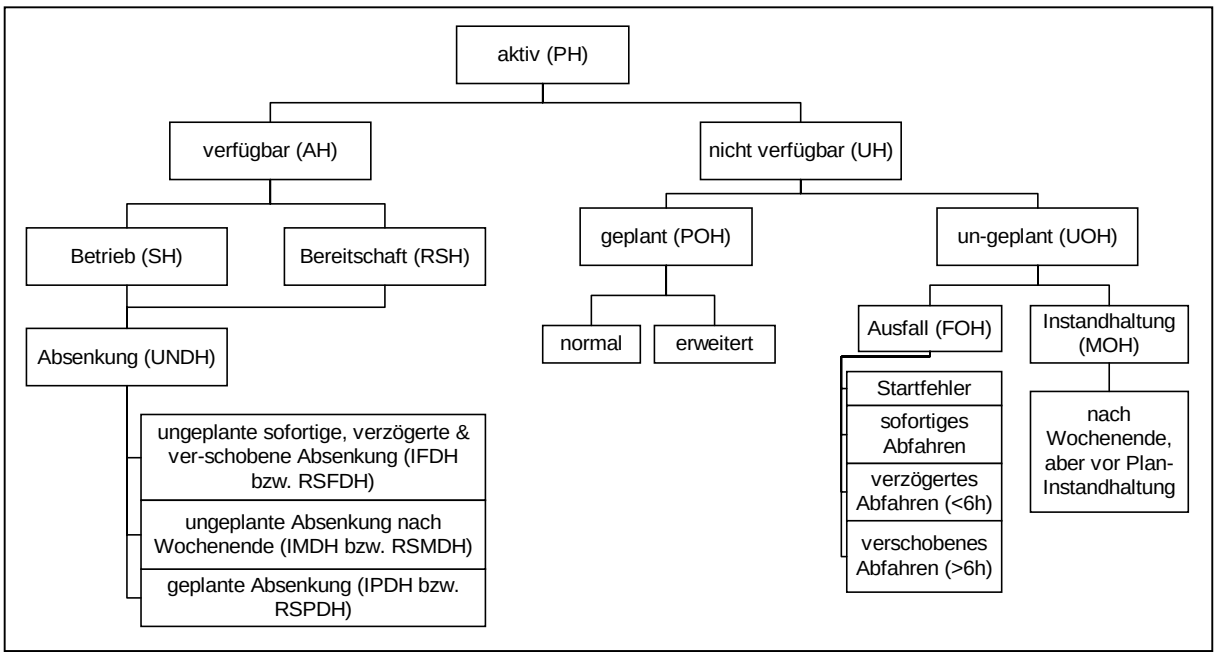


Bild 34 Betriebszustände nach NERC/IEEE

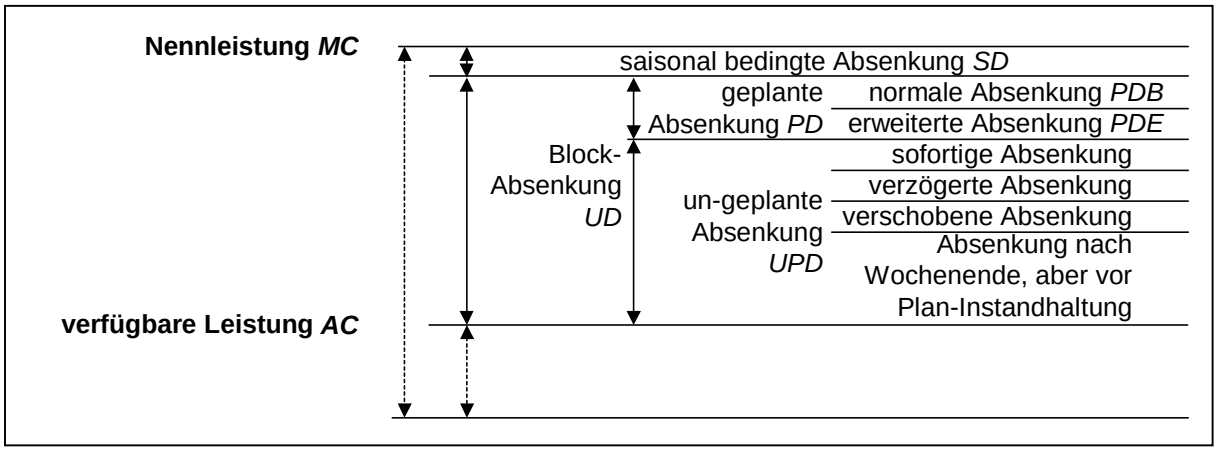


Bild 35 Abstufung der verfügbaren Leistung nach NERC

Die Zustands-Übergangsmatrix mit Erläuterungen ist in Anlage 10 gegeben.

4.2.1.3 Verwendete RAM-Kennwerte und Auswertung der Datenbank

Zugänglichkeit und Auswertungsmöglichkeit der Datensätze richten sich nach den jeweiligen Zugriffsberechtigungen. Käufer der Datenbank, die nicht zu den Daten liefernden Betreibern und Herstellern gehören, können nur anonyme Datensätze auswerten. D.h. wenn bei einer sehr starken Eingrenzung der Datensätze eine bestimmte Treffermenge unterschritten wird, erfolgt keine Auswertung. Auch die Analyse der Daten eines bestimmten Betreibers oder Herstellers kann nur von den dazu Berechtigten durchgeführt werden.

Die auszuwertenden Datensätze müssen zunächst eingegrenzt werden, indem verschiedene Auswahlkriterien eingegeben werden, die zu erfüllen sind. Damit wird aus dem gesamten

Datenpool die zu betrachtende Schnittmenge herausgefiltert. In Anlage 11 ist die Auswertung der Datensätze in NERC als Übersicht dargestellt.

Abschließend ist festzulegen, wie umfangreich die statistische Auswertung durchgeführt werden soll, für deren Aufbereitung verschiedene Standard- und Kurzberichte zur Auswahl stehen.

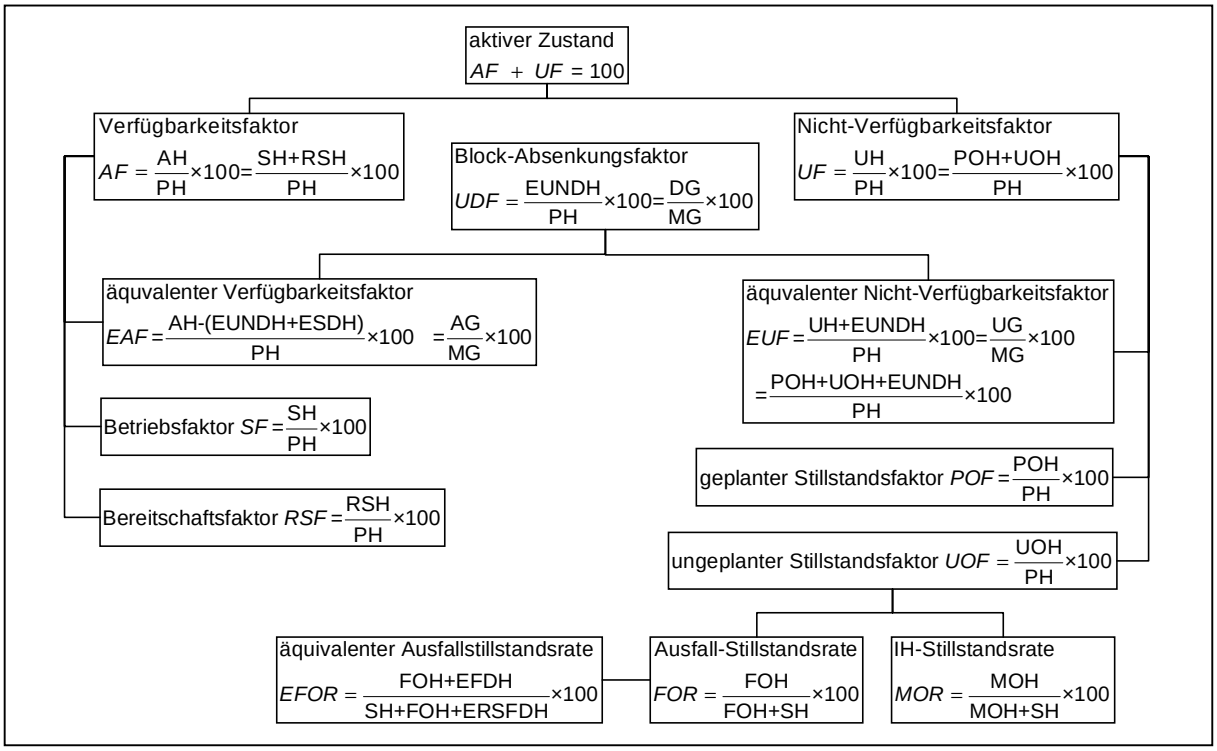


Bild 36 RAM-Kennwerte auf Kalenderzeit (*PH*) bezogen

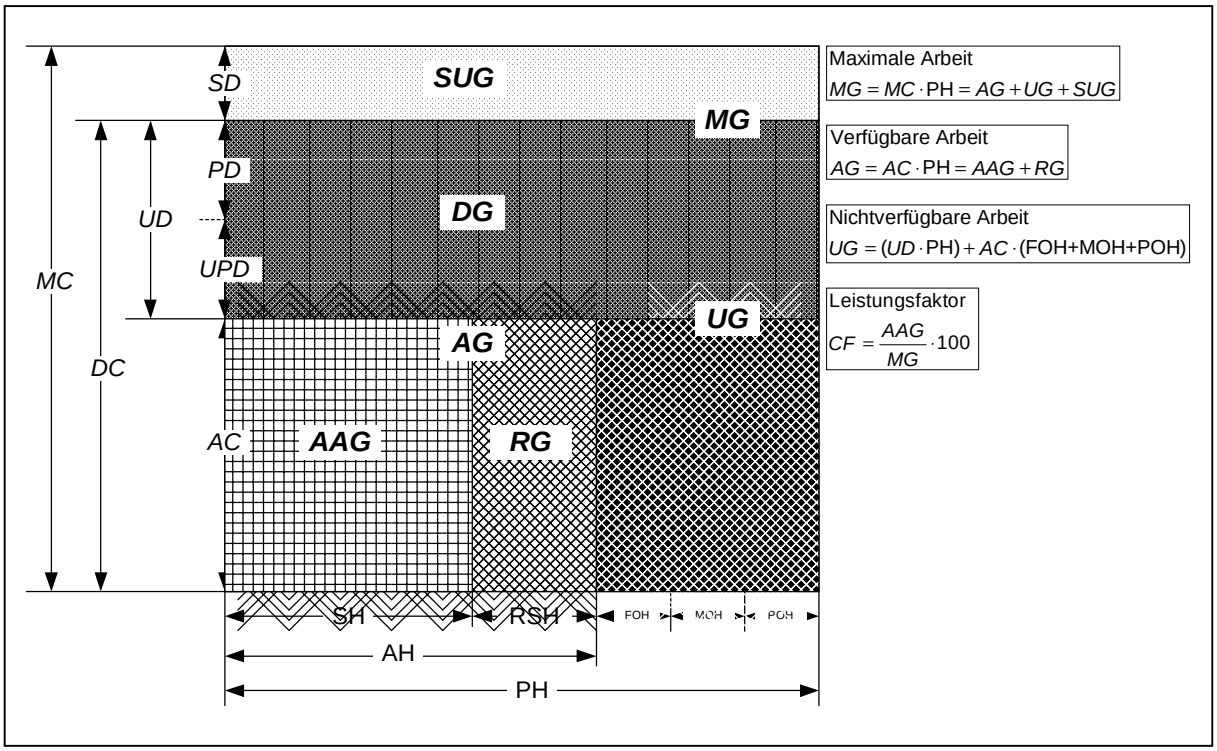


Bild 37 Ermittlung der Arbeitswerte nach NERC

4.2.2 VGB

4.2.2.1 Inhalt und Umfang der Datenbank

Die vom VGB gesammelten Daten werden in Form von Jahresberichten den Betreibern zur Verfügung gestellt /48/; eine mit NERC vergleichbare Form einer direkt auswertbaren Datenbank liegt bisher nicht vor. Die Datensammlung wurde zwar 1970 begonnen, die Nichtverfügbarkeitsauswertung wird aber erst seit 1988 realisiert. Sie umfasst derzeit 176 Anlagen mit einer installierten Leistung von 58.217 MW; die Gesamtzahl der ausgewerteten Nichtverfügbarkeits-Ereignisse über den gesamten Zeitraum beträgt 3.017 (1994).

Folgende Punkte sind vordefiniert bzw. auf Kraftwerksanlagen angepasst:

- Gründe der Block-Nichtverfügbarkeit: Anlage 12
- Verursachende Betrachtungsebene der Block-Nichtverfügbarkeit: Verwendung des Kraftwerks-Kennzeichnungs-Systems; Anlage 13
- Zustände und mögliche Zustandsübergänge: siehe 4.2.2.2
- RAM-Werte zur Kennzeichnung der Anlagenwirksamkeit: siehe 4.2.2.3

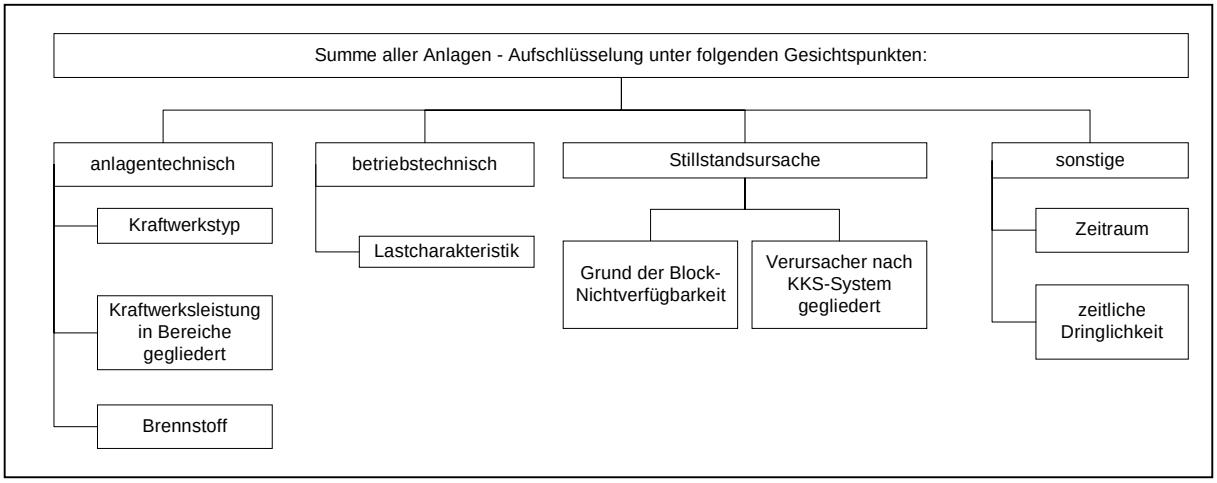


Bild 38 Aufschlüsselung der Datensätze bei VGB

Tabelle 6 Anlagentechnische Aufschlüsselung bei VGB

Kraftwerkstypen	Kraftwerksleistung in Bereiche gegliedert[38]	Brennstoff
Fossilbefeuerte Kraftwerke Blockanlagen Kernkraftwerke Diesel-Kraftwerk GuD-Anlagen Gasturbinenanlagen	bis 99 MW 100 bis 199 MW 200 bis 399 MW 400 bis 599 MW 600 bis 999 MW ab 1000 MW	Steinkohle[39] Braunkohle Öl/Gas Nuklear

[38] ohne GuD und Gasturbinenanlagen

[39] Untergliederung in Trocken- und Schmelzfeuerung

4.2.2.2 Vordefinierte Zustände, Zustandsübergänge und Einheiten

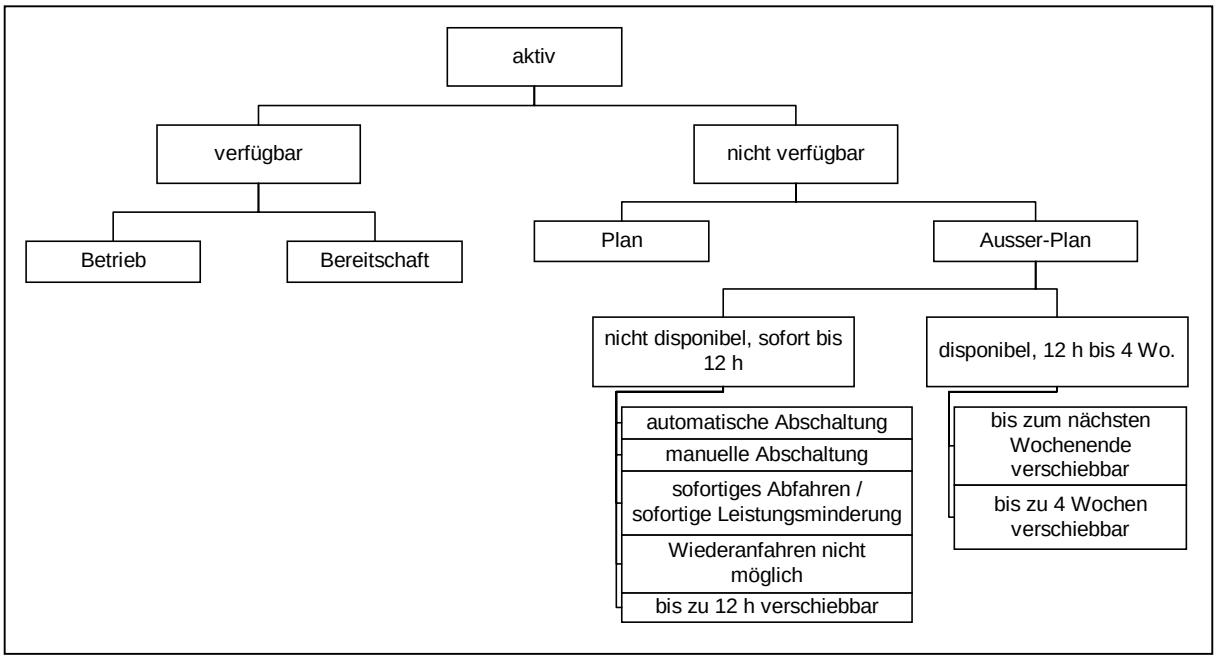


Bild 39 Betriebszustände nach VGB

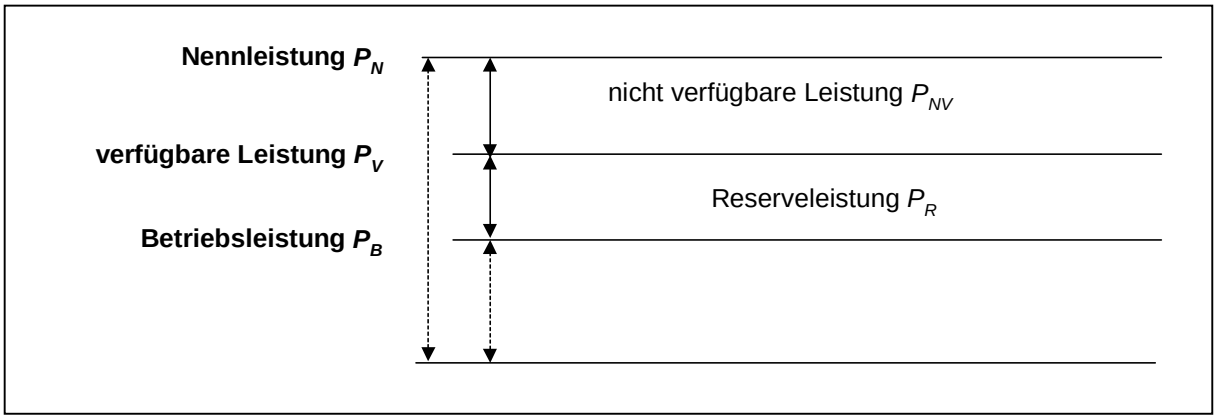


Bild 40 Abstufung der verfügbaren Leistung nach VGB

4.2.2.3 Verwendete RAM-Kennwerte und Auswertung der Datenbank

Wie erwähnt, ist eine Rechner-gestützte Auswertung derzeit nicht möglich, so dass aus den veröffentlichten Tabellen und Diagrammen die relevanten Zuverlässigkeitskennwerte, Anteile und Verursacher der Nichtverfügbarkeit abgelesen werden müssen.

Bei der Auswertung nach VGB wird eine weitaus geringere Anzahl von Kennwerten verwendet, als dies bei NERC der Fall ist. Neben der Angabe von aktuellen bzw. summierten Zeit-, Leistungs- und Arbeitsgrößen wird nur die jeweilige Verfügbarkeit bzw. Ausnutzung sowie die Ereigniszuverlässigkeit berechnet (Bild 41).

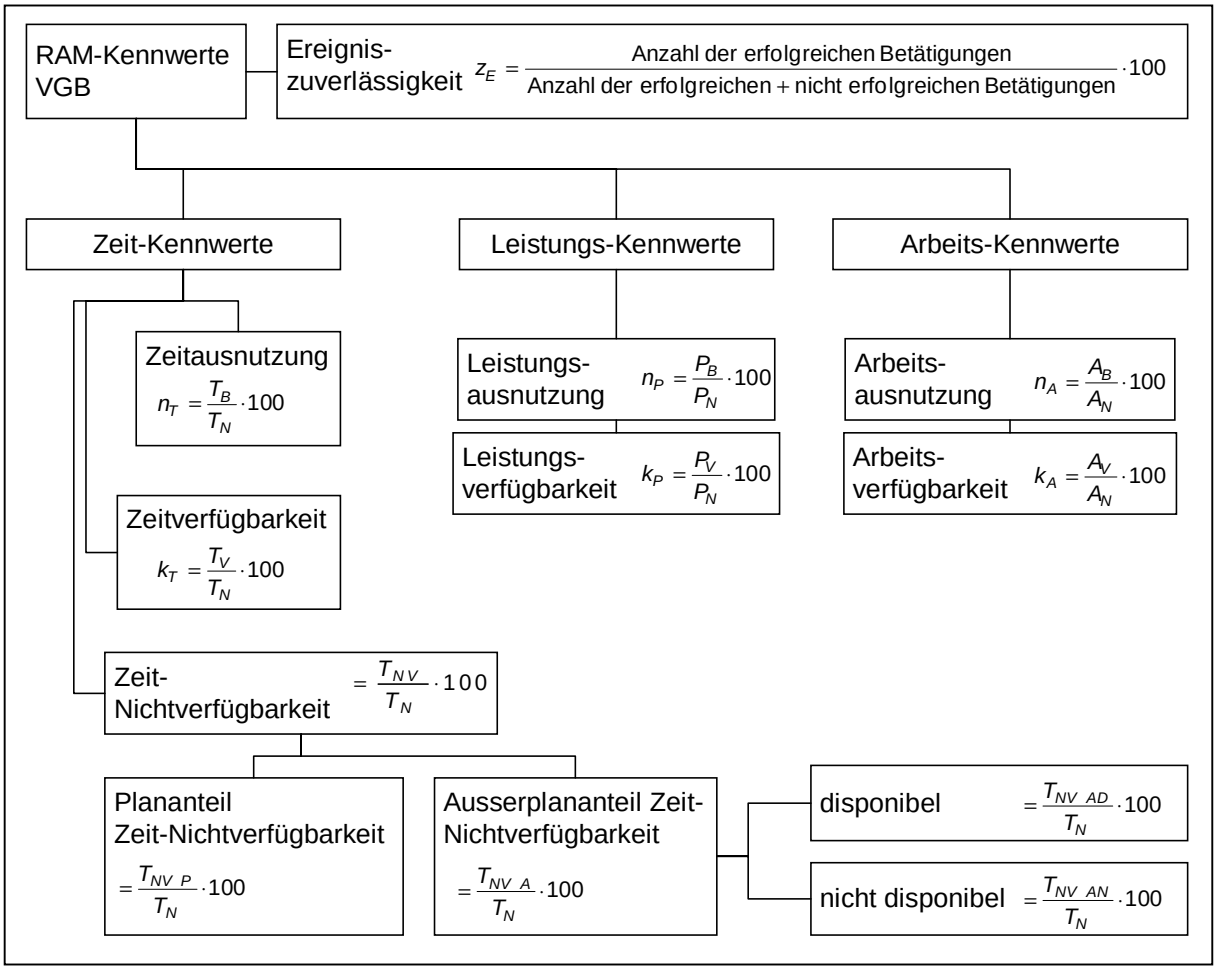


Bild 41 RAM-Kennwerte VGB

4.2.3 Gegenüberstellung von NERC und VGB

Folgende Gesichtspunkte spielen bei der Gegenüberstellung eine Rolle:

- Erfassung und Umfang der Daten;
- Aufschlüsselung der Nichtverfügbarkeits-Ereignisse;
- Auswertbarkeit der Daten und Aufbereitung der Ergebnisse.

Aufgrund der höheren Anzahl der erfassten Anlagen und dem Fakt, dass die Analyse der Nichtverfügbarkeiten beim VGB erst seit 1988 durchgeführt wird, bietet NERC mit GADS natürlich den größeren Datenpool. Davon abgesehen, kann der VGB aber in Bezug auf den Erfassungsgrad deutscher und auch europäischer Anlagen auf ein recht hohes Niveau verweisen, so dass auch hier eine gute Grundlage besteht. Es sollte aufgrund der europäischen Kontakte und den Bemühungen unterschiedlicher Stellen[40] demnach in naher Zukunft möglich sein, eine umfangreichere Datenbank für den europäischen Bereich aufzubauen.

[40] Beispielsweise das von der AG Turbo geplante Projekt „Probabilistische, ökonomisch/ökologische Analyse von GT-, GuD- und DT-Kraftwerken“.

Aus der Sicht des Autors erfordert ein derartiges Vorhaben aber, Erfassung und Auswertung der Daten weiter zu vereinfachen, was nur mit einer Datenbank möglich ist, die sowohl über eine komfortable, Formular-basierte Eingabe als auch über menügesteuerte Auswahl und Ausgabe verfügt. Damit soll der Aufwand für die Betreiber verringert werden, die generierten Daten in das betriebliche Controlling mit einbezogen werden können und eine Erweiterung der verfügbaren Kennzahlen erleichtert werden. Letzterer Punkt sollte im Zuge des verschärften Energiemarkts zunehmende Bedeutung erlangen, da hier neben dem internen Controlling auch das externe Benchmarking unterstützt wird und damit eine bessere Transparenz für den Betreiber in Hinsicht auf seine Marktposition und Verbesserungspotentiale besteht.

Kapitel 5 Untersuchungen zur Gasturbine V64.3

5.1 Problemanalyse

Bevor auf die Problem- und Zielstellung der Untersuchungen über die Gasturbine V64.3 eingegangen wird, muss auf die Vertraulichkeit der Arbeiten bzw. der entsprechenden Berichte verwiesen werden. Aus diesem Grund können im Rahmen der vorliegenden Arbeit zum Teil nicht die konkret verwendeten Daten und Informationen sowie die erzielten Ergebnisse angegeben werden. Wenn Interesse an weiteren Details besteht, die über diese Zusammenfassung hinausgehen, kann dies nur in Abstimmung mit den betroffenen Partnern, d.h. den Firmen DREWAG, Siemens KWU und den im Arbeitskreis “Gasturbine” des VGB organisierten Betreibern geschehen.

Bei der Problemanalyse wurde festgestellt, dass an einigen Komponenten der V64.3-Gasturbinen seit der Inbetriebnahme 1995 Lebensdauerprobleme auftraten. Dadurch wurden Instandhaltung und Betrieb der Maschinen negativ beeinflusst, so dass daraus Kosten und Einschränkungen resultierten, die nicht den Vorstellungen des Betreibers entsprachen.

Insbesondere wurden bei den Wirtschaftlichkeitsuntersuchungen folgende Punkte festgestellt:

- Die Turbinenbeschaufelung bildet mit 40% der direkten Instandhaltungskosten den größten Einzelposten und damit auch das wichtigste Optimierungspotential.

- Die zusätzlichen Kosten, die durch Revisionen entstehen, machen nach dieser Aufteilung 20% aus, wobei anzumerken ist, dass Revisionen durch Nichtverfügbarkeit auch indirekte Instandhaltungskosten verursachen. Weiterhin ist ein Teil der Grund- sowie Ersatzteilkosten strenggenommen Revisionsbedarf, der sich kostenstellenmäßig aber nicht scharf abgrenzen lässt . Weiterhin sind die Schaufelkosten ebenfalls Revisionskosten, die aber nur gesondert betrachtet werden.

- Ein weiterer großer Kostenblock sind die Instandhaltungsaufwendungen, die im Rahmen eines längerfristigen Servicevertrages pauschal abgedeckt sind, und für die jeweils ein jährlicher Betrag zu zahlen ist. Dieser Kostenblock ist zwar damit nicht Bestandteil der aktuellen Optimierungsuntersuchungen. Da aber nach dem Auslaufen entweder ein neuer Vertrag auszuhandeln ist, oder aber die einzelnen Leistung gesondert in Auftrag gegeben und bezahlt werden, muss auch hier klar sein, was die günstigste Variante für den Betreiber sein würde.

Jene die spezifischen Instandhaltungskosten beeinflussenden Kostenstellen, Randbedingungen und die zu berücksichtigenden Zusammenhänge wurden zunächst insges. analysiert (Anlage 14), um daraus anschließend einerseits die Untersuchungsziele näher einzugrenzen und andererseits die benötigten Daten und Informationen festzustellen. Auf das letztlich entstandene Optimierungsmodell, die darin berechneten und miteinander verglichenen Instandhaltungsstrategien, sowie auf die dafür ausgewerteten Informationen, wird in den folgenden Abschnitten eingegangen; Bild 42 zeigt eine Übersicht dazu.

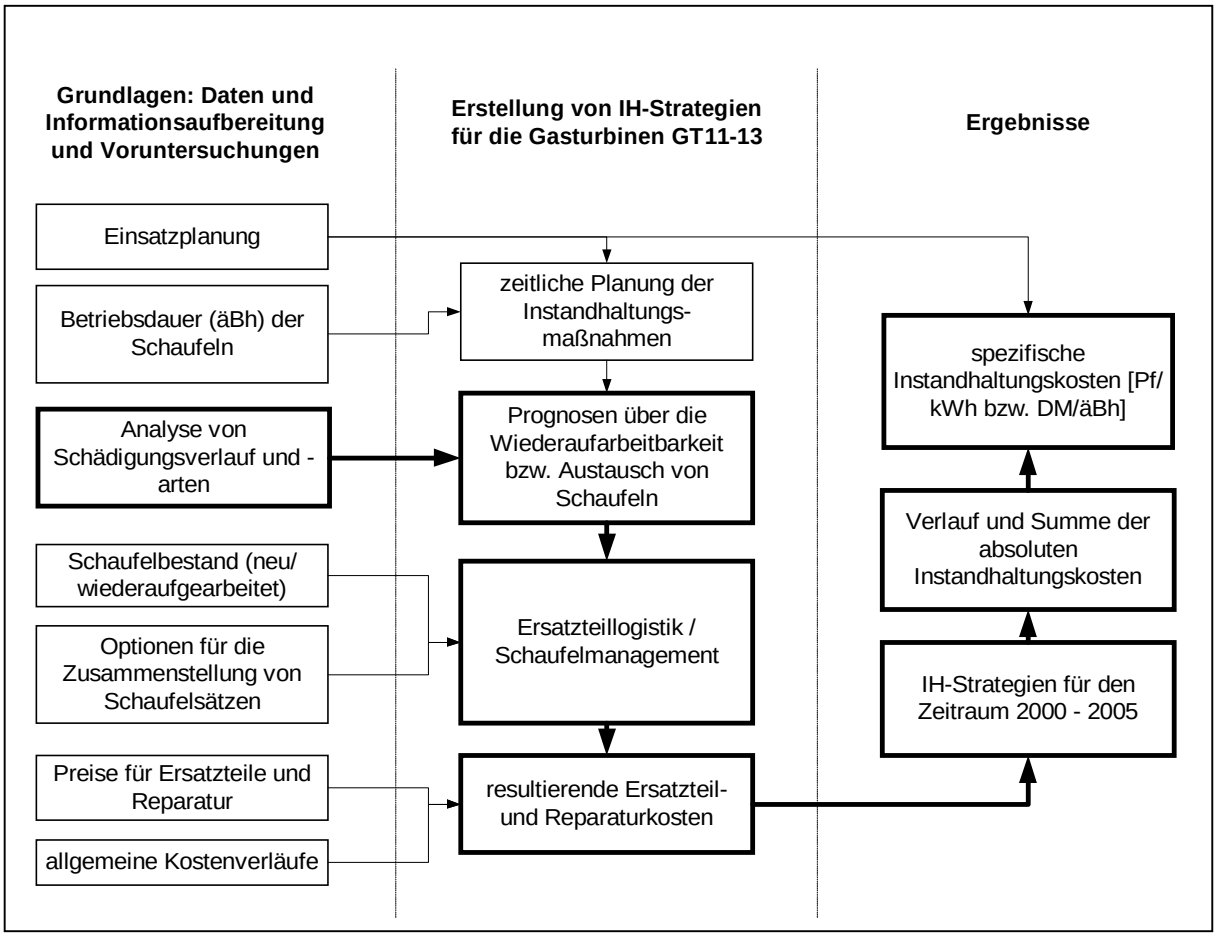


Bild 42 Daten, Untersuchungen und Ergebnisse des Projektes

5.2 Informationserfassung und -auswertung

5.2.1 Übersicht

Um zu möglichst gut abgesicherten Aussagen darüber zu kommen, nach welcher Betriebszeit mit welchen Schäden zu rechnen ist, wurde eine Schädigungsanalyse der Turbinenbeschaufelung durchgeführt; Bild 43.

Als Lebensdauerdaten standen zur Verfügung:

- DREWAG GmbH: Die Lebensdauerdaten und Befundinformationen der Inspektionen, Revisionen und die dabei durchgeführten Instandhaltungsmaßnahmen wurden in den sog. Lebenslaufakten zusammengefasst.
- Arbeitskreis “Gasturbine” des VGB: Die Erfahrungsberichte von Betreibertreffen, sowie zusätzliche Informationen, die auf Nachfrage zur Verfügung gestellt wurden.

Für die Analyse der Ausfallmuster, Schädigungsarten bzw. -vorgänge wurden zusätzlich folgende Quellen ausgewertet:

- Informationen vom Hersteller und der Wiederaufarbeitungsfirma, die jedoch überwiegend aus Arbeitstreffen im Rahmen einer weitergehenden Kooperation zwischen Betreiber und Hersteller stammen, und damit entsprechender Vertraulichkeit unterliegen.
- Literaturrecherche, z.B.: /38/, /49/, /50/, /51/, /52/, /53/

- Weiterhin standen natürlich auch die Erfahrungen und auf diesem Gebiet durchgeführte Untersuchungen des Lehrstuhls Kraftwerkstechnik zur Verfügung; z.B. /54/, /41/.

In den folgenden Abschnitten wird nur auf die Schädigungsanalyse der Turbinenleitreihe 1 (TLe1) eingegangen, da diese Schaufelreihe ganz erheblich die direkten Instandhaltungskosten bestimmt und hier die meisten Informationen verfügbar waren. Für die anderen Schaufelreihen wurde vergleichbar vorgegangen; die Analyse war aber weit weniger umfangreich.

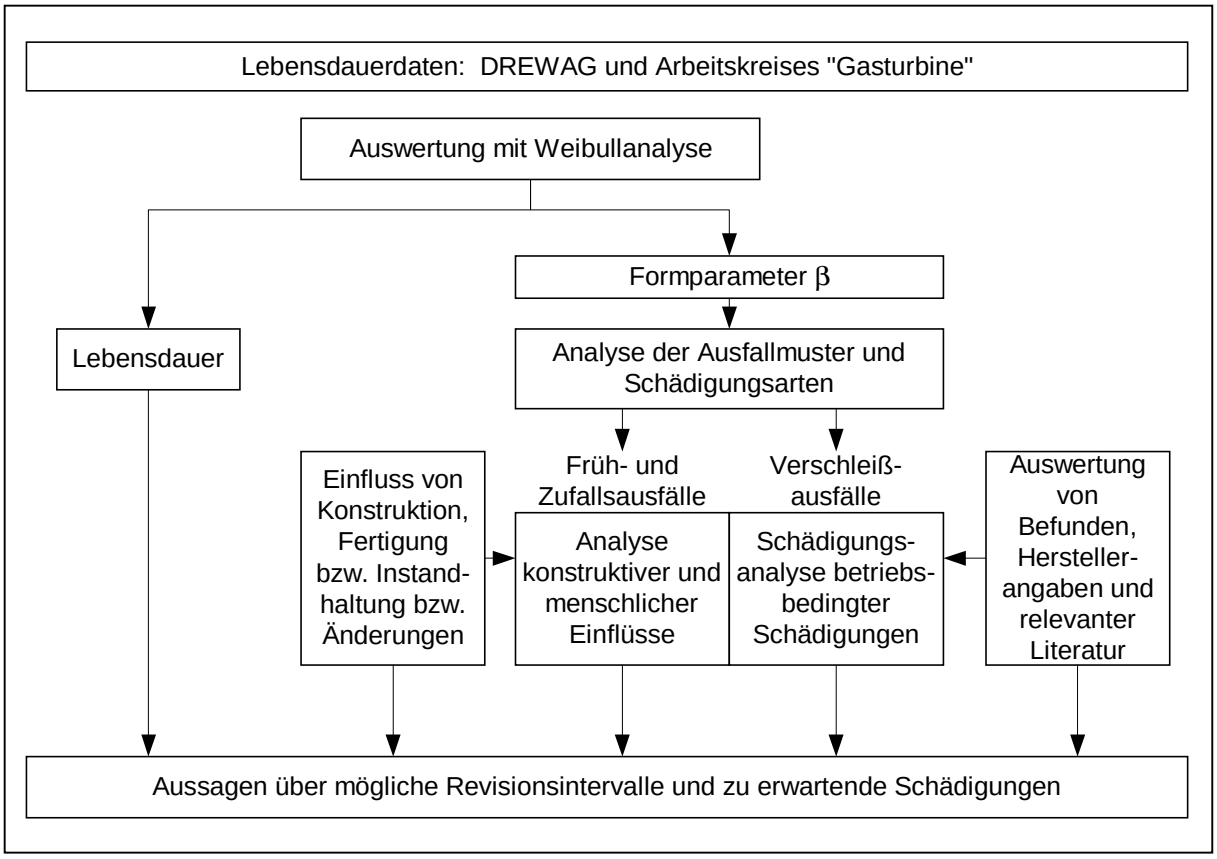


Bild 43 Übersicht über die durchgeführte Schädigungsanalyse der Turbinenbeschaufelung

5.2.2 Statistische Auswertung mit Weibullanalyse

Es standen insges. 39 Datensätze zur Verfügung, d.h. Betriebsdauern zwischen den Wechselaktionen an einzelnen TLe1-Schaufeln oder kompletten Schaufelsätzen, die bei geplanten Instandhaltungsmaßnahmen (Revisionen) oder ungeplanten (aufgrund von Schäden an der TLe1 oder auch anderen Komponenten) durchgeführt wurden. Die erfassten äquivalente Betriebsstunden[41] (äBh) wurden zunächst gruppiert; da aber die resultierende Verteilung aufgrund der gemischten Fehlerarten bzw. Ausfallmuster wenig Aussagekraft hatte, wurden die Datensätze nach folgenden Gesichtspunkten geordnet:

(1) TLe1, die über eine volle Revisionsperiode im Einsatz waren (auch bei zwischenzeitlichem Austausch einzelner Schaufeln) ⇒ Schwerpunkt Verschleißausfälle;

[41] Bei Heißteilkomponenten haben Start-, Schnellschluss- und Lastwechselvorgänge aufgrund der auftretenden Temperaturgradienten sowie Spitzenlastfahrweise aufgrund der erhöhten Betriebstemperaturen einen stärkeren Lebensdauerverbrauch zur Folge. Deshalb werden Revisionsintervalle bzw. Lebensdauern in sog. äquivalenten Betriebsstunden (äBh) angegeben, in denen neben den eigentlichen Betriebsstunden auch die erwähnten Vorgänge mit bestimmten Faktoren einbezogen werden; z.B. pro Start 10 äBh Lebensdauerverbrauch.

(2) TLe1, die zwischen zwei Revisionen, d.h. vor Erreichen des geplanten Revisionstermins teilweise oder vollständig getauscht werden mussten ⇒ Verschleiß- und Frühausfälle;

(3) TLe1, die zwischen einem ungeplanten Tausch und der restlichen Zeit bis zur folgenden Revision im Einsatz waren (nur komplett getauschte Sätze) ⇒ Befundung nach kurzer Betriebsdauer.

zu (1) Das entscheidende Kriterium ist die sog. scrap rate[42] nach der Zeit zwischen 2 Revisionen. Falls einzelne Schaufeln zwischenzeitlich getauscht werden mussten, sind diese der scrap rate eigentlich mit einzubeziehen; die Ergebnisse sind in Bild 44 zusammengefasst.

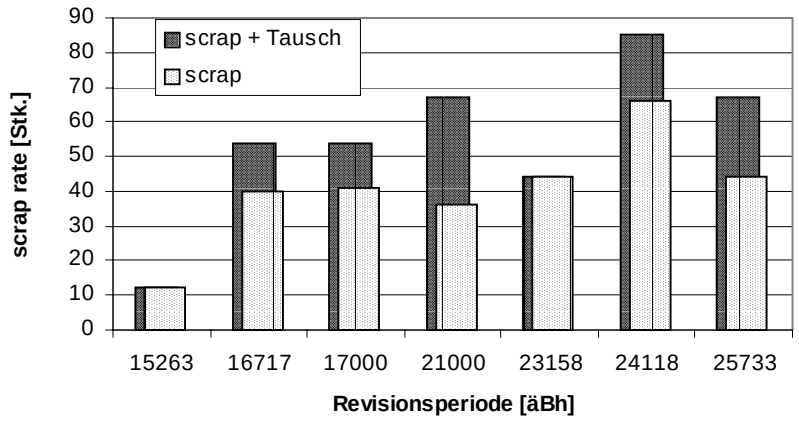


Bild 44 scrap rate nach voller Revisionsperiode

Der Weibullplot zeigt eine sehr steile Gerade, d.h. dass es einen ausgeprägten, relativ schmalen Zeitraum gibt, in dem alle Lebensdauern angesiedelt sind. Im Allgemeinen werden deshalb Verteilungen mit einem Formparameter >3-4 so gedeutet, dass nach einem Zeitraum mit sehr geringer Ausfallwahrscheinlichkeit die Bauteile ab einem bestimmten Zeitpunkt anfangen, sehr stark zu verschleißen (*accelerated wear out*; beschleunigter Verschleiß). In diesem Fall führt diese Deutung allerdings etwas in die Irre, da es sich zumeist um geplante Revisionstermine handelt, die sich an einer bestimmten äBh-Zahl der Instandhaltungsrichtlinien orientieren. Diese wurden allerdings anhand des in der Auslegung berechneten Beginns des beschleunigten Verschleißes berechnet. Die anzustrebende Lösung wäre daher, dass der Hersteller –einsatzspezifische- Weibulldaten über das reale Verschleißverhalten hat und darauf seine Instandhaltungsempfehlungen aufbauen und auch seinem Entwicklungsfortschritt folgend anpassen kann. Die abgelesenen Parameter sind in Tabelle 8 zusammengestellt; die sich daraus ergebenden Verläufe der Ausfallwahrscheinlichkeit, Ausfallwahrscheinlichkeitsdichte und Fehlerrate sind in Bild 45 bis Bild 47 dargestellt.

Tabelle 7 Ergebnisse der Weibullanalyse der Revisions-äBh der TLe1

T	β	μ	σ
23000	7	21000	8500

[42] Die scrap rate (Schrottrate) gibt an, wieviele Schaufeln absolut bzw. prozentual pro Reihe aufgrund der Schädigungen nicht wiederaufgearbeit werden konnten. Sie ist sowohl von den tatsächlichen Schäden (Oxidation des Grundwerkstoffes, Rißanzeigen) als auch von den verfügbaren Reparaturverfahren und Richtlinien abhängig.

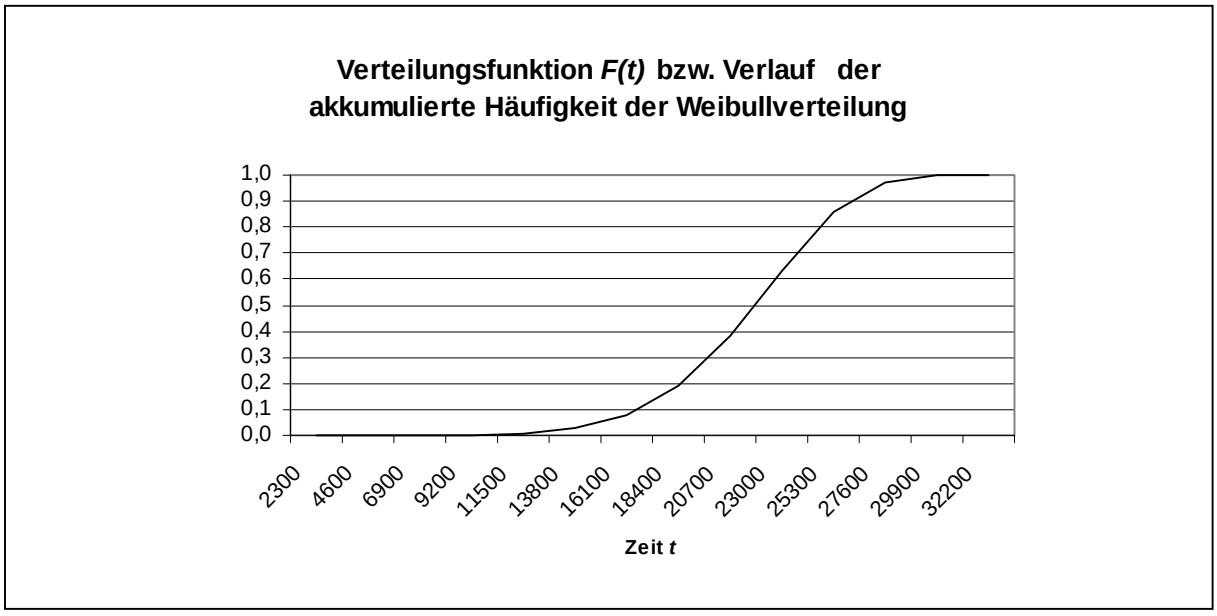


Bild 45 Verlauf der Ausfallwahrscheinlichkeit

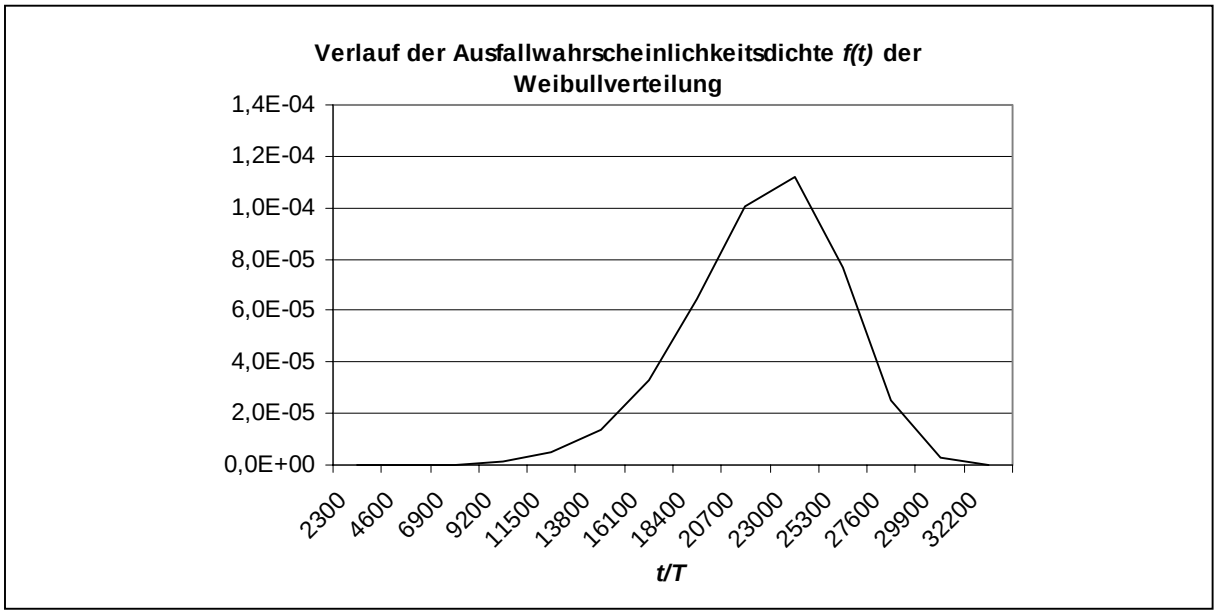


Bild 46 Verlauf der Ausfallwahrscheinlichkeitsdichte

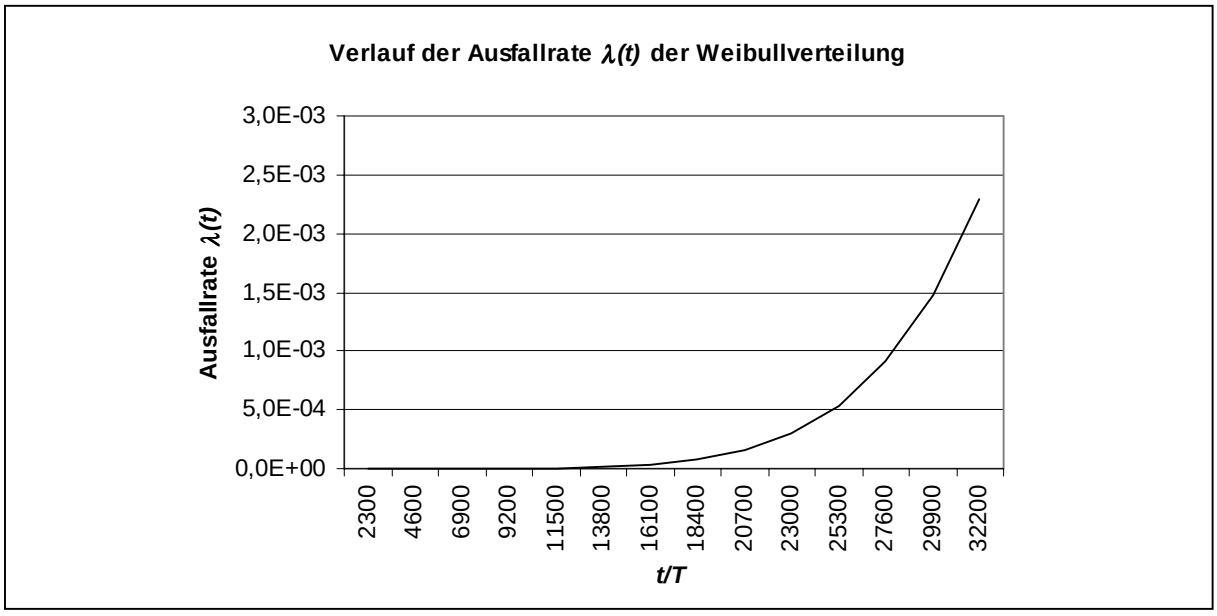


Bild 47 Verlauf der Fehlerrate

zu (2) Zunächst wird das zeitliche Auftreten von TLe1-Wechseln betrachtet; Bild 48. Dabei ist zu beachten, dass es sich zwar in der Mehrzahl um ungeplante Maßnahmen handelt, aber einige Betreiber in jährlichen Aktionen zwischen den Revisionen die jeweils am stärksten geschädigten Schaufeln austauschen.

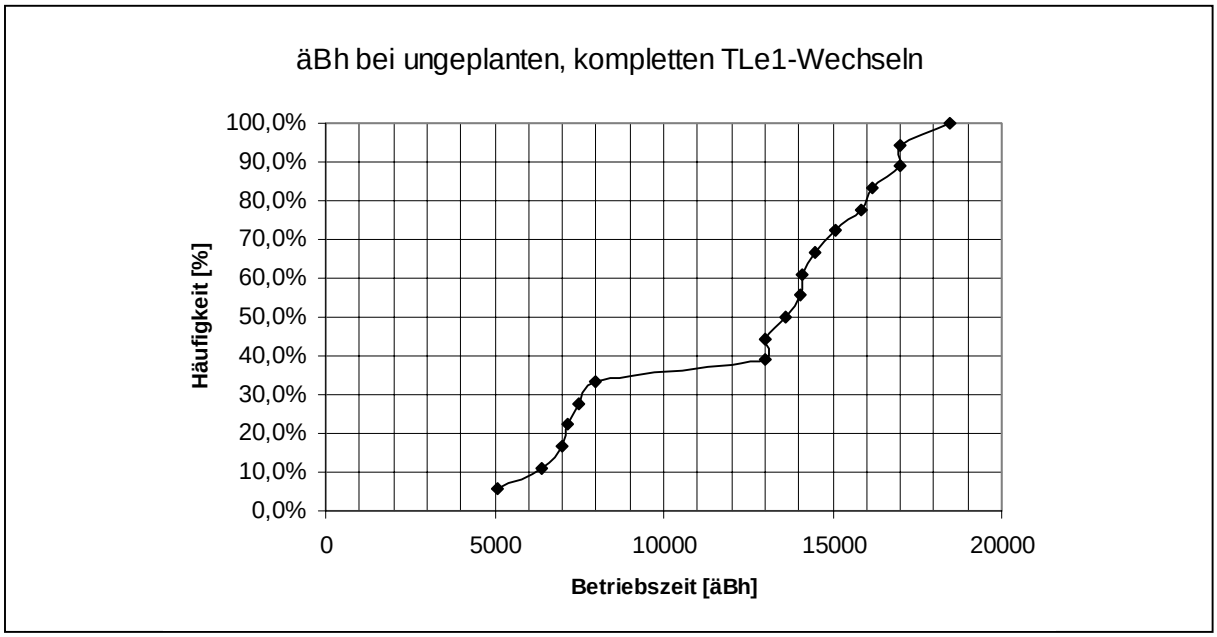


Bild 48 Akkumulierte äBh-Verteilungsdichte bei ungeplanten, kompletten TLe1-Wechseln

Soweit die tatsächlichen bzw. wahrscheinlichen Ursachen und Umstände für die Schädigungen bekannt sind, lassen sie sich folgendermaßen angeben:

- Probleme mit dem Kühlluftsystem: Dazu zählen Verschmutzungen oder mangelhaftes bzw. falsches Kühlluftangebot; die betroffenen Schaufeln waren entweder durch Oxidation oder Rissen an Funktionsflächen so geschädigt, dass sie nicht wiederaufarbeitbar waren;
- Qualitätsprobleme bei der Beschichtung neuer bzw. wiederaufgearbeiteter Schaufeln;
- Schäden durch Fremdkörper.

Der Weibullplot zeigt deutlich zwei Bereiche von Punkten, die jeweils annähernd eine Gerade bilden, und zwischen denen es zu einem Knick kommt. Mit der Geraden Nr.1 werden zunächst die Parameter für die gesamte Population bestimmt; Tabelle 8. Allerdings ist das Vorhandensein eines Knick ein Indiz dafür, dass verschiedene Ausfallmuster bzw. Schädigungsarten vorliegen. In dem vorliegenden Fall ist die Interpretation naheliegend, dass mit Gerade Nr.2 die Frühausfälle aufgrund von Verstopfungen, Montagefehlern bzw. mangelnder Beschichtungsqualität erfasst werden. Die Gerade Nr.3 hingegen charakterisiert Ausfälle aufgrund von Erschöpfung der Oxidationsschutzschicht, ohne dass zusätzliche Faktoren außer den Heißgastemperaturen bzw. Kühlungsbedingungen eine Rolle gespielt haben. In beiden Fällen liegen die Formfaktoren weit über 3-4, so dass im Gegensatz zu der ursprünglichen Gerade Nr. 1 von beschleunigtem Verschleiß ausgegangen werden kann, wenn man die zugrundeliegenden Schädigungsvorgänge einzeln betrachtet. Allerdings erfordert das die Kenntnis der tatsächlichen Ursachen. Da dies mit dem vorliegenden Datenmaterial nur eingeschränkt möglich ist, müssen auch die mit dem Weibullplot möglichen Aussagen entsprechend relativiert werden.

Tabelle 8 Ergebnisse der Weibullanalyse der Tausch-äBh der TLe1

Verteilungs-Nummer	T	b	μ	σ
Nr.1	13800	2,7	12000	5300
Nr.2	9500	5,9	8200	3500
Nr.3	15000	5,3	14000	5500

zu (3) Entscheidendes Kriterium bei Schaufelsätzen, die nur für die Zeit zwischen einem ungeplanten Tausch und der nächsten Revision in Betrieb waren, ist deren Wiederverwendbarkeit, sowohl mit oder ohne anschließender Wiederaufarbeitung. Während zwei Einträge auf Schäden durch Fremdkörper bzw. die nicht beseitigte Ursache des vorangegangenen TLe1-Wechsels zurückzuführen waren, zeigen die anderen Fälle jedoch (Bild 49), dass die Schaufelsätze bei Betriebszeiten von nur ca. 5.000 bis 7.000 äBh bei der Wiederaufarbeitung immer noch scrap rates von 7-12 Stück hatten. Als Alternative bietet sich deshalb die Vorhaltung bzw. der Wiedereinbau solcher gebrauchter Schaufelsätze für ungeplante TLe1-Wechsel an.

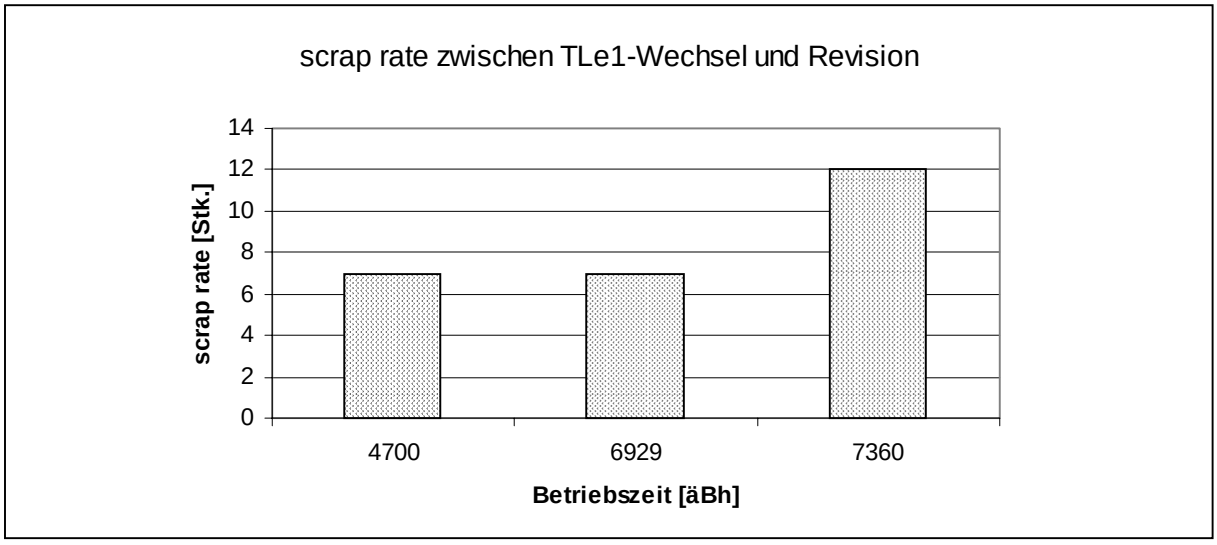


Bild 49 scrap rate nach Überbrückung zwischen TLe1-Wechsel und Revision

5.2.3 Analyse betriebsbedingter Schädigungen, konstruktiver und menschlicher Einflüsse

Oxidationsbefunde (bei Inspektionen bzw. TLe1-Wechseln) waren der Hauptgrund dafür, dass Schaufeln gewechselt werden mussten. Ca. 2 Drittel der Fälle konnte mehr oder weniger eindeutig auf Verstopfungen oder andere Kühlungsprobleme zurückgeführt werden. Die Datumsangaben zeigen, dass davon zwar die Mehrzahl, aber nicht alle, in den Zeitraum vor 1997 fallen. So lässt sich sagen, dass zwar konstruktive Veränderungen teilweise Erfolg hatten; jedoch das Kühlluftsystem immer noch eine sensible Stelle ist, wenn es darum geht, ohne außerplanmäßige Stillstände eine hohe Verfügbarkeit der Gasturbine zu erreichen. Da die durch Verstopfungen hervorgerufenen Oxidationsschädigungen sehr schnell wachsen, und die Chance diese bei Inspektionen rechtzeitig zu erkennen, entsprechend gering ist, stellen sie ein immer noch bestehendes Risiko dar.

In der Beschichtung entdeckte Risse bzw. Abplatzungen führten in einigen Fällen dazu (teilweise zusammen mit Oxidationsbefunden), dass Schaufeln getauscht werden mussten. Das Auftreten von sichtbaren Rissen zeigte weder zeitlich noch zahlenmässig statistisch signifikante Werte, sondern schien auf besondere Umstände oder Mängel einzelner Schaufeln bzw. Schaufelsätze zu verweisen.

Ungeplante Schaufelwechsel sind somit meist auf Oxidationsbefunde zurückzuführen; dies entweder aufgrund von Verstopfungen (Durchbrandgefahr einzelner Schaufeln) oder fortgeschrittener Oxidation des gesamten Satzes (ansteigende Gefahr hoher scrap rates und damit der Nutzung des wiederaufgearbeiteten Satzes). Einzelne Risse in den Schaufeln werden hingegen relativ selten als Grund gesehen, die betroffenen Schaufeln zu tauschen. Dies wird auch vom Hersteller so gesehen, welcher bei Querrissen (in Abhängigkeit ihrer Lage bzw. unter Berücksichtigung des bisher aufgetretenen Risswachstums) auch bei relativ großen Risslängen einen befristeten Weiterbetrieb der Maschine als zulässig erachtet. Von dem Sicherheitsaspekt abgesehen scheint es auch eine Rolle zu spielen, dass die Wiederaufarbeitbarkeit von Schaufeln mit - bei Inspektionen erkennbaren - Rissen kaum noch dadurch beeinflusst wird, ob die Schaufel nun sofort ausgebaut wird oder noch bis zur geplanten Revision verbleibt. Tritt jedoch ein frühzeitiges und an mehreren Schaufeln erkennbares Risswachstum auf, so ist dies ein Anzeichen auf Beschichtungs- oder Kühlungsprobleme bzw. mangelhafte Wärmebeweglichkeit (erhöhte Wärmespannungen, z.B. durch Montagemängel). In diesen Fällen würde der Satz nicht nur bei Weiterbetrieb zusätzlich stark geschädigt, auch die Gefahr eines absehbaren TLe1-Wechsels besteht, dass bald getauscht werden müsste.

Ohne dass an dieser Stelle konkret auf die Ergebnisse der Wiederaufarbeitung eingegangen werden kann, zeigte sich, dass der Eingangsbefund (also auch die bei Inspektionen erkennbare Befunde) und die endgültige scrap rate sowohl fast identisch sein kann als auch weit auseinander liegen kann. Dabei ist allerdings zu berücksichtigen, dass bei der Eingangsbefundung durch Oxidation ausgesonderte Schaufeln durchaus rissbehaftet gewesen sein können, ohne dass dies extra aufgeführt ist. Der Schluss scheint gerechtfertigt, dass die Aussonderungsgründe Oxidation und lineare Anzeigen zu ungefähr gleichen Teilen auftreten, das Verhältnis jedoch stark schwanken kann, so dass endgültige Aussagen wirklich erst nach dem Entschichten getroffen werden können.

Aufgrund der allgemeinen Erfahrungen an Gasturbinen werden Temperaturspitzen durch ungleichmäßige Temperaturverteilung als ein wesentlicher Faktor für die Schaufelschädigung angesehen. Die Auswertung kann nur Anhaltspunkte auf Schädigungsursachen geben. Dies ist darauf zurückzuführen, dass

- die tatsächlichen, auf der Außenseite der Schaufel vorliegenden Temperaturen nicht feststellbar sind,
- auf die Verteilung vor der Leitreihe aus Messwerten hinter der Turbine geschlossen werden muss,

- die Kühlungsverhältnisse auf der Schaufelinnenseite für den Betreiber nicht näher bestimmbar sind.

D.h. nur bei signifikanter Übereinstimmung zwischen einem messbaren Temperaturprofil und der Verteilung von temperaturbedingten Schädigungen über den Stufenumfang können aus einer solchen Korrelation direkte Schlüsse gezogen werden.

Es wurden insges. 6 verschiedene Messreihen ausgewertet, die in Tabelle 9 zusammengefasst sind.

Tabelle 9 Ausgewertete Messreihen

Turbine	243		232		251	
Zeitraum	15.-16.KW98	25.11.97	16.KW97	38.KW98	43.KW96	22.KW98
Messpunkte	11454	2	5535	1062	13935	11329
P_{max} [MW]	61,15	61,3	62,94	66,45	62,45	61,58

Um die Temperaturen im höheren Bereich auszuwerten, wurden nur Messwerte über 40 MW berücksichtigt und je nach der gemessenen maximalen Leistung in Intervalle unterteilt;

Tabelle 10.

Tabelle 10 Leistungsintervalle

P_{min} [MW]	40	45	50	52	54	56	58	60	62
P_{max} [MW]	45	50	52	54	56	58	60	62	P_{max}

Zunächst lässt sich in der Mehrzahl der Temperaturverteilungs-Diagramme deutlich erkennen, dass die Messwerte an den Positionen 23°°, 18°°, und 13°° immer die niedrigsten Werte aufweisen, die Spitzenwerte hingegen generell bei 16°°, 4°° und 6°° liegen. Eine wesentliche Verdrehung, d.h. das Auftreten von Minimal- bzw. Maximalwerten an anderen, in eine bestimmte Richtung verschobenen Positionen, konnte im Bereich über 40 MW nicht festgestellt werden. Die Spreizung zwischen Minimal- und Maximaltemperatur lag überwiegend bei 40 bis 50 K.

Um näherungsweise die Verteilung der Schädigungen über den Umfang mit den festgestellten Temperaturprofilen zu vergleichen, wurde aus den verfügbaren Daten zunächst ein Durchschnittsprofil erstellt. Im nächsten Schritt wurde die Verteilung der starken Oxidationsbefunde der TLe1 mit dem Temperaturprofil überlagert, und anschließend wird durch die Verdrehung der beiden Profile zueinander nach Übereinstimmungen gesucht. Das Bild 50 zeigt das Resultat, wenn das Temperatur-Profil 140° nach links gegenüber der Umfangsverteilung der schweren Oxidationsschäden verdreht wird. Eine sehr deutliche Überlagerung von Spitzenwerten der Temperatur und der Oxidationsbefunde ist feststellbar.

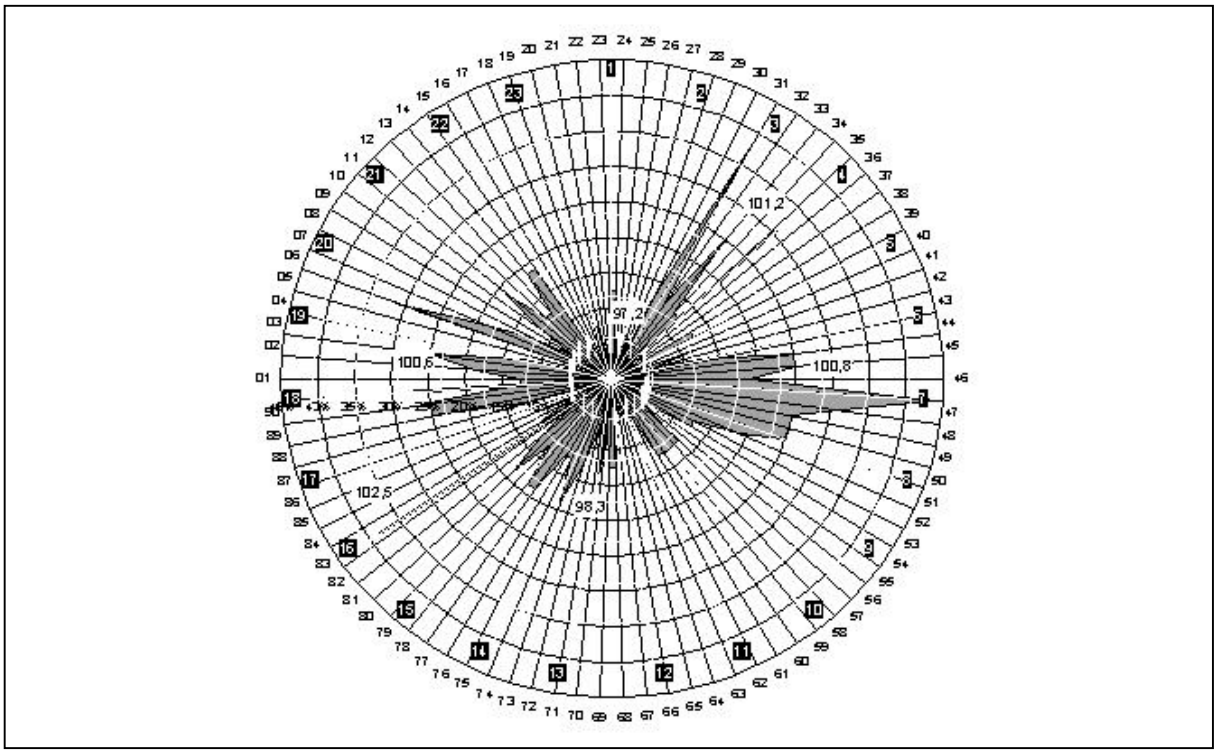


Bild 50 Überlagerung der Verteilung der starken Oxidationsbefunde der TLe1 mit dem Temperaturprofil

5.2.4 Aussagen zur Instandhaltungn

Um ungefähr festzustellen, mit welchen Standzeiten bzw. Ausschussraten bei den aktuell eingebauten Leitschaufeln der Stufe 1 zu rechnen ist, werden die Daten der Wechsel bzw. Revisionen aller dieser nach 1996 eingebauten Schaufeln betrachtet. Die Daten sind allerdings nur eingeschränkt aussagekräftig, da zumeist keine Betriebszeiten >23.000 äBh vorlagen. Mehrere Ereignisse weisen darauf hin, dass die zuverlässige Kühlluftversorgung immer noch ein Problem ist.

Bessere Rückschlüsse lassen sich hingegen aus den aktuellen äBh der derzeit eingebauten TLe1 ziehen - auch wenn es sich meist nur um ungefähre Werte handelt - sowie aus den Informationen aus den jeweils letzten Inspektionen.

Die Daten zeigen, dass die aktuellen Standzeiten in einer Reihe von Anlagen schon bei über 20.000 äBh liegen und bei den geplanten Revisionsterminen Laufzeiten von 25.000 äBh angepeilt werden. Der Weibullplot und die Verteilungsparameter in Tabelle 11 zeigen Werte, von denen die Aussage abgeleitet werden kann, dass man bei aktuellen und für die nächsten beiden Jahre geplanten Revisionen von 25.000er-Intervallen ausgeht. Dieser Wert wäre zwar identisch mit den Hersteller-Empfehlungen für die Instandhaltung, doch dabei sind mehrere Punkte zu beachten. Zunächst sind die aufgetragenen äBh Planungswerte und keine wirklichen Lebensdauern (sprich Ausfalldaten), die nur insoweit etwas über den tatsächlichen Zustand der Anlage aussagen, dass dieser Zustand nicht so schlecht sein wird, um das Revisionsintervall aus Sicherheits- und Wirtschaftlichkeitserwägungen unplanmäßig verkürzen zu müssen. Auch der extrem hohe Formfaktor zeigt an, dass es sich nicht um Lebensdauern im eigentlichen Sinn handelt, da Werte von >> 4 bedeuten, dass ab einem sehr klar angebbaren Zeitpunkt ein äußerst schneller Verschleiß eintritt, der das Bauteil binnen kurzem ausfallen lässt. In unserem Fall steht hier vielmehr die Überlegung im Hintergrund, dass ein Weiterbetrieb über ca. 24-25T äBh die scrap rate und damit die Wiederaufarbeitungskosten überproportional ansteigen lassen würde. Innerhalb der Wirtschaftlichkeitsbetrachtungen soll genau dieser Punkt näher untersucht und quantitativ bestimmt werden.

Tabelle 11 Weibullanalyse realisierter und geplanter Revisions-äBh der TLe1 seit 1997

T	b	μ	σ
25000	9	23500	ca. 10000

In Bezug auf die Verwendbarkeit wiederaufgearbeiteter Schaufeln, d.h. die Reparaturfähigkeit geschädigter Schaufeln, lässt sich feststellen, dass 1-mal wiederaufgearbeitete Schaufeln zwar einsetzbar sind, aber umfassende Langzeiterfahrungen mit über 35.000 akkumulierten äBh fehlen. Eine zweite Wiederaufarbeitung führt zu extrem hohen scrap rates, so dass dies z. Z. noch ein begrenzendes Kriterium zu sein scheint. Aus den Unterlagen lässt sich weiterhin der Schluss ziehen, dass auch bei der Wiederaufarbeitung von relativ neuen Sätzen (<10.000 äBh) lineare Anzeigen ausgeschliffen werden, so dass hier schon ein Wanddickenverlust eintritt, der eine nochmalige Wiederaufarbeitung nach den derzeitigen Reparaturgrenzwerten nicht zulässt. Seitens des Herstellers wird deshalb angestrebt, sowohl die Reparaturrichtlinien toleranter (weniger konservativ) zu machen, als auch in Zukunft rekonturierte Schaufeln einzusetzen, bei denen die ursprüngliche Wanddicke durch Hartlöten wieder hergestellt wird.

Die im einzelnen gemachten Feststellungen lassen sich folgendermaßen kurz zusammenfassen:

- Standzeiten von 20.000 äBh sind die derzeitige Obergrenze für die Leitschaufeln der Stufe 1. Bei längeren Intervallen zwischen zwei Revisionen ist bisher immer zumindest der teilweise Tausch notwendig geworden. Allerdings zeigen die aktuellen äBh der derzeit in Betrieb befindlichen TLe1, dass Intervalle von bis zu 25.000 äBh ohne Tausch realistisch erscheinen. Dies wird auch von den Betreibern auf eine neue Beschichtung sowie die an der Kühlluftversorgung durchgeführten Maßnahmen zurückgeführt.

- Visuell erfassbarer Hauptschädigungsgrund ist die Oxidation. Bei der Auswertung der für die Aussonderung verantwortlichen Befunde zeigt sich jedoch, dass lineare Anzeigen fast eine ebenso große Bedeutung haben. Im Gegensatz zu Oxidationsbefunden ist es allerdings bei linearen Anzeigen kaum möglich, wirklich eindeutige zeitliche bzw. positionsabhängige Tendenzen zu erkennen.

- Der Beschichtungsverbrauch durch die erwähnten technischen Maßnahmen lässt für die jetzigen Schaufeln im Durchschnitt eine scrap rate von 30-40% realistisch erscheinen. Jedoch ist zu erwarten, dass andere Faktoren als die Oxidationsbeständigkeit der Beschichtung zunehmende Bedeutung gewinnen werden. Insbesondere bei wiederaufgearbeiteten Schaufeln sind lineare Anzeigen am Grundmaterial das begrenzende Kriterium.

- Die Befundungsmöglichkeiten, sowohl der neuen Beschichtung, als auch in Hinsicht auf lineare Anzeigen, sind sehr eingeschränkt.

- Risiken bestehen nach wie vor durch Verschmutzung der Kühlluft bzw. durch Mängel an der Beschichtung. Beide Ursachen führen kurzfristig zu erheblichen Schäden und können nur durch regelmäßige Inspektionen entdeckt werden, so dass auch bei der zustandsorientierten Instandhaltung regelmäßige Kontrollen über die gesamte Betriebszeit notwendig sind.

- Es gab bisher keine Wiederverwendung von 2-mal wiederaufgearbeiteter Schaufeln, was insbesondere auf Wanddickenverluste durch Reparaturmaßnahmen bei der Wiederaufarbeitung zu erklären ist. Damit liegen auch keine Erfahrungen mit dem Schaufelgrundmaterial für Betriebszeiten über 35.000 äBh vor.

Abschließend kann gesagt werden, dass die obige Auswertung zwar einige wichtige Aussagen zugelassen hat, aber für eine bessere Quantifizierung eine weitere kontinuierliche Erfassung und Aufbereitung der relevanten Informationen notwendig ist, die auch mit den beteiligten Partner in Planung ist.

5.2.5 Grundlegende Kostenverläufe pro Revisionsintervall

Die folgenden Berechnungen wurden durchgeführt, um einen Anhaltspunkt für die ungefähren Kostenverläufe pro Revision in Abhängigkeit vom Intervall zwischen zwei Revisionen sowie für die Lage und Form des Minimums der spezifischen Instandhaltungskosten in DM/äBh zu haben. Da bei dem verwendeten Optimierungsansatz die Betriebszeit zwischen zwei Revisionen als freie Variable verwendet wurde, sollte zuvor untersucht werden, wie die generelle Abhängigkeit der spezifischen Instandhaltungskosten von den Revisionsintervallen ist. Daraus sollten Richtwerte für die konkrete Planung der Instandhaltungsstrategien, d.h. für die zu berechnenden und miteinander zu vergleichenden Alternativen, die als VM1 bis VM3 bezeichnet wurden, abgeleitet werden.

Werden die Verläufe auf mehrere Revisionsintervalle ausgedehnt, so müssten sowohl die unterschiedlichen Lebensdauern der Grundwerkstoffe der Reihen 1 bis 4 als auch die in Anlage 15 dargestellten Optionen für die Wiederaufarbeitung bzw. den Tausch von Schaufeln mit einbezogen werden. Das würde zu recht kompliziert aufgebauten Verläufen führen, die deshalb besser anhand konkreter Planungen durchgerechnet werden sollen.

Randbedingungen der Verläufe:

- Alle Schaufelsätze sind zu Beginn neu und sollen bei der Revision wiederaufgearbeitet werden.
- Die Revisionskosten (ohne Turbinenbeschaufelung) sind fest, d.h. unabhängig von der Betriebszeit. Es handelt sich um den Arbeitsumfang einer Revision nach 25.000 äBh.
- Für die Schaufelreihen TLe4 und TLa4 fallen keine Revisionskosten an.

Für die Berechnung der grundlegende Verläufe der spezifischen und der absoluten Revisionskosten sowie der entsprechenden Anteile der Turbinenbeschaufelung werden die prozentualen scrap rates benötigt.

Als mögliche Zukunftszenarien F_i wurden anhand der ausgewerteten Lebensdauerdaten und Befunde der DREWAG und des AK „Gasturbine“ Abschätzungen über Werte in Bezug auf den wahrscheinlichsten Fall (*most probable case*; MP), den optimistischen (*best case*; BC) bzw. den pessimistischen Fall (*worst case*; WC) getroffen. Die Wahl der jeweiligen Werte basiert zwar auf den ausgewerteten, verfügbaren Informationen über das Auftreten und die Ursachen von Schädigungen, dennoch sind es Abschätzungen, bei denen sich erst im Laufe der nächsten Jahre herausstellen wird, ob die realen Bedingungen ausreichend berücksichtigt wurden. Deshalb wurde beim Optimierungsmodell das Laplace-Kriterium verwendet, d.h. alle drei Fälle sind gleich wahrscheinlich, was eine sehr starke Vereinfachung darstellt. Allerdings wird durch die Einbeziehung von worst- und best-Szenarien auch das wirtschaftliche Unsicherheitsband erfasst, in dem sich die Planungen bewegen.

In Tabelle 12 werden die entsprechenden Werte für die scrap rates bei einer Wiederaufarbeitung nach 5, 10, 15, 20, 25, 30 und 35 Tsd. äBh zusammengefasst. Zwar liegen jenseits der 25.000 äBh bisher keine Erfahrungen vor. Trotzdem sollte auch abgeschätzt und bewertet werden, welchen Effekt derart verlängerte Revisionsintervalle in Zukunft auf die spezifischen Instandhaltungskosten haben.

Tabelle 12 scrap rates

	TLe1			TLe2			TLe3			TLa1			TLa2			TLa3		
Tsd. äBh	MP	BC	WC	MP	BC	WC	MP	BC	WC	MP	BC	WC	MP	BC	WC	MP	BC	WC
5	5	0	10	0	0	2	0	0	2	0	0	10	0	0	2	0	0	1
10	7	2	15	1	0	3	1	0	3	2	0	15	1	0	3	0	0	2
15	10	5	20	2	0	5	2	0	5	5	2	20	2	0	5	1	0	3
20	25	18	35	3	0	10	3	0	10	18	10	35	3	0	10	2	0	5
25	40	30	60	5	2	15	5	2	15	30	20	60	5	2	15	3	1	8
30	58	45	80	10	5	25	10	5	25	45	30	80	10	5	25	5	2	13
35	80	65	100	20	10	40	20	10	40	65	50	100	20	10	40	8	4	20

Die Werte werden in den folgenden Abschnitten in komprimierter Form pro Reihe kommentiert und die verwendeten Annahmen erläutert, um die Wahl nachvollziehbar zu machen und in Zukunft entsprechend zu korrigieren. Dabei werden äBh-Bereiche diskutiert, in welche die wichtigsten Aussagen aus der Auswertung als Rahmenbedinungen verwendet werden; die restlichen Werte wurden entsprechend approximiert.

Erläuterungen zu den Werten der TLe1 (Bild 51)

Die Werte wurden so gewählt, dass sie im Bereich bis 10.000 äBh relativ wenig, anschließend aber überproportional steigen. Dies ergibt sich aus der Überlegung, dass die beobachteten linearen Anzeigen hauptsächlich mit ungünstigen Wärmespannungs- und Dehnungsverhältnissen bzw. Einbaubedingungen erklärt werden können, die schon relativ zeitig zu Anrissen führen, mit einem weiteren, aber langsameren Risswachstum. Diese Annahme kann man allerdings anhand der wenig umfassenden Unterlagen und Informationen zu den linearen Anzeigen als Vermutung bezeichnen, die in weiterer Zukunft näher zu untersuchen ist. Auf den Schädigungsmechanismus der Oxidation soll der spätere, steilere Anstieg zurückgeführt werden. Nach den bisherigen Erkenntnissen über die Verarmung, ist dies einesteils ein kontinuierlicher Prozess, dessen Geschwindigkeit im Wesentlichen von der Temperatur an und in der Schaufel abhängig ist. Zum anderen hat der Grundwerkstoff nur eine sehr begrenzte Notlaufeigenschaft, d.h. die Fähigkeit selbst eine Oxidationsschutzschicht zu bilden, ohne dass der Werkstoff strukturell durch Phasenänderung und Oxidationsangriff geschädigt wird. Ist auch dieses Schutzpotential verbraucht, steigt der Anteil nicht wiederaufarbeitbarer Schaufeln stark an.

***5-10.000 äBh**:* Anhaltspunkt waren die Werte der Schaufelsätze, die nur zwischen einem ungeplanten TLe1-Tausch und der nächsten Revision in Betrieb waren (7-12 % scrap rate).

15.000 äBh: Diese Werte leiten sich vor allem aus den letzten Inspektionsergebnissen ab, die einen sehr guten Oberflächenzustand der Schaufeln in diesem äBh-Bereich zeigten. Beim pessimistischen Fall wird von Werten ausgegangen, wie sie mit der alten Beschichtung auftraten, obwohl die Maschinen derzeit mehrheitlich mit der neuen ausgestattet sind.

20-25.000 äBh: Auch hier wurde versucht, sowohl die Wiederaufarbeitungsergebnisse der letzten Jahre als auch den Wechsel der Beschichtung und die anderen konstruktiven Veränderungen zu berücksichtigen.

30-35.000 äBh: Hier ist das Konzept der Einwegschaufeln der Ausgangspunkt für die Überlegungen. Berücksichtigt man weiterhin die ungleiche Verteilung der Schädigungen über den Umfang, dann wird zwar die Mehrzahl der Schaufeln dann Schrott sein, aber Schaufeln in günstigen Positionen sind durchaus noch wiederaufarbeitbar.

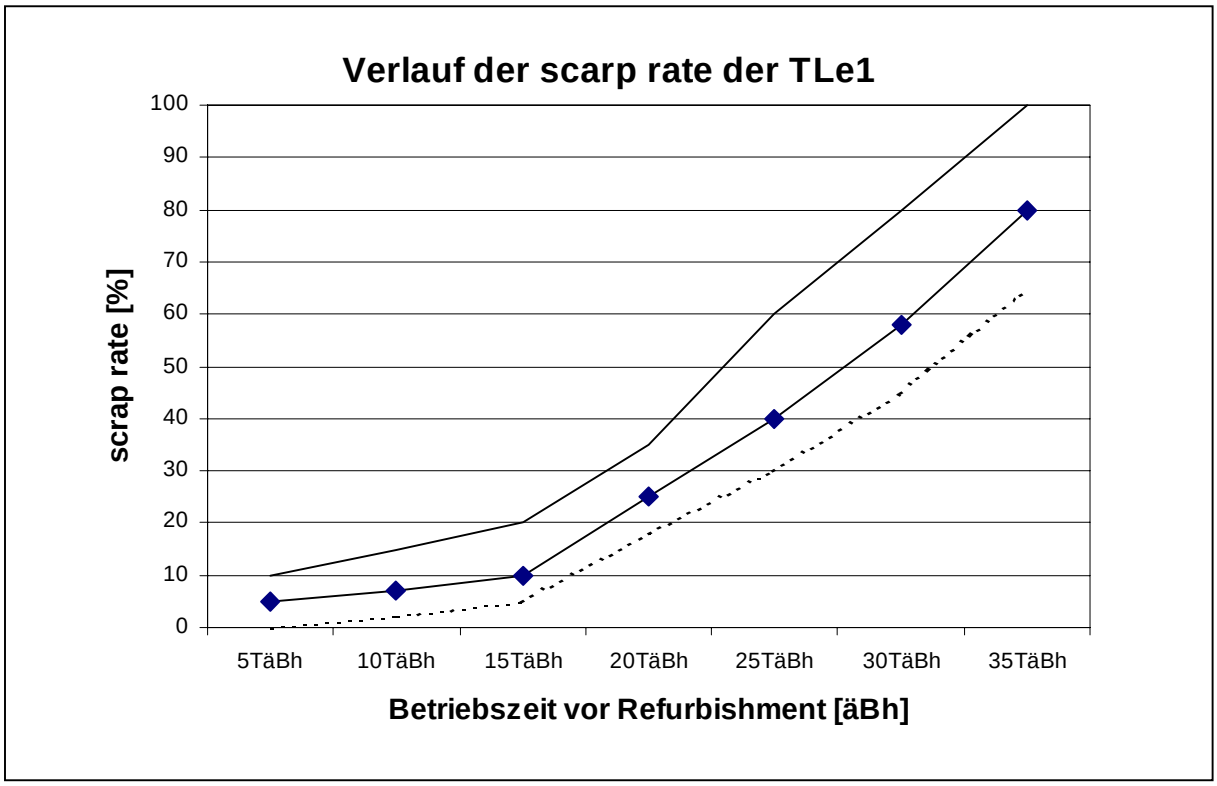


Bild 51 Verlauf und Schwankungsbreite der scrap rate für die TLe1

Erläuterungen zu den Werten der Leitreihen 2 und 3

Für diese Reihen konnten keine eindeutigen Tendenzen erkannt oder nachgewiesen werden. Dies liegt jedoch wesentlich daran, dass der Schwerpunkt bei der Informationsbeschaffung bei der Leitreihe 1 lag, woran sich auch die Zuarbeiten der Mitglieder des Arbeitskreises orientiert haben. Deshalb wird auch hier von einem überproportionalen Anstieg ab 15.000 äBh ausgegangen. Lineare Anzeigen tauchten als Ausschussgrund nicht in den Unterlagen auf, so dass hier am Anfang mit sehr geringen scrap rates gerechnet wird. Diese haben jedoch ohnehin nur wenig praktische Relevanz, da im normalen Betrieb in dieser Zeit keine Wiederaufarbeitung durchgeführt wird.

20-25.000 äBh: Als Schwankungsbreite wurden 3 bis 15% angenommen. Der Extremwert von 25 % wurde bei 30.000 äBh dem pessimistischen Fall zugeordnet.

Erläuterungen zu den Werten der Laufreihe 1

Wie schon erläutert, gibt es zur Wiederaufarbeitung von diesen Schaufeln sowohl des alten als auch des neuen Typs keine Informationen, aus denen sich etwas Genaueres ableiten ließe. Da jedoch die bisherigen Inspektionsbefunde sehr gute Ergebnisse zeigten, soll folgendermaßen verfahren werden: Die BC-Annahmen der TLe1 werden auf die MP-Werte der TLa1 übertragen; die WC-Annahmen für TLe1 und TLa1 sollen identisch sein.

Erläuterungen zu den Werten der Laufreihen 2 und 3

Für die Laufschaufeln gilt Vergleichbares wie für die Leitschaufeln dieser Reihen. Für die TLa2 wurden deshalb die Werte der Leitschaufeln übernommen. Die TLa3 zeigte jedoch in den vorliegenden Fällen geringere scrap rates, so dass entsprechend niedrige Werte angesetzt, aber von ähnlichen Tendenzen ausgegangen wurde.

Der Nachbearbeitungsanteil stellt den prozentualen Teil der Schaufeln dar, die zwar wiederaufarbeitbar sind (100% - scrap rate), aber repariert werden müssen. Dafür fallen extra Kosten an, die zwar im Verhältnis gesehen gering sind, aber trotzdem berücksichtigt werden sollten. Es stehen allerdings nur wenige Unterlagen zur Verfügung, aus denen sich ableiten läßt, wieviele Schaufeln welcher Reihe mechanisch bearbeitet werden mussten bzw. reparaturgeschweißt wurden (Tabelle 13).

Tabelle 13 Nachbearbeitung

Reihe	mechanische Bearbeitung	Schweissreparatur
TLe1	80 %	10 %
TLe2	70 %	10 %
TLe3	50 %	10 %
TLa1	50 %	10 %
TLa2	80 %	10 %
TLa3	50 %	10 %

Auch wegen des relativ geringen Kostenanteils werden der Nachbearbeitungsanteil nur sehr grob geschätzt bzw. nach äBh untergliedert (Tabelle 14).

Tabelle 14 Reparaturraten

	TLe1			TLe2			TLe3			TLa1			TLa2			TLa3		
TäBh	MP	BC	WC	MP	BC	WC	MP	BC	WC	MP	BC	WC	MP	BC	WC	MP	BC	WC
5 – 15	25	0	50	25	0	50	20	0	50	20	0	50	25	0	50	20	0	50
20 - 35	80	50	100	70	50	100	50	30	100	50	30	100	80	50	100	50	30	100

Auf die konkret verwendeten Kostenstellen je Revision der Turbinenbeschaufelung und für weitere Material- und Personalkosten kann aus den oben erläuterten Gründen nicht eingegangen werden. Deshalb handelt es sich auch bei den in Anlage 16 bzw. Anlage 17 dargestellten Ergebnissen für das Szenario *most probable case* um normiert dargestellte Größen.

Es ist zu erkennen, dass für Revisionen, die bei 30.000 äBh durchgeführt werden, die spezifischen Kosten für Ersatzteile und Wiederaufarbeitung am niedrigsten sind. Allerdings liegen sie für 25.000 äBh nur gering darüber, so dass Verlängerungen über 25.000 äBh zwar einen positiven Effekt haben, der aber keine drastischen Einsparungen erzielt. Weiterhin ist der gesamte Revisionszyklus der Maschine auf 25.000 äBh auszulegen. Würde man hier ein weitaus längeres Intervall anstreben, müsste für alle anderen relevanten Komponenten ebenfalls untersucht werden, mit welchen Konsequenzen zu rechnen ist bzw. ob dies überhaupt möglich ist. Aus der jetzigen Sicht und mit den bisherigen Erfahrungen mit dieser Problematik allein in Hinblick auf die Turbinenbeschaufelung erscheint dies für die mittelfristige Planung eher unwahrscheinlich. Allerdings würde es sich für die längerfristige Planung durchaus anbieten, eine systematische Begleitung vorausgesetzt, diese Option weiter zu untersuchen.

Bild 52 und Bild 53 zeigen die Gegenüberstellung der absoluten bzw. spezifischen Kosten für die drei betrachteten Szenarien.

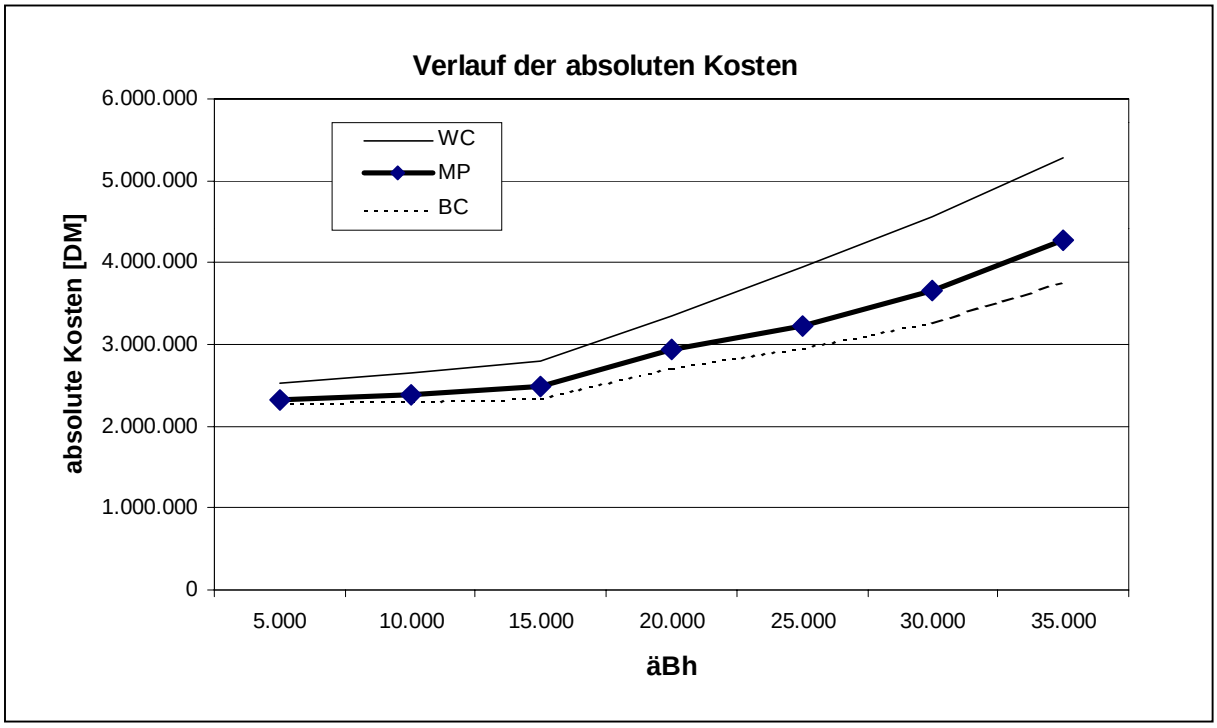


Bild 52 Gegenüberstellung der absoluten Kosten für *most probable case*, *best case* und *worst case*

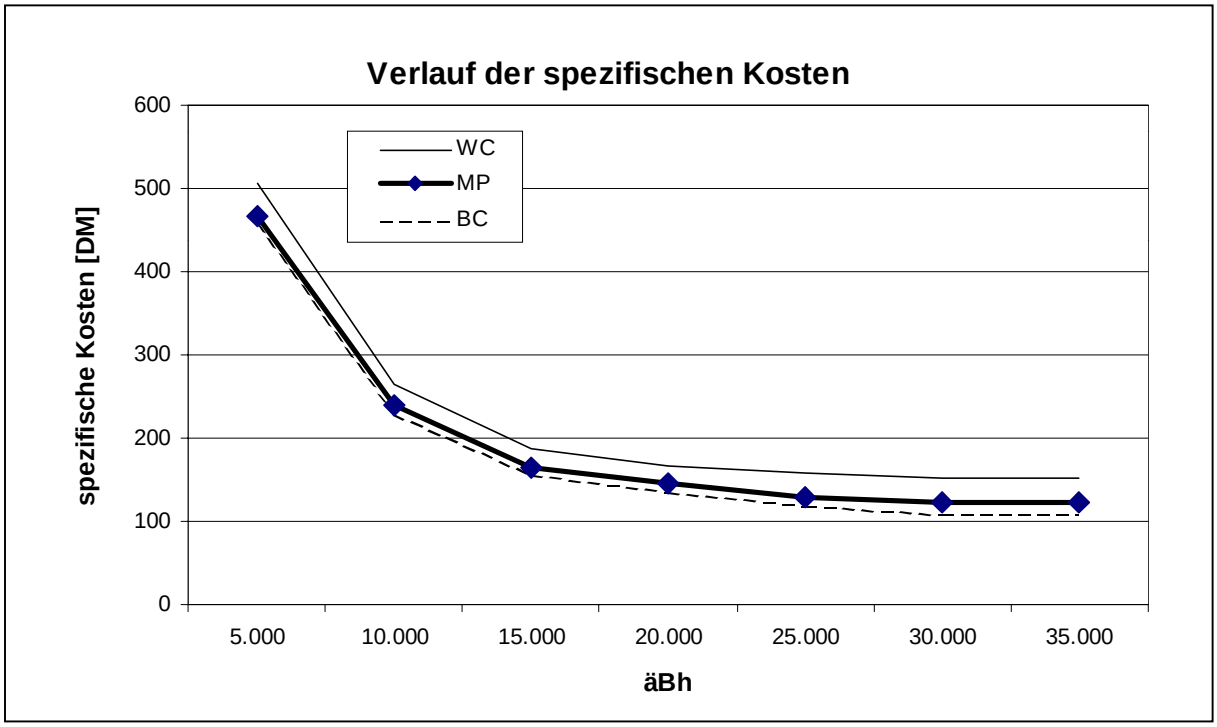


Bild 53 Gegenüberstellung der spezifischen Kosten für *most probable case*, *best case* und *worst case*

5.3 Randbedingungen der Instandhaltungsstrategien

5.3.1 Einsatzplanung

Aus den Unterlagen über die Stillstandszeiten-Planung und Gesprächen mit den Verantwortlichen für die Einsatzplanung wurden Richtwerte für einzelne Jahresabschnitte zusammengestellt, aus denen der monatliche Verlauf der Betriebsstunden, Starts und äBh bis 2005 berechnet wurde.

5.3.2 Schaufelbestand und –management

Eine weitere notwendige Vorarbeit war die Erfassung des aktuellen Bestands an eingebauten und gelagerten Schaufeln, sowie deren bisherige Betriebszeiten. Das erfordert einen genauen Überblick sowohl darüber, welche äBh die sich in den Maschinen befindlichen Schaufeln haben, als auch, was sich an weiteren Schaufeln im Lager des Betreibers bzw. des Wiederaufarbeiters befindet. Diese Informationen werden gleichfalls für eine spätere Optimierung der Lagerhaltung der kapital-intensiven Schaufeln benötigt, um einerseits die Höhe und Zeitdauer der dadurch gebundenen Mittel so gering wie möglich zu halten, andererseits aber trotzdem eine angemessene und rechtzeitige Vorhaltung sicher zu stellen.

Da die bisher verwendete Instandhaltungssoftware bzw. das Betriebsführungssystem dafür nicht geeignet ist, wurde für die Erfassung des Schaufelbestandes sowohl die Projektplanungs-Software Microsoft Project verwendet, als auch unter Microsoft Excel mit einigen Möglichkeiten gearbeitet.

Die bei den ausgebauten Schaufeln festgestellten Schädigungen bzw. die bis zu diesem Zeitpunkt akkumulierten äBh bestimmen, ob der Schaufelsatz aufgearbeitet oder evtl. unbearbeitet wieder eingebaut wird, bzw. wie hoch die scrap rate sein wird. Für die Zusammenstellung der zum Einbau vorgesehenen Schaufelsätze bestehen die in Anlage 15 erfassten Optionen, die aber in der Praxis bisher nur eingeschränkt genutzt werden konnten. Da in Zukunft sich die Anzahl der im Umlauf befindlichen Schaufeln weiter erhöhen wird, und infolge des Wettbewerbs auch die am Markt angebotenen Wiederaufarbeitungsangebote vielfältiger werden, wird die Optimierung des hier nur kurz dargestellten Schaufelmanagements eine zunehmende Bedeutung bekommen.

5.4 Optimierungsmodell, Umsetzung und Ergebnisse

Die Zielstellung und Durchführung der RAM-Optimierung wurde folgendermaßen definiert:

- Die zu bewertenden und zu vergleichenden Alternativen A_i sind die Varianten VM1 bis VM3.
- Als mögliche Zukunftsszenarien F_j werden der wahrscheinlichste (MC), schlechteste (WC) und optimistischste Fall (BC) betrachtet.
- Die Bewertungsgröße E beinhaltet die absoluten bzw. spezifischen Instandhaltungskosten.
- Die unabhängige, d.h. in diesem Sinne frei wählbare Variable X sind die äBh bei den Instandhaltungsmaßnahmen, woraus sich über die Einsatzplanung die Revisionstermine ergeben.

- Die abhängige, durch das Design vorgegebene Variable Y_d, ist der Schädigungsverlauf.

- Die design-unabhängigen Variablen Y_i sind insbesondere die Preise für Instandhaltungspersonal und Ersatzteile bzw. Reparaturen, sowie weitestgehend auch die Vorgaben der Einsatzplanung

Es wurden drei verschiedene, mittelfristige Instandhaltungsstrategien über den Zeitraum 2000-2005 entwickelt, die von der aktuell gültigen Einsatzplanung ausgehen. Die Varianten VM2 und VM3 unterscheiden sich nur darin, wie streng das Einweg-Prinzip anzuwenden ist. Damit ändert sich gegenüber VM2 nur das sog. Schaufelmanagement der Leit- und Laufschaufeln der Stufe 1 als Randbedingung der Alternative, da in der jetzt betrachteten Variante die Möglichkeit der Wiederaufarbeitung eingeräumt wird.

Auf der Grundlage der Einsatzplanung wurden die Lebensdauerdaten der Gasturbine für die geplanten Instandhaltungsmaßnahmen und der einzelnen Reihen für die jeweils nächste Revision berechnet. Im folgenden Schritt wurde eine detaillierte Planung des Schaufelbedarfs, der Wiederaufarbeitung und der jeweils anfallenden Kosten unter Verwendung der prognostizierten scrap rates für alle Turbinenreihen, sowie der Alternativen VM1 bis VM3 und unter den drei betrachteten Szenarien durchgeführt (Beispiel in Anlage 18). Die dabei berechneten (absoluten bzw. spezifischen) Instandhaltungskosten wurden in Bezug auf den niedrigsten Wert (BC, VM2 entspricht 100 %) normiert (Tabelle 15).

Tabelle 15 Instandhaltungskosten (normiert)

	MP (most probable case)	BC (best case)	WC (worst case)
VM1	153 %	140 %	167 %
VM2	107 %	100 %	107 %
VM3	113 %	113 %	127 %

5.5 Empfehlungen für weiterführende Untersuchungen

Aus den durchgeführten Auswertungen und Berechnungen wurden einige Empfehlungen für die zukünftige Instandhaltungsstrategie und weitere Maßnahmen abgeleitet, die jedoch hier nicht aufgeführt werden sollen, da sie ausschließlich für den auftraggebenden Betreiber gedacht sind. Da zum einen bisher nur das beschriebene Optimierungsmodell durchgerechnet wurde, und zum anderen durch die intensiven Voruntersuchungen eine relativ fundierte RAM-Wissensbasis zur Verfügung steht, bieten sich auf dieser Grundlage weitere, zielgerichtete Untersuchungen an.

In den bestehenden Vergleich der Alternativen VM1 bis VM3 können zunächst einmal neben den Instandhaltungskosten weitere Kriterien in die Betrachtung einbezogen werden, die sich aus der Zusammenfassung der Problemanalyse in Anlage 15 ergeben. In erster Linie sollte dabei das Risiko ungeplanter Stillstände bzw. eventueller Versicherungsprobleme bei verlängerten Revisionsintervallen beurteilt werden.

Zu Beginn des Projektes waren weiterhin auch die Betrachtung bei unterschiedlichen Einsatzplanungen sowie langfristiger Strategien geplant. Für die Betrachtung unter geänderten Einsatzplanungen sind allerdings im voraus entsprechende Wirtschaftlichkeitsbetrachtungen auf der Absatzseite erforderlich, d.h. vor allem Abschätzungen über die zukünftige Gestaltung des Absatzmarkts unter den Bedingungen der Liberalisierung, die relativ schwer

zu treffen sind. Auch eine sinnvolle Bewertung langfristiger Strategien ist nur im Rahmen von Betrachtungen machbar, welche die Gesamtstrategie des Kraftwerks und wahrscheinlich auch des Unternehmens insgesamt betreffen. Dies war zwar bisher nicht zu realisieren, sollte aber in Zukunft gegebenenfalls als Weiterführung von Interesse sein.

Wie sich aber ebenfalls aus der Problemanalyse ergeben hat, müssen neben den direkten[43] auch die indirekten[44] Instandhaltungskosten in die Wirtschaftlichkeitsbetrachtung einbezogen werden. Für diese Untersuchung bieten sich als Bewertungsgröße *E* die sog. Gebrauchskosten an. Der Gebrauchskostenansatz (Bild 55) wurde von *Beckmann* und *Marx* entwickelt und wird insbesondere für Wirtschaftlichkeitsbetrachtungen im Bereich der Kraftwerks-Instandhaltung verwendet (/12/ S.24ff.).

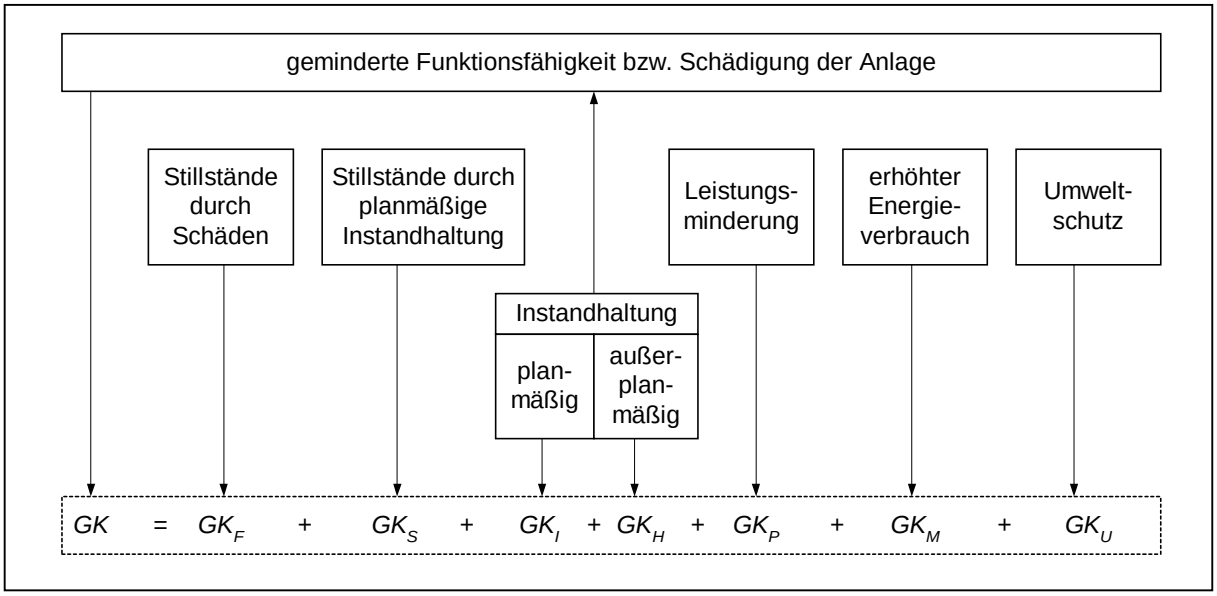


Bild 55 Erfassung der Schädigung als Gebrauchskosten; aus /55/

Die Gebrauchskosten werden aus den Gleichungen in Tabelle 16 bzw. den in Tabelle 17 zusammengefassten Größen berechnet, die sich den Variablen folgendermaßen zuordnen lassen.

- X: Planung von Zeitpunkt und Umfang der Instandhaltungsvorhaben; Kombination aus ausfall-, zeit- und zustandsorientiert instandzuhaltenden Baugruppen;
- Y_d: $M(t_p)$, T_S, T_F;
- Y_i: Sämtliche Kosten pro Einheit (MWh, Ersatzteile etc.) können zunächst als nicht direkt beeinflussbare Umgebungsbedingungen betrachtet werden, weiterhin auch φ_S, φ_F und Δw.

In Tabelle 17 ist ebenfalls angemerkt, wie die einzelnen Größen aus den in der vorliegenden Dissertation dargestellten Datenquellen und Analysemethoden bzw. bereits durchgeführten Voruntersuchungen ermittelt werden können.

Tabelle 16 Kostenbestandteile der Gebrauchskosten

[43] insb. Personal und Material

[44] insb. Stillstandskosten durch geplante Nichtverfügbarkeit

(4.1)	Schadensbedingte Stillstandskosten $GK_F = M(t_p) T_F \Delta P (\varphi_F p_D + k_F)$
(4.2)	Planmäßige Stillstandskosten $GK_S = T_S \Delta P (\varphi_S p_D + k_S)$
(4.3)	Planmäßige Instandhaltungskosten $GK_I = K_{ET} + K_P + K_{Service}$
(4.4)	Schadenskosten $GK_H = M(t_P) GK_{H^*}$
(4.5)	Leistungsminderung $GK_P = p_D \int_0^{t_P} \Delta P(t) dt$
(4.6)	Kosten durch erhöhten Material- und Energieverbrauch $GK_M = p_M \int_0^{t_P} \Delta w(t) dt$
(4.7)	Umweltschutzminderungen $GK_U = p_D \int_0^{t_P} \Delta P_U(t) dt$

Tabelle 17 Daten zur Ermittlung der Gebrauchskosten; nach /12/

Kategorie	**Bezeichung der Größe in GK-Berechnung**	**Ermittlung, Datenquellen bzw. Verweis auf Abschnitte in der Dissertation; sonstige Bemerkungen**
Zeit	t_P: Instandhaltungsperiode [h]	siehe Revisionsintervall im Optimierungsmodell
Kosten	p_D : Deckungsbeitrag [DM/MWh]	Differenz aus Erlös und variablen Kosten für eigenerzeugten und verkauften Strom.
	k_S : zusätzliche Kosten durch planmäßigen Leistungsausfall [DM/MWh]	Falls für die geplanten Stillstandszeiten nicht genügend redundante Leistung zur Verfügung steht, um bestehende Lieferverpflichtungen zu erfüllen, muss die fehlende Arbeit fremdbezogen werden. Bei entsprechender Vertragsgestaltung unter den jetzigen Marktbedingungen bestehen gute Chancen, dass die Zusatzkosten relativ gering bleiben.
	k_F : zusätzliche Kosten durch schadensbedingten Leistungsausfall [DM/MWh]	Da bei kurzfristig erforderlichem Fremdbezug die Lieferkonditionen i.A. schlechter als bei entsprechendem Vorlauf sind, gilt $k_F > k_S$. Allerdings ist zu beachten, dass davon zukünftig meist nur noch Sofortabschaltungen bzw. Abschaltungen innerhalb von 24 h betroffen sein werden, da ansonsten der Bezug von Ersatzkapaziäten über die im Aufbau befindlichen Strombörsen möglich sein sollte.
	K_{ET} : Ersatzteilkosten	siehe Schaufelmanagement in 5.3.2
	K_P : Personalkosten	Diese Kostenstellen wurden ebenfalls untersucht, werden aber aus Vertraulichkeitsgründen nicht in der Dissertation veröffentlicht.
	$K_{Service}$: Fremdleistungen	

Kosten	GK_{H^*} : Erwartungswert der Kosten zur Beseitigung der Havarie	siehe Bemerkungen zur Risikobetrachtung
	p_M : z.B. Brennstoffkosten	siehe Verwendung von Betriebsparametern als freie Variablen (in diesem Abschnitt)
RAM-Kennwerte	$M(t_p)$: mittlere Fehlerzahl in der Instandhaltungsperiode	ableitbar aus Fehlerrate λ bzw. *MTBF* (3.2)
	T_S: Stillstandszeit für planmäßige Instandhaltung	ableitbar aus Reparaturrate μ bzw. *MTTR* (3.2)
	T_F : Stillstandszeit für Schadensbeseitigung	Bei der Betrachtung der für die Durchführung identischer Instandhaltungsmaßnahmen erforderlichen Zeit wird von $T_F > T_S$ ausgegangen, da bei geplanten Stillständen notwendige Vorbereitungsarbeiten nicht oder nur zu geringen Verzögerungen führen, als bei ungeplanten.
Ergebnisse der Systemanalyse	$\Delta P(t)$: Zunahme der Leistungsminderung	siehe Erfassung von abgesenkter Leistung bei RAM-Kennwerten
	$\Delta P_U(t)$: Zunahme der Leistungsminderungen zur Einhaltung von Emissionswerten	siehe Erfassung von abgesenkter Leistung bei RAM-Kennwerten; NERC Ursachenschlüssel 9600-9690
	Δw : z.B. Zunahme des spezifischen Energieverbrauches	siehe Verwendung von Betriebsparametern als freie Variablen (in diesem Abschnitt)
	φ_S : Wirksamkeit des planmäßigen Leistungsausfalls	Ein Leistungsausfall schlägt sich nur dann monetär wieder, wenn für diese Leistung auf der Abnehmerseite Nachfrage besteht. Eine Erfassungsmöglichkeit ist in /12/ S.27f. erläutert.
	φ_F : Wirksamkeit des schadensbedingten Leistungsausfalls	Da bei einem schadensbedingten Leistungsausfall mindestens der Deckungsbeitrag der auf der Abnehmerseite nachgefragten Leistung anfällt, gilt $\varphi_F > 1$ bzw. $\varphi_F > \varphi_S$.

Eine weiterer wichtiger, gegebenenfalls zu untersuchender Ansatz ist die Verwendung von Betriebsparametern als freie Variablen. Ausgangspunkt der Überlegung ist, wie durch die Einstellung der für die Lebensdauer bestimmter Komponenten entscheidender Betriebsparameter die über einen längeren Zeitraum summierten Betriebs- und Instandhaltungskosten minimiert werden können. Dahinter steht die Erfahrung vieler Betreiber, dass die für hohe Wirkungsgrade erforderlichen Betriebsparameter (z.B. bei Gasturbinen die ISO- bzw. die realen Turbinen-Eintrittstemperaturen) oft in einem Bereich liegen, in dem die Lebensdauer der betroffenen Bauteile sehr sensibel auf Schwankungen reagieren. Daraus lässt sich ableiten, dass in einem bestimmten Bereich nahe der Auslegungswerte eine überproportionale Abhängigkeit der Lebensdauer, d.h. die Geschwindigkeit von Schädigungsprozessen (siehe 4.1.3), und somit die der direkten und indirekten Instandhaltungskosten. Auf der anderen Seite bedeutet die Senkung der entsprechenden Betriebsparameter auch einen geringeren

Wirkungsgrad, was zu höheren spezifischen Brennstoffkosten und über die geminderte Leistung ebenfalls zu einer geringeren Arbeitsverfügbarkeit der Anlage führt (Bild 56).

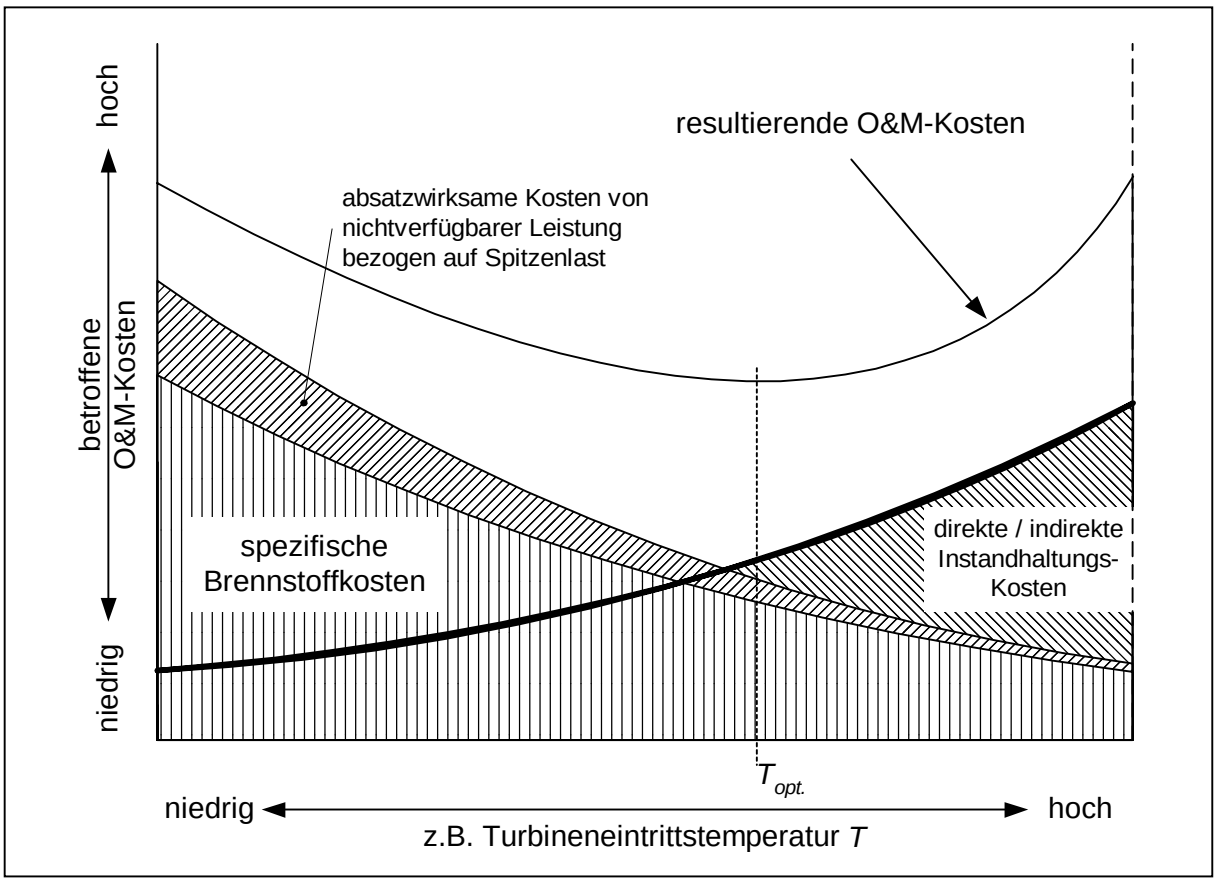


Bild 56 Schematischer Verlauf Betriebsparameter abhängiger O&M-Kosten

Die Bestandteile der RAM-Optimierung lassen sich für diesen Ansatz folgendermaßen beschreiben.

- Bewertungsgröße E : Gebrauchskosten GK; s.o.
- X : Einstellung des entscheidenden Betriebsparameters, z.B. Turbineneintrittstemperatur bzw. Temperatur nach Gasturbine;
- Y_d: (1) spezifische Brennstoffkosten, Arbeitsverfügbarkeit (bzw. Minderleistung) und (2) Lebensdauer (bzw. Standzeiten), mögliche Revisionsintervalle, Ausfallwahrscheinlichkeit;
- Y_i: (1) Absatzwirksamkeit der Minderleistung und (2) gegebenenfalls das Instandhaltungskonzept der nicht oder weniger vom gewählten Betriebsparameter abhängigen Komponenten;
- A_i: Alternativen in Bezug auf Änderung des Betriebsparameters X in bestimmten Schritten, z.B. Betrachtung von ständigem Spitzenlastbetrieb;
- F_j: Zukunftsszenarien in Form der Betrachtung von (1) unterschiedlichen (z.B. optimistischer und pessimistischer) Schädigungsverläufen sowie (2) von Brennstoffkosten und (3) den Absatzbedingungen, die die Kostenwirksamkeit der zur Verfügung stehenden Minderleistung bestimmen

Kapitel 6 Untersuchungen zum DWSF-HKW Cottbus

6.1 Einleitung

Für das DWSF-HKW Cottbus wurden von 1996 bis 1998 verschiedene Untersuchungen im Rahmen folgender Projekte durchgeführt:

RAM-Analyse des HKW Cottbus (10/96 bis 03/97): Im Rahmen der Planungen bzw. Vergabe des Neubaus des HKW Cottbus waren Abschätzungen zur Anlagenverfügbarkeit durchzuführen, die insbesondere einen Vergleich mit vertraglich fixierten Werten ermöglichen sollten. Der Hauptteil der Arbeiten wurde während eines Firmenpraktikums durchgeführt.

Entwicklung einer Instandhaltungsstrategie für das DWSF Kraftwerk Cottbus (10/97 bis 03/98): Als ein Ergebnis der RAM-Analyse wurde der Auftrag für eine Vorstudie mit mehreren Aufgabenkomplexen erteilt, der von Dipl.Ing. Braun gemeinsam mit dem Autor bearbeitet wurde, und dessen Projektleiter ebenfalls Prof. Bernstein war.

Wie ersichtlich liegen die Arbeiten schon einen geraumen Zeitraum zurück, deshalb beinhaltet die Vorstellung der Untersuchungen eine Betrachtung bzw. einige Vorschläge und Anregungen aus heutiger Sicht.

6.2 RAM-Analyse des HKW Cottbus

6.2.1 Zielstellung

Im Vorfeld (1995-96) der hier vorgestellten Untersuchungen wurden zur Verfügbarkeitsabschätzung von verschiedener Seite Aussagen getroffen:

- Auswertung der GU-Angebote; /56/
- Veröffentlichung von ABB Carbon und Southern Company; /57/
- Hersteller-interner Verfügbarkeitsreport; /58/

Von den beteiligten Seiten (Hersteller, zukünftiger Betreiber bzw. Auftraggeber) wurde erkannt, dass es aufgrund der neuartigen Technologie[45] noch Bedarf gibt, eine detailliertere Verfügbarkeitsprognose durchzuführen. Dazu sollten insbesondere die Betriebserfahrungen mit den bestehenden Anlagen mit dem Ziel ausgewertet werden, Rückschlüsse auf die Zuverlässigkeit und Instandhaltbarkeit der Anlage in Cottbus zu ziehen, die sich sowohl in ihrer konstruktiven Gestaltung wie auch in ihren Betriebsbedingungen unterscheiden. Diese Zielstellung beinhaltete neben der Identifikation der Fehlerarten, der Prognose der RAM-Werte für Komponenten und Baugruppen auch die Modellierung der Zuverlässigkeitsstruktur des HKW Cottbus (Bild 57).

[45] Es handelt sich hier um die erste kommerziell betriebene DWSF-Anlage in Deutschland.

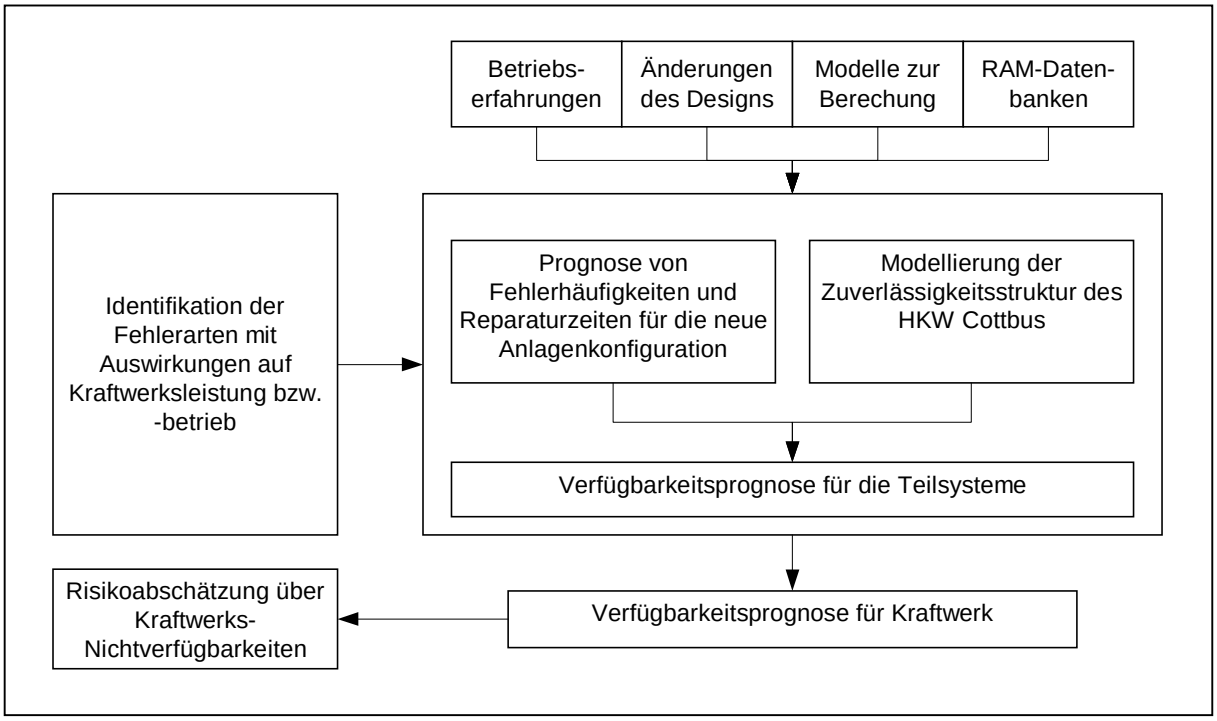


Bild 57 Lösungsweg für die Abschätzung der Kraftwerks-Verfügbarkeit

Da sich das Kraftwerksprojekt zum Zeitpunkt der beschriebenen Untersuchungen schon in der Phase der Fertigung bzw. Errichtung befand, waren eventuelle Änderungen der Anlagen-Konfiguration und Komponentenauswahl bzw. –gestaltung nicht das Untersuchungsziel. Neben der Verfügbarkeitsprognose war anhand der bei der Datenauswertung und Modellierung möglicherweise identifizierten Schwachstellen bzw. Unsicherheitsfaktoren eine Risikoabschätzung über Kraftwerks-Nichtverfügbarkeiten durchzuführen.

Bei der Aufgabenstellung wurde vom Hersteller davon ausgegangen, dass die für das neue Kraftwerk geplante Anlagengestaltung und die verwendeten Bauteilkonstruktionen das Resultat der mit dem Betrieb vorangegangener Anlagen gemachten Erfahrungen ist. Damit sollten die Nichtverfügbarkeitsgründe in der Neukonstruktion beseitigt bzw. ihre Ursachen so berücksichtigt worden sein, dass sowohl die Zuverlässigkeit entsprechend erhöht, als auch die erforderlichen Instandhaltungszeiten verringert werden. Damit sollte eine Verbesserung der Verfügbarkeit in der Größenordung von ca. 15-20% zwischen den älteren Anlagen und dem neuen HKW Cottbus zu realisieren und so die O&M-Vertragsbedingungen zu erfüllen sein.

Die Betrachtung von Einflussmöglichkeiten auf die Betriebsführung und Instandhaltung waren zunächst kein direkter Aufgabenbestandteil, die Auswertung der RAM-Datenquellen und die Risikoabschätzung sollten jedoch eine Grundlage für spätere Untersuchungen in dieser Hinsicht bilden können.

6.2.2 Anlagenbeschreibung

Bei der Druckwirbelschichtfeuerung (DWSF) handelt es sich um einen GuD-Prozess auf Kohlebasis, d.h. eine Kombination von Wirbelschicht (stationär oder zirkulierend) mit Gasturbinenanlage, in der die Wirbelschicht als Brennkammer der Gasturbine fungiert. Diese Technologie soll die Vorteile der Wirbelschicht und des GuD-Prozesses kombinieren, und so zu einer kompakten Bauweise, intensivem Stoff- und Wärmeübergang, Entstickung in der Wirbelschicht sowie hohem Wirkungs- bzw. Brennstoffausnutzungsgrad führen. Im Gegensatz

dazu stehen jedoch die Nachteile einer aufwendigen Anlagengestaltung, die zu Zuverlässigkeitsproblemen führt (insbesondere Verschleiß- und Ansatzprobleme durch Partikelströmung) und der durch die niedrige Eintrittstemperatur geringe Wirkungsgrad der Gasturbine.

Wesentliche Baugruppen der Anlage sind:

- Brennstoffaufbereitung und –eintrag: Kohle wird aufgemahlen angeliefert, mit Sorbent gemischt, über ein Behältersystem unter Druck gesetzt und mit Zellradschleusen bzw. dem Düsenboden in die Wirbelschicht eingetragen;
- Dampferzeuger und Wirbelbetthandhabung (Bettaschetransport, Bettmaterialrückführung sowie –vorwärmung);
- Rauchgasreinigung über ein zweistufiges Zyklonsystem;
- Gasturbogruppe (Zwei-Wellenanlage mit Hochdruck-Arbeitsturbine und Niederdruckturbine zum Antrieb des Niederdruck-Verdichters).

Weitere Details zu Anlagenaufbau, realisierten Anlagen und Betriebsverhalten sind in /59/ zusammengestellt. In Anlage 19 ist das Schaltbild und in Tabelle 18 sind die technischen Parameter des HKW Cottbus dargestellt.

Tabelle 18 Technische Parameter des HKW Cottbus

Leistungswerte: DWSF (mit geringer Wärmeauskopplung)	71 $MW_{el.}$ / 40 $MW_{th.}$
Leistungswerte: DWSF (mit hoher Wärmeauskopplung)	62 $MW_{el.}$ / 90 $MW_{th.}$
Leistungswerte: DWSF mit Spitzenlastkesseln	74 $MW_{el.}$ / 220 $MW_{th.}$
Wirkungsgrad (bei 15° C Umgebungstemperatur)	40 – 45 %
Frischdampfparameter	142 bar / 537° C
Kondensatordruck	0,07 bar
Brennstoffmassenstrom	11,3 kg/s
Sorbentmassenstrom	1,0 kg/s
Aschemassenstrom	1,8 kg/s
Emissionswerte: Schwefel	115 mg/Nm³ (bei 7 % O_2)
Emissionswerte: NO_X	115 mg/Nm³ (bei 7 % O_2)
Emissionswerte: Staub	20 mg/Nm³ (bei 7 % O_2)

6.2.3 Verfügbare RAM-Datenquellen und deren Auswertung

Die Betriebserfahrungen der schon von ABB Carbon in Betrieb genommenen Anlagen werden im Wesentlichen mit der firmeninternen RAM-Datenbank *DRID* erfasst und verwaltet (Bild 58). Von ABB Carbon wird damit regelmäßig eine Verfügbarkeitsanalyse für das Gesamt-Kraftwerk und die Teilsysteme (z.B. Gasturbine, Rauchgasreinigung, Brenstoffsystem etc.) durchgeführt und wöchentlich/jährlich RAM-Zeiten und –Kennwerte (z.B. *EAF*, *EFOR* etc.) berechnet und analysiert.

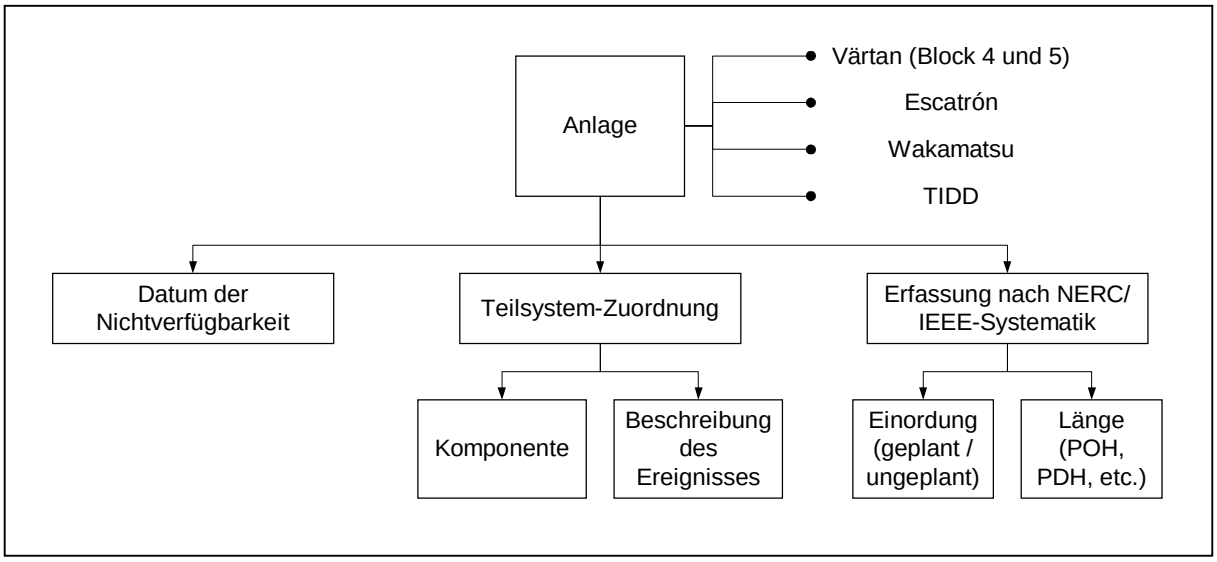


Bild 58 Inhalt der RAM-Datenbank DRID

Da eine Übertragung der auf diesen Betrachtungsebenen ermittelten RAM-Werte auf das HKW-Cottbus als ungenügend eingeschätzt wurde, waren die ebenfalls erfassten Ausfallinformationen zu Baugruppen und einzelnen Komponenten bzw. Fehlerarten (Datensätze mit Zeitpunkt und Nichtverfügbarkeitsdauer) in Anlehnung an die FMEA-Methode zu systematisieren und auszuwerten. Z.B. wurden die Fehlerraten λ (auf SH bezogen) und die *MTTR* in der bei ABB Carbon üblichen Aufteilung der Anlage für die Kraftwerke Escatrón und Värtan einzeln und insgesamt berechnet. In Anlage 20 ist ein nicht näher spezifiziertes Beispiel dafür angegeben, da konkrete Zuordnungen den Vertraulichkeitsvereinbarungen unterliegen.

Die ermittelten Werte stellten somit den Ist-Zustand dar. Die für die Nichtverfügbarkeiten im Wesentlichen verantwortlichen Komponenten bzw. Ausfallarten wurden daraufhin untersucht, ob es relevante Unterschiede in der Konstruktion bzw. den Betriebsbedingungen im HKW-Cottbus gibt, die bei der Übertragung der statistischen Ergebnisse einen Einfluss haben könnten. Zwar wurden diese Untersuchungen für einige Baugruppen zum Teil recht umfangreich durchgeführt (z.B. Zellradschleusen der Brennstoffzuführung), aber im Großen und Ganzen wurden die Ursachen für die aufgetretenen Fehler und die Auswirkungen von Änderungen in Cottbus nicht so umfassend analysiert, dass die gemachten Abschätzungen der RAM-Werte als hinreichend abgesichert bewertet werden können.

6.2.4 Modellierung der Zuverlässigkeitsstruktur

Als Methode für die Modellierung wurde der Fehlerbaum (3.4.2) ausgewählt. Anhand der konstruktiven Unterlagen und der ausgewerteten Ausfallinformationen wurde die gesamte Kraftwerksanlage modelliert, wobei als Hauptereignis der Fehlerbäume jeweils der Ausfall der einzelnen Teilsysteme verwendet wurde. Die Prognose der Fehlerrate des Gesamt-Kraftwerks erfolgte über eine mit dem Programm *FaultTree+* durchgeführten Fehlerbaummodellierung, die anschließend von *Dipl.Ing. Littemyr* der Firma ABB Carbon weitergeführt wurde, ebenso wie die letztliche Auswahl der verwendeten Zuverlässigkeitdaten und deren Auswertung, so dass daran seitens der TU Dresden keine Mitwirkung erfolgte. Dies führte dazu, dass die von ABB Carbon berechneten Ergebnisse (Tabelle 19) sich teilweise nicht völlig mit den Einschätzungen des Lehrstuhls Kraftwerkstechnik deckten.

Tabelle 19 Ergebnisse der Fehlerbaummodellierung

Kennwert	in Prozent	in Stunden pro Jahr
EAF für Kraftwerk	82,7 %	7244,5 h
POH für Kraftwerk	7,86 %	688,8 h (bzw. 4,1 Wochen)
EAF für PFBC-Teil	84,3 %	7384,7 h
EUF für PFBC-Teil[46], davon:	7,8 %	683,3 h
Gasturbinenanlage	2,0 %	179 h
Dampferzeuger	1,6 %	141 h
Entaschungssystem	2,1 %	181 h
andere Teilsysteme	2,1 %	184 h
EUF für Dampfturbogruppe und BoP	1,6 %	140 h

6.3 Entwicklung einer Instandhaltungsstrategie für das HKW Cottbus

6.3.1 Zielstellung

Im Zuge der späteren Diskussion der Ergebnisse des oben erläuterten Projektes wurden im September 1997 drei Themenschwerpunkte für die Durchführung einer Vorstudie zusammengefasst. Von der TU Dresden sollten Untersuchungen für das HKW Cottbus zu folgenden Punkten durchgeführt werden:

1. Entwurf einer zustandsorientierten Instandhaltungsstrategie;
2. Entwicklung einer Systematik zur Bewertung der realen Verfügbarkeit;
3. Durchführung eines RAM-Benchmarking, d.h. Vergleichs mit kohlegefeuerten Kraftwerken in Deutschland insb. in Hinsicht Verfügbarkeit und Instandhaltungskosten.

Die Ziele der Vorstudie waren in Bezug auf die ersten beiden Punkte jeweils Konzepte, die als Grundlage für eine spätere, detaillierte Ausarbeitung dienen sollten.

6.3.2 Entwurf einer zustandsorientierten Instandhaltungsstrategie

Im ersten Arbeitsschritt wurden die generellen Möglichkeiten eines Monitoring- & Diagnosekonzeptes (M&D) untersucht, mit dem die zustandsorientierte Instandhaltung der Nichtverfügbarkeits-Schwerpunkte des PFBC-Teils ermöglicht werden kann. Für die Teilsysteme wurden die bei der vorhergehenden RAM-Analyse identifizierten Problempunkte, sowie die erfassbaren Schädigungsprozesse und möglichen M&D-Einrichtungen analysiert. Dafür wurden sowohl die mit den bisherigen Anlagen verfügbaren Betriebserfahrungen, als auch die am Lehrstuhl Kraftwerkstechnik vorliegenden, mit anderen, fossil gefeuerten Kraftwerken gemachten Erfahrungen genutzt. Die Ergebnisse für die einzelnen Teilsystem wurden jeweils in einer Matrix zusammengefasst, die folgende Punkte beinhaltet:

- Komponente

[46] Es wurden offensichtlich keine extra für den PFBC-Teil geplanten Stillstände berücksichtigt (POH_{PFBC}=0), so dass sich hier im Grunde *EUF* = *UOF* ergibt.

- Fehler- bzw. Schädigungsart
- Zustandsparameter
- Meßwert und –bereich
- Erfassungsart
- Handlungen bei Grenzwert Unter- oder Überschreitung
- Meßstelle im HKW Cottbus (falls vorhanden)

Um einen Anhaltspunkt für die Ausfallmuster bestimmter Komponenten bzw. Teilsysteme zu erhalten, wurde ausgewertet, wieviele Wochen jeweils zwischen zwei Ausfällen der betrachteten Einheiten liegen. In Anlage 21 ist dazu ein Beispiel gegebenen, das wie üblich anonym gehalten ist.

Für die Strukturierung einer Wissens-Datenbank, mit der die für die Zustandsbewertung und Instandhaltungsplanung erforderlichen Informationen erfasst und ausgewertet werden sollten, wurden die in Anlage 22 dargestellten Vorschläge entwickelt. Im Abschlussbericht über die Voruntersuchungen wurden weitere Vorschläge für die Realisierung des in Bild 60 zusammengefassten Konzeptes unterbreitet.

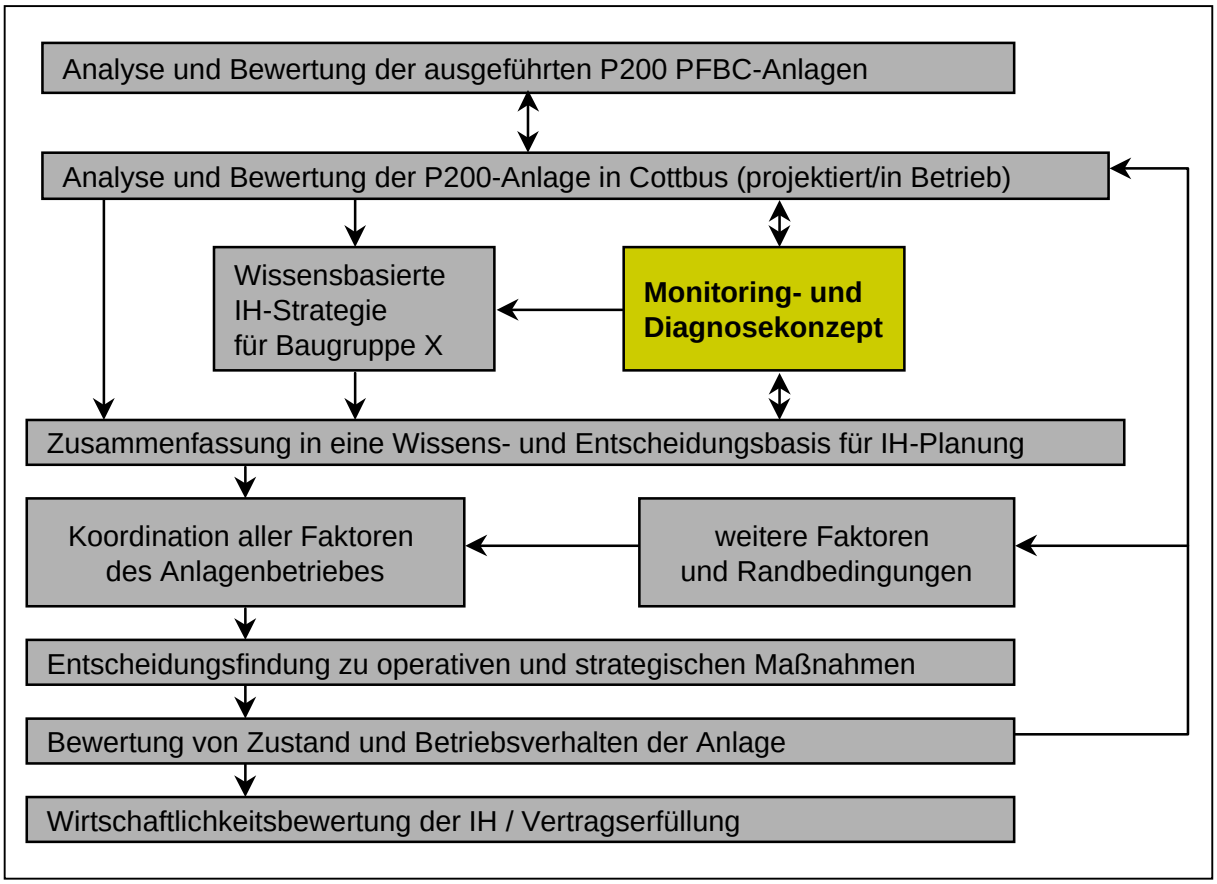


Bild 60 zustandsorientiertes Instandhaltungskonzept

6.3.3 Entwicklung einer Systematik zur Bewertung der realen Verfügbarkeit

Das zu entwickelnde Bewertungsmodell sollte folgende Punkte umfassen:

- Genaue Darlegung, auf welchen Definitionen die vertraglich fixierten Verfügbarkeitswerte basieren, und wie diese praktisch zu ermitteln sind.
- Charakterisierung von Nichtverfügbarkeitsstunden in Hinsicht auf ihre Ursachen, d.h. Komponentenausfall, externe Gründe, Mängel der Instandhaltungslogistik, Umweltauflagen etc..
- Zusammenstellung der für die Bewertung benötigten Daten.
- Entwurf von standardisierten Berichten, mit denen die relevanten Daten und die Ergebnisse regelmäßig zusammen zu fassen sind.

Da jedoch zu jenem Zeitpunkt noch einige vertragliche Gegebenheiten nicht endgültig geklärt waren, wurde dieser Aufgabenkomplex zunächst zurückgestellt, so dass bis jetzt seitens der TU Dresden auch keine weiteren Arbeiten durchgeführt worden sind.

6.3.4 RAM-Benchmarking

In der ursprünglichen Aufgabenstellung des RAM-Benchmarking sollten sowohl die Verfügbarkeitskennwerte als auch die durchschnittlichen Betriebs- und Instandhaltungkosten der in Deutschland in Betrieb befindlichen, mit Braunkohle bzw. Steinkohle gefeuerten Dampfkraftwerke verglichen werden.

Da sich jedoch bei den entsprechenden Recherchen herausstellte, dass die Ermittlung von belastbaren bzw. aussagekräftigen Kostenangaben nicht in der gedachten Art und Weise machbar war, wurde ausschließlich die Verfügbarkeitsauswertung durchgeführt. Als Datenbasis wurden die Nichtverfügbarkeitsdaten des VGB verwendet, die zwar teilweise auch ausländische Kraftwerk beinhalten, aber für Deutschland repräsentativ sind. Die Ergebnisse sind in Anlage 23 zusammengefasst.

6.4 Zusammenfassung und Empfehlungen für weiterführende Untersuchungen

Das zu Projektbeginn geplante Vorgehen bei der Verfügbarkeitsanalyse konnte in weiten Teilen nur ansatzweise realisiert werden. Vom jetzigen Standpunkt aus betrachtet, sind die Ursachen dafür in folgenden Punkten zu sehen:

- Das Ziel einer umfassenden, detaillierten und belastbaren Verfügbarkeitsprognose konnte nicht zufriedenstellend erreicht werden, da insbesondere Zuverlässigkeitsabschätzungen von Neukonstruktionen, für deren Vorgänger im Grunde nur sehr begrenzte, im Wesentlichen nur Prototyp-Erfahrungen vorliegen, auch für den erfahrenen Ingenieur eine schwierige Aufgabe darstellt, die mit erheblichen Unsicherheiten behaftet ist. Die sehr umfangreiche Literatur /60/ über die Methoden zur Bewertung von Zuverlässigkeitswachstum zeigt, dass nur eine frühzeitige, intensive und umfassende Einbeziehung von entsprechenden Experten in den Entwicklungsprozess und die Reifmachung, hier zu hinlänglich fundierten Aussagen führt.

- Die Untersuchungen fanden zu einem relativ späten Zeitpunkt innerhalb der Projektphase statt. Da damit auch die Möglichkeit eventueller konstruktiver Änderungen nicht mehr gegeben war, erfolgte vor allem ein kritischer Vergleich mit den vorgegebenen RAM-Zielen, um potentielle Schwachstellen und Risiken zu erkennen.

- Die Modellierung des Gesamt-Kraftwerks mit der Fehlerbaummethode hat sich als eher ungünstig erwiesen. Zum einen wurde dafür ein erheblicher Teil der zur Verfügung stehenden Zeit benötigt, zum anderen war die Aussagekraft relativ gering. Sinnvoller wäre sicherlich die eindeutige Orientierung auf die frühzeitig als Schwachpunkte identifizierten bzw. bereits bekannten Baugruppen gewesen. D.h. dass der Aufwand für die Auswertung der Ausfallursachen, der Änderungen für Cottbus und deren Fehlerbaum-Modellierung darauf zu konzentrieren gewesen wäre. Das hätte dazu beigetragen, die geringe Aussagesicherheit durch intensive Fehleranalyse mit den jeweiligen Experten so zu verbessern, dass nicht nur Punktschätzungen der RAM-Werte, sondern Prognosen zu den Eintrittswahrscheinlichkeiten bei verschiedenen Szenarien F_i möglich gewesen wären. Darauf aufbauend hätte auch eine brauchbare Risikoabschätzung durchgeführt werden können.

Auf Grundlage der Vorstudien wurde zwar eine Fortführung der Konzepte unter wissenschaftlicher Begleitung seitens der TU Dresden diskutiert, bisher jedoch noch nicht realisiert. Unter Berücksichtigung der erläuterten aktuellen Entwicklungen geht der Autor davon aus, dass die Wichtigkeit der Aufgabenstellungen als solche noch gestiegen ist. Als Gründe dafür können die beiden folgenden Punkte angeführt werden:

- Am Kraftwerksmarkt wird zunehmend das Konzept des modular aufgebauten Standard-Kraftwerks verfolgt, für das bei der Projektausschreibung mit relativ geringem Aufwand fundierte RAM-Garantien abgegeben werden können und ein flexibel an die Standort- bzw. Betreiberbedingungen angepasstes O&M-Konzept mit Verfügbarkeitszielen anbietbar ist. Dies erfordert jedoch sowohl ein aus der spezifischen Anlagenkonfiguration und den Betriebsbedingungen schnell erstellbares RAM-Modell, als auch ein für das konkrete Projekt optimierbares Instandhaltungs-Konzept. Für beide muss ein modular aufgebautes, einfach anpassbares Bezugsmodell existieren. Derzeit dazu geplante Arbeiten tragen beispielsweise die Bezeichung *probabilistische Wirtschaftlichkeitsbetrachtung*.

- Da das PFBC-HKW Cottbus das erste für den kommerziellen Betrieb bei ganzjähriger Fahrweise geplante und realisierte P200-Kraftwerk ist, liefert diese Anlage die erforderlichen Daten und Informationen, die für die oben erwähnten Modellierungen notwendig sind. Wie die bisher gemachten Erfahrungen zeigen, ist gerade eine frühzeitige und systematische Erfassung für die Optimierung neuer und bestehender Anlagen notwendig, sowohl um langfristig geringe O&M-Kosten als auch entsprechende Lebensdauern zu erreichen. Da die Anlage in Cottbus nicht zuletzt als Referenz für die angestrebte weitere Vermarktung dient, sollte die Ermittlung der spezifischen Instandhaltungskosten bzw. prognostizierten Lebenszykluskosten für die Erfordernisse des Benchmarking mit einer geeigneten Datenbank unterstützt werden.

In Bezug auf Empfehlungen für eine langfristige Verbesserung der Wirtschaftlichkeit mit Hilfe von RAM-Optimierungen kann auf die Vorschläge für die Gasturbine V64.3 (5.5) verwiesen werden, da es sich um Ansätze handelt, die sich direkt aus der allgemein für Kraftwerke entwickelten Methodik ableiten. Allerdings ist aufgrund des innovativen Charakters dieser Technologie besonders darauf zu achten, dass das zukünftige Verhalten (Szenarien F_i) mit größeren Unsicherheiten als üblich behaftet ist.

Kapitel 7 Erweiterung der Modellierung durch Unschärfeansatz

Die Ausgangsüberlegungen bei der Suche nach grundlegenden Weiterentwicklungsmöglichkeiten der Methodik der RAM-Optimierungen sind schematisch in Bild 61 dargestellt. Wie sich bei den theoretischen und praktischen Untersuchungen an zahlreichen Stellen deutlich zeigt, erfordert die Wiedergabe realer Gegebenheiten häufig stärker differenzierte Zustände, eine genauere Berechnung der Zeitabhängigkeit von RAM-Werten und die Berücksichtigung auch von veränderlichen Übergangsraten. Dies wird allerdings nur ansatzweise von den Verfahren erfüllt, die im Bereich RAM derzeit als Stand der Technik gelten, da allein für sie entsprechende Softwarelösungen breit verfügbar sind.

Allerdings gibt es auch Verfahren, die theoretisch weit besser die genannten Anforderungen erfüllen. Ihnen ist jedoch gemeinsam, dass dafür zwar recht umfangreiche theoretische Grundlagen existieren, ihre praktische Anwendung im allgemeinen und insbesondere für RAM-Optimierungen bisher nur gering bzw. in der Literatur überhaupt nicht auffindbar ist. Ursache dafür ist im Wesentlichen der grundsätzlich höhere mathematische Aufwand, der nur mit softwaregestützten Modellierungswerkzeugen beherrschbar ist, die jedoch nicht leicht verfügbar sind und die meist für andere Anwendungsgebiete entwickelt wurden.

Aus diesen Gründen können diese Verfahren im Rahmen der Dissertation nur in Hinblick auf ihre mögliche Integration bzw. Kompatibilität mit der Methodik der RAM-Optimierung für Kraftwerksanlagen diskutiert werden; der Autor kann in dieser Hinsicht nicht auf eigene Ergebnisse aus entsprechend durchgeführten Modellierungen verweisen.

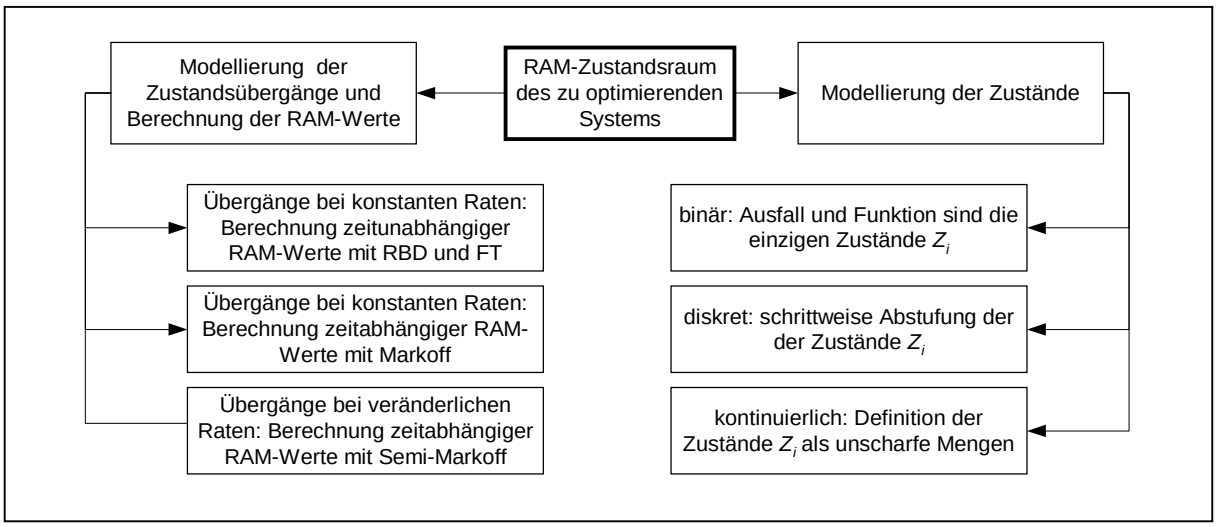


Bild 61 Grundlegende Weiterentwicklungsmöglichkeiten in Bezug auf die modellierbaren Zustände und Zustandsübergänge

Wie in Bild 62 angedeutet, ist die Erweiterung der modellierbaren Zustände ein Teil des Weges hin zu einer realistischeren Beschreibung von Funktion/Ausfall bzw. Zuverlässigkeit von Systemen.

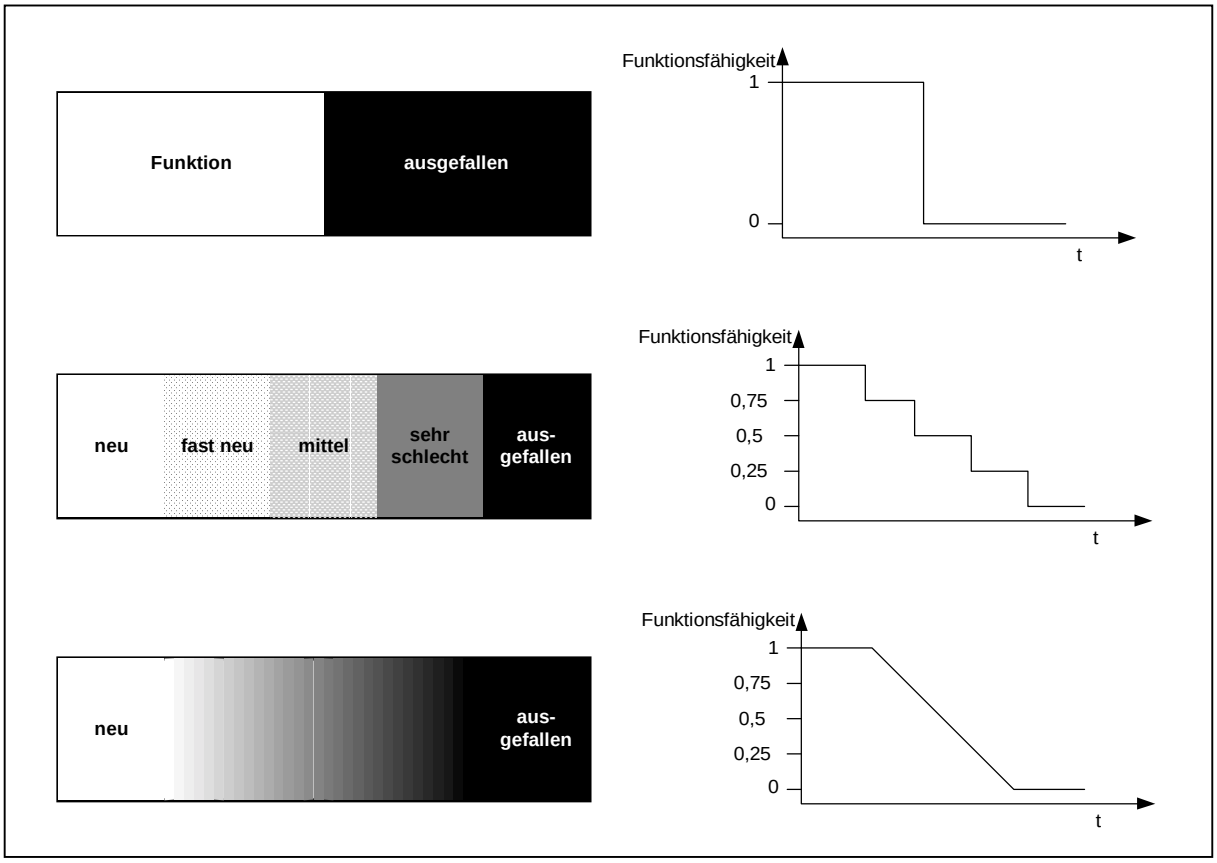


Bild 62 Übergang von binären, über diskrete hin zu kontinuierlichen Zuständen

Die Auseinandersetzung mit den Unsicherheiten bei der Zuverlässigkeitsanalyse realer Systeme[47] hat zu der Feststellung geführt, dass es zwei verschiedene Kategorien gibt, in die Unsicherheiten eingeteilt werden können. Die eine Kategorie (mit probabilistischem Charakter) bezieht sich auf die Unsicherheit des Eintritts eines bestimmten Ereignisses: der statistisch beschreibbaren Unsicherheit. Die andere Kategorie (mit possibilistischem Charakter) umfasst die Unsicherheit in Bezug auf das Ereignis selbst, d.h. wie genau sich ein Ereignis anhand von messbaren Werten überhaupt definieren lässt. So sind Ausfallkriterien von Elementen als Größen mit einem gewissen Graubereich anzusehen, da sie nur selten identisch mit dem sofortigen, totalen Verlust der Fähigkeit zur Funktionserfüllung sind.

> */35/ S.5: „Das Ausfallkriterium ist nicht immer natürlich gegeben, wie beispielsweise Bruch. Es kann auch durch einen Grenzwert oder Invalitätsgrad, wie z.B. die Mindestprofildicke eines Autoreifens festgelegt werden.“*

Anstelle der Über- bzw. Unterschreitung eines oberen oder unteren Grenzwertes, die mit Ausfall gleichgesetzt wird, ist bei der Verwendung unscharfer Mengen die Annäherung, d.h. Zugehörigkeit zu einem Grenzbereich zu betrachten.

> */42/ S. 359 f. „Die klassische Zuverlässigkeitsmethode erfordert eine scharfe Fehlerdefinition, die sich auf einen bestimmten Messwert oder Parameter bezieht, der für den Analysten von Interesse ist. Deshalb bleibt die Unsicherheit bei Fehlern unberücksichtigt. ... Verallgemeinerung des derzeit verwendeten Ansatzes zur Zuverlässigkeitsbewertung, in dem Fehler als unscharfe Ereignisse betrachtet werden.“*

---

[47] /44/: Physikalische Zufälligkeit; Statistische Unsicherheit; Modellierungs-Unsicherheit; undeutlich definierte Parameter, Messwerte und Beziehungen; Umfang der Abweichungen zwischen Modell & realem System; Widersprüche und Verwirrung in Informationen; menschliche und organisatorische Fehler

Für die Rechnung mit unscharfen Mengen[48] wurden mathematische Methoden entwickelt, deren Hauptanwendungsgebiete bisher hauptsächlich die Regelungstechnik (Fuzzy Logic) und zunehmend Expertensysteme (Fuzzy Expert Systems) sind. Die prinzipielle Anwendung für die Zustandsmodellierung bei RAM-Optimierungen zeigt schematisch Bild 63, wobei sich die Vorgehensweise an die der Fuzzy Logic anlehnt, da die in der Fuzzy-Inferenz verwendeten Regelmengen als Ansatz sehr gut auf die Modellierung der Zuverlässigkeitsstruktur von Systemen übertragbar sind.

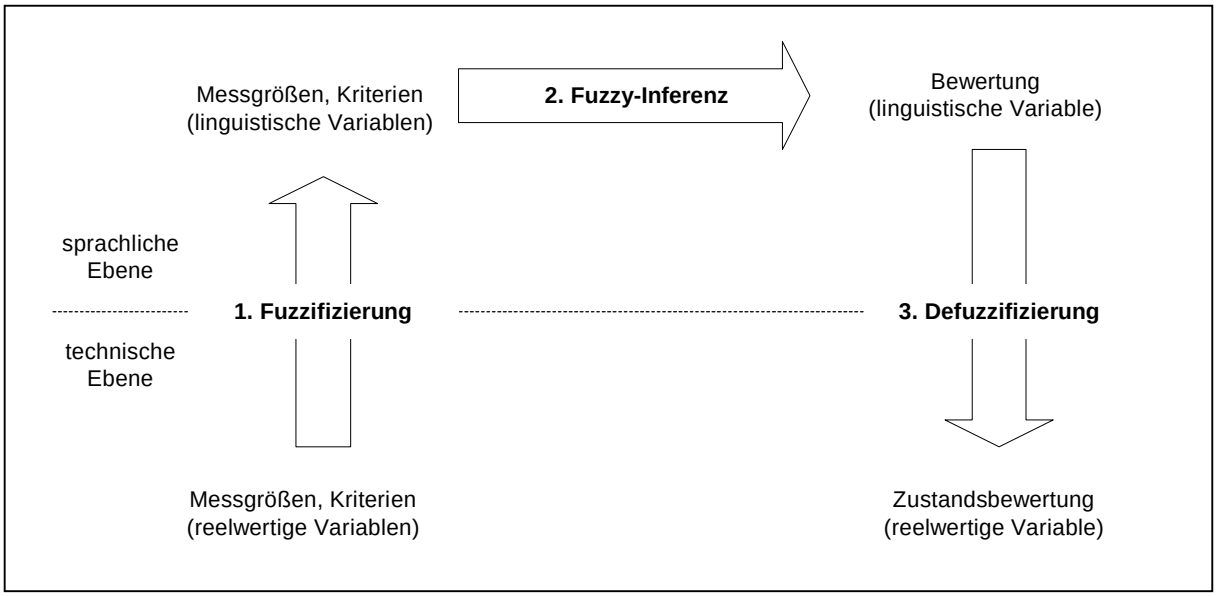


Bild 63 Prinzipieller Aufbau von Fuzzy-Systemen für Zustandsmodellierung; /61/

Aus diesem Grund soll kurz auf die drei wesentlichen Schritte bei der Bestimmung des Zustandes Z_i aus den Kriterien K_i bei Verwendung unscharfer Mengen eingegangen werden, während im Übrigen auf die entsprechende Literatur verwiesen wird /61/, /62/, /63/.

Schritt 1: Fuzzifizierung

Aus messbaren Kriterien K_i (z.B. Lastgradient beim Anfahren von Turbinen) bzw. durch von Experten geschätzten Werten (z.B. Risstiefe) werden linguistische Variablen gebildet. Der Wertebereich, den die jeweilige linguistische Variable umfasst, wird in mehrere Teilmengen (Intervalle, die jeweils einen charakteristischen Wert bzw. Mittelpunkt haben) unterteilt, die als Terme[49] bezeichnet werden. Die konkreten Werte einer linguistischen Variablen können mit unterschiedlicher Wichtung den Termen der Variablen über den Zugehörigkeitsgrad zugeordnet werden.

$$M = \left\{ \left(x, \mu_Z(x) \right); x \in U \right\} \qquad ; /64/ \tag{4.8}$$

M ... reellwertiger Messwert

U ... Wertebereich des Kriteriums K_i bzw. Messwertes M

x ... Term des Kriteriums K_i

μ_Z ... Zugehörigkeitsgrad des Messwerts zu Term x

---

[48] engl. fuzzy sets

[49] z.B. langsam-normal-schnell (Lastgradient) bzw. gering-messbar-intolerabel (Rißtiefe); die Bezeichnung der Terme hängt stark vom Kontext der linguistischen Variable ab, z.B. Lastgradient beim Anfahren von Turbinen, Term „normal“, charakteristische Werte: 3 K/s (Gasturbine) bzw. 4 K/min (Dampfturbine).

Schritt 2: Fuzzy-Inferenz

Nach der Fuzzifizierung der einzelnen Kriterien K_i und Ermittlung der Zugehörigkeitsgrade zu den jeweiligen Termen, sind Schlussfolgerungen hinsichtlich der gemeinsamen Bewertung (z.B. Bewertung der Restlebensdauer auf Grund der Risstiefe beim Anfahrregime der Turbine) zu ziehen. Die sog. Regelmenge, die das Wissen eines oder mehrerer Experten bzw. Personen mit entsprechender Erfahrung erfassen und ausdrücken soll, enthält eine Anzahl von „wenn-dann"-Regeln.

Schritt 3: Defuzzifikation

Aus der unscharfen Bewertung ist der Zustand in Form einer reellwertigen Variablen zu bestimmen (z.B. Restlebensdauer in Anzahl der noch zulässigen Anfahrvorgänge), die für die Modellierung bzw. Entscheidungsfindung verwendet werden kann. Für die Defuzzifikation wird meist das Flächenschwerpunkt-Verfahren (*bester Kompromiss*) oder Maximum-Verfahren (*plausibelste Lösung*) verwendet.

Zur Veranschaulichung der Anwendungsmöglichkeiten soll Bild 64 dienen. Insbesondere bei der Verwendung mehrerer Informationsquellen (Personen, Datenbanken, Befundberichte) besteht häufig das Problem, wie daraus eine Aussage zu Zustand oder RAM-Wert im konkret vorliegenden Fall zu treffen ist, wenn die Informationen nicht in sich konsistent sind.

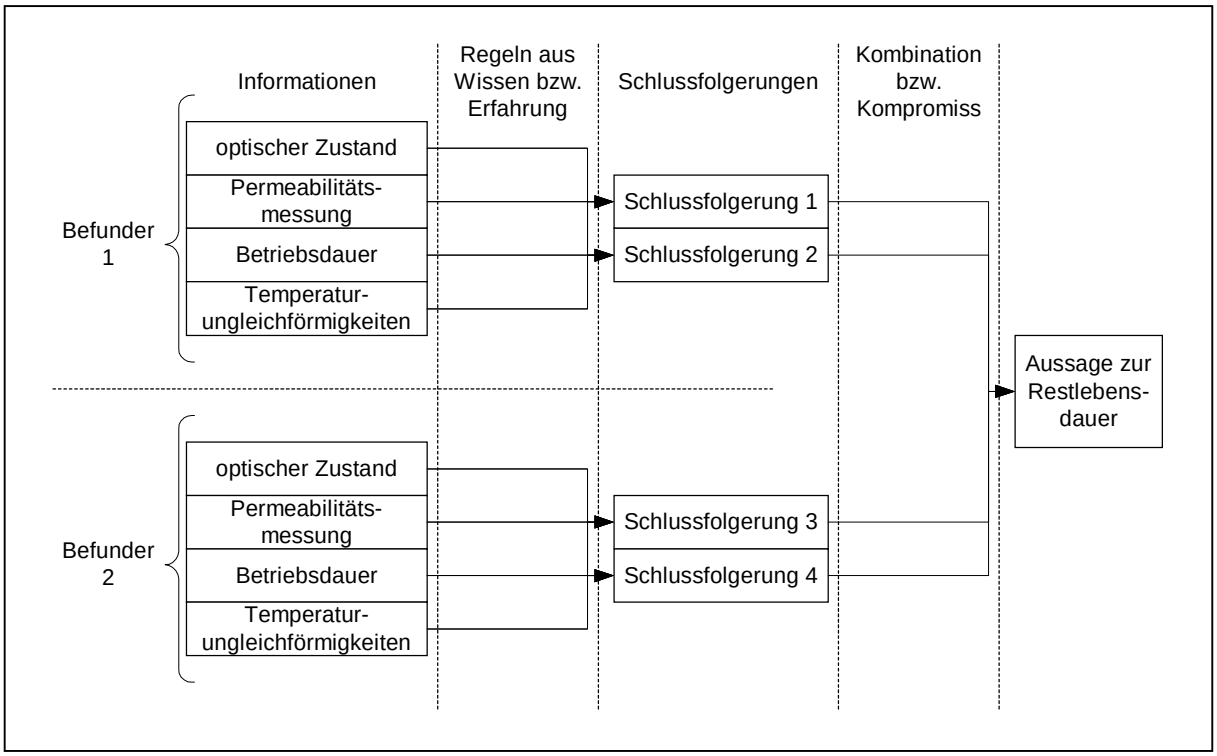


Bild 64 Ermittlung einer Aussage zur Restlebensdauer der Leitschaufelbeschichtung aus verschiedenen Informationen

Im Bereich der Kraftwerkstechnik wurden schon Arbeiten auf der Grundlage unscharfer Zustandsbegriffe durchgeführt, wie z.B. in /65/ oder /66/ dargelegt ist. Der Literatur lässt sich entnehmen, dass das klassische bzw. derzeit am meisten genutzte RAM-Anwendungsgebiet der Unschärfe die Entwicklung von Expertensystemen für die Fehleranalyse ist /67/, /68/. Weiterhin gibt es Forschungsarbeiten zu FMECAs, in der die Kritikalität mit linguistischen Variablen beschrieben und daraus das Risiko berechnet wird.

Bei der Anwendung von Fuzzy-Logic verfügt man bei der Modellierung über eine Vielzahl von Anpassungsmöglichkeiten, das reale Systemverhalten zu erfassen. Dazu gehören insbesondere das Vorgehen bei der Fuzzifikation über die Anzahl der Terme und die Art der Zugehörigkeitsfunktionen, Aufbau und Umfang der Regelmenge sowie die Ermittlung der reellen Variable aus der resultierenden Bewertung. Dieser Vorteil ist gleichzeitig ein entscheidender Nachteil bei der praktischen Umsetzung, da die Kontrolle und richtige Einstellung bzw. Kombination der zahlreiche Freiheitsgrade sehr aufwendig ist. Das macht entsprechende Software erforderlich und wirft das Problem der Datenanalyse auf. Aus diesen Gründen musste auch auf eine stärkere Einbeziehung des Fuzzy-Ansatzes in die Dissertation verzichtet werden.

Abschließend ist zum Thema Fuzzy zu erwähnen, dass es auch einzelne Arbeiten gibt /64/, in denen eine Zuverlässigkeitstheorie entwickelt wird, die sowohl probabilistischen als auch possibilistischen Charakter besitzt, und auf deren Grundlage Fehlerbaum und Zuverlässigkeitsblockdiagramme erstellt und berechnet werden. Da es sich jedoch um Einzellösungen handelt, die bisher noch keine wesentliche Verbreitung erfahren haben, sind sie auch nicht als Bestandteil einer Methodik geeignet, die Problemlösungen effizienter und transparenter machen soll.

Auf das Verfahren der Markoffschen Ketten und die Einbeziehung der Methodik zur RAM-Optimierung wurde schon in 3.4.3 eingegangen. Für die Modellierung mit veränderlichen Übergangsraten (Semi-Markoff bzw. nichthomogene Markoffketten) und die Verwendung speziell für Zuverlässigkeitsanalysen gibt es zwar einige Veröffentlichungen /69/, /70/, aber die dafür erforderlichen mathematischen Lösungs- bzw. Simulationsverfahren sind anspruchsvoll und aufwendig, so dass sie ohne entsprechende Software nicht zu bewältigen sind.

Da jedoch zunehmend bei der Modellierung komplexer elektronischer Systeme /71/, von Entscheidungsprozessen /72/ und Wirtschaftlichkeitsbetrachtungen /73/ das Markoff- bzw. Semi-Markoff-Verfahren angewendet wird, und damit auch Programme einfacher verfügbar werden, kann auf Sicht von einer Einbeziehung in RAM-Optimierungen ausgegangen werden.

Kapitel 8 Zusammenfassung

Wie innerhalb des einleitenden Kapitels erläutert wurde, soll die vorliegende Dissertation ein Betrag für den Komplex der systematischen Einbeziehung der technischen Faktoren Zuverlässigkeit, Verfügbarkeit und Instandhaltung in die Optimierung von kraftwerkstechnischen Anlagen unter den heutigen Bedingungen der Energieerzeugung liefern. Diese Betrachtungen sind insbesondere aufgrund der geänderten Randbedingungen erforderlich, da die erwähnten Veränderungen und sich zeigenden Tendenzen einen erheblichen Einfluß auf Betrieb und Instandhaltung der Kraftwerke, auf die gestellten Verfügbarkeitsanforderungen sowie auch auf das Entwicklungstempo bei der Einführung neuer Technologien bzw. Komponenten haben.

Eine umfassende Betrachtung des gesamten Komplexes übersteigt allein infolge der Vielzahl der Faktoren und relevanten Problemstellungen den möglichen Rahmen einer Dissertationsarbeit. Da ausserdem weiterhin Umgestaltungsprozesse stattfinden, deren vorrausichtliche Ergebnisse noch nicht klar erkennbar sind, erfolgte eine Eingrenzung der Zielstellung auf folgende Punkte:

- Entwicklung einer Methodik, die die systematische Einbeziehung von RAM-Faktoren in die Optimierung unterstützt, und dabei auf gängige Methoden der Aufbereitung und Auswertung von Zuverlässigkeitsdaten bzw. Ausfallinformationen sowie der Modellierung von Zuverlässigkeit und Verfügbarkeit aufbaut.
- Untersuchungen zur zustandsorientierten Instandhaltung von Kraftwerksanlagen, deren Hauptkomponenten durch neue bzw. fortschrittliche Technologien gekennzeichnet sind.

Bei der Bearbeitung dieser Zielstellung wurde von dem Ansatz ausgegangen, die Optimierung von Kraftwerken als zustandsorientierte Entscheidungsprobleme aufzufassen. Die Charakterisierung des Zustandes von Anlagen und ihrer Komponenten, und damit ihrer Funktionsfähigkeit, wurde anhand von RAM-Werten durchgeführt. Dabei wurden die technischen Einflüsse auf die Funktionsfähigkeit bei deren Auslegung, deren Minderung bzw. Verlust sowie ihrer Wiederherstellung analysiert und systematisiert. Ein Schwerpunkt dieser Untersuchungen war insbesondere die Erschließung und Aufbereitung der relevanten Daten und Informationen, um daraus Erkenntnisse für Möglichkeiten und Potentiale der Optimierung von Zuverlässigkeitsstruktur und Instandhaltung zu gewinnen.

Konkret bedeutete das die Untersuchung der technischen Gegebenheiten, d.h. der vorliegenden Schädigungsprozesse, die Verhältnisse zwischen Beanspruchung und Beanspruchbarkeit sowie die Planung der Instandhaltung in Bezug auf Zeitpunkt und Umfang. Die Entwicklung von theoretischen Grundlagen in Form der Kombination von Systemanalyse, Datenauswertung und Optimierungsmodell wurde parallel zu praktischen Untersuchungen an Kraftwerksanlagen in Cottbus und Dresden durchgeführt. Neben den technischen Aspekten spielten hierbei auch wirtschaftliche Faktoren eine Rolle. Die Ergebnisse, die sich aus der Lösung dieser Aufgaben ergeben haben, können in den nachstehenden Aussagen zusammengefaßt werden.

Obwohl der Umfang der Untersuchungen zur Gasturbine V64.3 und zum DWSF-HKW Cottbus recht unterschiedlich war, haben sich innerhalb beider Projekte ähnliche Probleme bei der Herangehensweise herausgestellt. Einerseits sind dabei die teilweise nicht genügend vorhandenen bzw. unzureichend abgesicherten technischen Erkenntnisse zu nennen, was auf einen Mangel an aussagekräftigen Daten und Informationen zurückzuführen ist. Andererseits gehören dazu die mittelfristig fest vorgegebenen konstruktiven, betrieblichen bzw. Instandhaltungs-Randbedingungen, so dass in erster Linie nur langfristig orientierte Empfehlungen für Verbesserungen der Verfügbarkeit und Instandhaltung geschaffen werden konnten.

Die praktische Umsetzung der in Bild 65 zusammengefaßten Methodik erfordert neben optimierbaren Faktoren der Zuverlässigkeit, Verfügbarkeit oder Instandhaltung vor allem eine technische Wissensbasis, welche die entsprechenden Informationen und Daten für die qualitative und quantitative Beschreibung der relevanten Schädigungsprozesse und Fehlerarten beinhalten muß. Wie insbesondere die an realen Anlagen durchgeführten Untersuchungen gezeigt haben, hat die Erstellung dieser Wissensbasis vorrangige Bedeutung; einerseits weil die Sammlung, Aufbereitung und Auswertung der notwendigen Daten und Informationen in Praxis das Hauptproblem darstellen und andererseits weil die Qualität der Ergebnisse aller Optimierungsanstrengungen auf dieser zur Verfügung stehenden Grundlage beruhen.

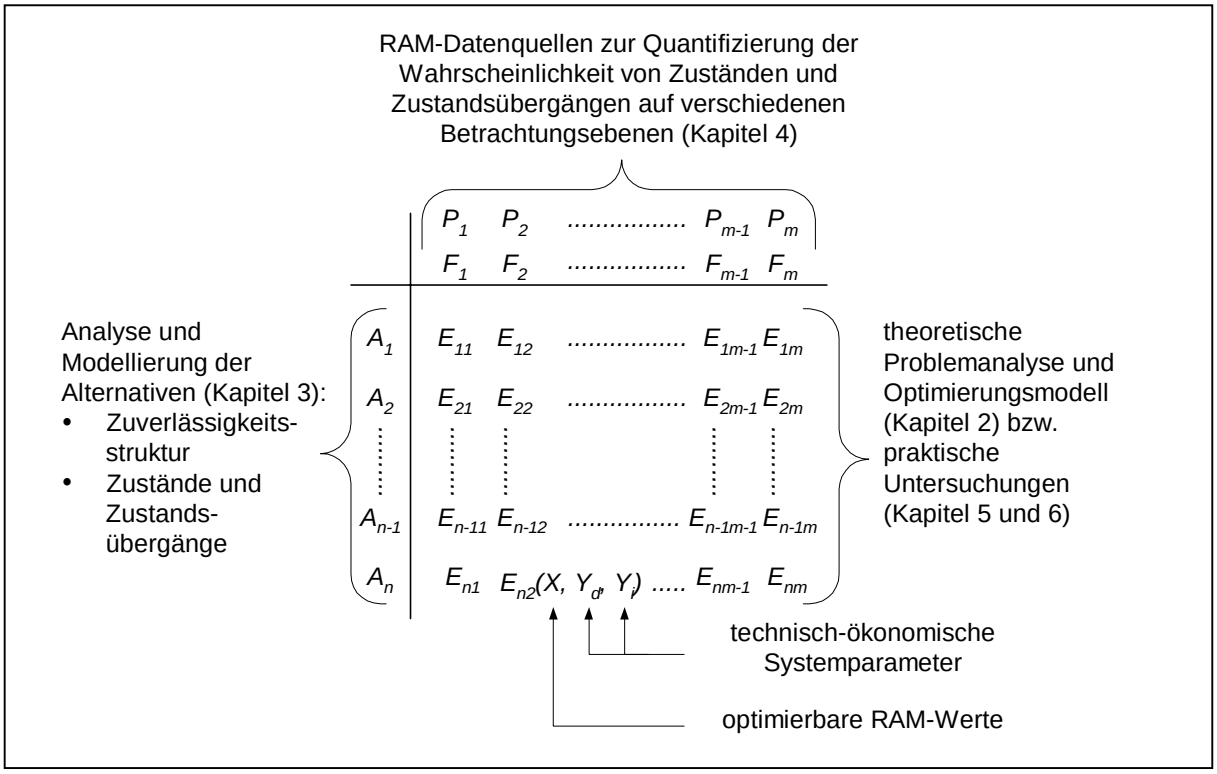


Bild 65 Gliederung der Methodik der RAM-Optimierung in Bezug auf die allgemeine Entscheidungs-Bewertungs-Matrix

Unsicherheitsfaktoren, die die Möglichkeit der RAM-Optimierung stark bestimmen, sind sowohl unvollständige Informationen über die an den Komponenten wirklich auftretenden Belastungen und deren Belastbarkeit, als auch die Schwankungen dieser Größen. Für eine hinreichend genaue Zustandsbestimmung anhand der normalerweise über den Betrieb und die Instandhaltung verfügbaren Informationen der betreffenden oder anderer Anlagen, ist demnach die Reproduzierbarkeit folgender Aspekte anzustreben:

- gleichbleibende bzw. in ihren Einflußfaktoren bekannte Zuverlässigkeit der Komponenten durch eine entsprechende Qualitätssicherung bei Auslegung, Herstellung, Einbau und Wartung der Komponenten;

- eindeutig definierte und nachweisbare Belastung der Komponenten bei Normalbetrieb und davon abweichenden Lastfällen.

Daraus ergibt sich zwangsläufig die Notwendigkeit von Langzeituntersuchungen zu Schädigungsvorgängen und Parameteränderungen, nicht nur an den Komponenten, die als Schwachstellen bekannt sind, sondern auch für die, die z.B. im Rahmen der Fehlermöglichkeits- und Einfluß-Analyse als potentielle Risiken identifiziert wurden. Diese konsequente Überwachung des Betriebsverhaltens ist auch die Vorraussetzung, um die Wahrscheinlichkeit für die rechtzeitige Erkennung von sog. schlafenden Fehlern zu erhöhen, also von an-

sonsten unbemerkt ablaufenden Schädigungsprozessen, die mit der Gefahr plötzlicher Ausfälle verbunden sind.

Eine umfassende und langfristig orientierte Optimierung erfordert demnach eine gründliche Analyse und Quantifizierung des Zustandes, schädigungsbedingter Zustandsveränderungen und der Relevanz bzw. Wirkungsweise von betrieblichen Einflußfaktoren. Die Bedeutung der Analyse von möglichen Schadensmechanismen und –szenarien sowohl bei der Bauteil- und Anlagenentwicklung als auch während des realen Betriebes über einen längeren Zeitraum steigt parallel mit der auf Wirkungsgradverbesserung abzielenden Steigerung der Betriebsparameter. Die Komplexität moderner Kraftwerksanlagen und der Einsatz von hoch belastbaren, aber auf Veränderungen ihrer Betriebsbedingungen sehr sensibel reagierenden Werkstoffen verlangt auf Hersteller- und Betreiberseite Kenntnis und Erkenntnis über die ursächlichen technischen Zusammenhänge, um Zuverlässigkeit und Instandhaltung nachhaltig als Optimierungspotential erschließen zu können..

Der resultierende hohe Wissensbedarf kann nur nur durch eine entsprechenden Informationsfluß zwischen Hersteller und Betreiber bzw. zwischen den Betreibern gedeckt werden. Da bei einer solchen Zusammenarbeit von den beteiligten Seiten nicht nur zum Teil sensible Informationen zugänglich zu machen sind, sondern auch ein nicht zu unterschätzender Aufwand auftreten kann, müssen alle Partner davon entsprechend profitieren. Aus der Sicht des Autors zeigt die vorliegende Dissertation dafür Möglichkeiten auf, die für eine Steigerung der Wettbewerbsfähigkeit von Herstellern und Betreibern genutzt werden können.

Abschließend kann erfreulicherweise festgestellt werden, das weitere umfangreiche Forschungsvorhaben mit verschiedenen Industriepartnern in dieser Richtung stattfinden werden, in die der Lehrstuhl Kraftwerkstechnik der TU Dresden integriert sein wird.

Literaturverzeichnis

/1/ Dolben, G.: *Auswirkungen der Liberalisierung auf den Betrieb und die Einsatzplanung des Kraftwerksparks*; VGB Kraftwerkstechnik 2/1999, S. 32-37

/2/ Wild, J.: *Service-Strategien der Zukunft*; VGB Kraftwerkstechnik 6/1998, S. 55-59

/3/ Blanchard, B. und Fabrycky, W.: *Systems engineering and analysis*; 3.Auflage New Jersey, Prentice-Hall 1998

/4/ Turban, E. und Aronson, J.E.: *Decision support systems and intelligent systems*; 5. Auflage New Jersey, Prentice Hall 1998

/5/ Morgan, M.G. und Henrion, M.: Uncertainty : *A Guide to Dealing With Uncertainty in Quantitative Risk and Policy Analysis*; Cambridge University Press 1992

/6/ Clemen, R.T.: *Making Hard Decisions: An Introduction to Decision Analysis*; 2. Auflage Belmont, CA, Duxbury Press 1996

/7/ Horváth und Herter: *Benchmarking, Vergleich mit den Besten der Besten*; Controlling 1/1992, S. 4-11

/8/ Mayer, J.: *Versicherung von energietechnischen Anlagen*; Monitoring und Diagnose in energietechnischen Anlagen, Braunschweig 1997; VDI-Berichte 1359 VDI Verlag Düsseldorf 1997, S. 65-76

/9/ Kreiner, Y. und Jelting, M.: *Versicherungsrechtliche Behandlung der Lebensdauerproblematik in der Maschinenversicherung*; Allianz Report 2/1999, S. 64-67

/10/ Weber, M.: *Outsourcen von Instandhaltungs-, Reparatur- und Erhaltungsarbeiten: Versicherungstechnische Probleme und deren Lösung*; Monitoring und Diagnose in energietechnischen Anlagen, Braunschweig 1997; VDI-Berichte 1359 VDI-Verlag Düsseldorf 1997, S. 301-307

/11/ VDI 2067: *Betriebstechnische und wirtschaftliche Grundlagen (Wirtschaftlichkeitsberechnungen)*; VDI Verlag Düsseldorf 1990

/12/ Beckmann, G. und Marx, D.: *Instandhaltung von Anlagen; Konzepte Strategien Planung*; 4. überarb. Aufl. Leipzig, Deutscher Verlag für Grundstoffindustrie 1994

/13/ Sherwin, J. D.: *Concerning Bathtubs, Maintained Systems and Human Frailty*; IEEE Transactions on Reliability 2/1997, S. 162

/14/ DIN 40041: *Zuverlässigkeit (Begriffe)*; Beuth Verlag Berlin 1990

/15/ DIN 25448: *Ausfalleffektanalyse (Fehler-Möglichkeits- und Einfluß-Analyse; FMEA)*; Beuth Verlag Berlin 1990

/16/ Wilbur, J.: *Failure Mode, Effects & Criticality Analysis*; New York, Reliability Analysis Center 1990

/17/ DIN 25424-Teil 2: *Fehlerbaumanalyse - Handrechenverfahren zur Auswertung eines Fehlerbaumes*; Beuth Verlag Berlin 1990

/18/ DIN 25424-Teil 1: *Fehlerbaumanalyse - Methode und Bildzeichen*; Beuth Verlag 1990

/19/ Mahar, D.: *Fault tree analysis application guide*; New York, Reliability Analysis Center 1990

/20/ Sturm, A.: *Zustandswissen für Betriebsführung und Instandhaltung*; 1. Auflage Essen, VGB-Kraftwerkstechnik 1996

/21/ Bream, B.: *Reliability Block Diagramms and Reliability Modeling*. NASA Lewis Research Center 1995

/22/ Willis, R.: *Comparison of Reliability-Availability Simulators*; Society of Reliability Engineers 1999; http://www.sre.org/srepubs.htm

/23/ Hermann, U.: *Knaurs etymologisches Lexikon*; München, Droemer Knaur 1983

/24/ Carter, A.: *Mechanical reliability and design*; London, Macmillan Press 1997

/25/ Bamberg, G. und Baur, F.: *Statistik*; 6., überarb. Auflage München Wien, R. Oldenburg Verlag 1989

/26/ McFadden, R. H.: *Developing a Database for a Reliability, Availability, and Maintainability Improvement Program for an Industrial Plant or Commericial Building*; IEEE Transactions on Industry Applications 4/1990, S. 735-740

/27/ Smith, C.: *Reliability Survey of diesel and gasturbine generating units*; IEEE Transactions on Industry Applications 4/1990, S. 741-755

/28/ Moubray, J.: *RCM - Die Hohe Schule der Zuverlässigkeit von Produkten und Systemen*; Landsberg, Verlag Moderne Industrie 1996

/29/ Neupert, D. und Simon, E.: *Das Expertensystem MODI - ein Beitrag zur wirtschaftlichen Führung von Kraftwerken*; ABB Technik 6/1994, S. 38-46

/30/ Andrick, W.: *Dokumentationsverwaltung für die Instandhaltung*; 2. Internationales Instandhaltungssymposium 1997; Zittau

/31/ Esser, M.und Fidelak, M.: *Geschäftsprozessorientierte Einführung von Informationssystemen für die Instandhaltung*; 2. Internationales Instandhaltungssymposium 1997; Zittau

/32/ Janosik, L.A.: *Enhanced CARES software enables improved ceramic life prediction*; NASA Lewis Research Center; http://www.abpi.net/T2007/am4/enhanced.html

/33/ Bury, K.: *Statistical distributions in engineering*; 1. Auflage Cambridge, Cambridge University Press 1999

/34/ Härtler, G.: *Statistische Methoden für die Zuverlässigkeitsanalyse*; 1. Auflage Berlin, Verlag Technik 1983

/35/ Deutsche Gesellschaft für Qualität e V.: *Das Lebensdauernetz; Leitfaden zur grafischen Bestimmung von Zuverlässigkeitskenngrößen der Weibull-Verteilung*; Frankfurt am Main, Deutsche Gesellschaft für Qualität e V., 1995

/36/ Abernethy, R.B.: *The New Weibull Handbook*; 2. Auflage North Palm Beach, Florida, 1996

/37/ Bernstein, W.: *Zur Lebensdauer und Instandhaltung von Gasturbinen*; Allianz Report 5/1993, S. 192-199

/38/ Committee on Coatings for High-Temperature Structural Materials, National Research Council: *Coatings for high-temperature structural materials; Trends and Opportunities*; Washington, D.C., National Academy Press 1996

/39/ Bürgel, R.: *Handbuch Hochtemperatur- Werkstofftechnik; Grundlagen, Werkstoffbeanspruchungen, Hochtemperaturlegierungen*; Braunschweig, Vieweg Verlag 1998

/40/ Reece, Cox, Morell und Phillips: *Estimation of Weibull Modulus from Dynamic and Static Fatigue Experiments*; Teddington, Middlesex, National Physical Laboratory 1993

/41/ Bernstein, W., Sauermann, G.und Werner, T.: *Zuverlässigkeit und Lebensdauer von Gasturbinen*; XXX. Kraftwerkstechnisches Kolloquium; Dresden 1998

/42/ Onisawa, T. und Kaeprzyk, J.: *Reliability and Safety Analyses under Fuzziness*; Heidelberg, Physica-Verl. 1995

/43/ Leitch, R.D.: *Reliability Analysis for Engineers; An Introduction*; Oxford, Oxford University Press 1995

/44/ Ayyub, B.M. und McCuen, R.H.: *Probability, Statistics & Reliability for Engineers*; CRC Press 1997

/45/ Nandi, S. und Aich, A.: *Hypothesis-Test for Reliability in a Stress-Strength Model, with prior information*; IEEE Transactions on Reliability 01/1996, S. 129-131

/46/ Erto, P. und Giorgio, M.: *Modified "practical Bayes estimator"*; IEEE Transactions on Reliability 01/1996, S. 132-136

/47/ Beiser, J. A. und Rigdon, S. E.: *Bayes Prediction for the Number of Failures of a Repairable System*; IEEE Transactions on Reliability 02/1997, S. 291-295

/48/ VGB: *VGB Technisch-wissenschaftliche Berichte "Wärmekraftwerke"; Analyse der Nichtverfügbarkeit von Wärmekraftwerken 1988-1994*; 7. Ausgabe 1995 Essen, VGB Technische Vereinigung der Grosskraftwerksbetreiber e.V.

/49/ Cooke, L. A.: *Advanced refurbishment and life extension technologies for industrial gas turbine components*; Third International EPRI Conference Welding and Repair Technology for Power Plants; Scottsdale, Arizona 1998

/50/ Cooke, L. A.: *Component refurbishment - Advanced technologies for life extension*; 12th Symposium on Industrial Applications of Gas Turbines; Banf, Alberta, Canada 1997

/51/ Ellison, K. A.und Liburdi, J.: *Novel approaches to the repair of vane segments*; International Gas Turbine and Aeroengige Congress and Exposition; Cincinnati, Ohio 1993

/52/ Elsner, W.: *Schäden im Heißgaspfad von Gasturbinen und ihre Ursachen*; Allianz Report 02/1998, S. 97-103

/53/ Swaminathan, V. P.: *Advanced materials and coatings for combustion turbines*; ASM 1993 Materials Congress; ASM International Pittsburgh, Pennsylvania 1994

/54/ Bernstein, W.: *Einfluß der Gastemperaturen vor der Turbine auf Lebensdauer und Schadstoffemission*; VGB-Kraftwerkstechnik 10/1998, S. 104-110

/55/ Marx: *Effektive Nutzung der Schadensstatistik*; VGB Kraftwerkstechnik 09/1996, S. 746-749

/56/ EUT GmbH Radebeul: *HKW Cottbus - Auswertung GU-Angebote*; interner, nicht öffentlicher Bericht; Radebeul 1996

/57/ Almhem, P. und Lofe, J. J.: *Umweltschonende, hocheffiziente PFBC-Kraftwerke für Leistungen bis 750MW*; ABB Technik 04/1994, S. 33-41

/58/ Karlsson, J.: *Availability Improvement - "Starting Point"*; interner Bericht der ABB Carbon; Finspong 1995

/59/ Werner, T.: *Untersuchungen zur Zuverlässigkeit von Druckwirbelschichtfeuerungsanlagen*; Technische Universität Dresden, Diplomarbeit, 1996

/60/ Fries, A. und Sen, A.: *A survey of discrete reliability-growth models*; IEEE Transactions on Reliability 4/1996, S. 582-604

/61/ Altrock, C.: *Fuzzy Logic; Band 1: Technologie*; 2. Auflage München Wien, R. Oldenburg Verlag 1995

/62/ Drösser, C.: *Fuzzy Logic; Methodische Einführung in krauses Denken*; Hamburg, Rowohlt Taschenbuch Verlag GmbH 1994

/63/ Ayyub, B.M. und Gupta, M.M.: *Uncertainty Analysis in Engineering; Fuzzy Logic, Statistics, and Neural Network Approach*; Boston, Kluwer Academic Publishers 1998

/64/ Cai, K.-Y. : *Introduction to fuzzy reliability*; Norwell, Kluwer Academic Publishers 1995

/65/ Bath, U., Jovanovic, A. und Weber, R.: *Instandhaltung von Kraftwerken mit Fuzzy-Datenanalyse*; VGB-Kraftwerkstechnik 07/1995, S. 573-586

/66/ Noor, S.: *Forced-Outages Rates of Generating Units based on Expert Evaluation*; IEEE Transactions on Reliability 01/1996, S. 138-139

/67/ Geymayr, J. A. B.: *Fault-Tree Analysis: A Knowledge-Engineering Approach*; IEEE Transactions on Reliability 01/1995, S. 37-45

/68/ Ye, N.: *The Presentation of Knowledge and State-Information for System Fault Diagnosis*; IEEE Transactions on Reliability 04/1996, S. 638-644

/69/ Csenki, A.: *Dependability for systems with a partitioned state space; Markov & Semi-Markov theory & computational implementation*; New York, Springer 1994

/70/ Perman, M.: *Semi-Markov Models with an Application to Power Plant Reliability Analysis*; IEEE Transactions on Reliability 04/1997, S. 526-532

/71/ Pukite, J.: *Modeling for reliability analysis; Markov modeling for reliability, maintainability, safety, and supportability analyses of complex computer systems*; New York, IEEE Press 1998

/72/ Gheorghe, A.V.: *Decision Processes in Dynamic Probabilistic Systems*; Dordrecht, Kluwer Academic Publishers 1990

/73/ White, D.J. und Douglas, J.: *Markov decision processes*; Chichester, John Wiley & Sons 1993

/74/ Almhem, P. und Schmenau, W.: Cottbus - first PFBC plant to be fired with brown coal; ABB Technik 1/1997, S. 4-12

Bildverzeichnis

Bild 1 Gesamtheit und Sichtbarkeit von Kosten; aus /3/ 5

Bild 2 Elemente, welche in die Kostenwirksamkeit einzubeziehen sind; nach /3/ 6

Bild 3 Verlauf von Beeinflussbarkeit, Festschreibung und Höhe anfallender Kosten sowie Anlagen-spezifischem Wissen; aus /3/ 7

Bild 4 Übersicht über Aufbau der Dissertation 9

Bild 5 Allgemeine Darstellung der Vorgehensweise bei der Modellierung und Lösung von Entscheidungssituationen; in Anlehnung an /4/ 10

Bild 6 Graphische Gegenüberstellung von Alternativen bei Bewertung anhand mehrerer Kriterien; aus /3/ 14

Bild 7 Menge der Zustände bei binärer Betrachtungsweise 17

Bild 8 Matrix mit den Zuständen und Ereignissen sowie deren Wahrscheinlichkeiten bei binärer Betrachtungsweise 17

Bild 9 theoretisch mögliche Kombination κ und deren Gruppierung in Zustände z_i 23

Bild 10 Hierarchie möglicher Betrachtungsebenen 24

Bild 11 Beispiel für die Kombination von Modellierungsmethoden 28

Bild 12 Übersicht zu Weibullanalyse 31

Bild 13 Ausfallwahrscheinlichkeitsdichtefunktion *f(t)* 35

Bild 14 Ausfallwahrscheinlichkeit *F(t)* 36

Bild 15 Ausfallrate λ *(t)* 36

Bild 16 Häufigkeitsverteilungen zur Lebensdauerermittlung; nach /37/ 37

Bild 17 Darstellung von PF-Intervall, Zustandsverlauf und Diagnosesicherheit 38

Bild 18 Ausfallmuster; aus /28/ 38

Bild 19 Verlauf der Fehlerrate bei Vorhandensein von Früh- und Verschleißausfällen 39

Bild 20 Erhöhung des mittleren Sicherheitsabstands bei Gasturbinen durch Verringerung des Zündsprungs; nach /37/ 40

Bild 21 Schematische Darstellung der Verhinderung von Frühausfällen durch Beschneiden der unteren Werkstoffkennwerte; nach /37/ 40

Bild 22 Probabilistische Betrachtung des Ausfallprozesses bei Schädigungen über der Betriebszeit *t*; nach /20/ 42

Bild 23 Allgemeiner Verlauf von Verschleißprozessen; nach /12/ 42

Bild 24 Verlauf der Streuung des Verschleißmaßes *S* über die Betriebszeit *t*; aus /12/ 43

Bild 25 Verlauf der Oxidschichtbildung auf Metallen; nach /12/ 43

Bild 26 Typisches Verhalten bei Werkstoffermüdung unter Berücksichtigung der Häufigkeitsverteilung von Beanspruchung *b* und Beanspruchbarkeit *f*; nach /28/ 44

Bild 27 Streubereich der Zeitstandsfähigkeit bei Bauteilen aus 10CrMo9.10; aus /12/ 45

Bild 28 Totale und bedingte Eintrittswahrscheinlichkeit des Zustandes *Z* 46

Bild 29 Geschätzte Häufigkeitsverteilung der Zustände Z_1 bis Z_5; nach /44/ S.460..... 49

Bild 30 Geschätzte Aufteilung von Zustandsraum und die objektive Lage des Zustandes Z 49

Bild 31 Beispiel für eine a-priori Häufigkeitsdichte von Ausfallraten λ_i; nach /43/ 50

Bild 32 Beispiel für eine a-posteriori Verteilung von Ausfallraten λ_i; nach /43/ 50

Bild 33 Übersicht über die Art der Aufschlüsselung der Datensätze bei NERC 52

Bild 34 Betriebszustände nach NERC/IEEE 53

Bild 35 Abstufung der verfügbaren Leistung nach NERC 53

Bild 36 RAM-Kennwerte auf Kalenderzeit (*PH*) bezogen..... 54

Bild 37 Ermittlung der Arbeitswerte nach NERC..... 54

Bild 38 Aufschlüsselung der Datensätze bei VGB 55

Bild 39 Betriebszustände nach VGB..... 56

Bild 40 Abstufung der verfügbaren Leistung nach VGB..... 56

Bild 41 RAM-Kennwerte VGB 57

Bild 42 Daten, Untersuchungen und Ergebnisse des Projektes..... 60

Bild 43 Übersicht über die durchgeführte Schädigungsanalyse der Turbinenbeschaufelung 61

Bild 44 scrap rate nach voller Revisionsperiode 62

Bild 45 Verlauf der Ausfallwahrscheinlichkeit 63

Bild 46 Verlauf der Ausfallwahrscheinlichkeitsdichte 63

Bild 47 Verlauf der Fehlerrate 64

Bild 48 Akkumulierte äBh-Verteilungsdichte bei ungeplanten, kompletten TLe1-Wechseln . 64

Bild 49 scrap rate nach Überbrückung zwischen TLe1-Wechsel und Revision..... 65

Bild 50 Überlagerung der Verteilung der starken Oxidationsbefunde der TLe1 mit dem Temperaturprofil..... 68

Bild 51 Verlauf und Schwankungsbreite der scrap rate für die TLe1 72

Bild 52 Gegenüberstellung der absoluten Kosten für *most probable case*, *best case* und *worst case* 74

Bild 53 Gegenüberstellung der spezifischen Kosten für *most probable case*, *best case* und *worst case* 74

Bild 55 Erfassung der Schädigung als Gebrauchskosten; aus /55/ 77

Bild 56 Schematischer Verlauf Betriebsparameter abhängiger O&M-Kosten 80

Bild 57 Lösungsweg für die Abschätzung der Kraftwerks-Verfügbarkeit 82

Bild 58 Inhalt der RAM-Datenbank DRID 84

Bild 60 zustandsorientiertes Instandhaltungskonzept 86

Bild 61 Grundlegende Weiterentwicklungsmöglichkeiten in Bezug auf die modellierbaren Zustände und Zustandsübergänge 89

Bild 62 Übergang von binären, über diskrete hin zu kontinuierlichen Zuständen 90

Bild 63 Prinzipieller Aufbau von Fuzzy-Systemen für Zustandsmodellierung; /61/ 91

Bild 64 Ermittlung einer Aussage zur Restlebensdauer der Leitschaufelbeschichtung aus verschiedenen Informationen 92

Bild 65 Gliederung der Methodik der RAM-Optimierung in Bezug auf die allgemeine Entscheidungs-Bewertungs-Matrix 95

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1 Entscheidungs-Bewertungs-Matrix für ein einzelnes Kriterium 13

Tabelle 2 Totale und bedingte Wahrscheinlichkeiten der Kriterien *K* 46

Tabelle 3 Totale und bedingte Wahrscheinlichkeiten der Zustände *Z* 47

Tabelle 4 Auswertung der Verfügbarkeit *AF* nach der Leistung 48

Tabelle 5 Bedingte Wahrscheinlichkeiten $P\left(NDC_i \middle| AF_j\right)$ des Beispiels 48

Tabelle 6 Anlagentechnische Aufschlüsselung bei VGB 55

Tabelle 7 Ergebnisse der Weibullanalyse der Revisions-äBh der TLe1 62

Tabelle 8 Ergebnisse der Weibullanalyse der Tausch-äBh der TLe1 65

Tabelle 9 Ausgewertete Messreihen 67

Tabelle 10 Leistungsintervalle 67

Tabelle 11 Weibullanalyse realisierter und geplanter Revisions-äBh der TLe1 seit 1997 68

Tabelle 12 scrap rates 71

Tabelle 13 Nachbearbeitung 73

Tabelle 14 Reparaturraten 73

Tabelle 15 Instandhaltungskosten (normiert) 76

Tabelle 16 Kostenbestandteile der Gebrauchskosten 77

Tabelle 17 Daten zur Ermittlung der Gebrauchskosten; nach /12/ 78

Tabelle 18 Technische Parameter des HKW Cottbus 83

Tabelle 19 Ergebnisse der Fehlerbaummodellierung 84

Abkürzungen und Symbole

ANSI	American National Standards Institute
äBh	äquivalente Betriebsstunden
AH	Available Hours
BC	best case
BE	Bauelement
Bh	Betriebsstunden
CPO	Cyclone Plug Outages
DGS	Differentialgleichungssystem
DWSF	Druckwirbelschichtfeuerung
EFDH	Equivalent Forced Derated Hours
EMDH	Equivalent Maintenance Derated Hours
EPDH	Equivalent Planed Derated Hours
EVU	Energieversorgungsunternehmen
FMEA	Failure Mode and Effect Analysis
FMECA	Failure Mode, Effect and Criticality Analysis
FOH	Forced Outage Hours
FT	Fault Tree
GuD	Gas- und Dampfturbinen-Kraftwerk
HKW	Heizkraftwerk
IEEE	Institute of Electrical and Electronic Engineers
IPP	Independent Power Producer
KKS	Kraftwerks-Kennzeichnungs-System
KW	Kraftwerk; Kalenderwoche
LCC	Life Cycle Cost
M&D	Monitoring- & Diagnose
MOH	Maintenance Outage Hours
MP	most probable case

NERC	North American Electric Reliability Council
O&M	Operation and Maintenance
OAF	Operational Availability Factor
OEM	Original Equipment Manufacturer
OPC	Operation and Plant Control
PH	Period Hours
POH	Planed Outage Hours
RAC	Reliability Analysis Centre
RAM	Reliability, Availability and Maintainability
RBD	Reliability Block Diagram
RSFDH	Reserve Shutdown Forced Derated Hours
RSH	Reserve Shutdown Hours
RSMDH	Reserve Shutdown Maintenance Derated Hours
RSPDH	Reserve Shutdown Planed Derated Hours
SH	Service Hours
TLe	Turbinenleitreihe
UH	Unavailable Hours
UNDH	Unplaned Derated Hours
UOH	Unplaned Outage Hours
VGB	Verband der Großkraftwerksbetreiber
VM	mittelfristige Instandhaltungsvariante
WC	worst case

a	Verschleißbedingung
A	Stationäre Verfügbarkeit
A	Alternative bzw. Handlungsalternative
A(t)	Momentane Verfügbarkeit
AAG	Actual Generation
AC	Available Capacity
AF	Availability Factor
AG	Available Generation
A_o	operative Verfügbarkeit
b	Beanspruchung; Verschleißbedingung
B	Bestand
CF	Capacity Factor
DC	Dependable Capacity
DG	Dependable Generation
E	Bewertungsgröße, Kriterium
EAF	Equivalent Availability Factor
EFOR	Equivalent Forced Outage Factor
EUF	Equivalent Unavailability Factor
f	Beanspruchbarkeit
F	Zukunftsszenario
F(t)	Ausfallwahrscheinlichkeit
f(t)	Ausfallwahrscheinlichkeitsdichte
FOR	Forced Outage Rate
FOR	Forced Outage Factor
G	absolute Häufigkeitssumme
GK	Gebrauchskosten
GK_F	Gebrauchskosten der Stillstände durch Schäden
GK_H	Erwartungswert der Gebrauchskosten zur Beseitigung der Havarie
GK_H	Gebrauchskosten der außer-planmäßigen Instandhaltung

GK_I	Gebrauchskosten der planmäßigen Instandhaltung
GK_M	Gebrauchskosten des erhöhten Energieverbrauchs
GK_P	Gebrauchskosten der Leistungsminderung
GK_S	Gebrauchskosten der Stillstände durch planmäßige Instandhaltung
GK_U	Gebrauchskosten des Umweltschutzes
$h\ (t)$	Hazardrate
H_i	relativen Häufigkeitssumme
k	Korrosionskonstante
K	Kriterium
k_A	Arbeitsverfügbarkeit
k_{ET}	Ersatzteilkosten
k_F	zusätzliche Kosten durch schadensbedingten Leistungsausfall
k_P	Leistungsverfügbarkeit
k_P	Personalkosten
k_S	zusätzliche Kosten durch planmäßigen Leistungsausfall
$k_{Service}$	Fremdleistungen
k_T	Zeitverfügbarkeit
M	reellwertiger Messwert
$M\ (t_P)$	mittlere Fehlerzahl in der Instandhaltungsperiode
$M(t)$	Reparaturwahrscheinlichkeit
$m(t)$	Wahrscheinlichkeitsdichtefunktion der Reparaturzeiten
MC	Maximum Capacity
MDT	Mean Down Time
MG	Maximum Generation
MOR	Maintenance Outage Factor
MTBF	Mean Time between Failures
MTTF	Mean Time to Failure
MTTFF	Mean Time to First Failure
MTTR	Mean Time to Repair

MUT	Mean Up Time
n	Anzahl der betrachteten Elemente
N	Anzahl der Ausfälle; Lastwechselzahl
N_0	Rißlastwechselzahl
n_A	Arbeitsausnutzung
NDC	Net Dependable Capacity
n_P	Leistungsausnutzung
n_T	Zeitausnutzung
P	Leistung; Wahrscheinlichkeit
$p(x)$	Häufigkeitsdichte der Größe x
P_0	objektive Sicherheit der Diagnose
P_B	Betriebsleistung
p_D	Deckungsbeitrag
PD	Planed Derating
P_{el}	elektrische Leistung
p_M	Material- bzw. Energiekosten
P_N	Nennleistung
P_{NV}	nicht verfügbare Leistung
POF	Planed Outage Factor
P_R	Anteil der diagnostisch erfaßten Abnutzungsteile
P_R	Reserveleistung
P_S	subjektive Sicherheit der Diagnose
ΔP_U	Leistungsminderungen zur Einhaltung von Emissionswerten
P_V	verfügbare Leistung
$R(t)$	Zuverlässigkeit
RG	Reserve Generation
RSF	Reserve Shutdown Factor
s	Sicherheit
S	Verschleißgröße

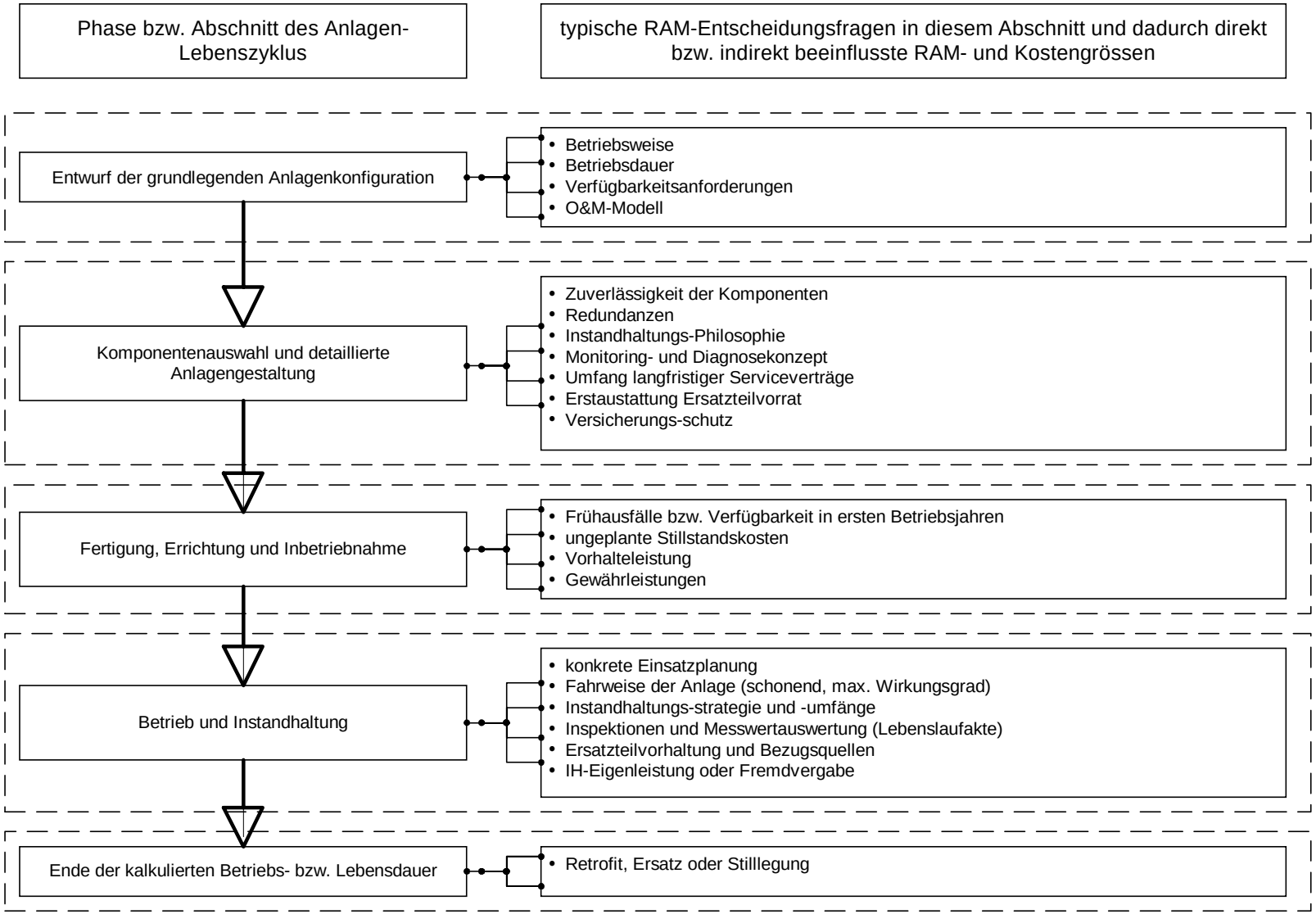
SD	Seasonal Derating
SF	Service Factor
S_o	Verschleißgrenzmaß
SUG	Seasonal Unavailable Generation
t	Zeit, Zeitpunkt
T	Charakteristische Lebensdauer
T_0	Ausfallzeitpunkt
t_0	ausfallfreie Zeit
t_F	Ausfallzeitpunkt
T_F	Stillstandszeit für Schadensbeseitigung
T_N	Kalenderzeit
$T_{NV, A}$	Außerplananteil der verfügbaren Zeit
$T_{NV, A}$	nicht-disponibler Außerplananteil der verfügbaren Zeit
$T_{NV, AD}$	disponibler Außerplananteil der verfügbaren Zeit
$T_{NV, P}$	Plananteil der nicht-verfügbaren Zeit
t_P	Diagnosezeitpunkt; Instandhaltungsperiode
T_S	Stillstandszeit für planmäßige Instandhaltung
TTF	Time to Failure
T_V	verfügbare Zeit
U	Wertebereich des Kriteriums K_i bzw. Messwertes M
UD	Unit Derating
UF	Unavailability Factor
UG	Unavailable Generation
UOF	Unplaned Outage Factor
UPD	Unplaned Derating
Δw	Zunahme des spezifischen Energieverbrauches
x	Term des Kriteriums K_i
X	frei wählbare Variablen

Y_d	nicht direkt kontrollierbare Variablen, welche direkt von den gewählten Variablen X abhängig sind
Y_i	nicht direkt kontrollierbare Variablen, welche aber von den gewählten Variablen X unabhängig sind
Z	Zustand allgemein
Z_A	Ausfallzustände
Z_E	Entscheidungszustände
z_E	Ereigniszuverlässigkeit
Z_N	Normzustand
β	Formparameter
ϕ_F	Wirksamkeit des schadensbedingten Leistungsausfalls
ϕ_S	Wirksamkeit des planmäßigen Leistungsausfalls
κ	Kombination mehrerer Kriterien
μ	Reparaturrate; Mittlere Lebensdauer bei Weibullanalyse
ν	Diagnosewirkungsgrad
σ_A	Spannung, bei der es zum Versagen kommt
σ_B	Zeitstandsfestigkeit
σ	Standardabweichung
μ_Z	Zugehörigkeitsgrad des Messwerts zu Term x

Anlagen

Anlage 1: Kraftwerksanlagen-Lebenszyklus..... 113
Anlage 2: Zuverlässigkeitsmanagement nach DIN IEC 300..... 114
Anlage 3: Darstellung der Zusammenhänge zwischen den RAM-Werten..... 115
Anlage 4: Abarbeitungsprozess der FMEA/FMECA..... 116
Anlage 5: Datenquellen und Nutzer der FMEA/FMECA..... 117
Anlage 6: FMEA/FMECA – Eingabeformular..... 118
Anlage 7: Fehlerbaum, RBD und Markoff im Vergleich; nach DIN IEC 300..... 119
Anlage 8: Aufbau einer RAM-Datenbank (/26/)..... 121
Anlage 9: Aufschlüsselung des NERC-Datenbankinhaltes..... 122
Anlage 10: Zustands-Übergangsmatrix in NERC..... 123
Anlage 11: Auswertung der Datensätze in NERC..... 124
Anlage 12: Gründe der Block-Nichtverfügbarkeit bei VGB..... 125
Anlage 13: Verursacher der Block-NV bei VGB (in /48/ verwendete Aufschlüsselung)..... 126
Anlage 14: Problemanalyse des V64.3-Projektes..... 127
Anlage 15: Optionen für Schaufelaus- und einbau..... 128
Anlage 16: Verlauf der absoluten Kosten (MP)..... 129
Anlage 17: Verlauf der spezifischen Kosten (MP)..... 130
Anlage 18: Schaufelmanagement – Beispiel für TLe1..... 131
Anlage 19: HKW Cottbus – Schaltbild (aus /74/)..... 132
Anlage 20: Beispiel für Auswertung einer bestimmten Baugruppe..... 133
Anlage 21: Beispiel für die Auswertung des Abstands zwischen zwei Ausfällen..... 134
Anlage 22: Strukturierung einer RAM-Datenbank..... 135
Anlage 23: Ergebnisse des RAM-Benchmarking..... 136

Anlage 1 Kraftwerksanlagen-Lebenszyklus



Anlage 2 Zuverlässigkeitsmanagement nach DIN IEC 300

Schritt 1: Auflisten aller Zuverlässigkeitsforderungen, Merkmale und Kenngrössen des Systems, zusammen mit Umwelt- und Betriebsbedingungen, einschliesslich der Forderungen an die Instandhaltung. Definieren des zu analysierenden Systems und der Beziehungen der Systemfunktionen untereinander bis zu höheren Ebenen und den Schnittstellen zu externen Systemen und Prozessen.

↓

Schritt 2: Störung des Systems definieren, die Fehlerkriterien und Fehlerbedingungen anhand der Forderungen an die Systemfunktionen und des erwarteten Betriebsverhaltens und der Betriebsumgebung definieren. Das Verhalten der Software sollte ebenfalls betrachtet werden.

↓

Schritt 3: Sind nummerische Ergebnisse erforderlich, wird eine Aufteilung der Zuverlässigkeit anhand einer vorläufigen Konzeption empfohlen (Zuweisung eines Teils der zugelassenen Systemausfallrate oder der Nichtverfügbarkeit auf die einzelnen Teilsysteme).

↓

Schritt 4: Analyse des Systems in folgenden Teilschritten

Schritt 4.1: Qualitative Analyse (deduktives/induktives Verfahren)
Die funktionale Struktur des betrachteten Systems analysieren, die Fehlerarten des Systems und seiner Elemente, der Ausfallmechanismen, der Ausfallauswirkungen und der Ausfallfolgen ermitteln, die Instandhaltbarkeit seiner Einheiten beachten, ein Zuverlässigkeitsmodell erstellen , mögliche Instandhaltungs- und Instandsetzungsstrategien festlegen usw.

Schritt 4.2: Quantitative Analyse (analytisch oder Ereignissimulation)
Daten zur Zuverlässigkeit der Einheiten (z.B. Ausfallraten) beschaffen, mathematische Zuverlässigkeitsmodelle aufstellen, die Brauchbarkeit der mathematischen Modelle rechnersich bewerten, Wirkbreite und Wirktiefe von Ausfälle der Elemente analysieren. Durch redundante Strukturen und durch Instandhaltungsstrategien möglicherweise verbessertes Systemverhalten analysieren usw.

↓

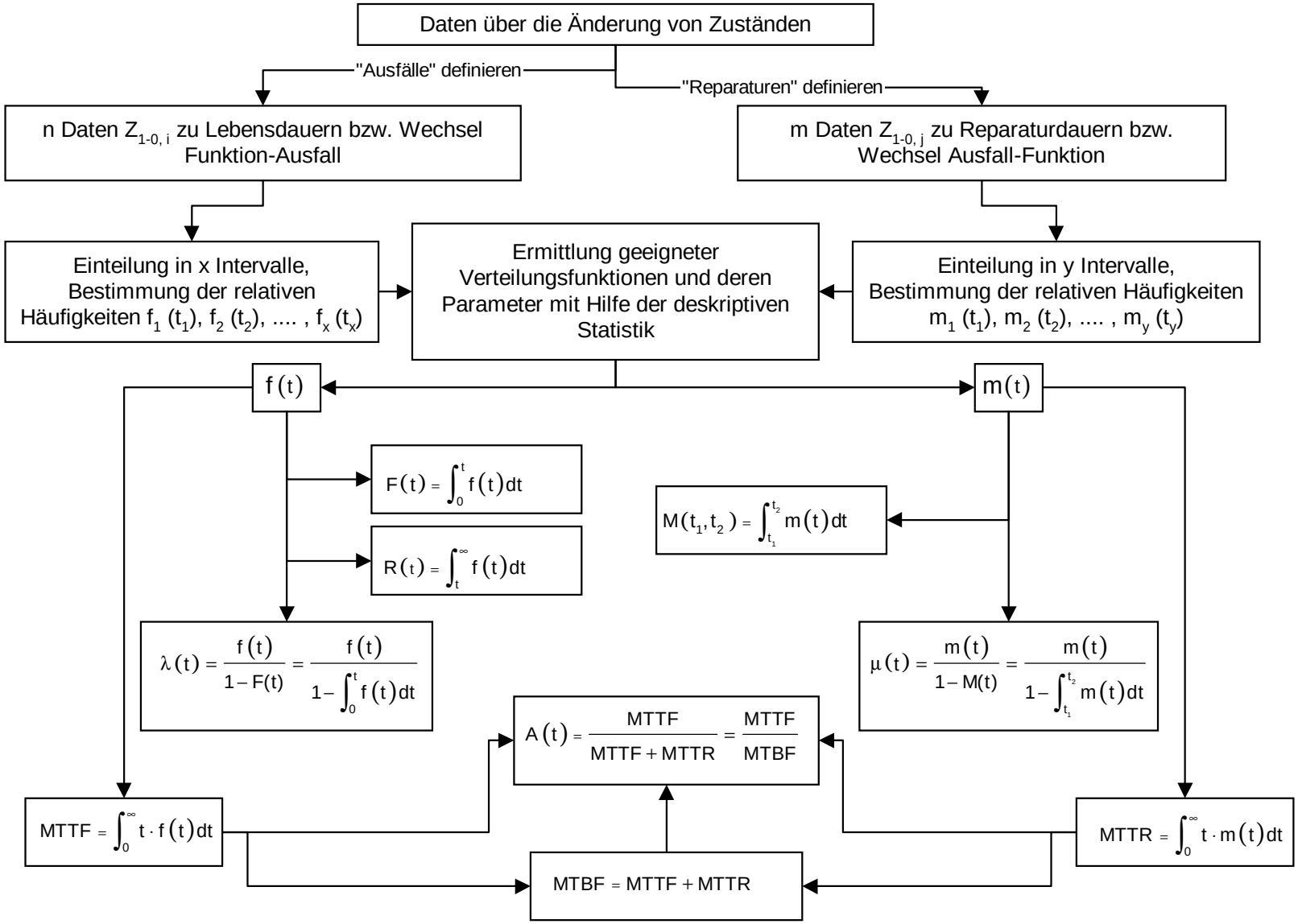
Schritt 5: Ergebnisse bewerten und mit den Forderungen oder alternativen Konzeptionen vergleichen. Weitere Aufgaben können sein:

Schritt 5.1: Die Systemkonzeption überprüfen, Schwachpunkte, Unausgewogenheiten und kritische oder gefährliche Fehlerarten oder Einheiten feststellen. Schnitttstellenprobleme des Systems, die Eigenschaft, in einen sicheren Zustand auszufallen, und andere Mechanismen beachten.

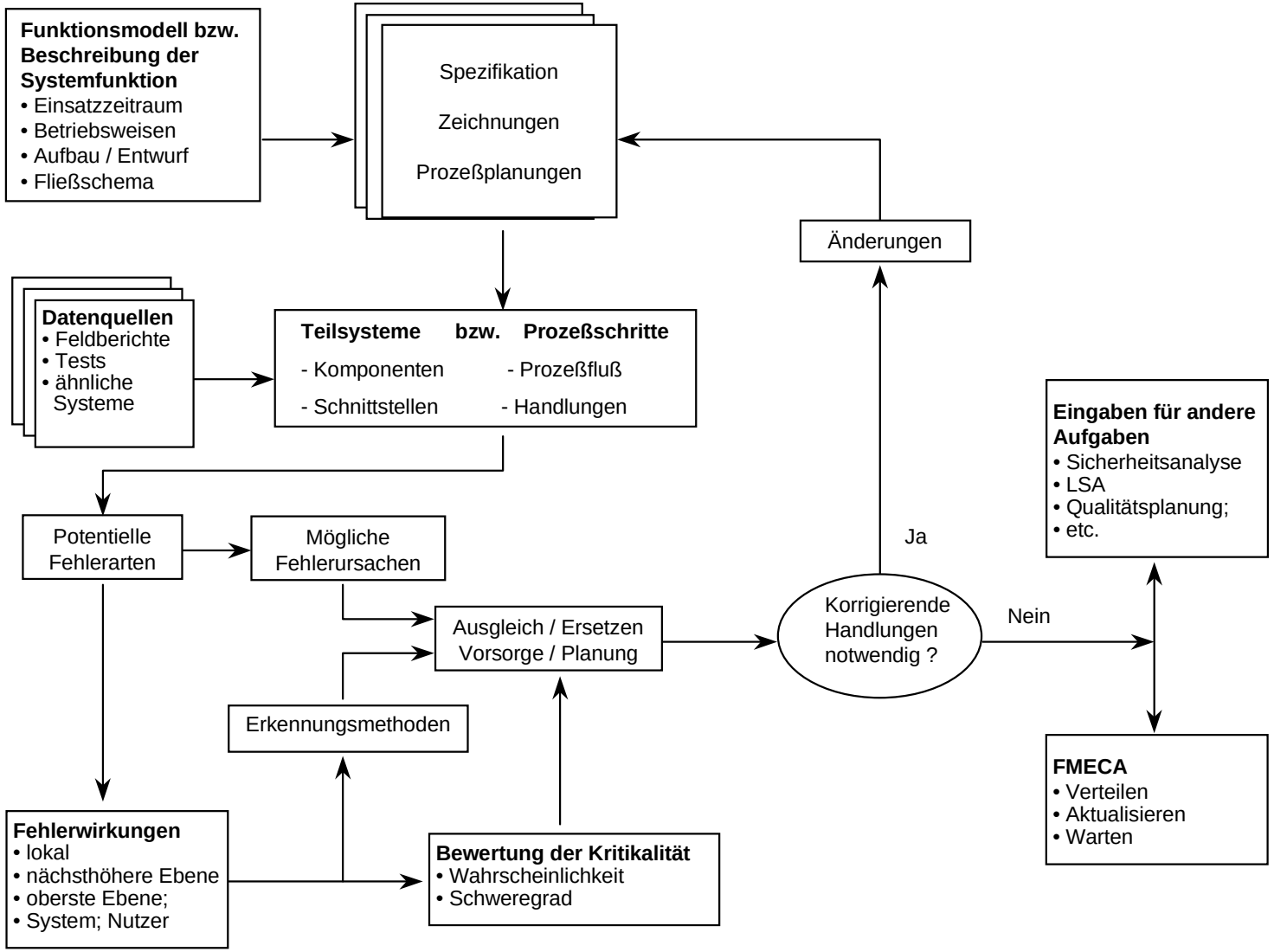
Schritt 5.2: Alternative Wege zur Verbesserung der Zuverlässigkeit suchen. Hierzu kann gehören: Redundanz zuweisen, Systemverhalten beobachten, Fehler erkennen, Verfahren zur Rekonfiguration des Systems, Instandhaltbarkeit, Möglichkeiten des Austausches und der Instandsetzung von Elementen

Schritt 5.3: Kosten/Nutzen-Studien und Kostenbetrachtungen alternativer Konzeptionen durchführen

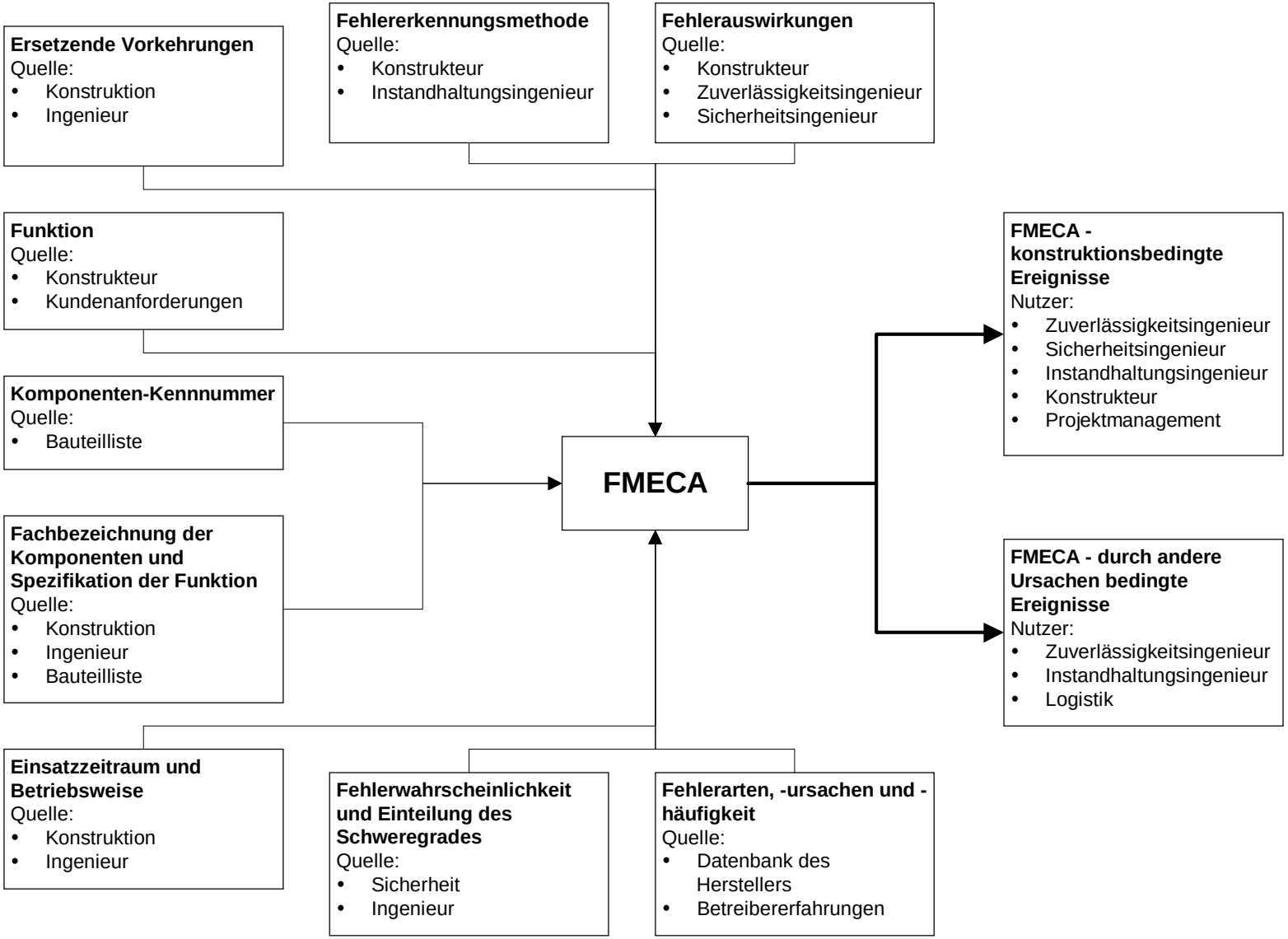
Anlage 3 Darstellung der Zusammenhänge zwischen den RAM-Werten



Anlage 4 Abarbeitungsprozess der FMEA/FMECA



Anlage 5 Datenquellen und Nutzer der FMEA/FMECA



Anlage 6 FMEA/FMECA – Eingabeformular

Fehlermöglichkeits- und Einfluß-Analyse (FMEA)

FMEA Nr: Erstellt am: Erstellt von:

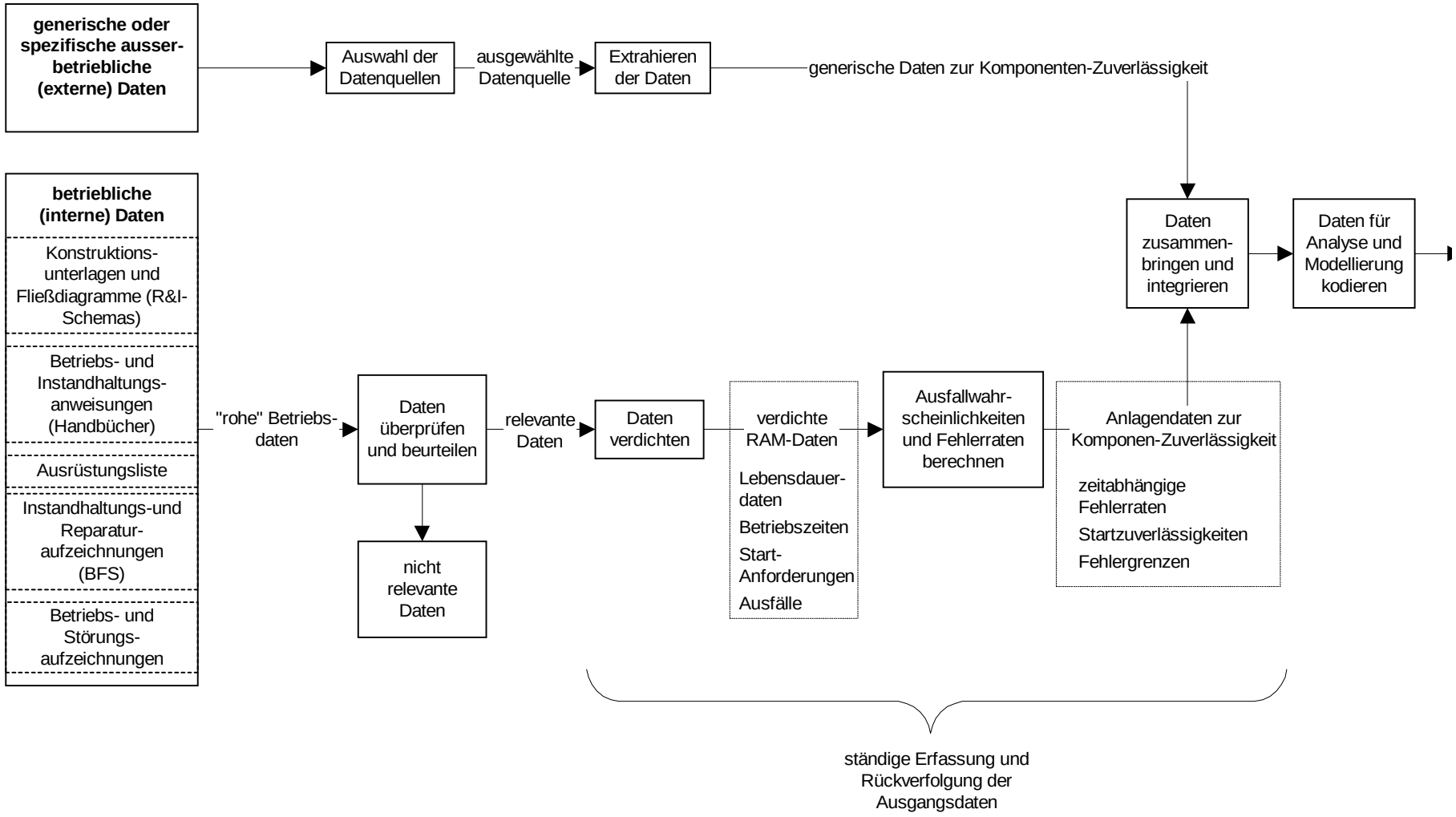
Nr.	Funktion	Fehlerart	Fehler-auswirkung	Schweregrad	Fehlerursache bzw. Schädigungs-mechanismus	Eintritts-wahrscheinlichkeit	Fehler-erkennung	Risiko (RPN)	Empfohlene Handlungen

Anlage 7 Fehlerbaum, RBD und Markoff im Vergleich; nach DIN IEC 300

Fehlerbaum Vorteile	• ergibt systematisch den logischen Weg eines Fehlers von einer bestimmten Auswirkung zurück bis zur eigentlichen Ursache und dokumentiert diesen Weg; • kann parallele, redundante oder alternative Fehlerpfade behandeln • kann die meisten Formen kombinierter Ereignisse und einige Abhängigkeitsformen behandeln • kann Systeme behandeln, die mehrere über Kreuz verbundene Teilsysteme behandelt • kann sehr einfach z. B. durch Boolesche Algebra, die Anzahl der Fehlerpfade auf eine Mindestmenge reduzieren • kann leicht Logik-Modelle in Angaben zur Wahrscheinlichkeit umwandeln bzw. umrechnen • kann Anhaltspunkte geben, welche Fehlerarten sich in erster Linie auf das Hauptereignis auswirken oder zum untersuchten Ergebnis führen • nützlich bei der Suche nach möglichen Ursachen für eine letztendliche Auswirkung, die vorher noch nicht erkannt war • nützlich bei umfassenden, systematischen Fehleranalysen, die bei einer oder zwei wichtigen Auswirkungen beginnen.
Fehlerbaum Nachteile	• führt bei großer Analysetiefe häufig zu sehr großen Bäumen • kann häufig dasselbe Ereignis in verschiedenen Zweigen beschreiben. Dies kann zur Verwirrung oder zu Fehlern führen; dies kann aber selbsttätig durch Logik verhindert werden • stellt nicht selbst die Übergangsbeziehungen zwischen den den verschiedenen Ereignissen entsprechenden Zuständen her • erfordert für jedes Hauptemeignis einen eigenen Stömungsbaum. Wechselwirkungen zwischen den einzelnen Störungsbäumen bedürfen dann besonderer Aufmerksamkeit • stellt lediglich die Beziehung zwischen dem festgestellten Hauptursache zum analysierten Hauptereignis her. Diese Ursachen können aber noch zu anderen, nicht dargestellten Auswirkungen führen • ist in erster Linie auf die Störungsanalyse ausgerichtet und kann nicht gut komplexe Instandhaltungsstrategien und allgemeine Verfügbarkeitsanalysen behandeln und erstellen.
RBD Vorteile	• Es ergeben sich weniger Verfahrensfehler und eine systematische Beschreibung der zur Funktionserfüllung notwendigen Pfade, da es sehr direkt aus dem Systemfunktionsdiagramm abgeleitet werden kann. • Es können die meisten Systemkonfigurationen (funktionsbeteiligte oder nicht funktionsbeteiligte Redundanz, alternative Operationspfade) behandelt werden. • Es können die meisten Ereigniskombinationen und einige Abhängigkeitsformen behandelt werden. • Es kann eine vollständige Variationsanalyse durchgeführt werden, falls diejenigen Parameter, die das Systemverhalten festlegen, geändert werden sollten. • Es kann ein minimales Logikmodell abgeleitet wenden, da es (bei zwei Systemzuständen) leicht geeignet ist, funktionale (oder nicht funktionale) Pfade (z.B. mit Hilfe der Booleschen Algebra zu bearbeiten. • Es kann leicht diejenigen Einheiten ermitteln, die am meisten die Zuverlässigkeit beeinflussen. • Es kann Ausgangspunkt für solche Modelle sein, mit deren Hilfe die Zuverlässigkeitskenngrößen als Wahrscheinlichkeiten angegeben wenren können. • Es ergibt kurze Diagramme für ganze Systeme.

RBD Nachteile	• Sie gibt selbst keine bestimmte Ausfallanalyse; d. h., die Ursache-Wirkung- oder die Wirkung-Ursache-Pfade werden nicht besonders hervorgehoben. • Sie erfordert von jedem Block im Diagramm eine Wahrscheinlichkeitsbeschreibung seiner Kenngrößen. • Sie gibt nicht allein Hinweise zu falschen oder unbeabsichtigten Ereignissen, sofern der Analytiker dies nicht beabsichtigt hat. • Sie ist in erster Linie auf die erfolgreiche Erfüllung der Systemfunktion ausgerichtet und kann nicht gut komplexe Instandhaltungsstrategien und allgemeine Verfügbarkeitsanalysen behandeln und erstellen. Es gibt hierfür jedoch nützliche Anhaltspunkte.
Markoff Vorteile	• Sie ergibt direkt ein Wahrscheinlichkeitsmodell der Systemzustände. Das Modell basiert auf der Systemlogik. • Sie kann wahrscheinlichkeitstheoretische Lösungen zu Teilmengen anderer Modelle (Logikdiagramme, Stömungsbäume) liefern. • Sie kann leicht durch Mehrfachzustände gekennzeichnete Situationen oder Auswirkungen bis hinab zum einzelnen Element behandeln. • Sie kann Ereignisabfolgen mit bestimmten Mustern oder Ereignisreihenfolgen darstellen. • Sie ist sehr nützlich zum Berechnung stationärer Verfügbarkeiten. • Sie ermöglicht die Untersuchung komplexer, voneinander abhängiger lnstandsetzungen.
Markoff Nachteile	• Sie kann bei Systemen mit vielen Zuständen sehr komplex werden. • Sie ist wenig hilfreich beim erstmaligen, logischen Lösen einem Aufgabe. • Sie erfordert üblicherweise konstante Übergangsraten. • Sie kann keine Zustandskombinationen darstellen, außer, man schafft für jede Kombination einen erneuten Zustand.

Anlage 8 Aufbau einer RAM-Datenbank (/26/)



Anlage 9 Aufschlüsselung des NERC-Datenbankinhaltes

anlagentechnische Aufschlüsselung bei NERC		
Kraftwerkstyp[50]	Eigenschaften von Kraftwerk bzw. Hauptkomponenten	Brennstoff
• Fossile DKW • Nukleare Kraftwerke • Diesel-Kraftwerk • Pump-/Wasser-Kraftwerk • GuD-Anlagen	• Bauart Dampferzeuger • Leistungsbereich • Rauchgasentschwefelung • Kondensatorkühlsystem	• Kohle • Öl • Gas • Kerosin • Nuklear

betriebstechnische Aufschlüsselung			
Lastcharakteristik	Zustandsbeschreibung	RAM-Kennwerte	Details zum Brennstoff
• Grundlast, • periodische, wöchentliche bzw tägliche Starts	• Leistung / Erzeugung • Betriebsstunden; RSH; FOH; AH • saisonale Lastabsenkung • Alter des Blocks	• CF, SF, OF, AF • FOR, POF • Start-zuverlässigkeit	• verbrannte Menge • durchschn. HW • %Asche • %Schwefel • %Feuchte

Ausfallkategorie	Beispiele
intern, d.h. durch Störungen bzw. Ausfälle von Komponenten bedingt	• 5210: Zwischenkühler Gasturbine • 4112: Schaufeln der MD-Dampfturbine • 8710: Probleme mit SO_2-Messung
extern; z.B. Umweltereignisse	• 9000: Flut • 9010: Feuer von außen, z.B. Waldbrand • 9030: Erdbeben
wirtschaftliche Gründe	• 0000: Reservestillstand • 9130: Brennstoffmangel • 9150: Streik
Behördenauflagen	• 9670: Lärmschutz • 9510: Umbau um geänderte Bestimmungen zu erfüllen

[50] Die weitere anlagentechnische Aufschlüsselung ist natürlich vom Kraftwerkstyp abhängig.

Anlage 10 Zustands-Übergangsmatrix in NERC

Zustand davor	Zustand danach								
	SH	RSH	POH normal	POH erweitert	FOH Start	FOH sofort	FOH verzögert	FOH verschoben	MOH
SH		(2)	(10)	n.m.	n.m.	(15)	(17)	(18)	(19)
RSH	(1)		(11)	n.m.	(14)	(16)	n.m.	n.m.	(20)
POH_{normal}	(1)	(3)		(13)	(14)	(16)	n.m.	n.m.	n.m.
$POH_{erweitert}$	(1)	(4)	n.m.		(14)	(16)	n.m.	n.m.	n.m.
FOH_{Start}	(1)	(5)	(12)	n.m.		n.m.	n.m.	n.m.	n.m.
FOH_{sofort}	(1)	(6)	(12)	n.m.	(14)		n.m.	n.m.	n.m.
$FOH_{verzögert}$	(1)	(7)	(12)	n.m.	(14)	n.m.		n.m.	n.m.
$FOH_{verschoben}$	(1)	(8)	(12)	n.m.	(14)	n.m.	n.m.		n.m.
MOH	(1)	(9)	(12)	n.m.	(14)	n.m.	n.m.	n.m.	

Legende:

n.m. nicht möglich

(1) Start erfolgreich durchgeführt

(2) aus wirtschaftlichen Gründen bzw. durch Vorgabe durch Lastverteiler in Bereitschaft gehen

(3) Ende des geplanten Stillstands

(4) Ende des geplanten, erweiterten Stillstands

(5) Ende des ungeplanten Stillstands wegen Startfehler

(6) Ende des ungeplanten, sofortigen Stillstands

(7) Ende des ungeplanten, verzögerten Stillstands

(8) Ende des ungeplanten, verschobenen Stillstands

(9) Ende des kurzfristig geplanten Instandhaltungs-Stillstands

(10) Abfahren für einen langfristig geplanten Instandhaltungs-Stillstand

(11) Beginn eines langfristig geplanten Instandhaltungs-Stillstand

(12) Erweiterung, um langfristig geplante Instandhaltungen durchzuführen

(13) Beginn des geplanten, erweiterten Stillstands

(14) Startfehler

(15) Anlagen-Schnellschluss bzw. manuelle Sofortabschaltung

(16) während des Stillstands festgestellter, sofort zu behebender Fehler

(17) Abfahren zur Fehlerbehebung binnen max. 6 Stunden zur Fehlerbehebung

(18) Abfahren zur Fehlerbehebung bis nächstes Wochenende zur Fehlerbehebung

(19) Abfahren zur Fehlerbehebung vor nächstem geplanten Stillstand

(20) Beginn des kurzfristig geplanten Instandhaltungs-Stillstands

Anlage 11 Auswertung der Datensätze in NERC

Selektion des auszuwertenden Datensätze

Schritt 1:
allgemeine und anlagentechnische Auswahlparameter:

- Zeitraum
- Region
- Kraftwerkstyp
- konstruktive Details des ausgewählten Kraftwerktyps

Schritt 2:
betriebstechnische Auswahlparameter:

- Lastcharakteristik
- Kennzahlen
- Blockstatistik
- Details zum Brennstoff

Festlegung des Umfangs der Auswertung

Teil 1:Auswahl bzw. Einschränkung der cause codes

Teil 2:Auswahl der Standard- und Kurzberichte

- Blockjahr-Durchschnittwerte
- Ausfallverhalten der Komponentengruppen
- Kurzberichte: Blockleistung; Blockstatistik; Liste der Kraftwerke; Einzelausfallereignisse

Teil 3: Statistik

- tabellarische Häufigkeitsverteilung
- detaillierte Bericht
- x-y-Diagramm

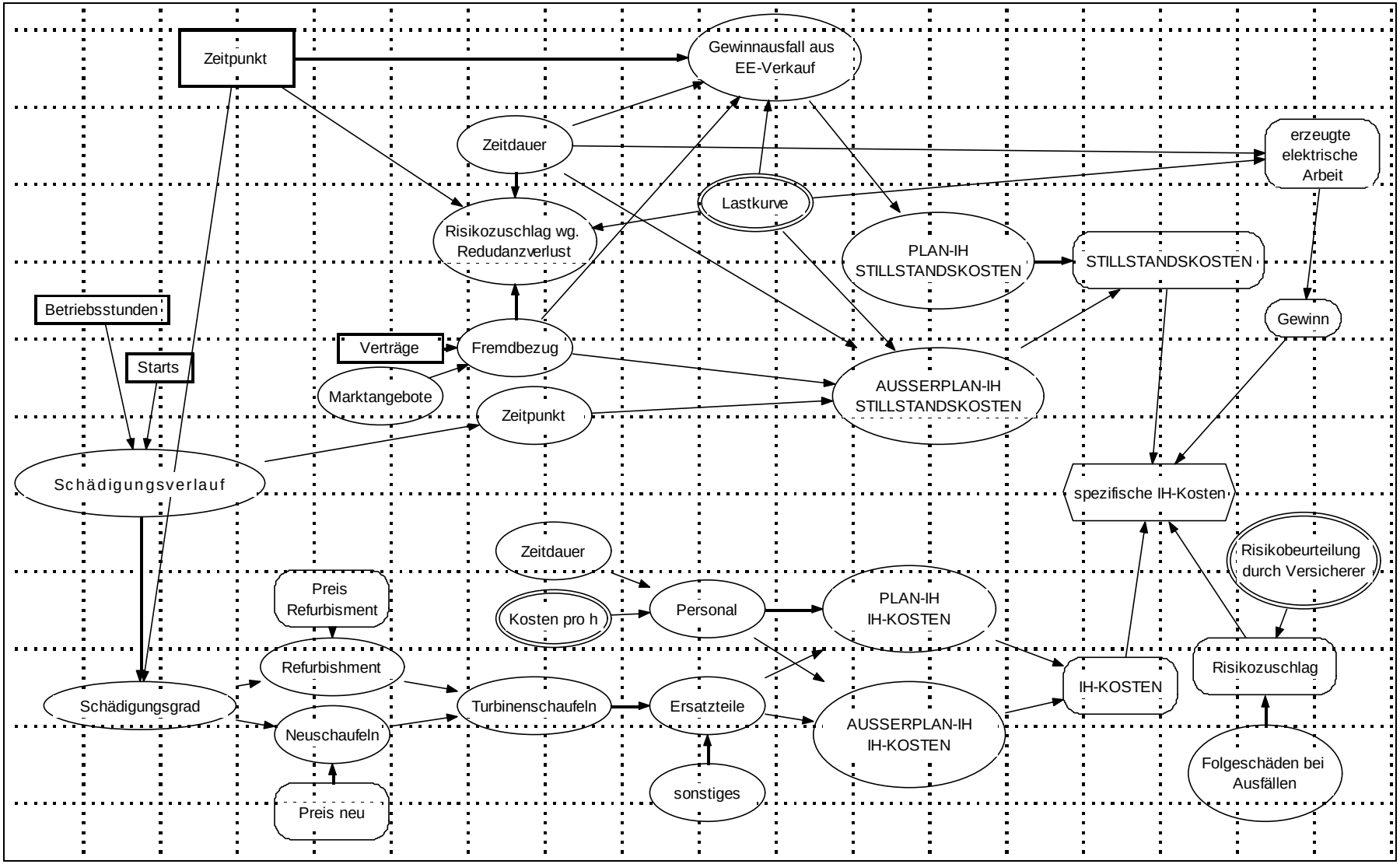
Anlage 12 Gründe der Block-Nichtverfügbarkeit bei VGB

SMS2	Beschreibung
A	*Schaden*: (störungsbedingte Instandsetzung notwendig, Bauteil voll oder teilweise nicht funktionsfähig)
B	*Störung (ohne Schaden)*: (Funktionsstörung, die einen Weiterbetrieb des Betriebsmittels oder des Blockes ohne sofortige oder spätere Instandsetzungsmaßnahme gestattet)
C	*Fehlbedienung*: (ohne Schaden, d.h. keine Instandsetzung notwendig)
D	*Schmierung*: (manuelle Routineschmierung und umfangreiche Öl- und Fettwechsel als Einzelmaßnahme)
E	*Wartung (nicht D)*: (eingehende, überwiegend äußere Funktions- und Zustandskontrolle ohne wesentliche Demontage; Einstell- und Nachstellarbeiten)
F	*Amtliche Prüfung*: (auch wiederkehrende Prüfung und von der Behörde einmalig angeordnete Prüfung)
G	*Inspektion, auch Revision (nicht F)*: (eingehende, überwiegend innere Funktions- und Zustandkontrolle)
H	*Vorsorgemaßnahme/vorbeugende Instandhaltung (nicht E-G)*: Instandsetzung, ohne daß eine Funktionsstörung (siehe B) oder ein Schaden (siehe A) vorliegt, aufgrund von Feststellungen während der Betriebszeit oder statistisch ermittelten Zeitintervallen bzw. aufgrund anderweitiger Erkenntnisse
J	*Brennelementwechsel*
K	*Anderung/Umbau*
L	*Versuch, Messung*
M	*Reaktivitätsmangel*
Y	*Sonstiges*: sofern nicht A bis M (im Klartext erläutern)
Z	*Nicht zutreffend*: Verschlüsselung A bis Y nicht anwendbar

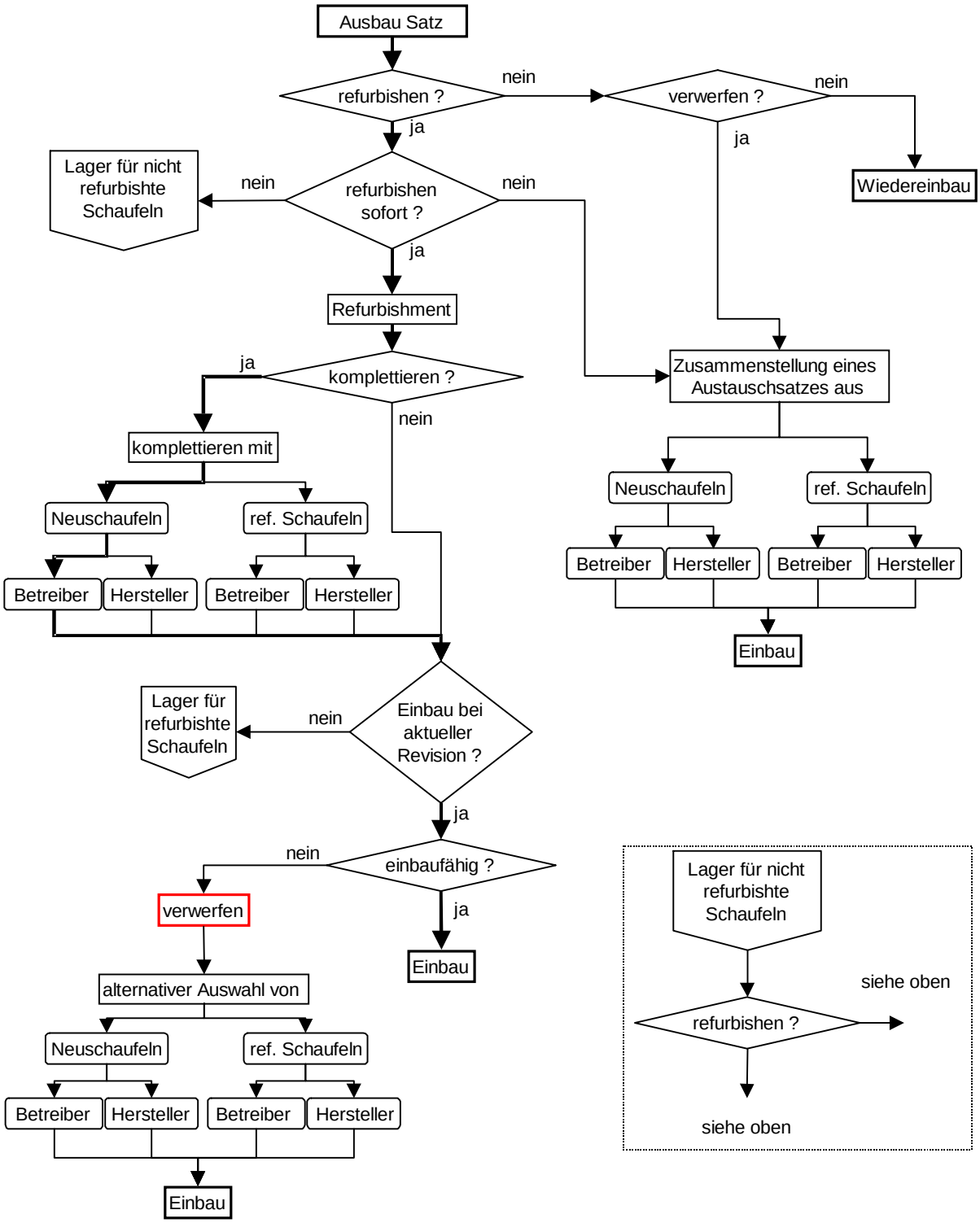
Anlage 13 Verursacher der Block-NV bei VGB (/48/)

KKS	Beschreibung
B	Energieableitung / Eigenbedarfsversorgung
BA	Energieableitungen
C	Anlagen der Leittechnik
E	konventionelle Brennstoffversorgung
EG	Versorgung mit flüssigen Brennstoffen
H	konventionelle Wärmeerzeugung
HA	Drucksystem
HF	Bunker-, Zuteiler- und Mahlanlagen
HH	Hauptfeuerung
HL	Verbrennungsluftsystem
HN	Rauchgasabführung
HY	Steuer-, Regel- und Schutzeinrichtungen
L	Dampf-, Wasser- und Gaskreisläufe
LA	Speisewassersystem
LB	Dampfsystem
M	Hauptmaschinensätze
MA	Dampfturbinenanlage
MB	Gasturbinenanlage
MK	Generatoranlage
P	Kühlwasseranlagen
PA	Hauptkühlwassersytem
S	Nebenanlagen
SB	Heizungsanlagen
SG	stationäre Brandschutzsysteme

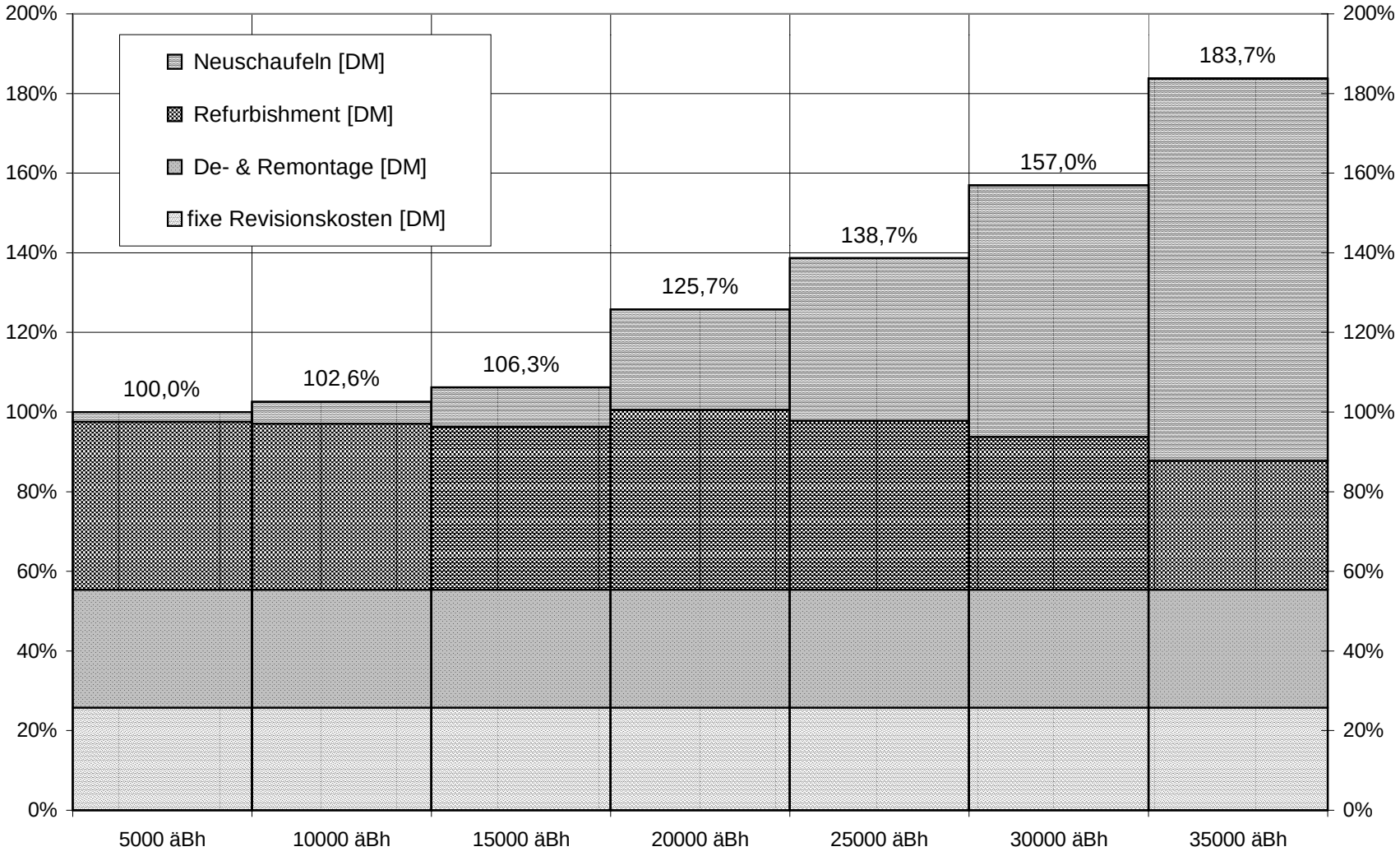
Anlage 14 Problemanalyse des V64.3-Projektes



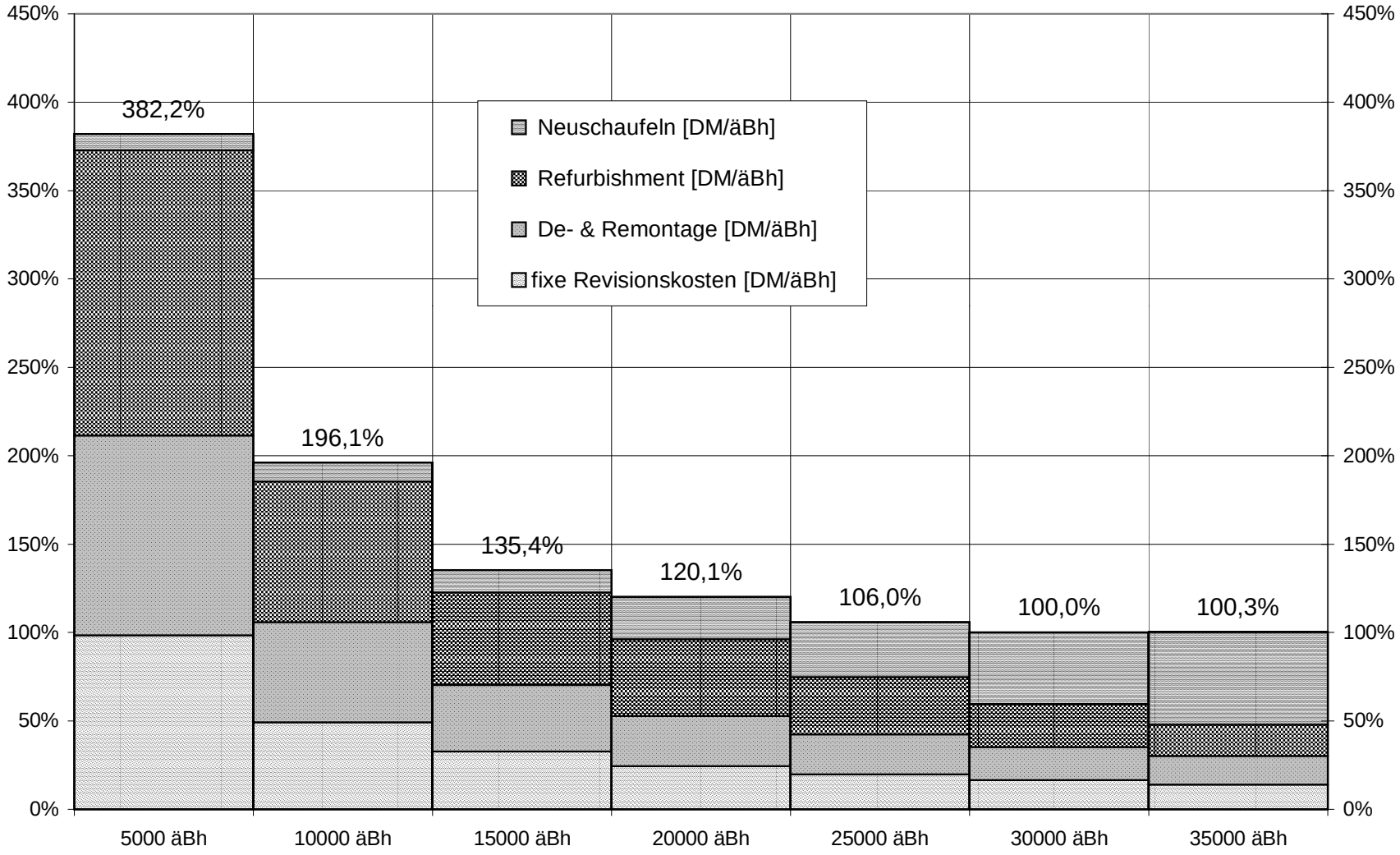
Anlage 15 Optionen für Schaufelaus- und einbau



Anlage 16 Verlauf der absoluten Kosten (MP)



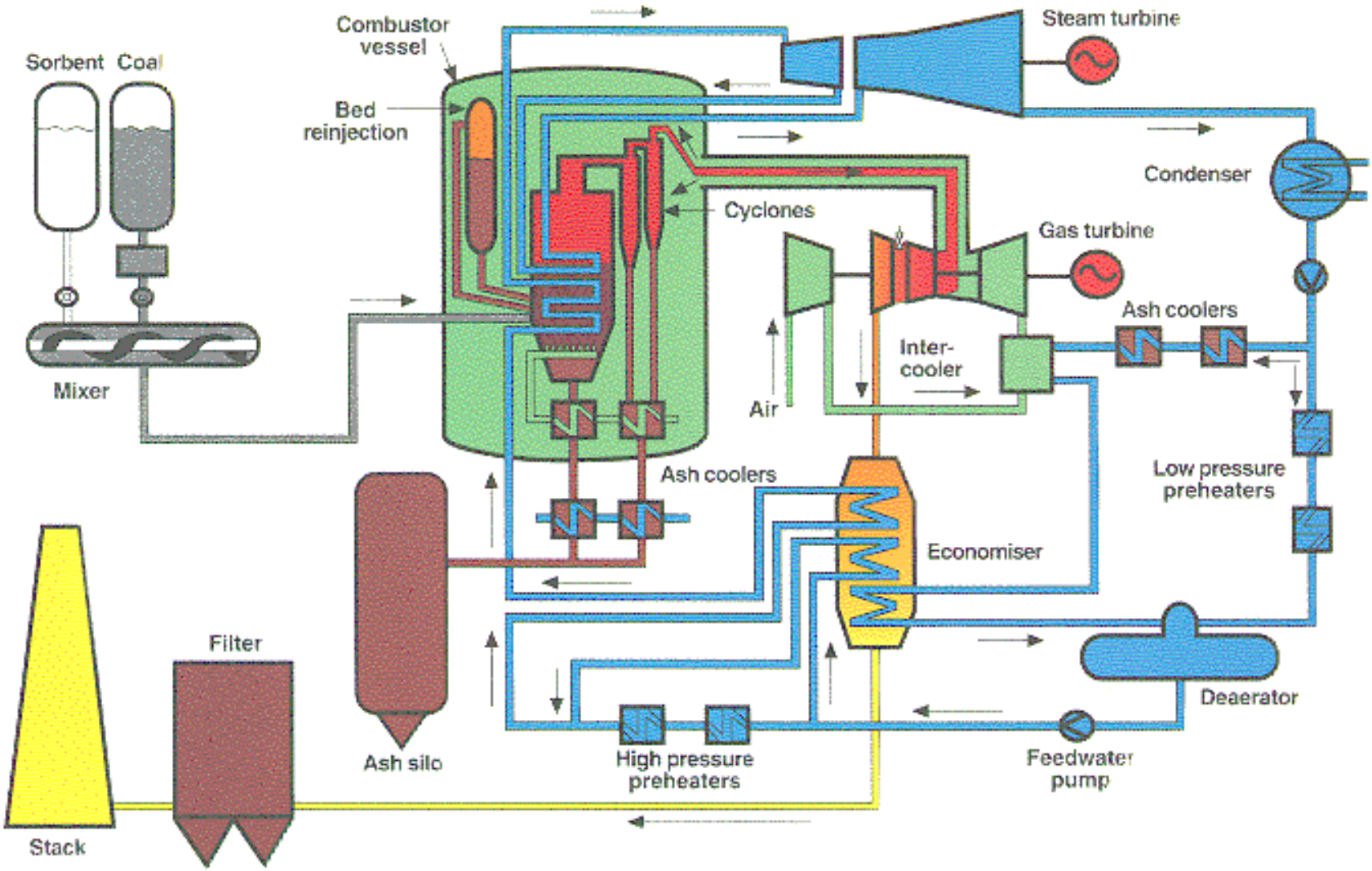
Anlage 17 Verlauf der spezifischen Kosten (MP)



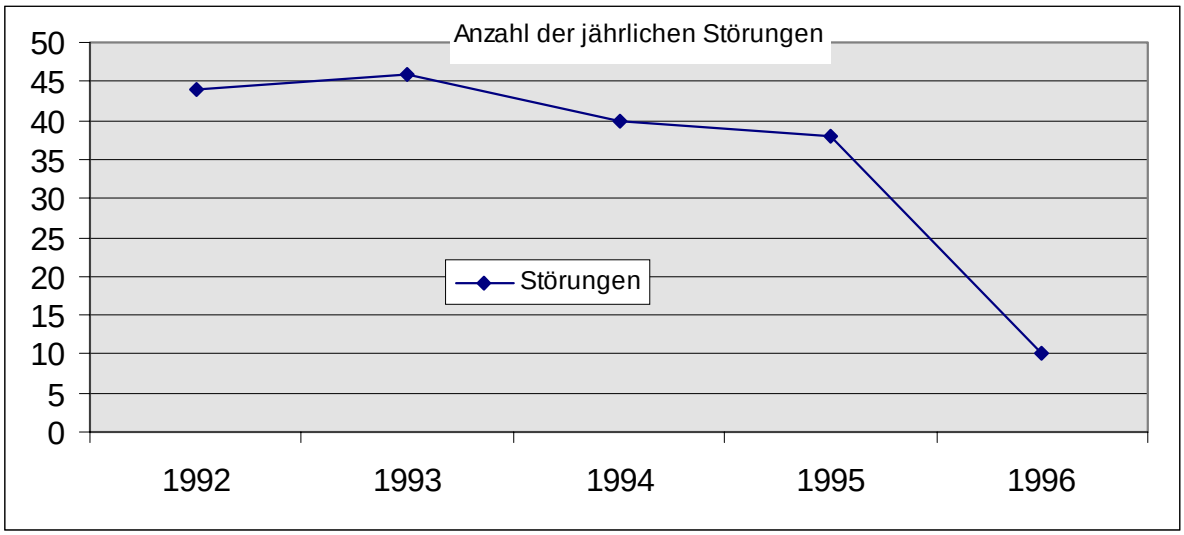
Anlage 18 Schaufelmanagement – Beispiel für TLe1

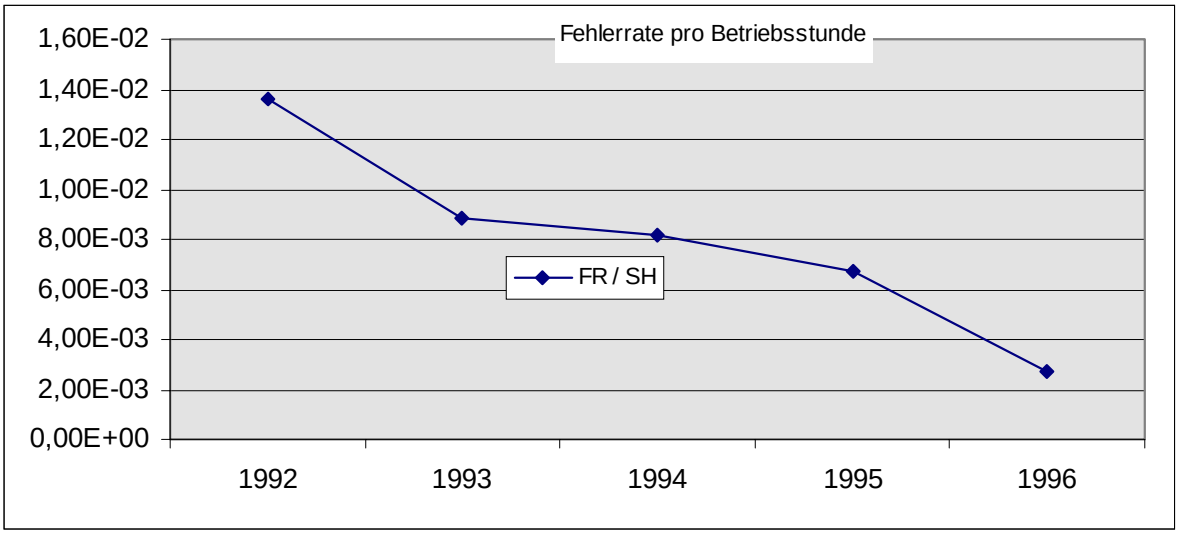
VM1 - TLe1 90																						
Jahr		**2000**						**2001**				**2002**				**2003**						
				03/2000		ca. 05/2000		05/2001		07/2001		05/2002				ca. 07/2003		ca. 08/2003		ca. 09/2003	
Bemerkungen				ca. 70 Stk. o.k.		refurb.		"Rekontur"		"Rainbow"		RT-Tausch (278 vs. 251)				refurb.		refurb.		refurb.	
Instandhaltungs-Maßnahme				TLe1-Wechsel 243				HTR 243		HTR 232		Ausbau 278 - Einbau 251		Revision 278							
äBh-Gasturbine					34614				43536		45028		22500		22500						
Ausbau von: äBh$_{SS}$ (äBh$_{GM}$)				70	13351			90	8702	90	21086			90	22500						
Einbau von: äBh$_{SS}$ (äBh$_{GM}$)				90	0			90	0 (?)	90	0	90	0	84	0 (10000)						
														6	0						
Refurbishment																						
äBh der Schaufeln						90	10000									90	22500	90	21086	70	13351
scrap rate [%]							7										32		27		9
refurb.Stk.							84										61		66		64
Sätze neu																					
refurbishte (und komplettierte) Sätze						84	0 (10000)	84	0 (10000)	84	0 (10000)	84	0 (10000)	84	0 (10000)	61	0 (22500)	61	0 (22500)	61	0 (22500)
						6	0	6	0	6	0	6	0	6	0	29	0 (0)	29	0 (0)	29	0 (0)
																		61	0 (21086)	61	0 (21086)
																		29	0 (0)	29	0 (0)
																				64	0 (13351)
																				26	0
un-refurbishte Schaufeln														90	22500						
										90	21086	90	21086	90	21086	90	21086				
				70	13351			90	8702	90	8702	90	8702	90	8702	90	8702	90	8702		
		90	10000	90	10000	70	13351	70	13351	70	13351	70	13351	70	13351	70	13351	70	13351	90	8702
refurbishte Schaufeln	A	#	äBh	#	äBh	#	äBh	#	äBh	#	äBh	#	äBh	#	äBh	#	äBh	#	äBh	#	äBh
		19	16500	19	16500	19	16500	19	16500	19	16500	19	16500	19	16500	19	16500	19	16500		
		41	6911	41	6911	41	6911	41	6911	41	6911	41	6911	41	6911	41	6911	41	6911	41	6911
	B	#	äBh	#	äBh	#	äBh	#	äBh	#	äBh	#	äBh	#	äBh	#	äBh	#	äBh		
		15	16500	15	16500	15	16500	15	16500	15	16500	15	16500	15	16500	15	16500	15	16500		
		42	6911	42	6911	42	6911	42	6911	42	6911	42	6911	42	6911	42	6911	42	6911	42	6911
Refurbishment gesamt (inkl. De- & Remontage)							539.752										769.108		719.248		481.992
nur Refurbishment							242.592										176.168		190.608		184.832
für Neuschaufeln							77.160										372.940		308.640		77.160

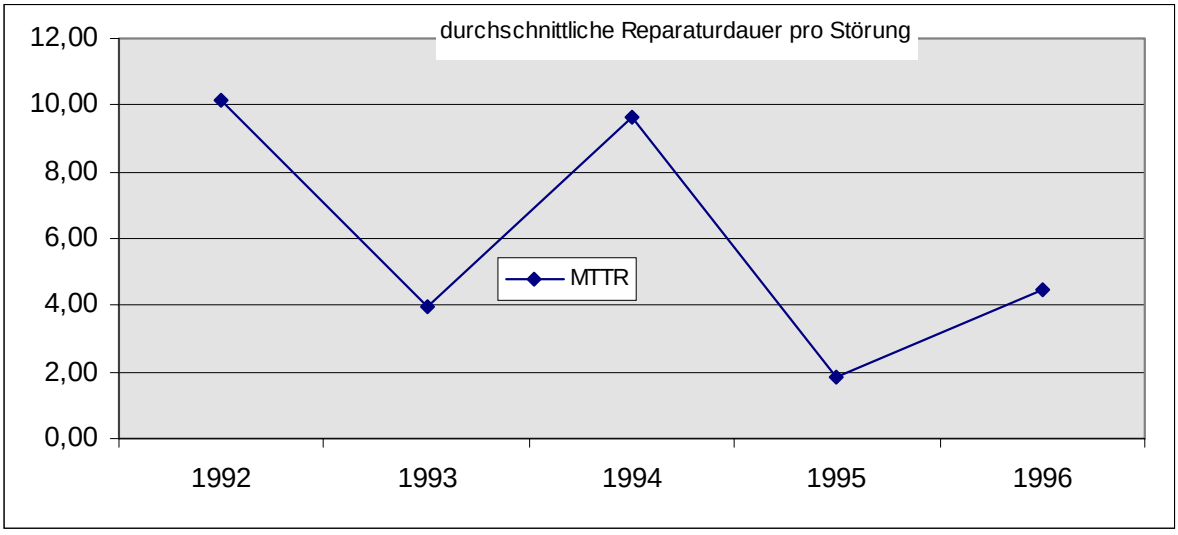
Anlage 19 HKW Cottbus – Schaltbild (aus /74/)



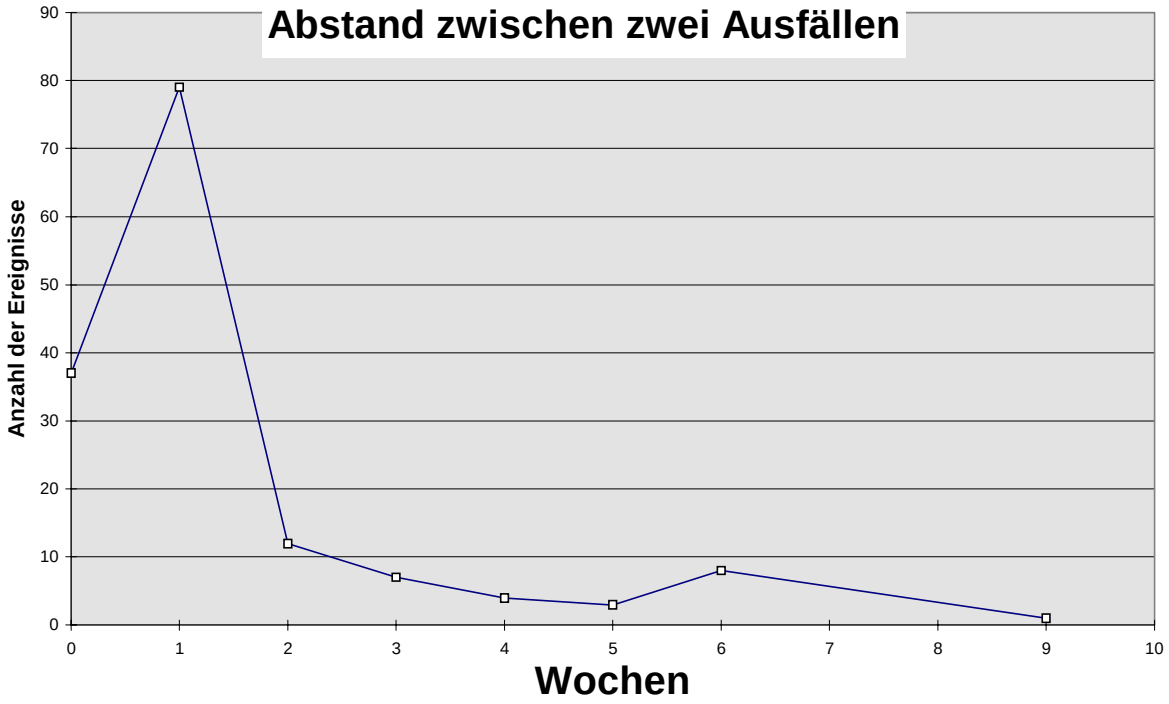
Anlage 20 Beispiel für Auswertung einer bestimmten Baugruppe

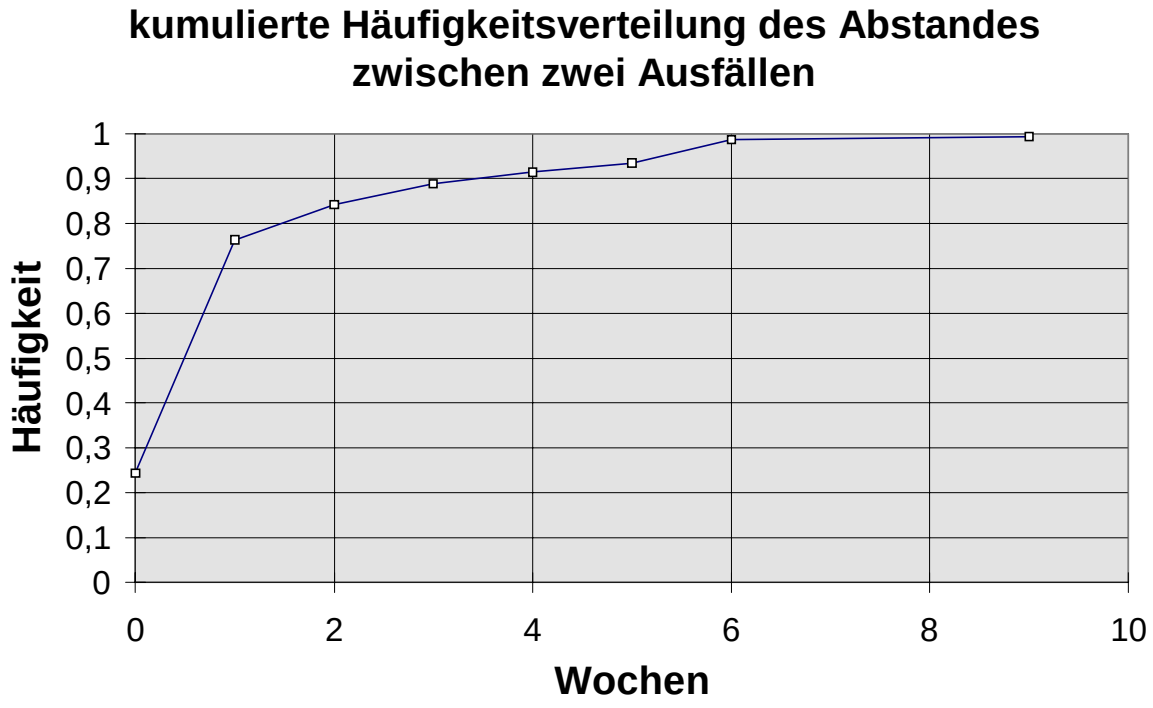




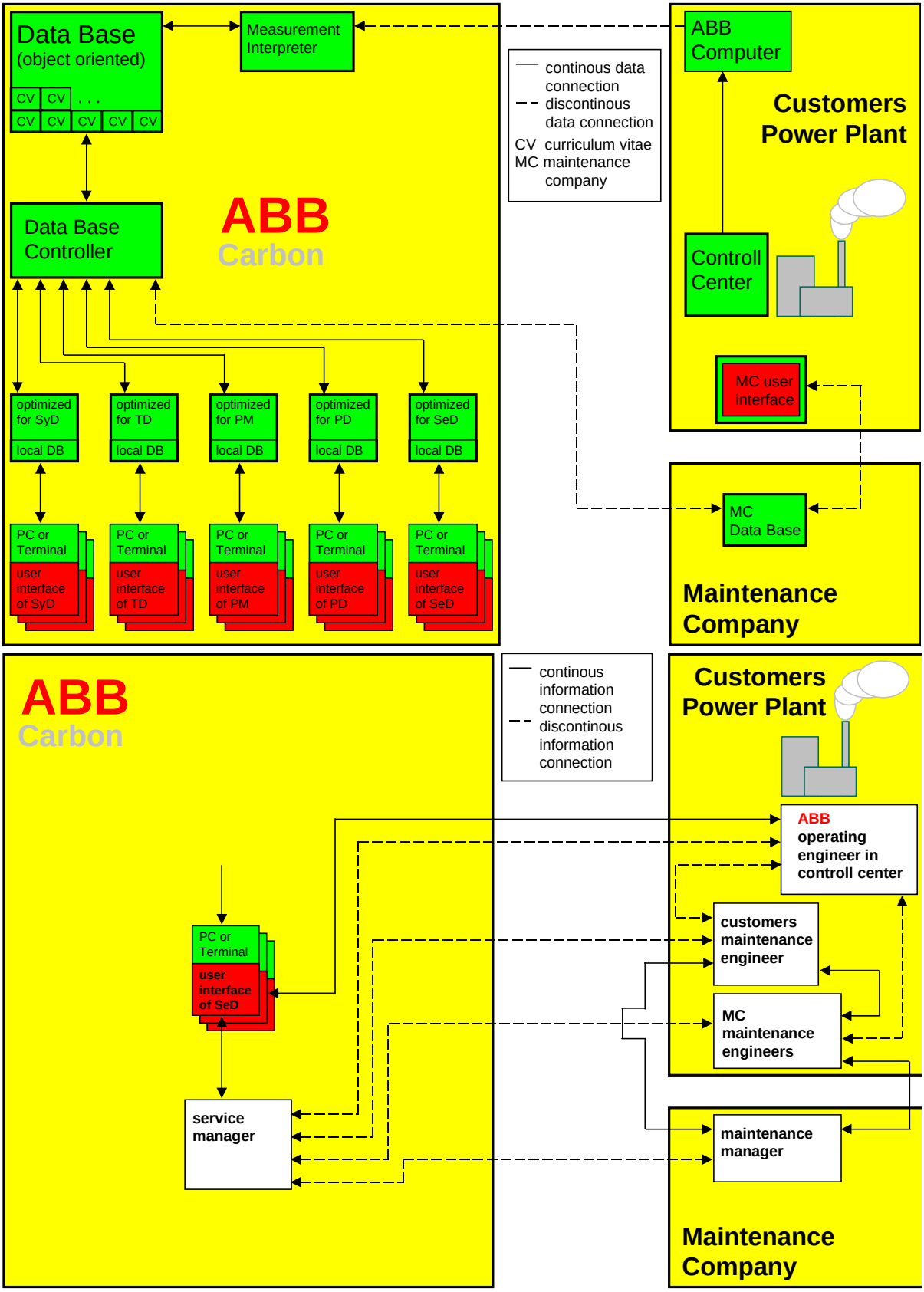


Anlage 21 Beispiel für die Auswertung des Abstands zwischen zwei Ausfällen

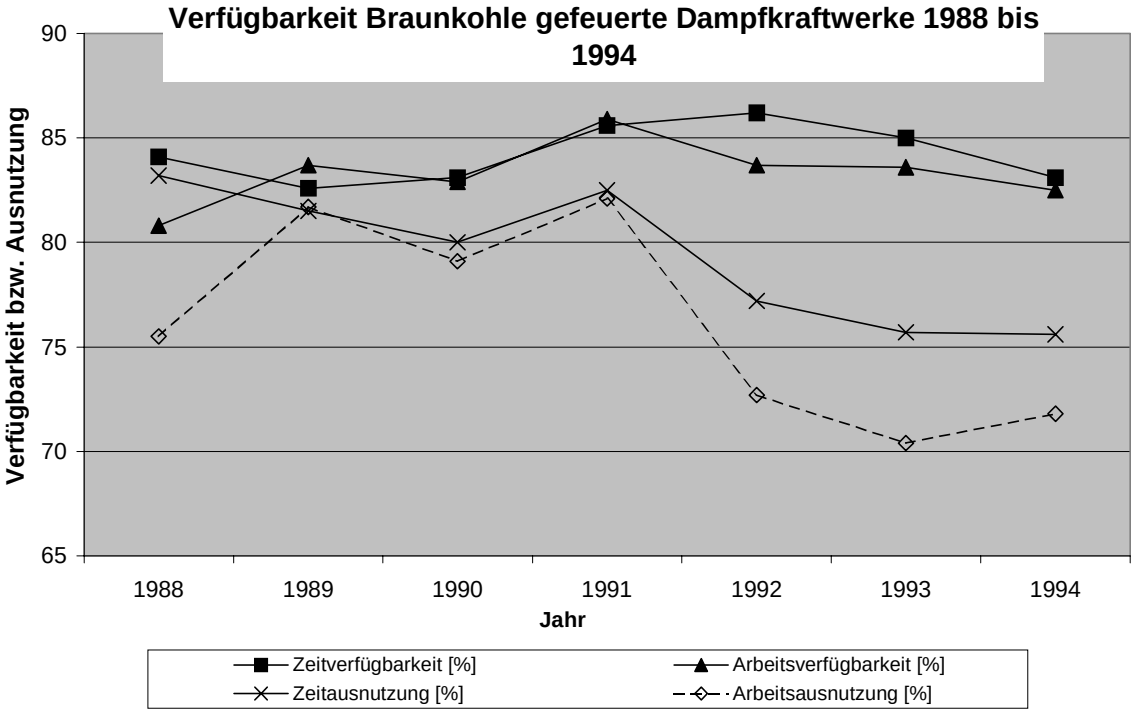


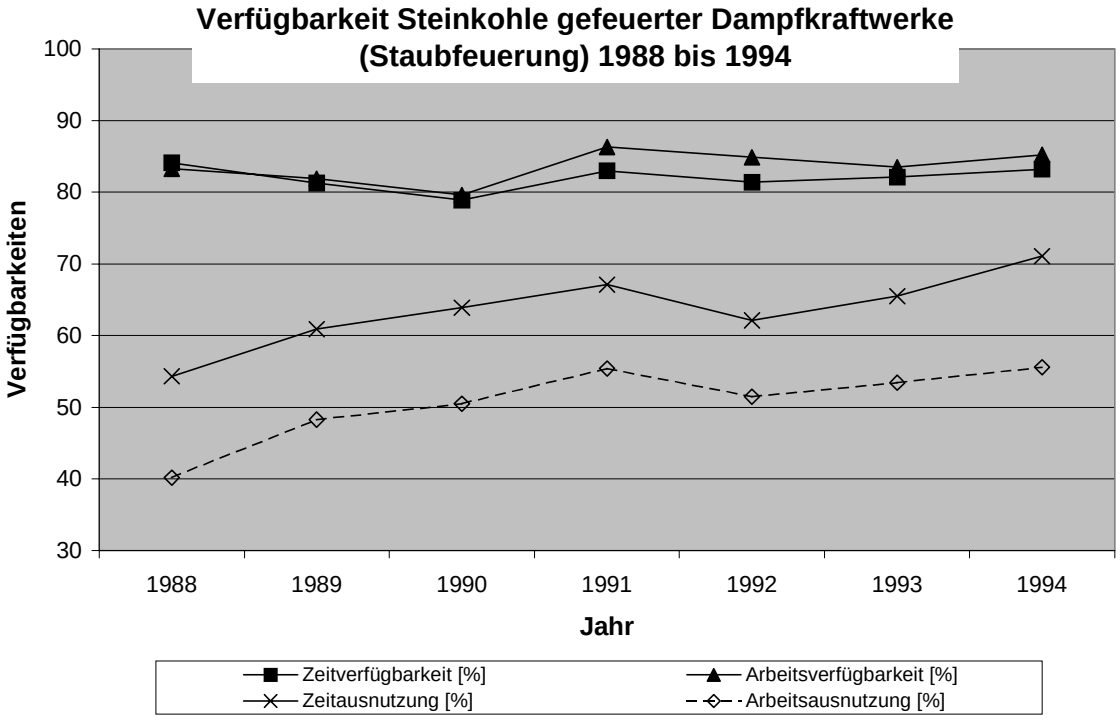


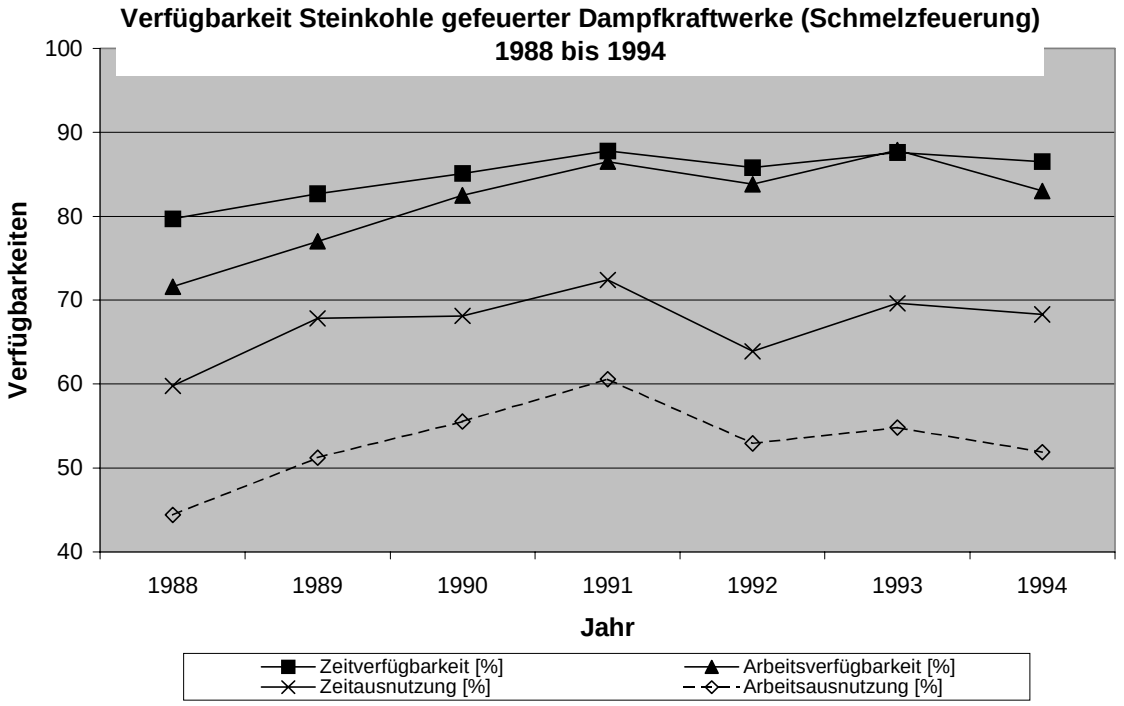
Anlage 22 Strukturierung einer RAM-Datenbank

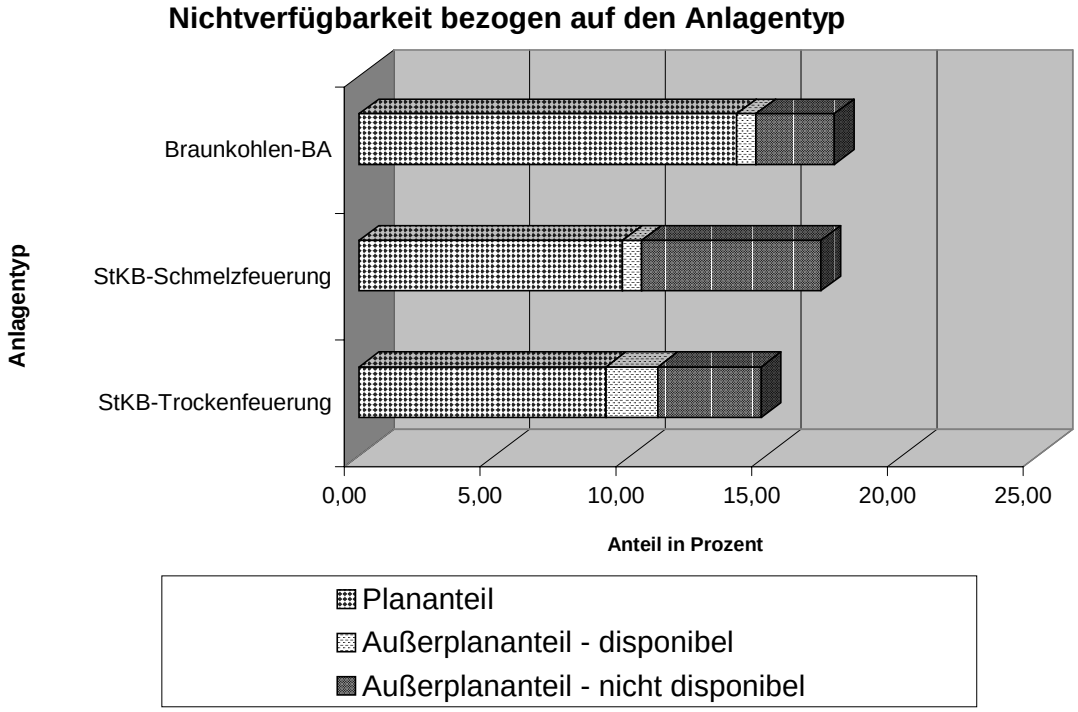


Anlage 23 Ergebnisse des RAM-Benchmarking






Verfügbarkeit Steinkohle gefeuerter Dampfkraftwerke (Schmelzfeuerung)
1988 bis 1994
Verfügbarkeiten
100
90
80
70
60
50
40
1988
1989
1990
1991
1992
1993
1994
Jahr
Zeitverfügbarkeit [%]
Arbeitsverfügbarkeit [%]
Zeitausnutzung [%]
Arbeitsausnutzung [%]


Nichtverfügbarkeit bezogen auf den Anlagentyp
Anlagentyp
Braunkohlen-BA
StKB-Schmelzfeuerung
StKB-Trockenfeuerung
0,00
5,00
10,00
15,00
20,00
25,00
Anteil in Prozent
Plananteil
Außerplananteil - disponibel
Außerplananteil - nicht disponibel

HSSS AdminTools (c) 2001, last visited: Fri Nov 30 10:18:44 GMT+01:00 2001