

Zustandsabhängiges, risikobasiertes Asset-Management in der Energieversorgung

Von der Fakultät
Informatik, Elektrotechnik und Informationstechnik
der Universität Stuttgart
zur Erlangung der Würde eines
Doktor-Ingenieurs (Dr.-Ing.)
genehmigte Abhandlung

vorgelegt von
Jozsef Osztermayer
aus Paks

Hauptberichter: Prof. Dr.-Ing. Dr. h. c. K. Feser
1. Mitberichter: Prof. Dr.-Ing. G. Balzer
2. Mitberichter: Prof. Dr.-Ing. S. Tenbohlen

Tag der mündlichen Prüfung:
05.02.2007

Institut für Energieübertragung und Hochspannungstechnik
der Universität Stuttgart

2007

Vorwort

Die vorliegende Arbeit entstand während meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Energieübertragung und Hochspannungstechnik der Universität Stuttgart.

Meinem Doktorvater, Herrn Professor Dr. -Ing. Dr. h. c. K. Feser, danke ich sehr herzlich für die Anregung zu dieser Arbeit und die ständige Diskussionsbereitschaft während der gesamten Betreuungszeit.

Herrn Professor Dr.-Ing. G. Balzer danke ich für die Bereitschaft, den Mitbericht zu übernehmen.

Dem neuen Leiter des Instituts, Herrn Professor Dr. -Ing. S.Tenbohlen, danke ich für die Hilfsbereitschaft und Diskussionsfreudigkeit.

Den Herren W. Tausend, R. Huber und J. Pfeiffer (EnBW Regional AG) danke ich für ihr wissenschaftliches Interesse an dem Thema dieser Arbeit und für die finanzielle Förderung, welche die Forschung ermöglichte.

Den Kollegen E. Cardillo, R. Wimmer, S. Hoek, H. Rönisch und dem ganzen Werkstattpersonal danke ich für die erfolgreiche Zusammenarbeit an dem Pilotprojekt: Großgartach.

Mein besonderer Dank gilt den Herrn T. Heise und M. Fischer, deren persönliches Engagement während ihrer Diplomarbeit - über die praktische Umsetzung des neuen Ansatzes - zum Gelingen der vorliegenden Arbeit beigetragen hat. Allen hier nicht namentlich erwähnten Studenten und Hilfskräften danke ich ebenfalls für Ihren Beitrag zu meiner wissenschaftlichen Arbeit.

Stuttgart, den 01.10.2006

A handwritten signature in black ink, appearing to read 'Joestermayer', with a large, stylized flourish extending to the left and a circular mark at the end.

"Alles Entbehrliche wirkt nachteilig. Das Gesetz der Einfachheit und Naivität, da diese sich auch mit dem Erhabensten vertragen, gilt für alle schönen Künste."

Arthur Schopenhauer

Inhaltverzeichnis

Abkürzungen und Formelzeichen	7
Zusammenfassung	11
Abstract	13
1. Einleitung	21
1.1 Einführung	21
1.2 Aufgaben des anlagennahen Asset-Managements	22
1.3 Stand der Technik	23
1.4 Aspekte aus der Asset-Management-Praxis bei EVU-s	24
1.5 Ziel der Arbeit und Darstellung der Arbeitsschwerpunkte.....	25
1.5.1 Allgemeine Zielformulierung	26
1.5.2 Konkrete Zielsetzungen.....	26
2. Theoretische Grundlagen zu den angewandten Basisdisziplinen	29
2.1 Budgetierung und Abschreibung als Rückgrat des Asset-Managements.....	29
2.1.1 Historische Entwicklung der Budgetplanungsmethoden	30
2.1.2 Abschreibung im Bereich des technischen Anlagenvermögens	31
2.1.2.1 Traditionelle Abschreibung.....	32
2.1.2.2 Zustandsbasierte Schätzung der kalkulatorischen Abschreibung	33
2.2 Beherrschen von Unsicherheiten durch Risikomanagement	34
2.2.1 Erwartungsstrukturen bezüglich zukünftiger Ereignisse.....	34
2.2.2 Risikomanagement mittels Erwartungskosten	36
2.2.3 Risikomanagement mittels zweckmäßig gebauter Risikovektoren.....	37
2.3 Regelbasierte Expertensysteme und die Fuzzy-Logik	39
2.3.1 Expertensystem für die Zustandsdiagnose und seine Anwendung	40
2.3.2 Theoretische Grundlagen zur Fuzzy-Logik	40
2.3.2.1 Begriff und Darstellungsform unscharfer Mengen	40
2.3.2.2 Operationen auf unscharfen Mengen.....	42
2.3.2.3 Fuzzy-Relationen zur Abbildung von Fuzzy-Regeln	43
2.3.2.4 Fuzzy-logisches Schließen anhand einer Relationsmatrix	44
2.3.2.5 Zustandsbeurteilung des Isolieröls eines Transformators	45

2.3.3	Beispiel für die Anwendung der Ergebnisse der Zustandsdiagnose	46
2.4	Zielkostenrechnung als theoretischer Hintergrund für den neuen Ansatz	47
2.4.1	Zielkostenrechnung	47
2.4.2	Bildung einer Anlagenhierarchie	49
2.4.2.1	Hierarchiebildung anhand der Erkenntnisse aus der Zielkostenrechnung	49
2.4.2.2	Assethierarchie-Bildung am Beispiel eines Umspannwerkes	49
2.4.2.3	Aggregation von Zustandskennzahlen	50
2.4.2.4	Verknüpfung des Fuzzy-Moduls mit dem der Systemhierarchie ..	53
2.5	Berechnung der Ausfallwahrscheinlichkeit durch die Fehlerbaumanalyse	54
2.5.1	Modellierung des Ausfallverhaltens eines Betriebsmittels	54
2.5.2	Zuverlässigkeit als Komplement zur Ausfallwahrscheinlichkeit	55
2.5.3	Bedeutung der Ausfallwahrscheinlichkeitsberechnung für diese Arbeit ..	55
3.	Die Säulen der Zustandsüberwachung	56
3.1	Zustandsüberwachungsphilosophie für das Asset-Management-Konzept	56
3.1.1	Einführung von Alterungstypen	57
3.1.2	Überwachungsdimensionen für die Zustandsverfolgung	58
3.2	Zustandsbeurteilung durch Monitoring und Diagnose	59
3.3	Entscheidungsorientierte Anwendung der Überwachungsphilosophie	59
4.	Fallbeispiel zur Entscheidungsfindung für Leistungstransformatoren	60
4.1	Definition der Aufgabenstellung	61
4.2	Die Randbedingungen zur Lösungsfindung	61
4.2.1	Bestimmung des aktuellen Zustandsverschlechterungsgrades	61
4.2.2	Bestimmung der aktuellen Wichtigkeit von einzelnen Anlagen	62
4.3	Der methodischer Ansatz zur Lösung der Aufgabenstellung	63
4.3.1	Risikoindikator zur Prioritätsbestimmung	63
4.3.2	Auslastungskoeffizient zur Manipulation der Basiswichtigkeit	63
4.3.2.1	Anforderungen an den Auslastungskoeffizient	64
4.3.2.2	Definition und Berechnung des Auslastungskoeffizienten	64
4.3.2.3	Beispielberechnung für den Auslastungskoeffizient	65
4.3.3	Kennzahlbildung für das ersatzbedingte finanzielle Risiko	66
4.4	Anwendungsbeispiele gemäß der Aufgabenstellung	67
4.4.1	Bedingungen und Ablauf der Ersatzprioritäts-Analyse	67

4.4.1.1	Strukturierung von Analysedaten.....	67
4.4.1.2	Analyse für Alterungsmodellkombinationen.....	68
4.4.1.3	Visualisierung und Deutung der Analyseergebnisse.....	71
4.4.2	Berechnung des ersatzbedingten finanziellen Risikos.....	73
4.4.3	Restlebensdauerabschätzung durch Abweichungsanalyse.....	74
4.5	Praktische Schlussfolgerungen zur Risikostrukturanalyse.....	76
5.	Ansatz zur Analyse eines Leistungsschalterportfolios.....	77
5.1	Quantifizierung des ersatzbedingten finanziellen Risikos.....	77
5.1.1	Definition des Risikobegriffes bezüglich des Ersatzes.....	78
5.1.2	Berechnung des maximalen monetären Schadens beim Ersatz.....	78
5.1.3	Berechnung der zustandsbasierten Ersatzwahrscheinlichkeit.....	79
5.1.3.1	Definition für die Ersatzwahrscheinlichkeit.....	80
5.1.3.2	Problemanalyse.....	80
5.1.3.3	Lösungsansatz.....	81
5.1.4	Bestimmung der Erwartungskosten des Gesamtverlustes.....	81
5.1.5	Schwerpunktanalyse mittels des ersatzbedingten finanziellen Risikos.....	82
5.2	Risikoverfolgung aus der Sicht der technischen Betriebsführung.....	82
5.2.1	Risikoverfolgung bis auf Betriebsmittelebene.....	82
5.2.2	Risikoverfolgung auf Systemebene.....	83
5.3	Unterstützung der Ersatzstrategiefindung.....	83
5.4	Unterstützung der Strategiefindung für die Instandhaltung.....	83
5.5	Zustandsbasierte Berechnung der kalkulatorischen Abschreibung.....	84
6.	Anwendungsbeispiel für die Leistungsschalterportfolio-Analyse.....	85
6.1	Zustandsbeurteilung mittels Fuzzy-Logik.....	86
6.1.1	Aufstellung eines Simulationsmodells.....	87
6.1.2	Die Darstellung der Fuzzy-Abbildung.....	87
6.1.2.1	Fuzzifizierung.....	88
6.1.2.2	Fuzzy-Inferenz.....	90
6.1.2.3	Verifizierung der gewählten Modell-Konfiguration.....	91
6.2	Zustands- und Abschreibungsberechnung in der Anlagenhierarchie.....	92
6.2.1	Das erarbeitete Berechnungsverfahren in Beispielen.....	92
6.2.1.1	Die Methode der hierarchischen Zustandsverfolgung.....	93

6.2.1.2 Berechnung der kalkulatorischen Abschreibung in der Anlagenhierarchie	95
6.2.1.3 Vorteile der hierarchischen Zustandsüberwachungsmethode	96
6.3 Schätzung der Ersatzwahrscheinlichkeit eines Leistungsschalters	97
6.3.1 Aufbereitung von Eingangsgrößen und der Ausgangsgröße	97
6.3.2 Darstellung der Wissensbasis durch Produktionsregeln	98
6.4 Analyse des ersatzbedingten finanziellen Risikos im Anlagenportfolio	99
6.4.1 Beschreibung der ABC-Analyse	99
6.4.1.1 Vorgehensweise bei der Durchführung der Analyse	99
6.4.1.2 Darstellung der Schwerpunktanalyse	101
6.4.1.3 Auswertung der Analyse	101
6.5 Indikator für die geschätzte Ausfallwahrscheinlichkeit	102
6.5.1 Aufstellung des Fehlerbaumes und des Blockschaltbildes	102
6.5.2 Berechnung der Ausfallwahrscheinlichkeit eines Leistungsschalters	103
6.5.2.1 Grenzbedingungen	103
6.5.2.2 Iterative Funktionsanpassung	103
6.5.2.3 Sensitivitätsanalyse für die zustandsbasierte Weibullverteilung	104
6.5.2.4 Beispielberechnung für die Ausfallwahrscheinlichkeit	105
6.6 Einsatz von Indikatoren zur Entscheidungsunterstützung	107
6.6.1 Risikoüberwachung aus finanzieller- und technischer Sicht	107
6.6.1.1 Simulation auf Systemebene	108
6.6.1.2 Deutung des zeitlichen Verlaufes von Indikatoren	109
6.6.1.3 Simulation auf der Ebene von überwachten Einheiten	109
6.6.2 Strategiefindung für Ersatz und Instandhaltung	110
6.6.2.1 Bestimmung der Ersatzstrategie	111
6.6.2.2 Ansatz zur risikobasierten Instandhaltung	114
7. Schlussfolgerungen	117
8. Anmerkungen und Ausblick	118
9. Anhang	120
10. Literatur	123

Abkürzungen und Formelzeichen

Allgemeine mathematische Bezeichnungen und Schreibweisen:

$:=$	definitionsgemäß gleich
\in	ist Element von
\notin	ist nicht Element von
\sum	Summenoperator
\prod	Produktoperator
$\int_a^b f(x) dx$	bestimmtes Integral
\cup	vereinigt mit
\cap	geschnitten mit
\forall	für alle
min	Minimumoperator
max	Maximumoperator
{...}	Mengenklammern
\circ	Verknüpfungsoperator zur Bildung einer Fuzzy-Relation
A	Menge A
\vee	steht für Boolesche Funktion ODER
\wedge	steht für Boolesche Funktion UND
x	Boolesche Variable für Funktionsfähigkeit
\bar{x}	Boolesche Variable für Funktionsausfall
$\rightarrow [0,1]$	aus dem mit 0 und 1 abgeschlossenen Intervall
$(y(x_i); x_i)$	Wertepaar zur Darstellung einer diskreten Fuzzy-Menge

Formelzeichen:

A_L	jährlicher Abschreibungssatz nach linearer Abschreibung
W	Wiederbeschaffungswert am Ende der geplanten Nutzungsdauer
RW	geschätzter Restwert am Ende der geplanten Nutzungsdauer
$ZW_L(t)$	Zeitwert der Anlage gemäß der linearen Abschreibung
KA(t)	aktueller Wert der kalkulatorischen Abschreibung
ZW(t)	Zeitwert der Anlage gemäß der kalkulatorischen Abschreibung
MW(t)	geschätzter Marktwert gemäß der kalkulatorischen Abschreibung

H_i	Erfüllungsgrad der i -ten Beurteilungsregel
y_{res}	Flächenschwerpunkt der resultierenden Ausgangs-Fuzzy-Menge
KZK_k	Zielkosten der k -ten Produktkomponente
FB_0	Funktionsbeitrag zum Installationsbeginn (<i>fehlerfreier Zustand</i>)
FB_t	Funktionsbeitrag zum aktuellen Zeitpunkt
\bar{y}	Ausfallereignis eines Betriebsmittels
$P_a(t)$	Ausfallwahrscheinlichkeit eines Betriebsmittels
$P_k(t)$	zustandsbasiert geschätzte Ausfallwahrscheinlichkeit der k -ten Betriebsmittelkomponente
$R(t)$	Überlebenswahrscheinlichkeit bzw. Zuverlässigkeit
ZVG_{max}	dominierende Zustandsverschlechterung unter Alterungstypen
TR	vektorbasierter Risikoindikator
W	relative Wichtigkeit einer Anlage in der Anlagegruppe
W_B	Basiswichtigkeit einer Anlage in der Anlagegruppe
$ALK(t)$	Auslastungskoeffizient der Anlage auf Prognosebasis
g	Gewichtsparemeter für die Anlagewichtigkeit
$S(t)$	Zeitfunktion für Transformatorplanlast
S_n	Nennleistung eines Transformators
$LF(t)$	Zeitfunktion für den prognostisierten Lastfaktor
$EK(t)$	Zeitfunktion für Erwartungskosten
P_{er}	zustandsbasiert geschätzte Ersatzwahrscheinlichkeit der Anlage
FR_{GR}	finanzielles Risiko auf der Hierarchieebene „Betriebsmittelgruppe“
T_{ZRLD}	zustandsbasierte Restlebensdauer

Abkürzungen:

AM	Asset-Management
BE	Bauelementebene in der Anlagenhierarchie
BG	Betriebsmittelgruppenebene in der Anlagenhierarchie
BM	Betriebsmittelebene in der Anlagenhierarchie
BP	Beschaffungskosten zu Beginn der Inbetriebnahme
BT	Bauteilebene in der Anlagenhierarchie
BÜAM	bereichsübergreifendes Asset-Management
BZ	Bezeichnung

CO	Kohlenmonoxid
CO ₂	Kohlendioxid
D	Depreciation (deutsch: Zustandsverschlechterung)
DS	Durchschlagspannung des Isolieröls
engl.	englisch
EnWG	Energiewirtschaftsgesetz
ERK	Errichtungskosten bezogen auf den Zeitpunkt der ersten Inbetriebnahme
ERK _{BD}	Errichtungskosten zur aktuellen Betriebsdauer
EVU	Energieversorgungsunternehmen
FA	fehlerbedingte Alterung
FMEA	Fehler-Möglichkeiten- und Einfluss-Analyse
FTA	Fehlerbaumanalyse (<i>engl. Fault Tree Analysis</i>)
FÜAM	funktionsübergreifendes Asset-Management
FZ	Farbzahl des Isolieröls
GIS	Gasisolierte Schaltanlage
Gl.	Gleichung
H ₂	Wasserstoff
HBBP	historiebasierte Budgetplanung
i.e.S.	im engeren Sinne
i.w.S.	im weiteren Sinne
IR	Inflationsrate
IT	Informationstechnik
LAM	lokales Asset-Management
LS_1	Leistungsschalter mit Kennzeichen 1
MG	Messgröße
NA	natürliche Alterung
ND	Nutzungsdauer
RF	Reihenfolge
RB&FÜAM	risikobasiertes und funktionsübergreifendes Asset-Management
SC C1	Arbeitsgruppe zum Asset-Management bei CIGRE
SAP/R3/PM	Software-Applikation für Instandhaltungsmanagement
ST	Stationsebene in der Anlagenhierarchie
T _δ	Verlustfaktor des Isolieröls
T _{BD}	Betriebsdauer zum aktuellen Zeitpunkt
T _{GLD}	geplante Lebensdauer
T _{GRLD}	geschätzte Restlebensdauer
T _{IB}	Zeitpunkt der ersten Inbetriebnahme der Anlage

TE	Teilentladung
TR_1	Transformator mit Kennzeichen 1
ÜE	überwachte Einheit
vgl.	vergleiche
z.B.	zum Beispiel
ZBBP	zerobasierte Budgetplanung
ZK	Zielkosten
ZVG	Zustandsverschlechterungsgrad

Zusammenfassung

Für die vorliegende Arbeit versteht man unter risikobasiertem und funktionsübergreifendem Asset-Management (RB&FÜAM) die risikobewusste Verwaltung von technischen Anlagen während ihrer gesamten Lebensdauer. Die konkrete Aufgabe ist dabei, die betriebsmittelrelevanten Aktivitäten zeitlich und inhaltlich funktionsübergreifend so zu koordinieren, dass die strategischen Unternehmensziele bei minimalen Anlagenkosten erreicht werden können. In der Tat geht es um die optimale Geldmittelallokation unter den Kernprozessen des Unternehmens, welche die Vernetzung von aktuellen risikorelevanten Informationen über das gesamte Anlagenportfolio voraussetzt.

Die wesentlichen Nachteile der traditionellen Asset-Management Ansätze lassen sich wie folgt zusammenfassen:

- Die Ursache-Wirkungskette zwischen den risikorelevanten Anlagendaten und der zugehörigen prozesscharakterisierenden Zielkennzahl (z.B. *Instandhaltungsbudget*) ist für Entscheidungsträger nicht transparent. Der Koordinationsaufwand und die Prozessdurchlaufzeit für die Entscheidungsunterstützung ist unverhältnismäßig groß.
- Die rechnergestützte Überwachung von betriebswirtschaftlichen Prozessindikatoren, die ihrerseits vom Anlagenzustand abhängig sind, ist wegen mangelnder Methodenkompetenz für die Informationsverzahnung nicht möglich.

Um diese Unzulänglichkeiten zu eliminieren, wurde der vorliegende Ansatz entwickelt. Hierbei wird der Anlagenzustand mittels Fuzzy-Logik anhand von aktuellen zustandsrelevanten Messgrößen der fehleranfälligen Anlagenkomponenten online geschätzt und die monetären Konsequenzen des Anlagenzustandes in Form eines Katalogs für Instandhaltungsszenarien formalisiert. Das von den fehlerbehafteten Anlagenkomponenten bzw. der Anlage ausgehende Risiko wird dabei durch den monetären Erwartungswert für die Durchführung eines dem aktuellen Zustand angemessenen Instandhaltungsszenarios berechnet. Als Alternative zur erwähnten Beschreibung des Risikos mit Erwartungswert kann auch die vektorbasierte Methode eingesetzt werden. In diesem Fall wird das Risiko durch die lineare Kombination des Zustandes und der Wichtigkeit der jeweiligen Betrachtungseinheit abgebildet.

Mit der Erarbeitung einer Überwachungsphilosophie wollte man ein allgemeingültiges Muster bereitstellen, das durch Zuschneiden an die jeweilige Aufgabenstellung angepasst werden kann. Dieses Muster ermöglicht die Anlageüberwachung für zwei Alterungstypen (*natürliche Alterung und fehlerbedingte Alterung*) in zwei Überwachungsdimensionen (*Zustandsfortschritt und Alarm*) auszuführen. Mit der Einführung des natürlichen Alterungstypus unterstützt man die lückenlose Anlagenüberwachung für den Fall, dass noch kein fehlerbedingtes Alterungsphänomen zu erkennen ist. Für Leistungstransformatoren mit einer natürlich alternden organischen Komponente wie die Öl-Papierisolierung ist diese Art der Überwachung von großer Bedeutung.

Nachdem der neue Ansatz durch die theoretische Behandlung der relevanten Basisdisziplinen fundiert wurde, wird die Anwendung der erarbeiteten Methode in zwei Fallbeispielen demonstriert. Während im Beispiel bezüglich einer Gruppe von Leistungstransformatoren die vektorbasierte Risikoanalyse eine Anwendung findet, wird

das zustandsbedingte Risiko in der Analyse für ein Leistungsschalterportfolio mittels Bildung von entsprechenden Erwartungswerten abgebildet.

Gemäß den Forderungen in der Praxis wurde die verursachungsgerechte Zusammenführung der Zustandsverschlechterung von Betriebsmittelkomponenten durch einen adäquaten Algorithmus, basierend auf der Theorie der Zielkostenrechnung, gelöst. Die Berechnungsvorschrift ermöglicht den Zustandsverschlechterungsgrad jeder Komponente einer zweckmäßig aufgebauten Anlagenhierarchie zu berechnen und damit die Überwachung des Zustandsfortschrittes jeweils auf die zeitliche Verfolgung einer einzigen Zustandskennzahl zu reduzieren. Diese Möglichkeit gewinnt an Bedeutung beim Aufsteigen in der Systemhierarchie. Weil die Kennzahlabbildung durchgängig formalisiert ist, bietet der Ansatz umfassende Möglichkeiten auch für die Ursachenforschung.

Da die weiteren Algorithmen für die anlagencharakterisierenden Indikatoren wie:

- Anlagenpriorität für Ersatzinvestition
- Ausfallwahrscheinlichkeit einer Betriebsmittelkomponente
- finanzielles Risiko für Ersatz bzw. Instandhaltung
- Priorität für Instandhaltung

auf dem relevanten Wahrscheinlichkeitswert für Ersatz, Ausfall und Durchführung des aktuellen Instandhaltungsszenarios basieren, wird der Übergang vom aktuellen Zustandsverschlechterungsgrad zu den erwähnten Wahrscheinlichkeiten diskutiert.

Mit Hilfe des vorgestellten Ansatzes, dessen Umsetzung durch ein modular aufgebautes Simulink-Modell getestet wurde, kann man eine fundierte Entscheidungsunterstützung für die folgenden Kernprozesse online zur Verfügung stellen:

- Budgetierung von Instandhaltungskosten
- Budgetierung von Kosten für Ersatzinvestitionen
- zustandsbasierte Schätzung der Restlebensdauer einer Anlage

Die nachstehenden Analysemöglichkeiten ergeben sich durch das AM-Modell:

- kontinuierliche Risikostrukturanalyse im selektierten Anlagenportfolio
- Simulation der Auswirkungen von geplanten risikominimierenden Maßnahmen auf unterschiedlicher Ebene der Anlagenhierarchie
- trendbasierte Prognose für die Kennzahlen anhand historischer Daten
- komponentenbezogene Archivierung von Wissen über die noch nicht vollständig erforschten Fehlermechanismen in Form von Beurteilungsregeln

Um die Praxistauglichkeit des vorgestellten Konzeptes zu demonstrieren, wurden die wichtigsten Anlagengruppen eines jeden Energieversorgungsunternehmens (die Leistungstransformatoren und die Leistungsschalter) jeweils einer Beispielanalyse zu Grunde gelegt. In diesem praktischen Teil der Abhandlung wurde großer Wert auf die Schritt für Schritt Darstellung der Applikation der Fuzzy-Folgerungstechnik und auf die Visualisierung der Analyseergebnisse gelegt. Diese sollen die Akzeptanz des Ansatzes sowohl bei den Entscheidungsträgern als auch beim technischen Servicepersonal sicherstellen.

Abstract

Introduction

The approach for management of capital assets, also known as fixed assets, has undergone dramatic changes since the liberalisation of energy market. Due to the cost saving pressure the electric utilities require an improvement in the ability to effectively target assets relevant capital and operational expenditure.

Asset managers need reliable online methods supporting the decision making process in order to deliver maximal added value at acceptable risk exposure caused by assets deterioration. The basic requirements according to this methods are simplicity, transparency and conformance with human reasoning. Moreover, the new methods should provide a computer based decision support for the most important decision situations like setting up budget for replacement and budgeting the cost of maintenance. The decision support is especially important for electrical equipments like power transformers and circuit breakers showing up high complexity.

Despite the substantial effort made by utilities, in course of implementing the reliability centered maintenance paradigm, the goal to maximize the Return on Assets (ROA) is not yet achieved. The reasons are insufficient modelling of the equipment aging phenomena and the lack of demand oriented condition reporting to different levels in the organization. Asset management models applied until now fail to deal with the stochastic character of equipment condition development, because they neither involve the condition relevant monitoring data on online basis nor are able to process equipment related expert knowledge for condition assessment in a systematic, transparent and simple way. As a result, the process cycle time for data collection usually exceeds the development period of business critical failures caused by degradation of assets. The described situation is in particular crucial for management of expensive physical assets as power transformers, whose failure modes may have a development time in a range of a week or even a couple of days. If an event starts to develop it should trigger the planning of several processes (*maintenance, procurement, funding etc.*) in order to initiate a comprehensive optimization process on the highest system level. The overall objective of the condition based online estimation of asset related risk is the real time cost and risk control of condition sensitive core processes (*e.g. maintenance, replacement, financing and depreciation*), having substantial influence on the ROA and consequently on the business profitability as a whole.

The main objective of this thesis is to set up a computer based hierarchical simulation model, which is able to estimate the condition deterioration of equipment components which are prone to fail, in order to determine the system condition on its various hierarchy level and to give proposal for key decision situations. Having assessed the condition deterioration through fuzzy-logic in percentage, then one can derive the assets depreciation in monetary terms, which provides a solid basis for predicting the maintenance and replacement budget. Forecasting the remaining life time of equipments is also supported. In financial records used for strategic planning, fixed assets are usually expressed as the cost of asset minus depreciation, this aspect underlines as well the importance of the precise condition based calculation of asset depreciation.

State-of-the-art in Asset-Management

Over the past ten years, some key technologies such as the invention and large-scale application of microprocessors, development of digital communications, worldwide implementation of internet networking and modern modelling tools have become great enablers with regard to opportunities to develop the existing still sub-optimal asset management practice. However, the lacking of a concept for comprehensive online asset management is still a bottleneck in full utilization of the mentioned developments.

In the past, asset managers struggled with the fact that too less data of assets condition was available on a cost effective way when they attempted to analyse the asset portfolio in order to set up an optimal strategy for assets. Today the application of modern IT solutions with implementing IED's is the state-of-the-art for most substations. For data retrieval the access to IED's and monitoring systems is provided via modern communication networks. This allows the exchange of data between AM-applications and the related data source in a cost-effective way. In the case that an appropriate AM-concept is available, there is not remarkable obstacle to run an Asset-Management under on-line basis anymore. The main objective of this thesis is to bridge the information gap between the current condition of physical assets and the budgeting procedure identifying the annual and long-term budget for asset maintenance and replacement.

Basic disciplines used for the development of the concept on hand

The presented approach is made of an interdisciplinary work. Disciplines of economics, condition monitoring, maintenance, reliability analysis and Fuzzy-Logic have been employed in order to transform technical data from equipment monitoring into information of financial relevance. The following list outlines the most important areas of the mentioned disciplines:

- Budgeting, financial and imputed depreciation
- Risk management to control technical and financial uncertainties
- Fuzzy-Logic and rule based expert systems
- Target costing as theoretical background for hierarchical condition monitoring
- Quantitative Failure Tree Analysis for calculation of breakdown probability

Budgeting and depreciation

In broadest sense the assets budget charts the course and costs for planned actions on assets. In the narrower sense however it focuses on activities of condition driven business processes as maintenance, financing and investment. The mentioned consolidating character of the budgeting process, its remarkable quantitative dependence on current assets condition and the fact, that budgeting activities are inseparable part of other financial processes (*e.g. cash flow and investment planning*) point out its vital importance for the new asset management approach.

Basically, there are three ways to plan a budget:

1. Incremental or baseline budgeting
2. Zero-based-budgeting
3. Combination of the baseline and zero-based types

In incremental budgeting the budget for the current year is the starting point for the next year budget. This costly approach, disregarding the actual assets condition has been generally used by utilities until the liberalization of the energy market. The new market environment however pushed the utilities to introduce zero-based models for spending by breaking up the habit of simply budgeting non-essential costs because they were incurred on the prior year. The basic concept for zero-based budgeting corresponds to the proposed risk-based asset-management, starting from zero and building up the plan budget according to the current financial risk.

The cost saving potential of the zero-based budgeting is particularly high for such assets categories like power transformers and circuit breakers binding tremendous capital. In order to face the financial consequences caused by condition deterioration on time, the maintenance budget should be readjusted in line with deterioration process concurrently. For that reason, it is necessary a computer supported online mapping for the condition dependency of expenditures.

To support the budgeting, some indicators are required at helping to define the timing to enrol the costs of risk reducing measures in the budget. In case of limited budget, it is not enough to make the observation of risk development for a single equipment separately but to the entire assets portfolio at the same time in order to set up a priority list ranking the assets for a certain measure (*e.g. replacement*).

A case study for 15 circuit breaker will show that the decision on equipment selection for replacement and timing of related activities can be carried out concurrently. The example demonstrates also that the costs for replacement should be budgeted as soon as the replacement probability exceeds a predefined threshold e.g. of 50 %. The priority order helps to deploy the available budget for the most risky pieces of assets.

Accounting for depreciation of fixed assets

Depending on objectives there are two kinds of depreciation approaches regarding the fixed assets. The financial depreciation is a process of assets amortization to spread the cost of acquiring long-term assets over their estimated useful life in order to make sure the nominal maintenance of capital. It will be carried out according to financial policies regardless of the actual assets condition and it serves for assets evaluation e.g. for balance sheet. Contrary to this, the imputed depreciation aims at the substantial maintenance of capital. It should account for actual equipment wear and provide the internal cost accounting with reports on costs induced by assets impairment. The purpose of the latter is to make the financial means available to annual assets maintenance on the most efficient way and to assist the operation management in forecasting the general performance of equipments.

As regards the ability of financial depreciation to assist the comprehensive asset management, disadvantages overwhelm the only advantage characterized by its simp-

licity. Therefore, assets managers are looking for an imputed depreciation model, which is in opposite to financial depreciation able to map the condition deterioration as a function of condition relevant measurements data delivered by online monitoring devices.

A key figure for actual market value of the equipment in concern have been developed in order to be able to assess the actual equipment performance. It can also help to take decision regarding the question: maintain or replace ?

For estimating the remaining life time the financial depreciation will be compared with the imputed depreciation. The calculation of the imputed depreciation will be carried out by it for two aging types the natural aging and the failure-based aging concurrently. The most dominating of the mentioned types must be taken into consideration by conducting the mentioned comparison, which provides a solid basis to make prognosis for further development regarding the consumption of remaining life time.

Risk management to control uncertainties

The basic indicator characterising the condition of power system and underlying the computation of further control and performance key figures is the condition deterioration in percentage (*assessed by fuzzy-logic*). Parameters for probability of events, like implementing of maintenance scenarios or breakdown of system components, are calculated by experience oriented assumptions based on the current value of assets condition deterioration.

In regard to the quantification of risk, there are two different approaches used in this thesis. The first one is a method based on mapping the risk through assets importance and assets condition deterioration in a Cartesian coordinate system. The second one operates with expected values of damage for anticipated risky events. The choice of the most recommended method for modelling the risk depends on the task to be solved and on the available database at disposal. Examples for the practical deployment of the above mentioned methods will be provided.

First feasibility study: Portfolio analysis for 15 circuit breakers.

The choice for conducting a portfolio analysis of circuit breakers using the risk mapping through expected values lies on the available database making possible to calculate the monetary consequences of equipment breakdown on the basis of not delivered energy.

This study demonstrates the considerable advantage of multidimensional decision support by means of fuzzy-logic. It shows, that relying on the financial risk analysis by the definition of replacement priority exclusively would lead to a sub optimal decision. Although the financial risk indicator allows for a rough assessment of replacement priority a precise priority calculation needs a multidimensional fuzzy algorithm. The deployment of such an algorithm will be given in all details.

In addition, it is of vital importance to support the decision making process by setting up replacement priority for assets as well as the proposal regarding the ranking of previously selected maintenance activities.

Supposing that a catalogue of maintenance activities at disposal and the costs of these measures are known, an example for the fastest financial risk reduction by means of optimal scheduling of those maintenance activities will be demonstrated. The applied method is based on the recurrent calculation of financial risk in assets portfolio characterised by expected value of monetary consequences of equipment breakdown. The ranking procedure is done as following: First the most deteriorated controlled unit of the equipment with the highest risk potential must be repaired. Once this unit has been repaired, the breakdown probability of the related equipment, the priority list in the assets portfolio and the budget at disposal must be updated. The subsequent loops should be carried out until the remaining budget is zero. The visualisation of subsequent steps of the above described procedure will be given exemplarily.

Second feasibility study: Portfolio analysis for 20 power transformers

Due to the variety of designs, manufacturers and operational circumstances of power transformers statistical approaches, to derive the probability of defects and thus to support the **Risk Based** and **Cross Functional Asset-Management (RB&CFAM)** concept on the hand, are not applicable in the praxis. Expert systems relying on condition relevant online measurement data are needed in order to take the individuality of respective transformer into consideration by assessing its condition quantitatively.

An advantageous, fundamentally new method will be presented. This one is able to support the decision making for transformer replacement with regard to the following significant problems:

1. quantitative assessment of replacement priority in a group of 20 power transformers
2. building a key indicator characterising the total financial risk on group level caused by rising replacement probability on equipment level
3. assessment of remaining life time on equipment level

The expert system built for generating the above described key figures has the next distinguishing features:

- It estimates the replacement priority of respective transformer on the basis of a risk vector calculated for the life time critical oil-paper-insulation.
- The risk vector is composed of the condition deterioration of oil-paper-insulation and the equipment importance. A rule based fuzzy-model is deployed for the degradation assessment. The relative importance of a transformer in the assets group will be defined on the basis of its current replacement value and a ratio of utilisation which is calculated by means of the respective load forecast.
- Both the natural aging and the failure-based aging type will be modelled for the estimation of the current degradation of oil-paper insulation. According to the elaborated monitoring philosophy the value delivered by the dominant failure type is supposed to be taken for the resulting degradation degree.
- The comparison of financial and imputed depreciation is used for assessment of remaining life time of transformers. The deviation of the imputed depreciation from the financial depreciation allows forecasting for future developments in consumption of remaining transformer life time.

The role of fuzzy logic for the concept on hand

Fuzzy-Logic operates on computer by applying linguistic variables and provides a sharp value as output variable. The fact, that the expert knowledge about the dependency between condition relevant measurement data and the related condition deterioration is available in a verbalised form may suggest the application of the fuzzy logic for calculating the condition deterioration on online basis.

The proposed way for determining the assets degradation and for quantifying the circuit breaker replacement probability on the basis of more than one criteria utilises the mentioned beneficial feature of the fuzzy-logic. It appears as one of the most important discipline used in the advanced RB&CFAM-concept and thus deserves great attention.

Target costing methodology as base theory for a systematic approach

The task to form condition key figures describing the assets condition on systematic way posed the challenge to define the assets degradation on system component level and to aggregate this according to a predefined system hierarchy with many level.

The idea for the solution on hand was delivered by the **Target Costing Methodology** having a systematic approach to define the function contribution of system components. The fact, that in this method the production costs of components are defined on the basis of the respective function contribution, raised an idea to use the underlying algorithm for calculating the current function contribution by means of assets degradation assessment in percentage.

For instance, having estimated e.g. the component degradation of an equipment in percentage on the basis of current condition relevant measurement data then as well the current imputed depreciation can be calculated easily. The imputed depreciation defined on this way provides a solid basis as well as for budget forecasting at the same time.

The distinctive features of the proposed supervision philosophy

In compliance with the underlying new concept the observation of assets aging takes place for two separate aging types. The reasons for that are various organizational functions having different time horizons for planning. While e.g. the long-term system planning is rather interested in information about estimated lifetime consumption of equipment as a whole, organisation units like maintenance, operation management and annual budgeting need information about the development of critical failure modes of equipment components separately.

As a result of the mentioned different requirements two aging types have been developed. The first type called natural aging (NA) is designed for decision support in long term planning primarily, while the failure-based aging (FA) provides information to control operational and financial consequences of assets degradation rather in short term.

There is also a difference concerning the subject of monitoring. The focus of NA supervision is the degradation of lifetime critical oil-paper insulation characterizing the

aging process on equipment level by oneself. In case of failure-based type however all known failure modes of failure-prone transformer components are subjected to separate observation. It must be noticed yet, that the mentioned aging types are not alternate choices, but rather they are complementary. This fact is supposed to be considered also by designing the reporting. As regards the report layout, displaying the two types simultaneously seems to make sense, because it helps understand the discrepancies in different views on both the strategic and tactic sites. An example regarding the remaining life time assessment accounts for the need of separate supervision of natural and failure-based aging.

Difficulties by the definition of importance in assets portfolio

The complexity of net configurations and numerous additional conditions having influence on importance of a piece of assets require to focus on the most significant factors by mapping this risk relevant parameter.

Theoretically, the relative importance of an equipment should be defined on the basis of its share in total damage anticipated in the underlying system for the case of assets breakdown. However, to estimate possible collateral losses in monetary terms and to update these in time continuously would lead to a very complex simulation model. Therefore, according to the RB&CFAM-concept the indicator for equipment importance will be defined in two steps as described below.

Using the assumption that the (n-1) criterion for secure power supply is always granted and that a faulty equipment can be taken out of service without any losses in energy supply the breakdown induced maximal monetary loss can be characterised by the current replacement value of the equipment. Using this approach a so called basis importance can be calculated on the basis of current replacement values.

In order to provide the possibility to consider as well some relevant factors like redundancy, unutilised asset capacity, loss in energy supply etc., the concept on hand allows for the appropriate manipulation of the basis importance. An example will show how to manipulate the basis importance of transformers in case if the load factor of an equipment is varying in time.

Conclusions

The **Risk Based** and **Cross Functional Asset-Management** concept (RB&CFAM) allows online decision support in today asset management practice. Based on modelling the asset degradation on a cause impact based way by means of fuzzy-logic and on a simple aggregation algorithm for assets degradation computed on component level, the following advantages can be achieved by using the model:

The knowledge about the dependency between condition relevant measurement data and component degradation, *which is at disposal by experts in form of verbalised rules*, can be processed online. The ability for online processing provides a solid basis for integrated asset management and allows information spreading to different functions of the organisation at the same time.

Using the proposed model for assets *-composed of separate modules for failure-prone equipment components-* the impact of various risk reducing scenarios on underlying system can be assessed by means of key figures like assets depreciation and condition deterioration. The supervision of the motioned figures makes the early detection of failure escalation possible.

The case studies conducted for 20 power transformers and 15 circuit breakers confirm the need for replacement of today decision supporting approach reliant on traditional disjointed systems for finances and asset management on equipment level. It demonstrates as well as that cross functional core processes like planning of maintenance, replacement and the related budgeting process can be supported by providing key figures generated online.

As a result of applying this concept, decision makers can consider the financial consequences of assets degradation timely, which leads to enhanced efficient of management of interacting business processes and consequently to significant savings in the entire organisation. The related software enables strategy planers to implement the right assets strategy for improved assets performance, reduced costs and optimal return on investment respectively. This business intelligence tool combine the condition based analysis of equipment reliability, costs and risk in order to address complex multi-criteria business decisions across the utility enterprise.

1. Einleitung

In den letzten Jahrzehnten sieht sich die Energieversorgung immer härteren Wettbewerbsbedingungen gegenüber. Die verschärfte Wettbewerbssituation ergibt sich durch das Energiewirtschaftsgesetz (EnWG) vom 24. April 1998. Die wichtigsten Ziele dieses Gesetzes sind ein zuverlässiger Betrieb von Energieversorgungsnetzen und die Sicherung eines wirksamen Wettbewerbs zwischen den Energieversorgern.

Im Zuge der Umsetzung der oben genannten Ziele fand ein Unbundling in der Energieversorgung statt. Dieses führte sowohl zu einer abrechnungstechnischen als auch zu einer gesellschaftsrechtlichen Trennung von Geschäftsbereichen wie Erzeugung und Stromhandel, Übertragung sowie Verteilung von elektrischer Energie. Über diese Entflechtung hinaus verpflichtete das Energiewirtschaftsgesetz die Netzbetreiber zur Veröffentlichung der Netznutzungsentgelte. Die erwähnte Regelung bewirkte eine symmetrische Informationsverteilung unter den konkurrierenden EVU-s, stellte die vom Gesetz geforderte höhere Kostentransparenz sicher und löste den aktuellen, verschärften Kurs zu Kosteneinsparungen aus.

Um dauerhaft im weltweiten Wettbewerb erfolgreich bleiben zu können, müssen die Elektrizitätsversorgungsunternehmen künftig mit noch weniger Ressourcen den gleichen Anforderungen gerecht werden. Ein Paradigmenwechsel ist im Bereich des Kostenmanagements unabdingbar geworden [Laerderach, 2003, Janssen, 2003].

1.1 Einführung

Die neue Wettbewerbssituation unter den Energieversorgungsunternehmen verlangt nach einer zielgerichteten Erschließung noch vorhandener Einsparungspotenziale. Der erste Schritt zur Lösung dieser Aufgabe ist die Entwicklung branchenindividueller Methodenkompetenz für Prozessmanagement, die im Rahmen einer prozessorientierten Ablauforganisation das Verständnis der Unternehmensangehörigen für den Gesamtzusammenhang in jeder Entscheidungssituation fordert und durch ein integriertes Informationsmanagement fördert. Eine wettbewerbsorientierte Unternehmensführung setzt voraus, technische und betriebswirtschaftliche funktionale Bereiche als Glieder eines Ganzen, als eine Gesamtheit miteinander verzahnter Aufgabenbereiche, zu begreifen [Bogaschewsky, 2004].

Instandhaltung, Abschreibung, Investitionen und Budgetierung sind Kernprozesse eines jeden Energieversorgungsunternehmens (EVU). Aufgrund der hohen Komplexität und der Vernetztheit dieser betrieblichen Prozesse entwickeln sich das ganzheitliche Denken und Handeln von Entscheidungsträgern zu erfolgsrelevanten Schlüsselqualifikationen im Wettbewerb. Aus diesem Grunde wird bei EVU-s mit Nachdruck nach neuen Ansätzen gesucht, welche die funktionsübergreifende interdisziplinäre Sicht auf die unternehmerischen Problemstellungen inne haben und die Entscheidungen im Sinne einer ganzheitlichen Betrachtungsweise, verstärkt durch die Analyse von „größeren Zusammenhängen“, unterstützen.

Konzentriert sich die Abbildung von Kernprozessen auf das ganzheitliche Zusammenwirken der betrieblichen Tätigkeiten, so rückt „automatisch“ die Geschäftsprozessbetrachtung in den Vordergrund. Ein Geschäftsprozess umfasst eine Reihe von Aktivitäten mit einer messbaren Wertschöpfung und endet mit einem messbaren Output. Die eigentliche Aufgabe bei der Prozessabbildung besteht darin, die Interdependenzen im Kontext Aktivitätsinput(s)-Aktivität-Aktivitätsoutput-Prozessinput(s)-Prozess-Produktoutput verursachungsgerecht abzubilden [Baus, 1995].

Um den Anforderungen des liberalisierten Energiemarktes gerecht zu werden, ist ein neuer computergestützter Ansatz für die Gestaltung, Analyse und Optimierung der Kernprozesse erforderlich. Dieser Notwendigkeit wird in der vorliegenden Arbeit Rechnung getragen.

1.2 Aufgaben des anlagennahen Asset-Managements

Der Begriff Asset-Management steht im weiteren Sinne für das Management des gesamten Unternehmensvermögens. Als ein Teilbereich dessen fokussiert sich jedoch das anlagennahe Asset-Management ausschließlich auf die optimale Koordination von anlagenrelevanten Aktivitäten unterschiedlicher Unternehmensfunktionen wie z.B. *Instandhaltung, Investition, Beschaffung und Finanzierung*. Das Ziel der genannten Teilgebiete ist die ursache-wirkungsorientierte Verknüpfung von Leistungsindikatoren auf der technischen Prozessebene mit den Leistungskennzahlen der operativen- und strategischen Planungsebene, um die Prozesslenkung zwecks Kostenoptimierung auf einer formalisierten Basis computergestützt sicherzustellen.

Als industriezweigspezifische Zielposten können die folgenden Punkte für die Elektrizitätsversorgungsunternehmen genannt werden:

1. Sicherstellung einer vorgegebenen Versorgungszuverlässigkeit bei minimiertem Kostenaufwand.
2. Weitgehende Ausschöpfung der Nutzungsdauer von Betriebsmitteln.
3. Stärkere Auslastung von Anlagen unterstützt durch simultane Überwachung von Risikopotentialen in Bereichen wie Betriebsführung und Finanzen.
4. Ausschöpfung von Synergiepotenzialen durch computergeschützte Entscheidungsfindung über das gesamte Anlagenportfolio hinweg.

Um aus den obigen abstrakten Zielsetzungen für die vorliegende Arbeit konkrete Aufgaben zu definieren, muss man sich zuvor die grundsätzliche Vermögensstruktur eines Unternehmens (*englisch: Assets*) vor Auge führen. Aus dem Blockdiagramm in Bild 1.1 ist ersichtlich, dass sich die Vermögensgegenstände eines Unternehmens grundsätzlich über zwei Güterbereiche verteilen lassen.

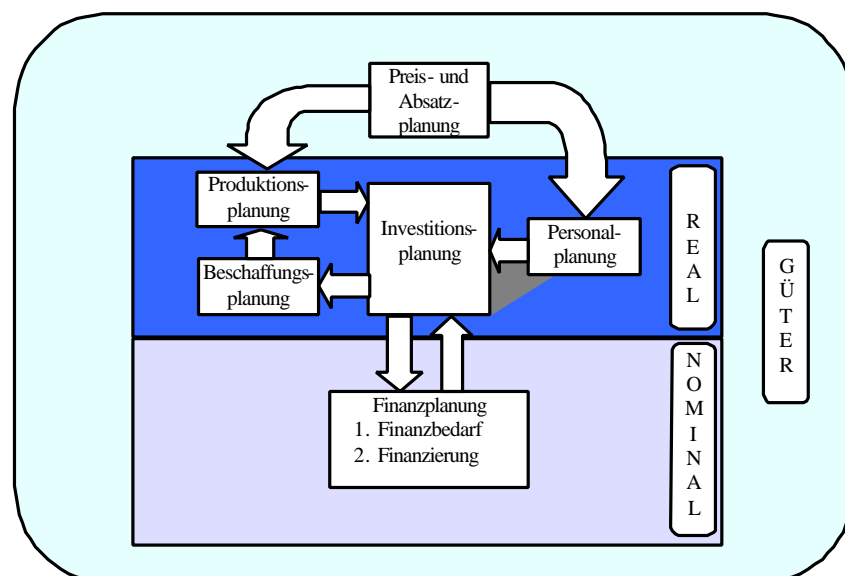


Bild 1.1 Bereiche der Real- und Nominalgüterplanung, die in ein Asset-Management-System übergreifend integriert werden sollen

Dem Bild 1.1 ist zu entnehmen, dass die Aktivitäten eines Geschäftsprozesses (z.B. *Beschaffung*) einerseits auf dem Gebiet von Realgütern (*Sachvermögen und Dienste*), andererseits im Bereich der Nominalgüter (*Banknoten, Giral- und Buchgeld, Finanzierung*) ausgeführt werden. All das bedeutet eine zweipolig fokussierte funktionale Trennung von Tätigkeiten desselben Prozesses, die meistens auch mit einer räumlichen Entfernung zwischen den Ausführungsorten der einzelnen Prozessaktivitäten einhergeht. Für das anlagennahe Asset-Management (AM) gilt es, diese getrennten Prozessteile durch eine computergestützte Applikation zu verbinden.

Aktivitäten unterschiedlicher funktionaler Prozesse stehen in einer direkten oder indirekten Wechselwirkung miteinander. Die erste Aufgabe des AM ist die Abbildung der erwähnten Wechselwirkung durch adäquate Verkettung von relevanten Kennzahlen [Olfert, 1996]. Dies soll transparent geschehen, um die Kostenentstehung im Kontext von Kostentreibern (z.B. *Zustandsverschlechterung von Anlagen*) innerhalb eines Prozesses (z.B. *Instandhaltung*) und zwischen unterschiedlichen Kernprozessen (z.B. *Budgetierung und Instandhaltung*) analysieren und letztendlich gezielt steuern zu können [Morton, 1999], [Oechsle, 2000], [Orlowska, 2000], [Stiegler, 2006].

Die zweite Aufgabenstellung ist die zustandsbasierte Prognose von objektorientierten Tätigkeitskosten für die finanzielle Risikoabschätzung.

Die letzte und damit die anspruchsvollste Aufgabe ist die effiziente Gestaltung der online Berichterstattung. Das moderne Asset-Management kann seinen größten Hebeleffekt gerade bei der Implementierung dieser Aufgabenstellung entfalten. Die Aktualität dieser Aufgabe ist damit zu erklären, dass fortschrittliche Technologien wie grafische Navigationsdienste und busbasierte Feldgerätekommunikation heute schon kostengünstig einzusetzen sind.

1.3 Stand der Technik

Der Stand der Technik im Bereich des anlagennahen Asset-Managements kann vorwiegend durch die folgenden Aspekte charakterisiert werden:

1. Der Entwicklungsstand der für das AM relevanten Basistechnologien wie digitale Signalverarbeitung, moderne Schutz- und Leittechnik bzw. online Monitoring.
2. Der Fortschritt in der Fehlerdiagnose für die elektrischen Betriebsmittel.
3. Die effiziente Anwendung von fortschrittlichen Technologien für die Datenübertragung (Teleservice mit Internet-Techniken usw.).
4. Die Methodenkompetenz für maßgeschneiderte AM-Applikationen, welche die Anlagendaten für die Entscheidungsunterstützung verursachungsgerecht verdichten und die so gewonnenen Informationen bedarfsgerecht darstellen.

Während in der Informationstechnik (IT) hochintegrierte Schaltkreise und die daraus folgenden immer leistungsfähigeren Softwareapplikationen für eine hohe Entwicklungsdynamik sorgten und damit die ersten drei Voraussetzungen für moderne Asset-Managementapplikationen geschaffen haben, ist die Kompetenzentwicklung für die Informationsgewinnung aus Prozessdaten in Verzug geraten. Dieser gravierende Kompetenzmangel stellt bis heute einen erfolgskritischen Engpass zur Verwirklichung des integrierten Asset-Management-Konzeptes dar.

Obwohl die offene Kommunikation unter Feldgeräten unterschiedlicher Hersteller durch die IEC 61850 Norm weitgehend geöffnet wurde, befindet sich der integrierte AM-Ansatz immer noch in einer abstrakt formulierten Entwurfphase. Der Vollständigkeit halber muss man jedoch festhalten, dass praxisrelevante Teillösungen schon heute zur Verfügung stehen [Balzer, 2005, Groot, 2003 und Albeln, 1987]. Diese können als Grundlage zur Entwicklung eines funktionsübergreifenden AM-Ansatzes herangezogen werden. Auch für die vorliegende Arbeit lieferten die genannten Studien wertvolles Gedankengut.

1.4 Aspekte aus der Asset-Management-Praxis bei EVU-s

An der rechtzeitigen Bereitstellung von Informationen über den Betriebsmittelzustand haben diverse Abteilungen und Führungsebenen Interesse, weil die Prozesseffizienz der von ihnen verwalteten Prozessabschnitte direkt beeinflusst wird. Die Prozessdurchlaufzeit und die Prozesskosten (*für Arbeits-, Informations- und Entscheidungsprozesse usw.*) gehören zu denjenigen Einflussgrößen, deren Reduzierung dem Unternehmen zum Wettbewerbsvorteil verhelfen kann.

Betriebsführung, Instandhaltung, Beschaffung, Netzplanung und Lagerhaltung sind funktionale Einheiten, deren Aktivitäten als Prozesselement in den funktionsübergreifenden, gleichnamigen Unternehmensprozessen vorhanden sind. Durch die erwähnten Aktivitäten werden Kosten verursacht, die in einem Asset-Management-Prozess durchgängig zusammengefasst werden sollen. Um die zu den einzelnen Betriebsmitteln zugeordneten, zustandsbedingt auszuführenden Aktivitäten mit Plankosten bewerten und die Aktivitäten zeitlich und inhaltlich koordinieren zu können, ist die Kenntnis über den aktuellen Zustand von Betriebsmitteln in der Form einer Ursache-Wirkungskette (*Anlagenkomponenten-Fehlerarten-IH-Aktivitäten-IH-Kosten*) unabdingbar. Der aktuelle Zustand von Betriebsmitteln soll daher in quantifizierter Form ermittelt und für eine weitere Verarbeitung online zur Verfügung gestellt werden.

Im Rahmen der angewandten traditionellen Anlagenbuchhaltung kann zwar dem technischen Verschleiß von Betriebsmitteln durch unterschiedliche Verfahren der Abschreibung Rechnung getragen werden, aber dieser rein finanzmathematische Ansatz kann die sich stochastisch ändernde tatsächliche Wertminderung nicht zustandssynchron abbilden. Während die erwähnte Unzulänglichkeit zu gravierender Ungenauigkeit allein in Bezug auf die Einschätzung der Restlebensdauer von strategisch wichtigen Anlagen (z.B. Leistungstransformatoren) führen kann, werden auch zahlreiche finanzrelevante Kernprozesse (z.B. Kostenplanung) negativ beeinflusst. Die unerwünschten Auswirkungen haben dabei einen organisationsweiten, sich verstärkenden Charakter, wobei dieses fehleraggregationsbedingte Phänomen auf der Unternehmensebene schon erhebliche Abweichungen zwischen Plan- und Ist-Kosten hervorruft. Die genannte Fehlplanung induziert weitere Kosten.

Die Ausführungen oben machen deutlich, dass die Relevanz der konventionellen Anlagenbuchhaltung sowohl für das strategische, als auch für das operative Anlagenmanagement äußerst gering geworden ist. Trotz dieser Tatsache wird die computergestützte Echtzeitabbildung von zustandsbedingten Ursache-Wirkungs-Beziehungen in der Praxis von den meisten EVU-s immer noch nicht eingesetzt. Zu den erwähnten Defiziten kommt hinzu, dass ohne einen geeigneten, auf einen Systemansatz basierenden IT-Support die kosteneffiziente online Früherkennung anbahnender Fehlereskalationen im Versorgungsnetz, das Lokalisieren der Störquellen und die

ganzheitliche Analyse des aktuellen Risikoportfolios rechtzeitig nicht durchzuführen sind.

Die fehlende oder nicht durchgängig ausgeführte IT-Architektur zur Bereitstellung von Zustandsinformationen in Echtzeit und die defizitäre Methodenkompetenz in „mundgerechter Informationsaufbereitung über Implikationen der Zustandszenarien für das Controlling“ bedeutet auch, dass für viele Entscheidungsträger die Prozessdurchlaufzeit für die Entscheidungsfindung durch zu lange Kommunikationswege (*zwischen den Prozessverantwortlichen und den Entscheidungsträgern*) zusätzlich verlängert ist. Das Gesagte gilt vor allem für die Controllingtätigkeiten (*z.B. Budgetierung*) aber auch für die Netzführung. Diese zustandssensitiven Prozesse gehören zu der Prozesskategorie, die man als „Kernprozesse“ zu bezeichnen pflegt [Baus, 1995; Ehrlenspiel, 1995].

Die Zustandsverschlechterung von Anlagen kann eine hohe Entwicklungsdynamik haben, wobei die Ausfallwahrscheinlichkeit der Betriebsmittel mit zunehmender Degradation oftmals exponentiell steigt. Dieses Phänomen verlangt nach einer extrem kurzen Reaktionszeit auf Zustandsänderungen, was auch in der Gestaltung der Entscheidungsunterstützung reflektiert werden soll.

Aus den oben erklärten Gründen können die Asset-Manager auf die Störereignisse meistens nur reagieren, anstatt durch rechtzeitig getroffene Maßnahmen die vorhandenen Einsparungspotenziale in einer systematischen Früherkennung proaktiv zu realisieren. Um durch rechtzeitige Informationsvorbereitung eine aktive Entscheidungsunterstützung bieten zu können, ist die Ausarbeitung eines entscheidungsorientierten, hierarchisch organisierten AM-Modells mitsamt einer massgeschneiderten Berichtstruktur unbedingt notwendig. Sollte eine aus einer Menge von vordefinierten Entscheidungssituationen eintreffen, muss der zugehörige aktuelle Berichtssatz innerhalb kurzer Zeit dem Entscheidungsträger zur Verfügung stehen. Das moderne anlagennahe Asset-Management soll insbesondere die situative, gezielte Entscheidungsunterstützung inne haben [Balzer, 2005; Osztermayer, 2002].

Als Konsequenz der aufgeführten Aussagen soll das Berichtswesen der Elektrizitätsversorgungsunternehmen inhaltlich um quantitativ bewertete Informationen über den aktuellen Zustand von einzelnen Betriebsmitteln und über die zustandsrelevanten monetären Konsequenzen erweitert werden, um frühzeitig Hinweise auf ergebnisrelevante Veränderungen (*z.B. Lieferungsengpass wegen anbahnender Netzzustandsverschlechterung*) geben zu können, bevor sich diese im finanziellen Ergebnis niederschlagen.

1.5 Ziel der Arbeit und Darstellung der Arbeitsschwerpunkte

Optimierungspotenziale auf der Ebene von einzelnen Betriebsmitteln und im Bereich einzelner funktionaler Einheiten sind mit den traditionellen Asset-Management Ansätzen nahezu völlig ausgeschöpft worden. Um die noch bestehenden Kosteneinsparungspotenziale realisieren zu können, bedarf es einerseits der bereichsübergreifenden Ausweitung der Optimierungsspannweite auf der Prozessebene und andererseits die Versetzung der Zustandsbeurteilung von der Betriebsmittelebene auf die Ebene von fehleranfälligen Anlagenkomponenten.

1.5.1 Allgemeine Zielformulierung

Das übergeordnete Ziel dieser Arbeit ist ein Konzept bereit zu stellen, welches Kostensenkungspotenziale durch die vorhin genannten Erweiterungen risikobasiert realisiert. Das auszuschöpfende Einsparungspotenzial, welches durch den neuen Ansatz zu erzielen ist, wurde in Bild.1.2 im Kontext der relevanten Dimensionen, wie Zustandsbeurteilungsebene und Spannweite der Prozessoptimierung (*lokales Asset-Management (LAM)* oder *bereichsübergreifendes AM (BÜAM)*) dargestellt.

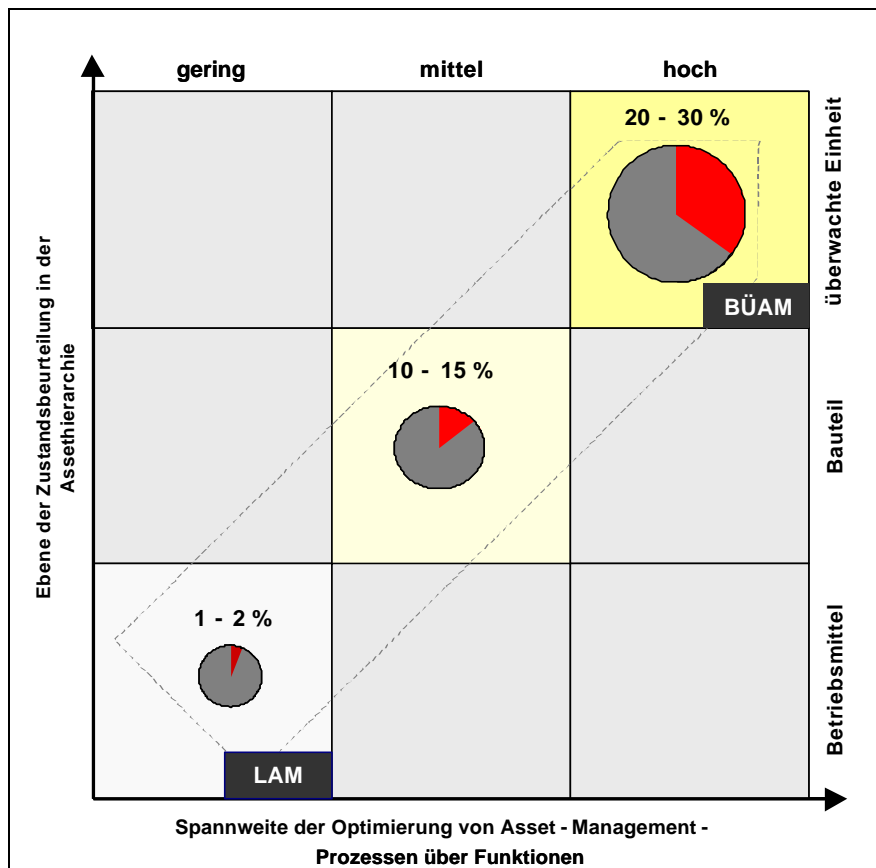


Bild 1.2 Kostenreduktionspotenzial mittels eines modernen bereichsübergreifenden Asset-Management Systems

1.5.2 Konkrete Zielsetzungen

Aus der Aufgabenstellung des anlagennahen Asset-Managements unter dem Punkt 1.2 und der Analyse seiner Defizite in der heutigen Praxis in Punkt 1.4 lässt sich der Handlungsbedarf zur Weiterentwicklung der Methodenkompetenz nach den folgenden Punkten ableiten. Diese Punkte kann man als methodische Zielsetzungen für die Umsetzung des Konzeptes betrachten.

1. Erarbeitung eines Gesamtkonzeptes zur hierarchischen Aggregation der Degradation von einzelnen, fehleranfälligen Betriebsmittelkomponenten, wobei sowohl die genannten Komponenten als auch die Betriebsmittel selbst als Komponente eines beliebig angelegten Gesamtsystems angesehen werden können.
2. Erarbeitung eines regelbasierten Zustandsberechnungsmodells, welches den Zustand der Betriebsmittelkomponente auf niedrigster Hierarchieebene aus deren zustandsrelevanten Messgrößen computergestützt berechnen kann.

3. Ausarbeitung von computergestützten Ansätzen zur risikobasierten hierarchischen Entscheidungsunterstützung für Leistungstransformatoren und Leistungsschalter bezüglich der nachstehenden Entscheidungssituationen:
 - a. Budgetierung von Anlagenkosten für Ersatz und Instandhaltung.
 - b. Zustandsbasierte Schätzung von Abschreibungen in Echtzeit.
 - c. Bestimmung des Ersatzportfolios als Untermenge des jeweiligen gesamten Anlagenportfolios.
 - d. Risikobasierte Bestimmung der Ersatzreihenfolge im Ersatzportfolio.
 - e. Risikobasierte Festlegung der Instandhaltungsreihenfolge.

In Details besteht die Zielumsetzung darin, die folgenden Fragen zu beantworten:

- Wie ist der Zustand auf unterschiedlichen Ebenen der Systemhierarchie?
- Wann und in welcher Höhe sollen Ersatz- und Instandhaltungskosten budgetiert werden?
- Wie groß ist die Ersatzwahrscheinlichkeit einer Anlage?
- Wie groß ist die Ausfallwahrscheinlichkeit einer Anlage bzw. seiner Komponenten?
- Anhand welches Kriteriums kann die Ersatzreihenfolge von Betriebsmitteln berechnet werden?
- Anhand welches Kriteriums kann die Instandhaltungsreihenfolge bestimmt werden?

Die Lösungsvorschläge sollen dabei den Ansatz des integrierten risikobasierten Asset-Managementsystems durch betriebsmittelspezifische Beispiele demonstrieren. Der praktischen Realisierbarkeit soll eine hohe Priorität eingeräumt werden. Entwickler von Informationsmanagementsystemen sollen in die Lage versetzt werden, die vorgeschlagene Weiterentwicklung auf einer vorhandenen Software-Plattform (*vor allem auf SAP/R3/PM* [Stengl, 1993]) vornehmen zu können.

Die vorliegende Arbeit hat einen Innovationsbeitrag zur Weiterentwicklung der bereits vorhandenen AM-Applikationen zu leisten. Der Innovationsfortschritt soll sich dabei an den folgenden Eigenschaften des neuen AM-Ansatzes erkennen lassen:

- Komplett modellbasierte Applikation, die den Zustand von Betriebsmitteln mittels Fuzzy-Folgerung aus zustandsrelevanten Messgrößen der fehleranfälligen Einheiten ableitet, die Systemanalyse aus System Sicht durchführt und die Entscheidungsunterstützung auf konkrete Entscheidungssituationen fokussiert.
- Das zugrundeliegende Simulationsmodell soll modular aufgebaut werden, wobei die Komponenten der Assethierarchie aus Transparenzgründen jeweils in einem separaten Modul unterzubringen sind.
- Die Ergebnisse einer entscheidungsorientierten Analyse sollen ausreichend visualisiert angeboten werden. Die gewählte Art der Visualisierung soll eine Tiefanalyse entlang der jeweiligen Ursache-Wirkungskette weitgehend unterstützen [Deym, 1977].

Darstellung der Arbeitsschwerpunkte im Kontext der Gliederung

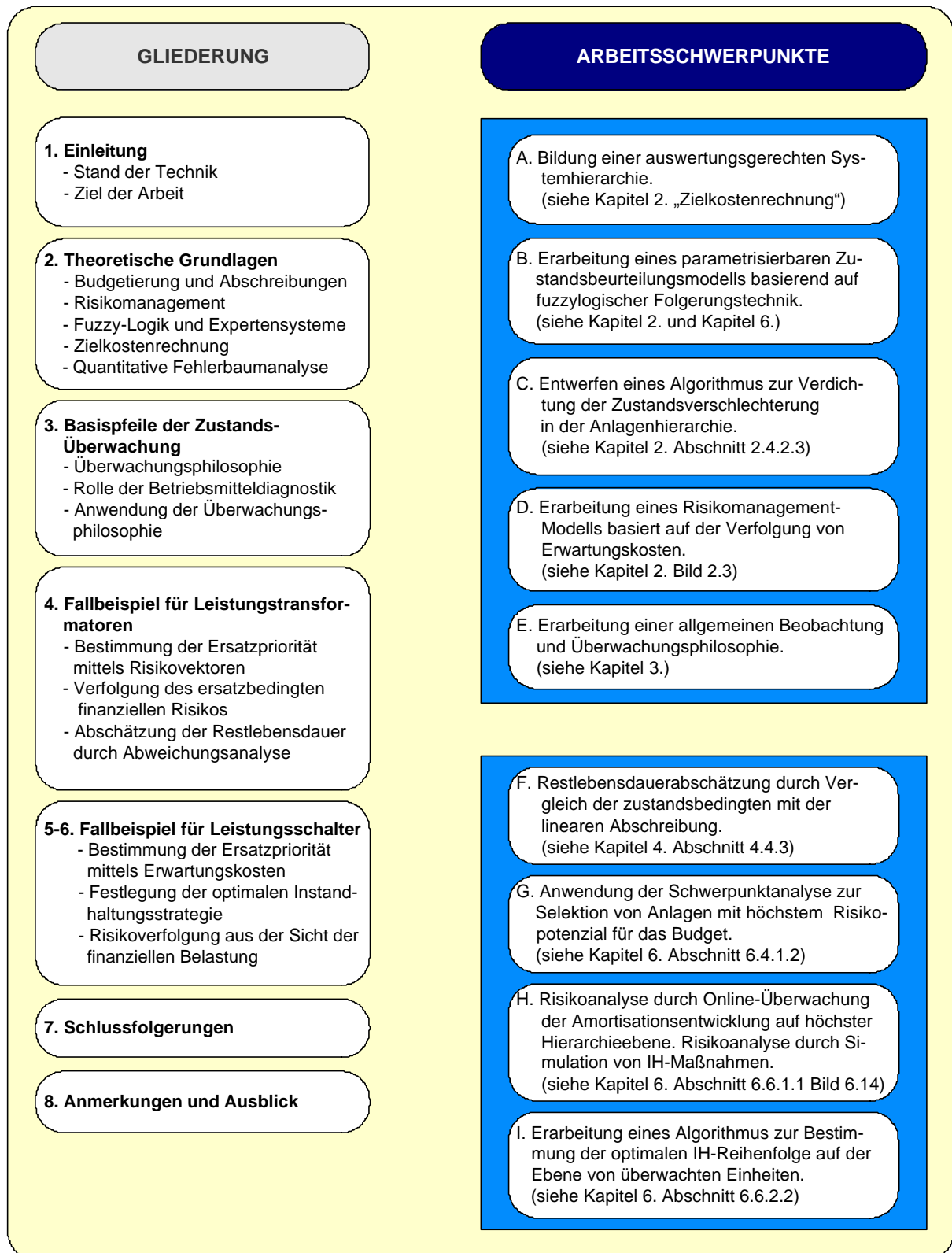


Bild 1.3 Übersichtsplan zu Gliederung und Arbeitsschwerpunkte

2. Theoretische Grundlagen zu den angewandten Basisdisziplinen

Einen wichtigen Schwerpunkt des neuen Asset-Management-Ansatzes bildet die kontinuierliche regelbasierte Bestimmung des Anlagenzustandes, den anderen die darauf basierte Risikoüberwachung durch kontinuierliche Budgetprognose für Ersatzinvestitionen, die Budgetvorhersage für die Instandhaltung und die online Bestimmung der kalkulatorischen Abschreibungen auf Zustandsbasis.

Es ist unschwer zu erkennen, dass es sich bei den genannten Schwerpunkten um zwei wichtige Stützpfeiler einer „Brücke“ handelt, die mittels prozesskonformen mathematischen Funktionen zwischen technischem Anlagenbereich und den betriebswirtschaftlichen Unternehmensbereichen gebaut werden soll. Die methodische Ableitung dieser bereichsverbindenden Brückenfunktionen kann jedoch nur unter Einsatz unterschiedlicher Disziplinen aus Wirtschaft und Technik erfolgen. Um das Verstehen der späteren Auslegungen schon im voraus sicherzustellen, werden in diesem Abschnitt die wichtigsten Grundlagen der angewandten Basisdisziplinen erläutert. Wo es sinnvoll erscheint wird das neue Lösungskonzept, gleich im Anschluss an die Theorie, dargestellt. Die Abfolge der Disziplinen folgt dabei der folgenden Auflistung:

- 2.1 Budgetierung und Abschreibung.
- 2.2 Beherrschen von Unsicherheiten durch Risikomanagement.
- 2.3 Fuzzy-Logik und regelbasierte Expertensysteme.
- 2.4 Zielkostenrechnung als theoretischer Hintergrund für den neuen Ansatz
- 2.5 Quantitative Fehlerbaumanalyse für die Berechnung der Ausfallwahrscheinlichkeit eines Betriebsmittels.

2.1 Budgetierung und Abschreibung als Rückgrat des Asset-Managements

Finanzcontrolling hat die Aufgabe eine effiziente Prozesssteuerung innerhalb des Finanzbereiches und zwischen dem Finanzbereich und Anlagenbereich zu bewerkstelligen. Im Wesentlichen geht es dabei um die optimale Allokation von Finanzmitteln unter den miteinander konkurrierenden Investitionsposten wie z.B. Ersatz und Instandhaltung. Finanzierung- und Investitionsentscheidungen sind neben der Liquiditätssicherung die zentralen Aufgabenbereiche des Finanzcontrollings, wo durch das funktionsübergreifende Asset-Management (**FÜAM**) noch viele Kostensenkungspotenziale realisiert werden können. Um der ursachengerechten Ressourcenzuweisung im Bereich der Produktionsanlagen gerecht zu werden, soll durch einen modernen AM-Ansatz die Budgetierung risikobasiert durchgeführt werden.

Prozesse, welche die Finanz- und Leistungsbereiche unmittelbar verbinden und die erwähnte Ursache-Wirkungsabhängigkeit im Kontext des Zustandes und der Kosten am meistens innehaben, sind IH-Budgetierung und die Bestimmung der kalkulatorischen Abschreibungen. Dass gerade diese Prozesse zum Rückgrat des **FÜAM** erklärt wurden, liegt daran, dass die IH-Kosten in anlagenintensiven Industriezweigen zum Teil mehr als 50 % der gesamten Betriebskosten ausmachen [Gartner, 2003].

Aktuelle Unzulänglichkeiten bezüglich der Budgetierung und Abschreibung sind die folgenden:

- Hoher Koordinationsaufwand bei der Bestimmung des IH-Budgets.
- Unzulängliche Methodenkompetenz in risikobasierter Generierung von IH-Aktivitäten und in der Schätzung des IH-Budgets.
- Fehlendes Verfahren für die zustandsabhängige Bestimmung der kalkulatorischen Abschreibung und das damit einhergehende defizitäre Kosten- und Restlebensdauermanagement im Anlagenbereich.

Die zu erzielenden Ergebnisse durch den neuen Ansatz sind:

- Computergestützte IH-Budgetierung und Abschreibungsberechnung.
- Standardisierung von Planungsprozessen und Berichtserstattung.
- Prozesstransparenz und Nachvollziehbarkeit.

2.1.1 Historische Entwicklung der Budgetplanungsmethoden

Finanzleute sind auf die aktuelle Kostenentwicklung aus dem Anlagenbereich angewiesen, wollen sie den richtigen Zeitpunkt für Optimierungsmaßnahmen bezüglich der effizientesten Finanzportfoliogestaltung bzw. Umgestaltung nicht verpassen. Die Realität sieht allerdings oft so aus: „Berichte kommen zu spät, sind unpräzise und spiegeln den aktuellen Sachverhalt nicht wieder“. Die erwähnte Diskrepanz gilt insbesondere für die Budgetierung von Instandhaltungskosten und Ersatzinvestitionen bei Elektrizitätsversorgungsunternehmen, wo der stochastische Charakter der Zustandsänderung von Anlagen einen unmittelbaren Einfluss auf die wertmäßige Budgetentwicklung nimmt. Um die Zustandsentwicklung in den Berichten ohne eine kritische Zeitverzögerung wiederzuspiegeln, soll der Budgetierungsprozess durch geeignete Automatisierung erheblich beschleunigt werden.

Ein Instandhaltungsbudget ist ein in wertmäßigen Größen, in Geldbeträgen formulierter Kostenplan, es stellt den Kostenrahmen für IH-Aktivitäten dar. Mit dem Begriff Budgetierung bezeichnet man hingegen einen finanztechnischen iterativen Planungsprozess mit dem Ziel ein Budget zu erstellen. Das Hauptaugenmerk der vorliegenden Arbeit gilt vor allen dem Letzteren.

Theoretisch existieren drei Methoden einen Budgetplan zu erstellen. Nachfolgend werden diese in Ihrer historischen Entwicklung aufgelistet und kurz erläutert:

1. Historienbasierte Budgetplanung (HBBP) auf der Basis von Ist-IH-Kosten.
2. Zerobasierte Budgetplanung (ZBBP) auf der Basis von simulierten IH-Kosten.
3. Kombination von HBBP und ZBBP.

Bei historienbasierter Budgetplanung wird für die Bestimmung der Budgetsumme das Budget des vorangehenden Jahres zu Grunde gelegt. Diese Methode, die vor der Liberalisierung nahezu überall praktiziert wurde, zieht den tatsächlichen Anlagenzustand nicht in Betracht, es nimmt lediglich eine Korrektur in bezug auf die Inflation vor. Die Folgen dieser Praxis sind überhöhtes IH-Budget und gravierende Abweichungen zwischen Ist- und Plankosten, welche auf eine große Planungsunsicherheit hinweisen.

Im Falle des zerobasierten Verfahrens werden die in den früheren Planperioden akzeptierten IH-Aktivitäten auf Ihre Notwendigkeit überprüft. Der aktuelle Zustand der jeweiligen Anlage und die Kosten für das geplante IH-Szenario spielen bei der Ent-

scheidung, ob die jeweilige IH-Aktivität in den jährlichen Budgetplan aufgenommen wird oder nicht, eine wichtige Rolle [Osztermayer, 2004].

Nach Peter Horvath können die Budgetierung und das Budget als Planung- und Kontrollsystem aufgefasst werden [Horvath, 1997]. In Anlehnung an ihn kann die Budgetierung in drei Zeitperioden für die zukünftigen Budgets unterschieden werden. Demnach sollen die IH-Aktivitäten in die folgenden Kategorien eingeordnet werden.

1. Strategisch (langfristig, 5-10 Jahre)
2. Taktisch (mittelfristig, 3-5 Jahre)
3. Operativ (< 3 Jahre)

Der Modul für das finanzielle Risikomanagement wird in der vorliegenden Arbeit auf der Grundlage der zerobasierten Budgetplanung (ZBBP) basieren. Dieser Ansatz soll die bisherigen Unzulänglichkeiten in der Budgetierung beseitigen, indem es für die computergestützte Planung von IH-Aktivitäten eine zustandsbasierte, transparente Lösung bietet. In den späteren Absätzen, im Zuge der Konzeptdarlegung, wird ein Planungsverfahren, gemäß der obigen Auffassung von Horvath über Budgetierung und das Budget, detailliert beschrieben. Die aufeinanderfolgenden Schritte der Budgetplanung sind zum besseren Verständnis in [Osztermayer, 2005] anschaulich visualisiert dargestellt.

2.1.2 Abschreibung im Bereich des technischen Anlagenvermögens

Abschreibungen sind Kosten für die Abnutzung der Produktions- und Anlagengüter im Leistungserstellungsprozess.

Grundsätzlich gibt es zwei Arten von Abschreibungen. Die bilanzielle Abschreibung und die betriebswirtschaftliche, kalkulatorische Abschreibung. Diese unterscheiden sich nach ihren Zielsetzungen.

Während sich die bilanzielle Abschreibung nach dem Prinzip der nominellen Kapitalerhaltung und handelsrechtlichen bzw. steuerlichen Zwecken richtet und auf der Basis der Beschaffungskosten planmäßig durchgeführt wird, dient die kalkulatorische Abschreibung ausschließlich der betrieblichen Kostenrechnung, um den verursachungsgerechten Wertverzehr zu ermitteln. Ziel dieser Abschreibungsart ist die Substanzerhaltung oder anders ausgedrückt die Aufrechterhaltung des ursprünglichen Leistungspotentials von Anlagengütern. Das bedeutet, dass das Leistungspotential, ausgedrückt in Geldeinheiten, über die Nutzungszeit erhalten werden soll [Horvath, 1997]. Daher sind die Anlagengüter vom Wiederbeschaffungswert (*Tageswert*) abzuschreiben, damit am Ende der Nutzungsdauer eine gleichwertige Anlage mit gleicher Leistung beschafft werden kann.

Aus der Sicht des anlagennahen Asset-Managements ist die kalkulatorische Abschreibung deshalb von besonderer Bedeutung, weil sie Anspruch auf die zustandsbasierte Ermittlung des Werteverzehrs stellt. Die auf diese Weise bestimmte Amortisation spiegelt den aktuellen Leistungspotenzialverlust der Anlage wieder und unterstützt eine präzisere Prognose ihrer tatsächlichen Restlebensdauer.

Um den in dieser Abhandlung vorgeschlagenen zustandsbasierten Verfahren in den Kontext von möglichen Abschreibungsverfahren einordnen zu können, sind diese in Bild 2.1 schematisch zusammengestellt. Neben dem Methodengerüst, visualisiert das genannte Bild auch einen Modul für die online Zustandsbeurteilung, welcher als

Datenquelle für die Budgetprognose und die Abschreibungen dient. Bei der Budgetprognose wird dabei angenommen, dass der aktuelle zustandsbasierte Abschreibungsbetrag das aktuell benötigte Budget widerspiegelt. Ob ein Titel in das operative Budget tatsächlich aufgenommen wird oder nicht, soll dabei anhand der Prognose je Titel individuell entschieden werden. Ein Beispiel zum Verfahren der Budgetplanung für den Ersatz wird später in Abschnitt 4.4.3 gegeben.

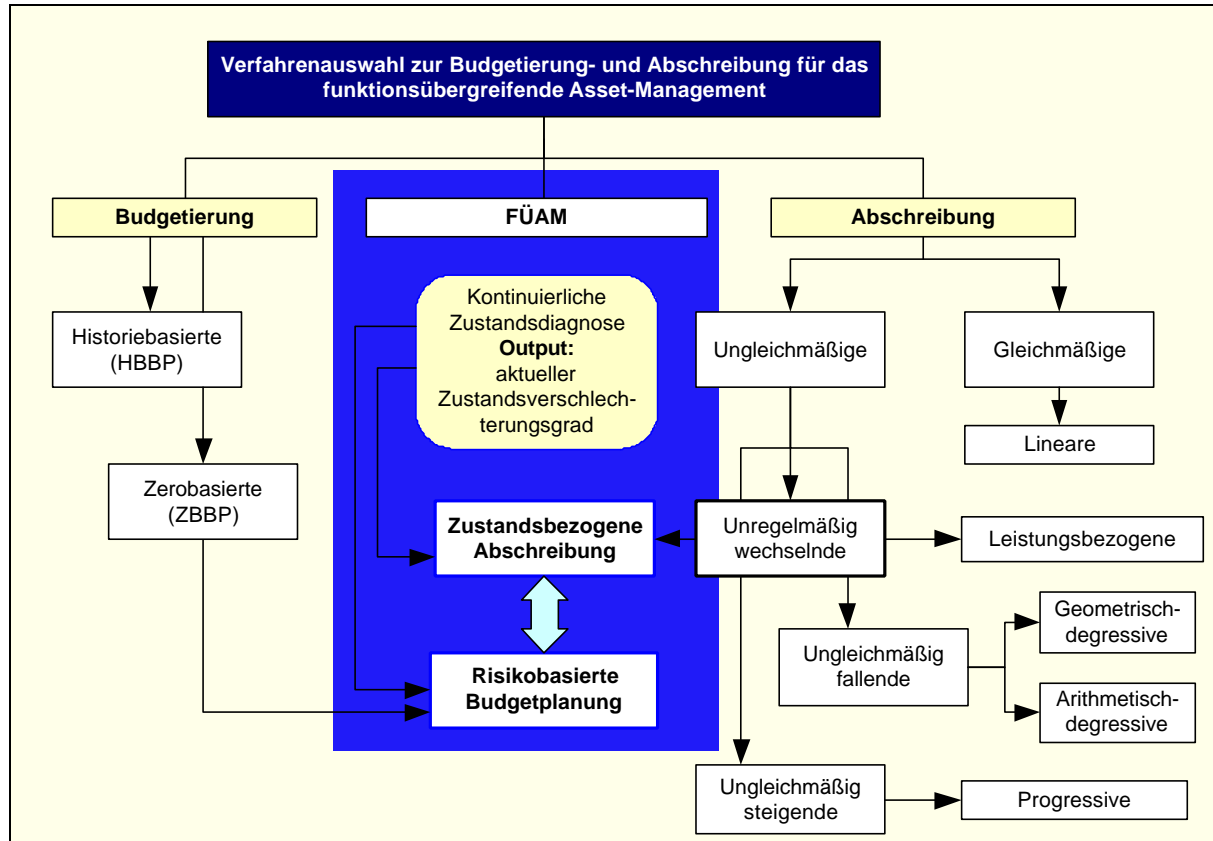


Bild 2.1 Zusammenführen von geeigneten Ansätzen der Budgetierung und Abschreibung für die Konzipierung des funktionsübergreifenden Asset-Management-Ansatzes

2.1.2.1 Traditionelle Abschreibung

Bei den meisten EVU-s wird die Abschreibung des technischen Anlagenvermögens (*Transformatoren, GIS-Anlagen*) meistens nur aus der Sicht der bilanziellen Abschreibung vorgenommen, wobei als Abschreibungsmethode vorzugsweise (*aber nicht ausschließlich*) die lineare Abschreibung über eine geplante Nutzungsdauer eingesetzt wird. Obwohl die Verbreitung der kalkulatorischen Abschreibung in der Branche explizit nicht untersucht wurde, kann man anhand glaubwürdiger Schätzungen behaupten, dass die Anwendung der zustandsbasierten kalkulatorischen Abschreibung mittels Fuzzy-Logik bisher nicht stattfindet.

Aufgrund der Intention, das neu entwickelte Verfahren der zustandsbasierten kalkulatorischen Abschreibung im Laufe der Ausarbeitung mit der linearen Abschreibungsmethode zu vergleichen, werden nachfolgend die wichtigsten Schritte -und Begriffe der linearen Abschreibung aufgeführt. Auf die Ausweitung der Untersuchung bezüglich anderer Abschreibungsmethoden, wie progressive und degressive [Olfert, 1996] wird an dieser Stelle verzichtet. Es muss jedoch bemerkt werden,

dass als Vergleichsreferenz für die neue zustandsbasierte Methode jegliche Art der herkömmlichen Abschreibungsmethoden herangezogen werden kann.

Bei linearer Abschreibung wird der Basiswert eines Anlagengutes gleichmäßig auf die einzelnen Rechnungsperioden verteilt, in denen die Anlage voraussichtlich genutzt wird. Gemäß des Zweckes der kalkulatorischen Abschreibung wird für die Abschreibungsbasis der Wiederbeschaffungswert der Anlage am Ende ihrer geplanten Nutzungsdauer gewählt. Es gelten die Gl.-en (2.1-2.2) für die Bestimmung des jährlichen linearen Abschreibungssatzes (A_L). Die Gl. 2.3 beschreibt dabei den Zeitwert der Anlage ($ZW_L(t)$) nach der jeweiligen Abschreibungsperiode (t).

$$A_L = \frac{WW - RW}{ND} \quad (2.1)$$

$$WW = BK \cdot \left(1 + \frac{IR}{100}\right)^{ND} \quad (2.2)$$

ND \Rightarrow Geplante Nutzungsdauer bei der Inbetriebnahme in Jahren.

WW \Rightarrow Wiederbeschaffungswert am Ende der geplanten Nutzungsdauer.

RW \Rightarrow Geschätzter Restwert am Ende der geplanten Nutzungsdauer.

BK \Rightarrow Beschaffungskosten zu Beginn der Inbetriebnahme.

IR \Rightarrow Mittelwert der geschätzten jährlichen Inflationsrate über die ND.

$$ZW_L(t) = WW - \left(\frac{WW - RW}{ND}\right) \cdot t \quad \text{wo: } t = 1, 2, 3, \dots, ND \text{ ist.} \quad (2.3)$$

Dass die Anwendung der eben vorgeführten Berechnung des Anlagenzeitwertes bei der Festlegung des Ersatzzeitpunktes zu erheblichen Fehlbeurteilungen in der Investitionsplanung führen kann ist offensichtlich. Auf den tatsächlichen Anlagenzustand geht der vorgeführte Berechnungsalgorithmus gar nicht ein, obwohl der Zustand für die Bestimmung des Ersatzzeitpunktes ursächlich ist. Aus diesem Grunde ist der finanzmathematische Ansatz nach Gl. 2.3 für die Bestimmung der Restlebensdauer im neuen AM-Konzept nicht zu gebrauchen. Er kann jedoch für die im nächsten Abschnitt beschriebene, zustandsbasierte Methode als Vergleichsreferenz dienen.

2.1.2.2 Zustandsbasierte Schätzung der kalkulatorischen Abschreibung

Im Gegensatz zu der Bestimmung des absoluten Abschreibungsbetrages (A_L) nach der Methode der linearen Abschreibung in Gl. 2.1, wird der kalkulatorische Abschreibungsbetrag (KA) nach dem vorliegenden Konzept durch eine relative Kenngröße, *benannt als Relativer Zustandsverschlechterungsgrad ($ZVG(t)$)*, berechnet. Diese in Prozent ausgedrückte zeitabhängige Größe wird anhand von zustandsrelevanten Messgrößen einer der Abschreibung zugrundeliegenden Betriebsmittelkomponente mittels regelbasierter Fuzzy-Folgerung geschätzt. Verwendet man den Wiederbeschaffungswert des Abschreibungsgegenstandes als Abschreibungsbasis, dann errechnet sich der absolute kalkulatorische Abschreibungsbetrag ($KA(t)$) nach der Gl. 2.4 und der Zeitwert des Wirtschaftsgutes ($ZW_K(t)$) nach Gl. 2.5.

$$KA(t) = \frac{ZVG(t)}{100} \cdot (WW - RW) \quad (2.4)$$

$$ZW(t) = WW - \frac{ZVG(t)}{100} \cdot (WW - RW) \quad (2.5)$$

Der Zeitwert nach Gl. 2.5 ist kein Marktwert. Er stellt den noch abzuschreibenden Betrag zum aktuellen Zeitpunkt dar und gibt Auskunft über das aktuelle Leistungspotenzial der Anlage auf monetärer Basis. Setzt man in Gl. 2.5 den Wiederbeschaffungswert und den Restwert zum aktuellen Zeitpunkt ein, dann ergibt sich der geschätzte Marktwert (MW(t)) der Anlage (vgl. Gl. 2.6).

$$MW(t) = WW(t) - \frac{ZVG(t)}{100} \cdot (WW(t) - RW(t)) \quad (2.6)$$

Im späteren Verlauf werden Simulationsergebnisse der beiden genannten Methoden verglichen und die Vorteilhaftigkeit der simultanen Darstellung zur Restlebensdauerabschätzung eines Transformators an einem Beispiel demonstriert.

2.2 Beherrschen von Unsicherheiten durch Risikomanagement

In diesem Abschnitt werden zunächst die möglichen Erwartungsstrukturen bezüglich zukünftiger Ereignisse vorgestellt. Gleich im Anschluss an diese Vorstellung findet die Auswahl der für die vorliegende Arbeit relevanten Erwartungsstruktur statt und wird deren besondere Berechtigung für den kritischen Anlagenbereich wie Leistungstransformatoren und Leistungsschalter fundiert. Als nächstes wird der erarbeitete Risikomanagementprozess im Zusammenhang mit der Budgetierung gezeigt, woran sich der „Brückenfunktionsbau“ als Zentralelement des funktionsübergreifenden AM-Ansatzes erkennen lässt.

2.2.1 Erwartungsstrukturen bezüglich zukünftiger Ereignisse

Die Bewertung von zukünftigen, mit Unsicherheit behafteten Ereignissen wie z.B. Ausführung eines IH-Szenarios spielt für das anlagennahe Asset-Management eine erfolgskritische Rolle. Die aus der zustandsbedingten Unsicherheit resultierenden finanziellen Konsequenzen wie zustandsinduzierte Zahlungsströme erben die genannte Unsicherheit, welche eine effiziente Prozesssteuerung vereiteln kann. Deshalb soll ein Ansatz zur Beherrschung der Unsicherheit gefunden werden, welcher die erwähnten Zahlungsströme in Bezug auf Volumen und deren zeitliche Aspekte mit akzeptabler Genauigkeit abschätzen lässt.

Es wird über Unsicherheit gesprochen, wenn man mindestens zwei Zustände für möglich hält, von denen genau einer eintreten wird. Sollte man jedoch den denkbaren Zuständen Eintrittswahrscheinlichkeiten zuordnen können, redet man über Risiko. Wie die Wahrscheinlichkeiten bestimmt werden, hängt von der Art der zu beurteilenden Zustände ab. Bei Vorlage einer großen Zahl gleichartiger Fälle können Häufigkeitsverteilungen über den Eintritt möglicher Zustände ermittelt werden. Die ermittelte Wahrscheinlichkeitszahl wird in diesem Falle als objektiv bezeichnet. Wenn jedoch die Wahrscheinlichkeit, über den Eintritt des möglichen Zustandes, nur durch eine Schätzung des Beobachters abgeleitet werden kann, spricht man über subjektive Wahrscheinlichkeit.

Aufgrund der vorherigen Definition ist offensichtlich, dass die Ableitung der Eintrittswahrscheinlichkeit von Instandhaltungsmaßnahmen bei Leistungstransformatoren und Leistungsschaltern „wegen der begrenzten Anzahl von gleichartigen Fällen“ meistens nur durch kontinuierliche „Beobachtung“ bzw. Überwachung erfolgen kann.

Beachtet man die obigen Feststellungen und zieht die hohe Individualität (*bedingt durch Lastbedingungen, IH-Praxis usw.*) der ausgewählten Betriebsmittel in Betracht, dann fällt die Entscheidung bei der Erwartungsstrukturauswahl auf die Risikobestimmung durch subjektive Wahrscheinlichkeiten. Die möglichen Optionen, welche zur Auswahl stehen, sind dabei in Bild 2.2 zusammengestellt.

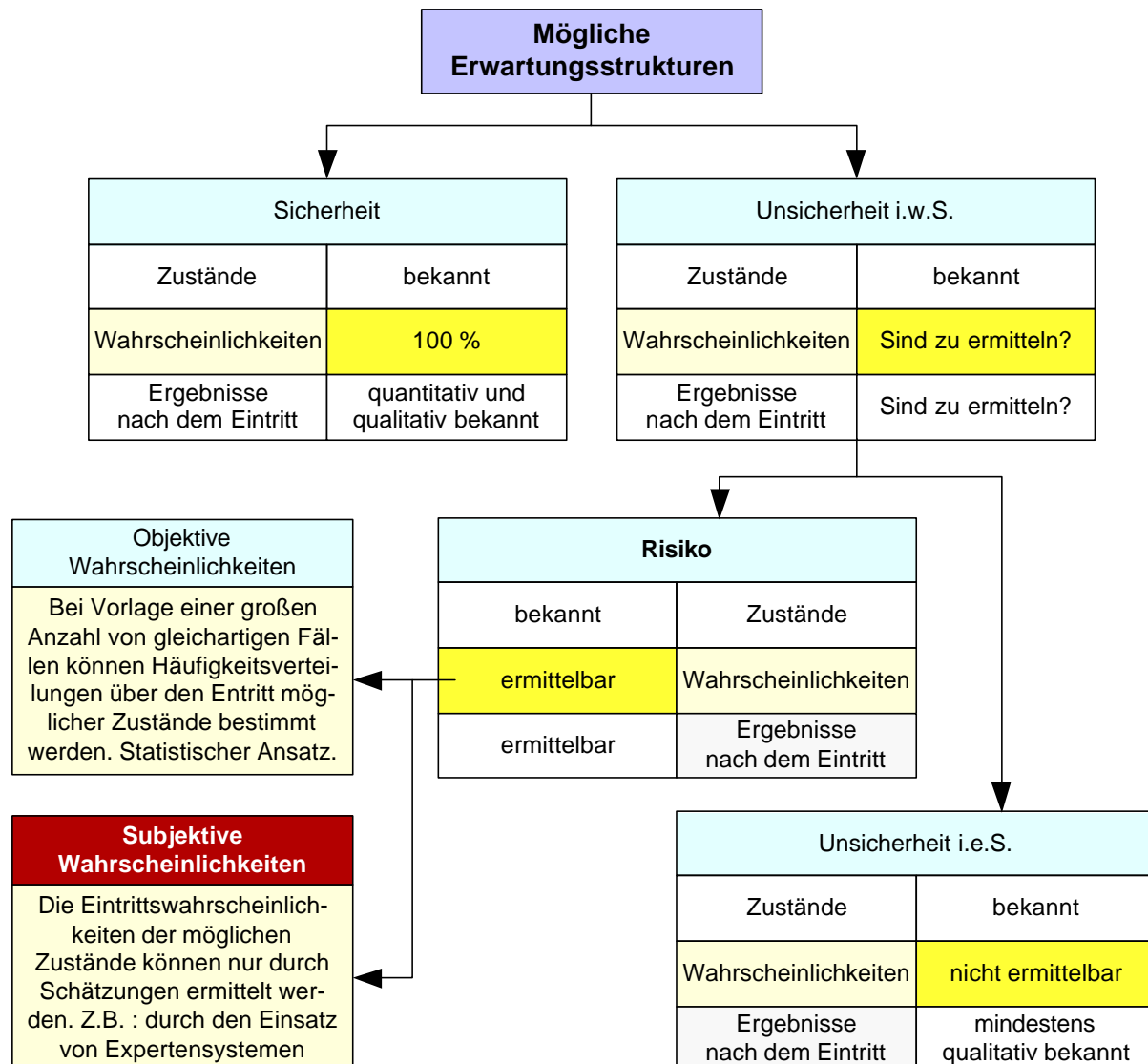


Bild 2.2 Der Begriff von „Risiko“ im Kontext von möglichen Erwartungsstrukturen

Um die Glaubwürdigkeit in dem neuen AM-Ansatz durch das fehlinterpretierbare Wort „subjektiv“ nicht gleich am Anfang zu erschüttern, soll das folgende Zitat bezüglich der Subjektivität Klarheit schaffen:

„Subjektive Meinungen von Experten
beruhen auf objektiven Tatsachen“
(Dr. Otto Papp)

2.2.2 Risikomanagement mittels Erwartungskosten

Risiko auf monetärer Basis ist, die Wahrscheinlichkeit eines unerwünschten Ereignisses multipliziert mit den zu erwartenden monetären Auswirkungen.

Ausgehend von der obigen Definition und der konkreten Aufgabenstellung in Punkt 1.5.2 -*das zustandsbedingte finanzielle Risiko zu quantifizieren*- ergeben sich zwei Teilaufgaben, die man zu lösen hat:

1. Ableitung der Wahrscheinlichkeit des Fehler- bzw. IH-Szenarioeintrittes durch Beobachtung [Csernyák, 1978].
2. Bestimmung der monetären Auswirkungen für den Zeitpunkt der Entscheidung zur Risikominderung [Osztermayer, 2005].

Durch fortgeschrittenes Zustandsmonitoring ist das Risiko im Realgüterbereich eine regulierbare Zielfunktionsgröße geworden. Den Prozess, der diese Regelung abbildet, nennt man Risikomanagementprozess. Er wird nachfolgend beschrieben.

In dem vorgeschlagenen Konzept wird die quasiobjektive Wahrscheinlichkeit des Fehlereintrittes schrittweise geschätzt. Dabei wird angenommen, dass zwischen dem durch Fuzzy-Logik berechneten Zustandsverschlechterungsgrad (englisch: Depreciation (**D**)) und der Fehlereintrittswahrscheinlichkeit (**P**) eine starke positive Korrelation besteht. Die Auswirkung des Fehlereintrittes wird in Form monetär bewerteter IH-Szenarien bestimmt. Die Auswahl für ein angemessenes IH-Szenario trifft man dabei anhand des aktuellen Wertes der Fehlereintrittswahrscheinlichkeit. Das Bild 2.3 stellt die beschriebene Prozedur in Details dar.

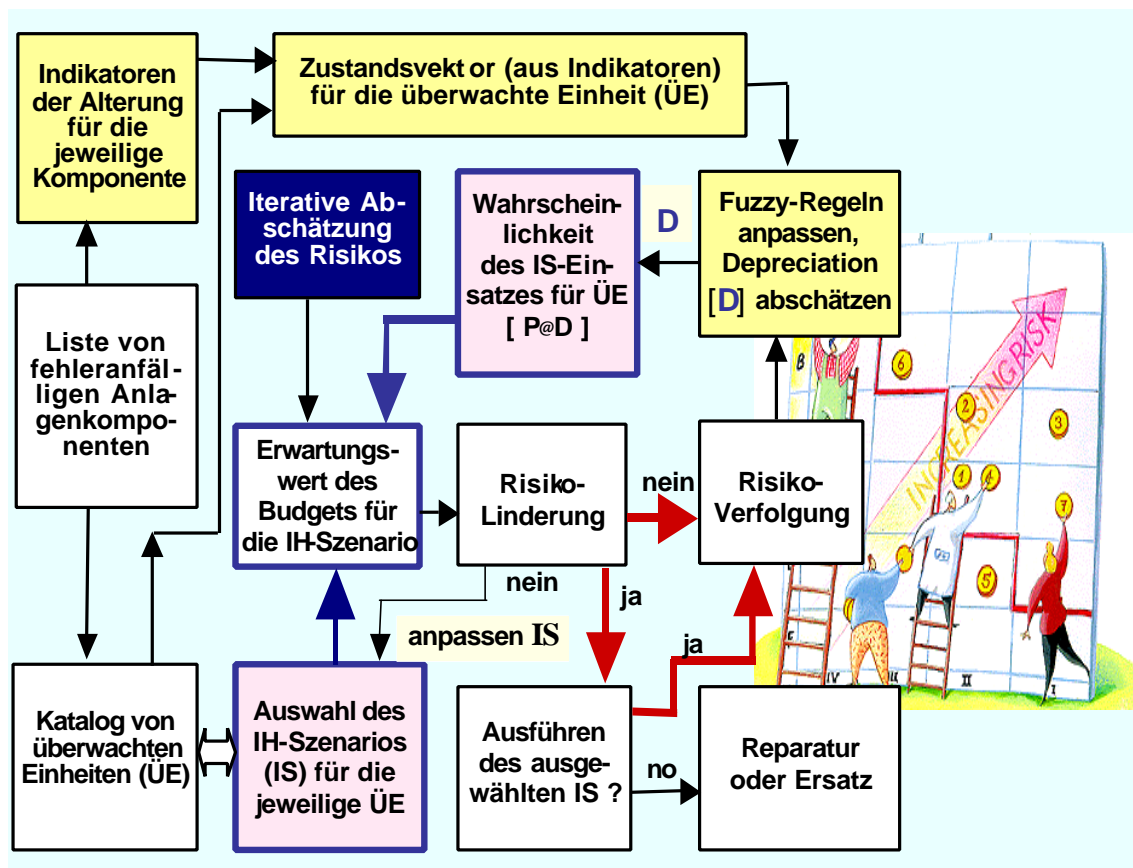


Bild 2.3 Risikomanagement-Prozess auf der Ebene von überwachten Einheiten

Der Risikosteuerungsprozess in Bild 2.3 besteht aus den folgenden Teilschritten:

- Bildung von überwachten Einheiten (ÜE) aus fehleranfälligen Anlagenkomponenten.
- Zusammenstellen eines Katalogs monetär bewerteter IH-Szenarien je ÜE.
- Bildung eines Zustandsvektors, dessen Elemente aus zustandsrelevanten Messgrößen der jeweiligen ÜE bestehen.
- Schätzung des Zustandsverschlechterungsgrades (ZVG) von überwachten Einheiten durch Fuzzy-Logik und Folgerung auf die Fehlereintrittswahrscheinlichkeit durch den aktuellen Zustandsverschlechterungsgrad ($P \cong ZVG=D$).
- Berechnung des mit Erwartungskosten (EK) charakterisierten Risikos für alle ÜE-en ($EK=P \cdot \text{Kosten für das ausgewählte IH-Szenario}$).
- Entscheidung, ob eine Risikominderung erforderlich ist oder das Risiko unter Überwachung weiter steigen kann. Falls für eine Risikominderung entschieden wird, sollen die relevanten Kosten für den entsprechenden Zeithorizont budgetiert werden [Osztermayer, 2005].

Das vorgestellte Risikomanagement-Modell stellt eine wirkungsvolle Entscheidungshilfe für die Budgetierung dar, gibt jedoch keine Auskunft über die Ausführungsreihenfolge von in das Budget aufgenommenen IH-Szenarien. Wie die Reihenfolge von Instandhaltungsaktivitäten bestimmt werden kann, ist in einem Fallbeispiel für Leistungsschalter ausführlich beschrieben (siehe Kapitel 6., Punkt 6.6.2.2).

Zum Schluss soll auf die Bindungsmöglichkeit risikobasierter Kennzahlen hingewiesen werden. Zum Beispiel bildet die Summe von Erwartungskosten über alle ÜE-en des gesamten Anlagenparks das steigende finanzielle Risiko für das Unternehmen ab. Das Finanzwesen soll je nach Struktur und Höhe des Risikos rechtzeitig reagieren.

2.2.3 Risikomanagement mittels zweckmäßig gebauter Risikovektoren

Beim Risikomanagement mittels zweckmäßig gebauter Risikovektoren wird davon ausgegangen, dass das von einem Betriebsmittel ausgehende Risikopotenzial für die Versorgungszuverlässigkeit mit einer linearen Kombination von zwei risikorelevanten Größen; Zustandsverschlechterung (**ZVG**) und Wichtigkeit (**W**) beschrieben werden kann ($TR=ZVG+I \cdot W$) [Osztermayer, 2002]. Die den genannten Größen entsprechenden Vektoren werden dabei in einem Descartes-Koordinatensystem zu einem Risikovektor zusammengefasst. Die erläuterte Vorgehensweise ist in Bild 2.4 bildhaft dargestellt.

Zur anschaulichen Darstellung der Reihenfolge von betriebsmittelrelevanten Risikovektoren wird in das W-ZVG-Diagramm in Bild 2.4 eine zusätzliche Hilfsachse (HA) im Winkel von $45^\circ \angle(B,O,w)$ eingefügt. Den Punkt **C** erhält man durch Lotfällen von **A** auf HA, den Punkt **B** durch Verlängern des Lotes von **A** auf die W-Achse bis zu HA.

Der Winkel $\angle(C,A,B)$ ist ebenfalls 45° , da die Schenkel \overline{CA} und \overline{AB} paarweise senkrecht stehen auf \overline{BO} und \overline{Ow} , die ihrerseits einen Winkel von 45° einschließen.

Damit entspricht die Strecke \overline{AB} der Summe aus $\overline{O-zvg}$ (**ZVG**) und $\overline{O-w}$ (**W**) und somit dem vorhin definierten Risiko.

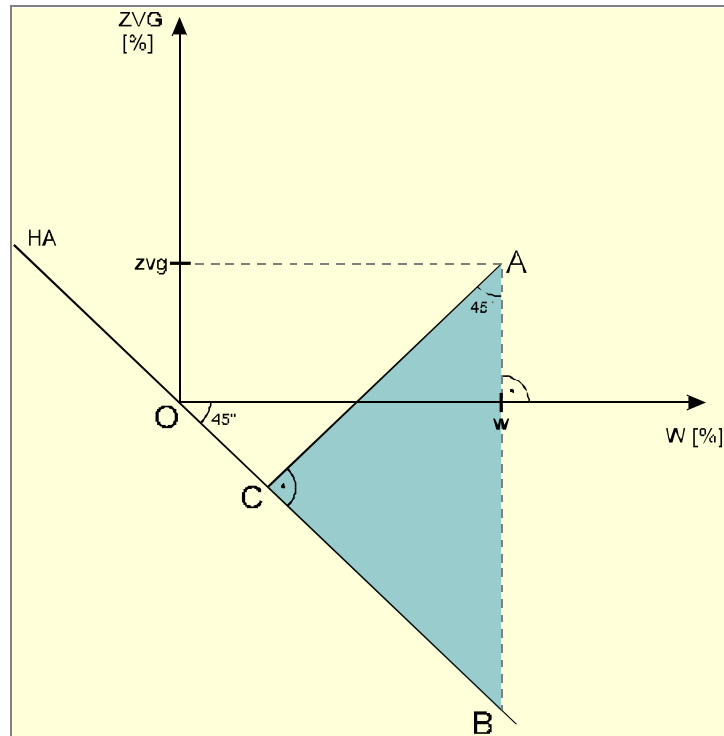


Bild 2.4 Abbildung des Risikos im Kontext der Wichtigkeit und der Zustandsverschlechterung

Im nachfolgenden Bild 2.5 sind zum Vergleich zwei Betriebsmittel mit den entsprechenden Zustandsverschlechterungsgraden und Wichtigkeiten eingetragen. Die Reihenfolge nach Risikopotential lässt sich nun leicht an Hand des Prioritätskriteriums Risiko (TR), repräsentiert durch Vektoren \overline{AB} und \overline{DE} ablesen.

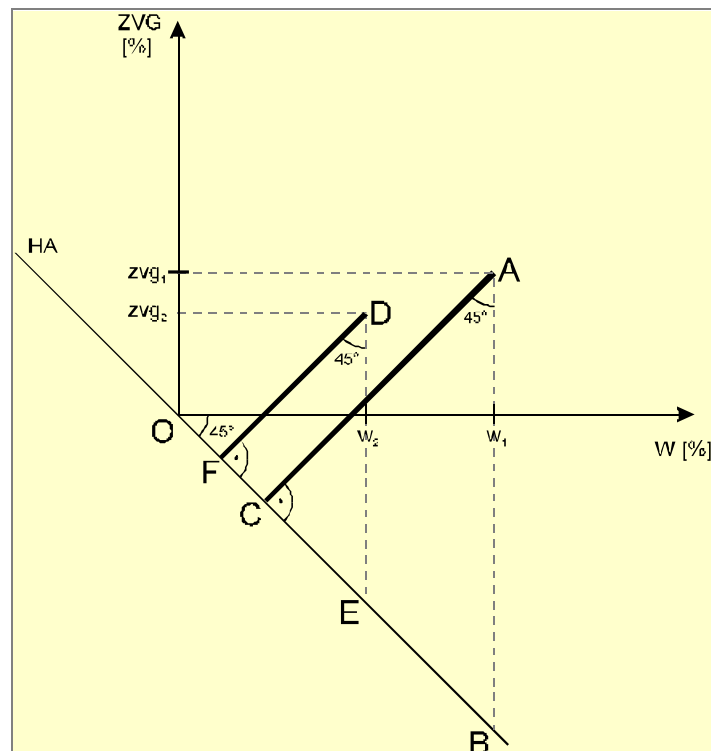


Bild 2.5 Abbildung des Risikopotentials im Asset-Portfolio

Anstatt der oben angegebenen Strecken (\overline{AB} und \overline{DE}) wird in der Fachliteratur gemäß dem Bild 2.6 die Distanz zur Hilfsachse HA (hier Strecken \overline{AC} und \overline{DF}) zur Abbildung der Risikostruktur verwendet. Diese Wahl ist dadurch begründet, dass in diesem Fall das Ablesen der resultierenden Reihenfolge erleichtert wird. Die Risikostruktur bleibt dabei wegen der Ähnlichkeit der zugehörigen Dreiecke unverändert.

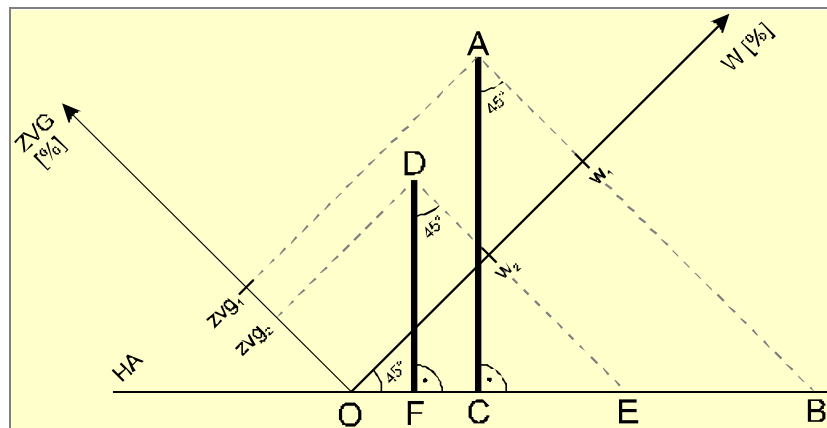


Bild 2.6 Ablesen der Gefährdungsreihenfolge an Hand der Risikovektoren

Abschließend sei bemerkt, dass eine Gewichtung der risikobildenden Komponenten wie Wichtigkeit und Zustand durch die Änderung des Winkels der Hilfsachse sich einstellen lässt, wodurch sich IH-Strategien wie zustandsabhängige (CBM) [Solvang, 2001], zeitabhängige (TBM), korrektive (CB) und zuverlässigkeitsorientierte (RCM) abbilden lassen [Balzer, 2003]. Eine praxisorientierte Anwendung dieses Ansatzes für die Bestimmung der Ersatzstrategie von Transformatoren ist in Kapitel 4 ausführlich beschrieben.

2.3 Regelbasierte Expertensysteme und die Fuzzy-Logik

Während die verbreitete Zustandsbewertung mit „Schulnoten“ bei dem technischen Servicepersonal akzeptiert wird, stößt diese bei den Befürwortern des bereichsübergreifenden Asset-Managements auf Ablehnung. Die Gründe für die Ablehnung sind dabei vor allem in den folgenden Aspekten zu sehen:

- Die Vergabe von Noten erfolgt auf der Basis subjektiver Wahrnehmung.
- Die einheitliche Anwendung von scharfen Bewertungskriterien ist nicht garantiert, wobei Ihre starke Diskretisierung die Bewertungsplausibilität in Frage stellt.
- Die Noten-Vergabeprozedur auf Computerbasis ist nicht zu automatisieren und deshalb steht sie nicht im Einklang mit dem computergestützten AM-Konzept.

Um eine zeitkontinuierliche Bewertung auf einer objektiven Basis, in computergerechter Form zu bekommen und gleichzeitig die von Experten gepflegte verbale Folgerung für die Zustandsbeschreibung beizubehalten, hat man zwecks Konzeptimplementierung die regelbasierten Expertensysteme aufgegriffen [Fathi, 1995].

Zunächst werden die wichtigsten Eigenschaften von Expertensystemen erläutert und darauf aufbauend die theoretischen Grundlagen zur Fuzzy-Logik, *als Zentralelement des vorliegenden Expertensystems für die Zustandsbeurteilung*, erklärt. Auf ein detailliertes Beispiel wird zunächst verzichtet, eine praxisrelevante Anwendung für Leistungsschalter wird jedoch in Kapitel 6. in Details gezeigt.

2.3.1 Expertensystem für die Zustandsdiagnose und seine Anwendung

Als Expertensystem werden Software-Systeme bezeichnet, die auf der Basis von Expertenwissen zu Bewertungen bestimmter Problemstellungen gelangen können [Kerndlmaier, 1989]. Dabei reproduzieren sie den Inhalt der Wissensbasis und sind auch in der Lage auf Grundlage der erwähnten Wissensbasis zu Schlussfolgerungen zu gelangen.

Abhängig von der Art der Wissensrepräsentation und Schlussfolgerungsmechanismen kommen unterschiedliche Modelle zum Einsatz [Yen, 1995], [Richter, 1989].

Fallbasierte Systeme gehen von einer Falldatenbasis aus, welche konkrete Problemstellungen in ihrem Kontext mitsamt einer vorgenommenen Lösung beschreiben (z.B. *Krankheitsbilder - konkrete Diagnose*). Das System versucht zu einem gegebenen Fall einen möglichst ähnlichen Fall in seiner Falldatenbasis aufzufinden und dessen Lösung auf den aktuellen Fall zu übertragen.

Regelbasierte Systeme, die auch bei dem vorliegenden Konzept zum Zuge kommen, basieren hingegen nicht auf konkreten Fallbeschreibungen, sondern auf Regeln, aus welchen Schlussfolgerungen für konkrete Situationen gezogen werden können.

2.3.2 Theoretische Grundlagen zur Fuzzy-Logik

Die Fuzzy-Set-Theorie, die von Prof. Lotfi A. Zadeh entwickelt wurde, wird sowohl für die Lösung technischer Probleme als auch für die Entscheidungsfindung erfolgreich eingesetzt. Auf der Basis der Fuzzy-Set-Theorie entwickelte Professor Zadeh die Fuzzy-Logik, um die menschlich-logische Denkweise und Entscheidungsstrategien für den Computer nutzbar zu machen [Yen, 1995; Altrock, 1993].

Im Gegensatz zu den Ansätzen, bei denen der Entscheidungsfindung ein mathematisch-exaktes Prozessmodell zu Grunde gelegt wird, benötigt eine Fuzzy-Logik-Entscheidungsfindung das erwähnte, oft sehr komplexe Modell nicht. Fuzzy-Logik-Entscheidungsfindung basiert auf einem durch linguistisches Regelwerk beschriebenen Prozessabbild. Modellbeschreibungen mit Fuzzy-Logik sind leicht verständlich und sie können durch Änderung des Regelwerkes schnell angepasst werden. Diese Eigenschaft ist insbesondere im Anlagenbereich wichtig, wo das Bedienungspersonal die Entscheidungskriterien in Form von Beurteilungsregeln zu formulieren pflegt und die Zustandsbeurteilungsregel einer zeitlichen Änderung unterliegen können.

Im folgenden werden zum besseren Verständnis die wichtigsten Begriffe der unscharfen Mengen (*engl. Fuzzy-Sets*), die unscharfe Logik und darauf folgend ein Beispiel ihrer praktischen Anwendung bezüglich der Bildung von Fuzzy-Relationen für die mathematische Abbildung sprachlich formulierter Fuzzy-Regeln präsentiert. Die grafische Darstellung der Zustandsbeurteilung einer Betriebsmittelkomponente wird zum Schluss gegeben, sie soll die Nachvollziehbarkeit der erworbenen Kenntnisse unterstützen.

2.3.2.1 Begriff und Darstellungsform unscharfer Mengen

Den Begriff der unscharfen Mengen kann man am besten im Kontext der klassischen Mengenlehre erklären. Während eine Menge im klassischen Sinne ein betrachtetes Element „eindeutig und vollständig“ enthält oder nicht, kann ein betrachtetes Element zu einer unscharfen Menge ganz oder nur zu einem gewissen Grad gehören [Islam, 1985; Hiyama, 1999].

Der Zugehörigkeitsgrad ist ein quantitatives Maß dafür, inwieweit ein betrachtetes Element die Eigenschaften einer unscharfen Menge erfüllt. Zu einer unscharfen Menge, die mit dem linguistischen Term „schwarzes Auto“ bezeichnet wird, gehört z. B. ein weisses Auto zu null Grad (0%), ein graues Auto zu 0,5 Grad (50%) und ein schwarzes Auto zu 1 Grad (100%).

Definition für eine Fuzzy-Menge:

Ist \mathbf{G} eine Grundmenge, so heißt die Abbildung $\mu: G \rightarrow [0, 1]$ eine Fuzzy-Menge in \mathbf{G} . μ wird auch als Zugehörigkeitsfunktion der Fuzzy-Menge bezeichnet, die jedem Element $x \in G$ den Zugehörigkeitsgrad $\mu(x)$ aus dem Intervall $[0, 1]$ zuordnet.

Für Fuzzy-Mengen gibt es eine Reihe unterschiedlicher Beschreibungsformen:

1. Direkte grafische Darstellung durch Zugehörigkeitsfunktionen $\mu(x)$.
2. Diskrete Darstellung durch Angabe einer Anzahl diskreter Wertpaare ($\mu(x) / x$).
3. Parametrische Darstellung in Form analytischer Funktionen.

Fuzzy-Mengen werden später in der Simulation für Leistungsschalter durch die parametrische Darstellung repräsentiert (siehe Kapitel 6.), wobei die Zugehörigkeitsfunktionen auf die folgenden Arten beschränkt bleiben (Gl.-en: 2.7-2.11):

$$\text{sigmf}(x; a, c) = \frac{1}{1 + e^{-a(x-c)}} \quad (2.7)$$

$$\text{psigmf}(x; a_1, c_1, a_2, c_2) = \frac{1}{1 + e^{-a_1(x-c_1)}} \cdot \frac{1}{1 + e^{-a_2(x-c_2)}} \quad (2.8)$$

$$\text{dsigmf}(x; a_1, c_1, a_2, c_2) = \frac{1}{1 + e^{-a_1(x-c_1)}} - \frac{1}{1 + e^{-a_2(x-c_2)}} \quad (2.9)$$

$$\text{trimf}(x; a, b, c) = \begin{cases} 0, & x \leq a \\ \frac{x-a}{b-a}, & a \leq x \leq b \\ \frac{c-x}{c-b}, & b \leq x \leq c \\ 0, & c \leq x \end{cases} \quad (2.10)$$

$$\text{trapmf}(x; a, b, c, d) = \begin{cases} 0, & x \leq a \\ \frac{x-a}{b-a}, & a \leq x \leq b \\ 1, & b \leq x \leq c \\ \frac{d-x}{d-c}, & c \leq x \leq d \\ 0, & d \leq x \end{cases} \quad (2.11)$$

Dabei gilt stets: $x \in \text{Def}$; $a, a_1, a_2, b, c, c_1, c_2, d \in \mathfrak{R}$.

2.3.2.2 Operationen auf unscharfen Mengen

Bei Mengenoperationen werden Mengen verknüpft, wobei die Verknüpfung zwischen den einzelnen Mengenelementen erfolgt. Am Ende der Operation steht eine Menge.

Durch Logikoperationen werden Eigenschaften betrachteter Elemente verknüpft, am Ende steht ein Element mit bestimmter Eigenschaft.

Nachstehend werden die wichtigsten Mengenoperationen aufgelistet, um die Fuzzy-Relationen zur mathematischen Beschreibung von Beurteilungsregeln einzuleiten.

Die Vereinigungsmenge der Menge **A** und der Menge **B** wird nach Gl. 2.12 definiert, wobei der Zugehörigkeitsgrad der Elemente der Ergebnismenge durch den Maximum-Operator laut der Gl. 2.13 zu bestimmen ist [Traeger, 1993].

$$A \cup B = \left\{ (x; \mathbf{m}_{A \cup B}(x)) \mid \mathbf{m}_{A \cup B}(x) > 0 \right\} \quad \forall x \in G \quad (2.12)$$

$$\mathbf{m}_{A \cup B}(x) := \max \left\{ \mathbf{m}_A(x); \mathbf{m}_B(x) \right\} \quad \forall x \in G \quad (2.13)$$

Im folgenden Beispiel wird die Berechnungsvorschrift in Gl. 2.13 durch diskrete Darstellung von unscharfen Mengen **A** und **B** auf der Grundmenge „**G**“ -durch Angabe einer Anzahl diskreter Wertpaare $(\mu(x) / x)$ - für eine Vereinigungsmenge, gemäß Gl. 2.14 demonstriert.

$$G = \{a, b, c, d, f\}$$

$$A = \{(a;0.7), (c;0.3), (d;0.2), (f;0.5)\}$$

$$B = \{(b;1), (c;0.6), (d;0.7), (e;0.2)\}$$

$$\text{Damit ist: } A \cup B = \{(a;0.7), (b;1), (c;0.6), (d;0.7), (e;0.2), (f;0.5)\} \quad (2.14)$$

Die Schnittmenge für **A** und **B** in Gl. 2.17 wird nach Gl. 2.15-2.16 bestimmt. Der Zugehörigkeitsgrad von Elementen der vereinten Menge ist dabei mittels des Minimum-Operators gemäß der Gl. 2.16 zu berechnen.

$$A \cap B = \left\{ (x, \mathbf{m}_{A \cap B}(x)) \mid \mathbf{m}_{A \cap B}(x) > 0 \right\} \quad \forall x \in G \quad (2.15)$$

$$\mathbf{m}_{A \cap B}(x) := \min \left\{ \mathbf{m}_A(x); \mathbf{m}_B(x) \right\} \quad \forall x \in G \quad (2.16)$$

$$\text{Damit ist: } A \cap B = \{(c;0.3), (d;0.2)\} \quad (2.17)$$

Man erkennt, dass die Elemente a, b, e, f in der Schnittmenge fehlen, weil sie nicht in beiden Mengen enthalten sind.

Wegen der Vollständigkeit sei bemerkt, dass es noch weitere Mengenoperationen, wie Komplement, Produkt und Summe gibt. Bezüglich dieser wird jedoch auf die folgenden Literaturstellen hingewiesen [Traeger, 1993; Kahlert, 1993].

2.3.2.3 Fuzzy-Relationen zur Abbildung von Fuzzy-Regeln

WENN-DANN-Regeln, die das Herzstück der bezweckten regelbasierten Zustandsbeurteilung ausmachen, bilden eine Wissensbasis, die durch Experten in sprachlicher Form bereitgestellt wird. Diese Regeln bestehen aus linguistischen Termen (z.B. *klein, groß, mittel*) der zustandsrelevanten linguistischen Variablen (z.B. *Gasfeuchte, Ölfeuchte* [Koch, 2005] *Gasdruck usw.*).

Die genannten Terme werden durch Zugehörigkeitsfunktionen beschrieben und sie müssen für die Inferenz (*die Abarbeitung von Regeln*) verknüpft werden. Im Folgenden wird erklärt, wie eine Fuzzy-Relation die regelrelevanten Fuzzy-Mengen mathematisch verknüpft. Die Beispielbeurteilungsregel, deren Terme der gesuchten Verzahnung zu Grunde liegen sei wie folgt beschrieben:

Wenn x (*Wassergehalt im Isolieröl [ppm]*) **mittel** dann ist y
(*Zustandsverschlechterung des Isolieröls [%]*) **hälfte**

Die den linguistischen Termen (*mittel und hälfte*) entsprechenden, diskreten Fuzzy-Mengen werden für das Beispiel durch die folgenden Wertepaare repräsentiert.

$\mu_1: G_1 \rightarrow [0,1]$ entspricht: *mittel* $\equiv (0;3), (0.5;4), (1;5), (0.5;6), (0.25;6.5), (0;7)$

$\mu_2: G_2 \rightarrow [0,1]$ entspricht: *hälfte* $\equiv (0;30), (0.5;40), (1;50), (0.5;60), (0.25;65), (0;70)$

Definition der Fuzzy-Relation:

Seien $\mu_1: G_1 \rightarrow [0,1]$, $\mu_2: G_2 \rightarrow [0,1]$ Fuzzy-Mengen.

Dann wird die Fuzzy-Relation zwischen G_1 und G_2 über das Kreuz-Produkt (kartesisches Produkt)

$\mu_1 \times \mu_2: G_1 \times G_2 \rightarrow [0,1]$

gebildet. Die Elemente der resultierenden Schnittmenge werden durch Gl. 2.18 berechnet.

$$\mu_R(x,y) = (\mu_1 \times \mu_2)(x,y) := \min(\mu_1(x), \mu_2(y)), \quad (x,y) \in G_1 \times G_2 \quad (2.18)$$

Wendet man die obige Definition auf die vorhin angegebenen Fuzzy-Mengen (**mittel** und **hälfte**) an, dann ergibt sich eine Fuzzy-Relation, gegeben durch die folgende Matrix in Gl. 2.20. Diese Relationsmatrix wird dabei gemäß der Gl. 2.19 aus Vektoren der entsprechenden Grundmengen berechnet.

$$\mu_1 \times \mu_2 = \mu_1^T \circ \mu_2 \quad (2.19)$$

Der Verknüpfungsoperator (\circ) auf der rechten Seite der Gl. 2.19, weist darauf hin, dass bei der Ausführung der üblichen Matrizenoperationen die Multiplikation durch den Min-Operator und die Addition durch den Max-Operator ersetzt werden soll.

$$\begin{pmatrix} 0 \\ 0.5 \\ 1 \\ 0.5 \\ 0.25 \\ 0 \end{pmatrix} \circ (0 \ 0.5 \ 1 \ 0.5 \ 0.25 \ 0) = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0.5 & 0.5 & 0.5 & 0.25 & 0 \\ 0 & 0.5 & 1 & 0.5 & 0.25 & 0 \\ 0 & 0.5 & 0.5 & 0.5 & 0.25 & 0 \\ 0 & 0.25 & 0.25 & 0.25 & 0.25 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix} \quad (2.20)$$

2.3.2.4 Fuzzy-logisches Schließen anhand einer Relationsmatrix

Die Fuzzy-Relationsmatrix, dargestellt in Gl. 2.20, stellt die generelle Verknüpfung zwischen Prämisse und Konklusion einer Fuzzy-Regel dar. Um zur Schlussfolgerung eines fuzzy-logischen Schließens bei einem aktuell vorliegenden Ereignis (*auch Faktum genannt*) zu gelangen, benötigt man jedoch die Konkretisierung der erwähnten Verknüpfung.

Definition: Eine Inferenz ist eine Verarbeitungsvorschrift für WENN...DANN...-Regeln unter Berücksichtigung eines Faktums (*Ereignisses*). Sie hat eine Schlussfolgerung als Ergebnis [Kahlert, 1993].

Nachfolgend wird die gebräuchlichste Art der Inferenz, die MAX-MIN-Komposition, mathematisch abgeleitet und später in Form eines Fuzzy-Inferenz-Bildes dargestellt. Diese mathematisch fundierte, visuelle Abbildung soll den Einstieg zu der fuzzy-logischen Zustandsbeurteilung einleiten.

Um zur Schlussfolgerung bei einem scharfen Eingangswert (x') zu gelangen, muss die Fuzzy-Relationsmatrix in Gl. 2.20 für den genannten Eingangswert (*hier 6,5 ppm Wassergehalt*) ausgewertet werden. Dabei muss man beachten, dass ein scharfer Wert als Singleton auf der entsprechenden Fuzzy-Menge beschrieben werden soll. Das bedeutet für diesen Beispielfall, dass der Vektor für Singleton auf der Fuzzy-Menge „mittel“ anstatt $(0 \ 0.5 \ 1 \ 0.5 \ 0.25 \ 0)$ die Form $(0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 1 \ 0)$ annimmt. Der Vektor (\mathbf{V}) „ $0 \ 0.25 \ 0.25 \ 0.25 \ 0.25 \ 0$ “, ist die Ergebnismenge in Gl. 2.21. Dieser kann als Schlussfolgerung aus der zu Grunde gelegten Regel betrachtet werden. Zu dieser Folgerung kommt man, wenn die Fuzzy-Relationsmatrix mit dem entsprechend ausgelegten Singleton durch den Verknüpfungsoperator „ \circ “ verbunden wird.

$$(0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 1 \ 0) \circ \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0.5 & 0.5 & 0.5 & 0.25 & 0 \\ 0 & 0.5 & 1 & 0.5 & 0.25 & 0 \\ 0 & 0.5 & 0.5 & 0.5 & 0.25 & 0 \\ 0 & 0.25 & 0.25 & 0.25 & 0.25 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix} \equiv (0 \ 0.25 \ 0.25 \ 0.25 \ 0.25 \ 0) \quad (2.21)$$

Ein Beispiel für die Berechnung des fünften Elements des Ergebnisvektors (\mathbf{V}_5) ist in der Gl. 2.22 gegeben. Der Berechnungsvorgang wird dabei mittels des bereits eingeführten Verknüpfungsoperators „ \circ “ demonstriert.

$$V_5 = \max \left[\begin{array}{l} \min(0,0); \min(0,0.25); \min(0,0.25); \\ \min(0,0.25); \min(1,0.25); \min(0,0) \end{array} \right] = 0.25 \quad (2.22)$$

Aus der Inferenz oben kann die Erkenntnis gewonnen werden, dass die Ausgangs-Fuzzy-Menge durch den Erfüllungsgrad der Regelprämisse bestimmt wird. Für den vorliegenden Fall bedeutet dies, dass die ursprüngliche Fuzzy-Ausgangsmenge in der Höhe des Erfüllungsgrades der Regelprämisse, d.h. bei 0.25 abgeschnitten wird. Bei mehreren UND-verknüpften Regelprämissen wird die Abschneidehöhe (\mathbf{H}) durch

das Minimum über die einzelnen Werte der Erfüllungsgrade von einzelnen Prämissen gemäß Gl. 2.23 bestimmt. Die Abschneidehöhe „ H “ ergibt damit den Erfüllungsgrad einer Regel [Altrock, 1993].

$$H := \min(\mu_1(x'_1), \mu_2(x'_2), \dots, \mu_n(x'_n)) \quad (2.23)$$

Gewöhnlich werden mehrere Regeln für die Beschreibung einer Problemstellung verwendet. Das bedeutet, dass die Ergebnis-Fuzzy-Mengen der einzelnen Regeln verknüpft werden müssen. Weil die einzelnen Regeln implizit ODER- verknüpft sind, müssen die zugehörigen Ergebnismengen mittels eines MAX-Operators zu einer resultierenden Ausgangs-Fuzzy-Menge zusammengeführt werden. Dieser Anforderung wird in Gl. 2.24 Rechnung getragen.

$$\mu_{res}(ZVG) = \max_{i=1,2}(\min(H_i, \mu_{ZVG,i}(ZVG))) \quad (2.24)$$

ZVG ist für dieses Beispiel der Zustandsverschlechterungsgrad des Isolieröls.

Das grafische Lösungsbeispiel für die Gl.-en (2.23-2.24) wird im nächsten Abschnitt in Bild 2.7 demonstriert. Das Beispiel bezieht sich dabei auf die Zustandsbeurteilung des Isolieröls eines Transformators.

2.3.2.5 Zustandsbeurteilung des Isolieröls eines Transformators

Um die gewonnenen Erkenntnisse aus den vorherigen Abschnitten erinnerungswirksam festzuhalten, wird hier der Inferenzvorgang durch geeignete Visualisierung dargestellt. Primär wird dabei das Ziel verfolgt, die einzelnen Verarbeitungsschritte (wie *Bildung von unscharfen Mengen und Bestimmung der resultierenden Ausgangs-Fuzzy-Menge durch Abschneiden der entsprechenden Ausgangsmenge beim Regelerfüllungsgrad*) nachvollziehbar darzustellen. Das Inferenz-Bild 2.7 stellt die erwähnten Bearbeitungsschritte exemplarisch dar.

Das Ergebnis der Fuzzy-Inferenz ist zunächst eine resultierende unscharfe Menge für die Ausgangsgröße „Zustandsverschlechterungsgrad“ (*engl. Depreciation (D)*). Um jedoch eine scharfe Ausgangsgröße zu bekommen, muss die Ausgangs-Fuzzy-Menge (*in der linken unteren Ecke in Bild 2.7*) defuzzifiziert werden. Im vorliegenden Fall wurde die Defuzzifizierung mit der Schwerpunktmethode vorgenommen. Es ist das am meisten verwendete Verfahren. Der Flächenschwerpunkt wird dabei nach Gl. 2.25 bestimmt [vgl. Kahlert, 1993]. Die so gebildete Ausgangsgröße (y_{res}) ist eine scharfe Zahl. Sie beschreibt die Zustandsverschlechterung zeitkontinuierlich und ist einfach zu interpretieren.

$$y_{res} = \frac{\int_0^{\infty} y m_{res}(y) dy}{\int_0^{\infty} m_{res}(y) dy} \quad (2.25)$$

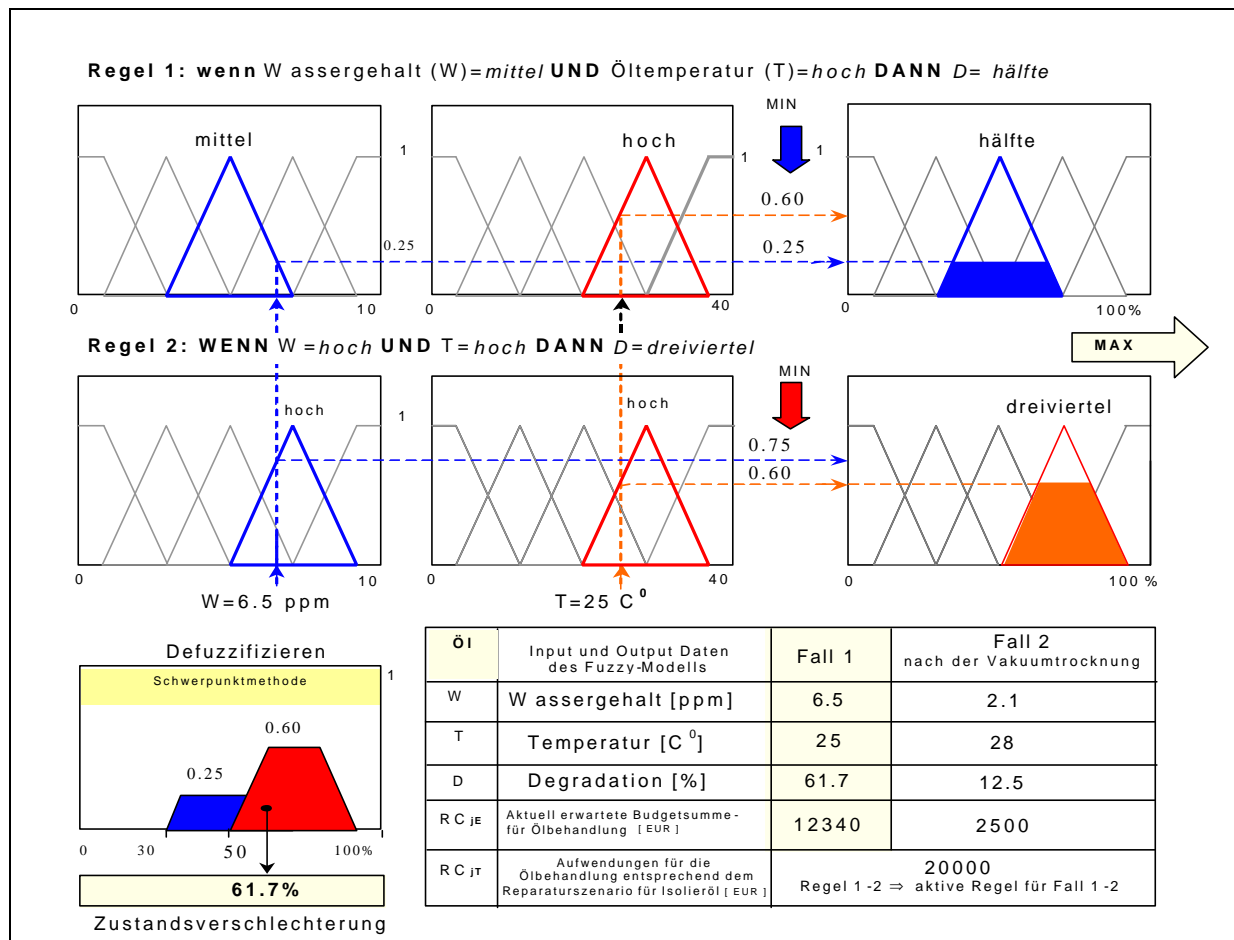


Bild 2.7 Fuzzy-Logik basierte Schätzung des Zustandsverschlechterungsgrades des Transformator-Isolieröles anhand seiner zustandsrelevanten Messgrößen

2.3.3 Beispiel für die Anwendung der Ergebnisse der Zustandsdiagnose

Um die Anknüpfung der Ergebnisse der Zustandsdiagnose an die Zielsetzung des funktionsübergreifenden Asset-Managements direkt zu präsentieren, wird hier ihre Verwendung für das finanzielle Risikomanagement kurz erläutert.

Der finanzielle Risikomanagement-Prozess auf der Komponentenebene ist in Bild 2.3 im Abschnitt 2.2.2 bereits dargestellt worden. Er dient zur Verfolgung von finanziellen Risiken bedingt durch das Budget für die Instandhaltung und den Ersatz von Anlagen.

Nachdem der Zustand des Isolieröles eines Transformators im vorherigen Abschnitt in quantifizierter Form berechnet wurde, kann man das finanzielle Risiko mittels des Erwartungswertes für das vorgesehene Instandhaltungsszenario bestimmen. Dabei wird angenommen, dass die Eintrittswahrscheinlichkeit des aktuellen IH-Szenarios (P_{IH}) mit dem Zustandsverschlechterungsgrad der betrachteten überwachten Einheit (ZVG_{ÜE}) eine starke positive Korrelation aufweist ($ZVG_{ÜE} \cong P_{IH}$).

Aus der in Bild 2.7 integrierten Tabelle ist ersichtlich, dass der Erwartungswert für das IH-Szenario „Vakuumtrocknung“ mit einem Budget von 20000 EUR durch die Ausführung des genannten IH-Szenarios von 12340 EUR auf 2500 EUR gesunken ist. Der Zustandsverschlechterungsgrad änderte sich dabei von 61,7% auf 12,5%.

2.4 Zielkostenrechnung als theoretischer Hintergrund für den neuen Ansatz

Die grundlegenden Erkenntnisse für die Erarbeitung eines wissenschaftlich tragfähigen Konzeptes zur hierarchischen Aggregation der Degradation von fehleranfälligen Betriebsmittelkomponenten wurden durch die Analyse der Zielkostentheorie gewonnen. Es wurde erkannt, dass das verursachungsgerechte Zusammenführen der Zustandsverschlechterung von Energiesystemkomponenten in Analogie zur Funktionsbeitragsaggregation in der Zielkostenrechnung möglich ist. Zur Erinnerung an die konkreten Zielsetzungen in Abschnitt 1.5.2 sei bemerkt, dass die genannte Aggregation für die Bildung von Systemzustandsindikatoren von großer Bedeutung ist. Diese soll eine rechnergestützte Berichterstattung für unterschiedliche Managementebenen ermöglichen und damit den Koordinationsaufwand für den Informationsaustausch wesentlich senken.

Nachstehend wird zunächst die Zielkostenrechnung theoretisch eingeführt und die daraus resultierenden Erkenntnisse für den Bau einer Anlagenhierarchie festgehalten. Es wird erklärt, wie man eine Anlagenhierarchie zweckmäßig gestalten soll, damit die in der Zielkostenrechnung angewandten Berechnungsvorschrift für die geforderte, hierarchische Zustandsaggregation gültig bleibt.

2.4.1 Zielkostenrechnung

Die Zielkostenrechnung (engl.: Target Costing) wurde in der japanischen Wirtschaft in den 1970er Jahren begründet. Zweck der Methode ist es, die vom Markt akzeptierten Gesamtkosten oder anders ausgedrückt die Zielkosten eines Produktes (ZK) unter seinen Komponenten optimal zu verteilen [Williamson, 1997].

Die Optimierung bedeutet dabei, dass sich die Komponentenkosten zu den Gesamtkosten genau so verhalten sollen, wie der Nutzbeitrag der einzelnen Produktkomponenten zum Gesamtnutzen (vgl. Bild 2.8).

Die Bestimmung der Komponentenzielkosten (KZK) erfolgt nach folgenden Schritten:

1. Zuerst wird der Beitrag der wichtigsten Produktfunktionen (F_j) ermittelt.
2. In einem zweiten Schritt werden die einzelnen Produktkomponenten durch deren Komponentenbeiträge (FB_{kj}) den von Ihnen unterstützten Produktfunktionen zugeordnet. Der Beitragsbestimmung wird dabei die vollständige Erfüllung der relevanten Produktfunktion (F_j) zu Grunde gelegt [Baus, 1995].
3. Als dritter Schritt werden schließlich die erlaubten Herstellungskosten, (*d.h. die Komponentenzielkosten (KZK) nach ihrem Gesamtbeitrag (FB_k)*), gemäß Gl. 2.26 bestimmt. Ein Beispiel für die Komponente „1“ ist in Gl. 2.27 gegeben.

$$KZK_k = ZK \cdot FB_k = ZK \cdot \sum_j^n FB_{kj} \cdot F_j \quad (2.26)$$

$$KZK_1 = ZK \cdot \sum_1^3 FB_{1j} \cdot F_j = 20000 \cdot [(0,6 \cdot 0,4 + 0 \cdot 0,4 + 0,2 \cdot 0,2)] = 5600 \quad (2.27)$$

In Bild 2.8 ist die netzähnliche hierarchische Struktur der Verteilung von Funktionsgewichten und der Funktionsbeiträge der einzelnen Produktkomponente detailliert dargestellt.

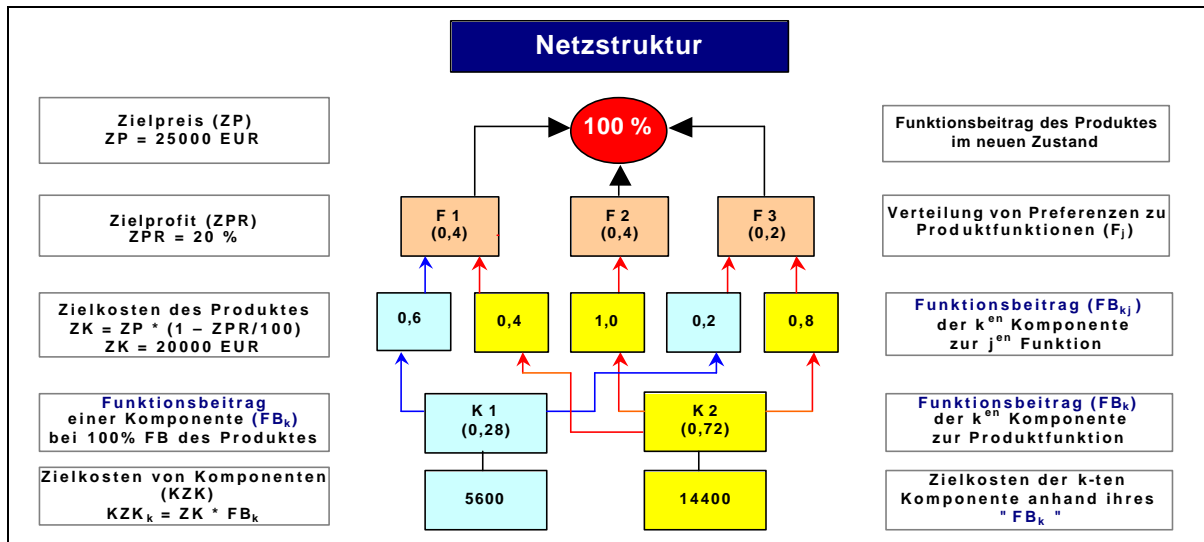


Bild 2.8 Zielkostenspaltung anhand gewichteter Produktfunktionen zwecks der Bestimmung der Zielkosten von Produktkomponenten

Aus der Zielkostenspaltung werden die folgenden Erkenntnisse gewonnen:

1. Im Falle eines optimal entworfenen Produktes entsprechen die Nutzbeiträge der einzelnen Produktkomponenten dem Herstellungskostenanteil der jeweiligen Komponente an den Gesamtkosten des Produktes.
2. Vorausgesetzt, dass die Preise der Produktkomponenten durch die gleiche Profitmarge gebildet wurde, ist der Nutzbeitrag der einzelnen Komponenten auch auf Preisbasis bestimmbar.
3. Definiert man die Präferenzfunktionen des Produktes so, dass diese mit der technischen Funktion der relevanten Komponenten übereinstimmen, dann kann die Zielkostenspaltung, *anstatt der Netzstruktur in Bild 2.8*, gemäß der Baumstruktur in Bild 2.9 vorgenommen werden.

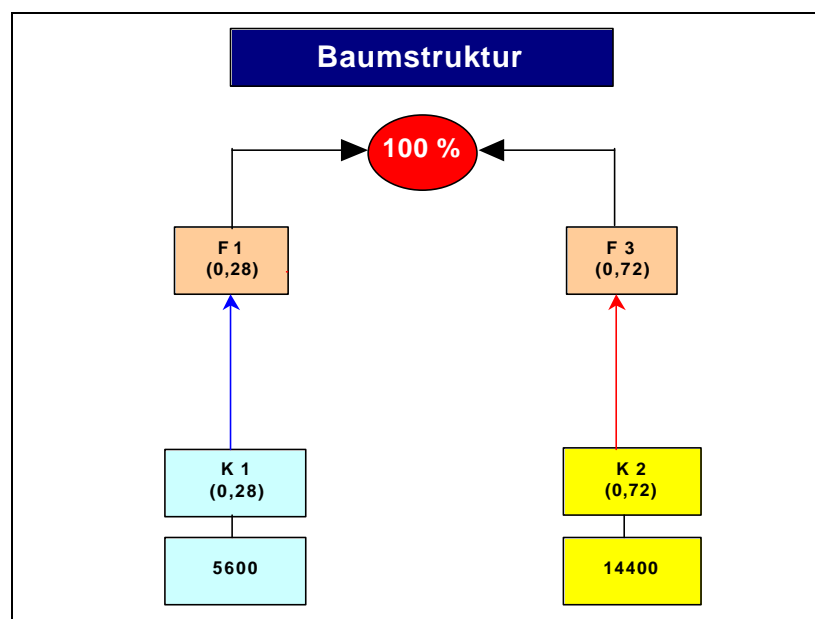


Bild 2.9 Zielkostenspaltung anhand gewichteter technischer Komponentenfunktionen

2.4.2 Bildung einer Anlagenhierarchie

Die konsequente Umsetzung des risikobasierten Assetmanagementkonzeptes verlangt verständlicherweise die Einbeziehung des Anlagenzustandes als Querschnittsaufgabe in die Optimierung von relevanten Unternehmensprozessen. Um den Zustand des technischen Anlagenvermögens für diverse Ebenen der Aufbauorganisation abzubilden, ist die Bildung einer Assetshierarchie unerlässlich.

2.4.2.1 Hierarchiebildung anhand der Erkenntnisse aus der Zielkostenrechnung

Die Erkenntnis aus der Methode der Zielkostenrechnung, dass sich die Funktionsbeiträge von Einzelkomponenten einer technischen Anlage nach einer Baumstruktur zusammenführen lassen, prädestiniert diese Struktur für die Assetshierarchie verwendet zu werden. Ausgehend von der Funktionsbeitragsminderung von fehlerbehafteten Anlagenkomponenten auf der untersten Hierarchieebene kann dann der aktuelle Funktionsbeitrag der übergeordneten, virtuellen Komponenten durch einfache Summierung der relevanten Beiträge und die darauffolgende Multiplikation dieser Summe mit dem zugehörigen Funktionsbeitrag FB_0 berechnet werden.

Neben Transparenz und verursachungsgerechter Zustandsabbildung gehört zu den Kriterien der Entwicklung einer zielgerechten Systemhierarchie auch die Zweckmäßigkeit der Asset-Segmentierung. Traditionell erfolgt die Asset-Klassifizierung durch die Bildung von Betriebsmittelgruppen aus Anlagen gleicher Art (z.B. *Transformatoren, Leistungsschalter usw.*). Diese Art der Asset-Segmentierung bildet eine solide Grundlage für die folgenden Maßnahmen:

1. Risikoorientierte Steuerung der IH-Aktivitäten.
2. Entwicklung anlagengruppenspezifischer Asset-Strategien.
3. Simulation und Bewertung alternativer Asset-Strategien.

Die gebildeten Asset-Segmente sollen dabei mittels eines geeigneten Kennzahlensystems umfassend beschrieben werden, welches als Instrument zur Steuerung des Anlagenparks fungieren soll [Balzer, 2003].

2.4.2.2 Assethierarchie-Bildung am Beispiel eines Umspannwerkes

Im vorherigen Abschnitt ist die Baumstruktur für die Beschreibung der Anlagenhierarchie festgelegt worden.

Alle vom Systemdenken ausgehenden Problemlösungen bauen auf die Ergebnisse der Zustandsanalyse im gesamten Anlagenportfolio. Die Detaillierungstiefe der Zustandsanalyse kann jedoch je Führungsinstanz und Aufgabenstellung stark variieren.

Während sich die Unternehmensführung vor allem für den Zustand des Systems als Ganzes aber nicht für den Zustand eines einzelnen Betriebsmittels interessiert, wird sich der Assetmanager sowohl für das Gesamte als auch für die Details interessieren müssen. Zu seiner Aufgabe gehört u.a. die folgenden Fragestellungen zu klären:

1. Ursache-Wirkung Beziehungen im voraus festzulegen.
2. Symptome einer sich abzeichnenden Gefahr zu identifizieren.

Die Ursache-Wirkungskette wird nach dem Lösungskonzept in drei Abschnitte aufgespalten. Im ersten Abschnitt werden die zustandsrelevanten Messgrößen mit der aktuellen Funktionsbeitragsminderung (*auch Zustandsverschlechterung genannt*), im zweiten die Funktionsbeiträge von Systemkomponenten miteinander und im dritten Abschnitt die resultierende aktuelle Funktionsbeitragsminderung mit weiteren relevanten Parametern verknüpft. Am Ende dieser Verzahnung steht eine Kennzahl, welche bei der Entscheidungsfindung Unterstützung bieten soll.

Auf die Gestaltung der Systemhierarchie nimmt die Bestimmung von fehleranfälligen Komponenten einen wesentlichen Einfluss. Diese Komponenten können im Zuge einer Fehler-Möglichkeiten- und Einfluss-Analyse (FMEA) ermittelt werden [Bertsche, 2004; Balzer, 2003] und sie bilden die unterste Ebene der Asethierarchie.

Das Bild 2.10 stellt die Dekomposition eines Umspannwerkes dar, wobei das hierfür exemplarische Betriebsmittel, der Leistungstransformator, bis auf die fehleranfälligen Komponenten (*auch überwachte Einheit genannt*) zerlegt wurde.

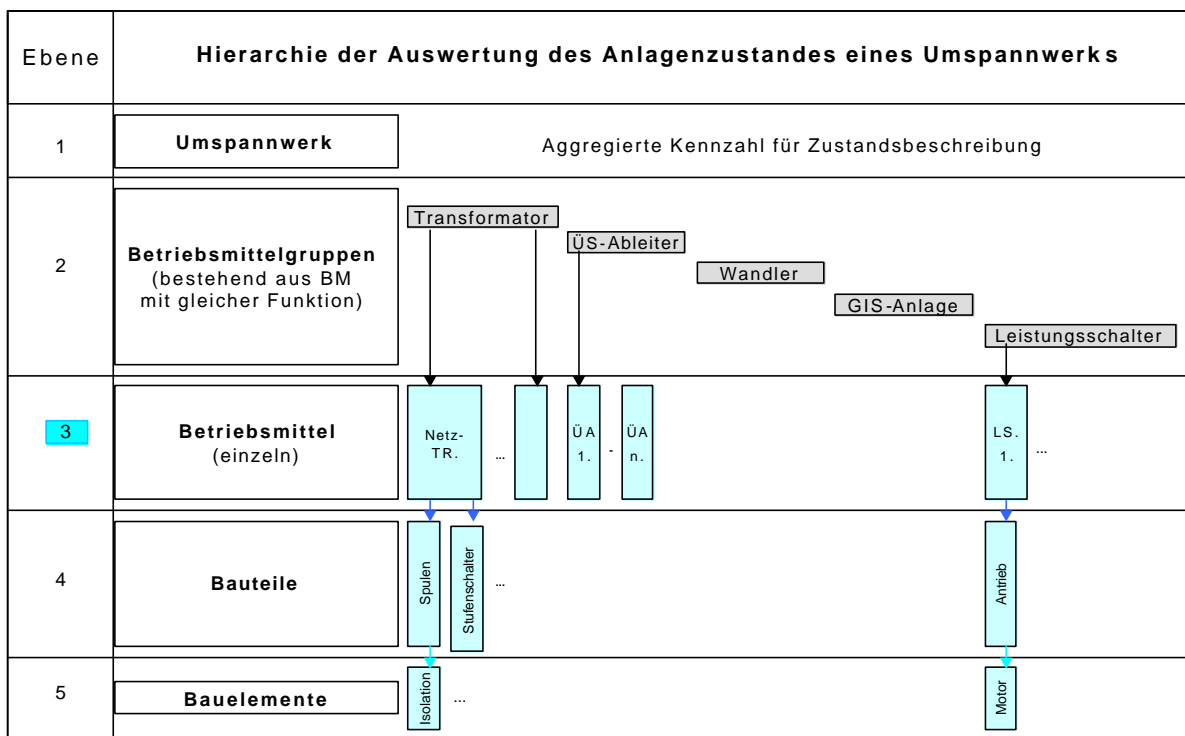


Bild 2.10 Hierarchische Dekomposition des Assetportfolios eines Umspannwerkes zwecks Bildung von anlagenbeschreibenden Prozessindikatoren

2.4.2.3 Aggregation von Zustandskennzahlen

Nachdem die Zerlegung eines frei definierten Systems an obigem Beispiel demonstriert wurde, wird hier eine für die mathematische Behandlung der Systemhierarchie notwendige Kennzeichnung durchgeführt. Anschließend wird die gebildete Systemhierarchie mit den neu eingeführten Kennzeichen dargestellt und der Basisalgorithmus für die online Berechnung der Funktionsbeitragsverteilung bekannt gegeben [Macfarlane, 1967].

Das System „Umspannwerk“ wurde in die gebildeten Betrachtungseinheiten gemäß dem Bild 2.10 aufgespalten, um diese in die gewählte Systemhierarchie mit fünf Ebe-

nen einzuordnen. Dabei wurden die einzelnen Ebenen mit den folgenden Kennzeichnungen versehen:

ST \Rightarrow Stationsebene

BG \Rightarrow Ebene für Betriebsmittelgruppen gleichen Typus

BM \Rightarrow Ebene von einzelnen Betriebsmitteln

BT \Rightarrow Ebene von fehleranfälligen Bauteilen

BE \Rightarrow Ebene von fehleranfälligen Bauelementen

Um die Beschreibung eines aufgespaltenen Systems rechnerauglich zu formalisieren, empfiehlt sich die Einordnung von Systemkomponenten in eine Matrix mit Größe $\{5 \cdot (k \cdot l \cdot m \cdot n)\}$. Die Gl-en (2.28-2.31) reflektieren diese Beschreibung.

$$ST = [BG_1, BG_2, \dots, \mathbf{BG}_g, \dots, BG_k] \quad (2.28)$$

$$BG_g = [BM_{g1}, BM_{g2}, \dots, \mathbf{BM}_{gh}, \dots, BM_{gl}] \quad (2.29)$$

$$BM_{gh} = [BT_{gh1}, BT_{gh2}, \dots, \mathbf{BT}_{ghi}, \dots, BT_{ghm}] \quad (2.30)$$

$$BT_{ghi} = [BE_{ghi1}, BE_{ghi2}, \dots, \mathbf{BE}_{ghij}, \dots, BE_{ghmn}] \quad (2.31)$$

wobei: k, l, m, n die maximale Anzahl von Systemkomponenten, die zu einem Knoten auf dem entsprechenden Hierarchieniveau der Baumstruktur gehören.

Die zweite Erkenntnis aus der Zielkostenrechnung, dass der prozentuale Preisanteil einer Komponente am gesamten Produktpreis dem Funktionsbeitrag dieser Komponente zur Systemfunktionserfüllung gleicht, wird zwecks Bestimmung der Funktionsbeitragsverteilung in der degradationsfreien Systemhierarchie zu Nutze gemacht. Der Algorithmus für die Aggregation der Funktionsbeiträge über alle Systemkomponenten (*repräsentiert durch die obige Systemmatrix*) wurde in Bild 2.11 dargestellt. Aus Sicht der praktischen Umsetzung kommt auf die Indizierung der Systemkomponenten eine große Bedeutung zu, das Hauptaugenmerk bei der Betrachtung des erwähnten Bildes soll dementsprechend auf diese gerichtet sein.

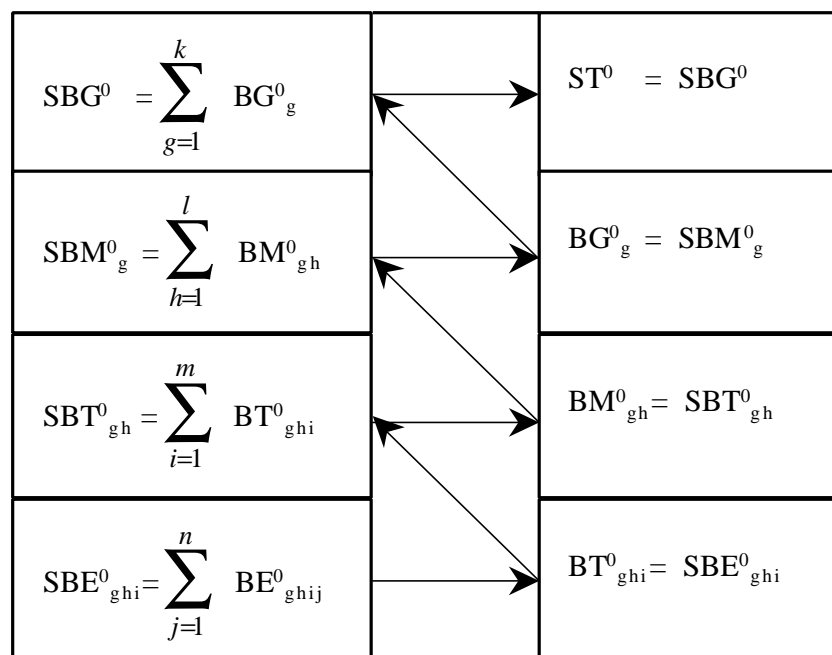


Bild 2.11 Algorithmus für die Aggregation von Funktionsbeiträgen in einer Systemhierarchie mit fünf Ebenen

Eine exemplarische Darstellung der Preisverteilung unter den Systemkomponenten und die daraus resultierende Funktionsbeitragsverteilung (FB_0) sind für den fehlerfreien Systemzustand in den Bildern 2.12-2.13 dargestellt.

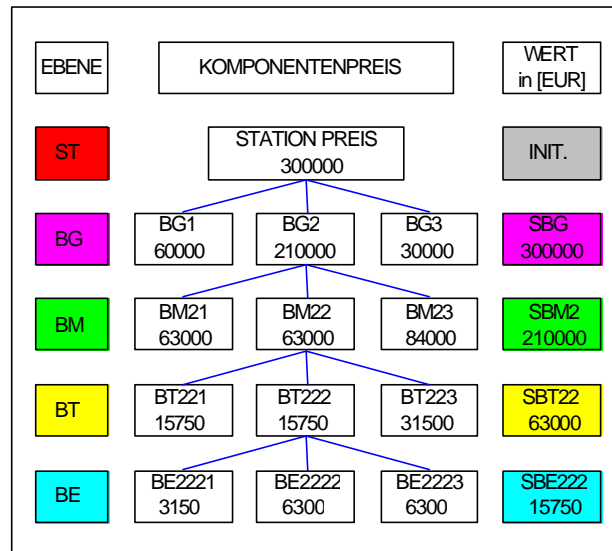


Bild 2.12 Preisverteilung von Systemkomponenten in einer exemplarischen Systemhierarchie

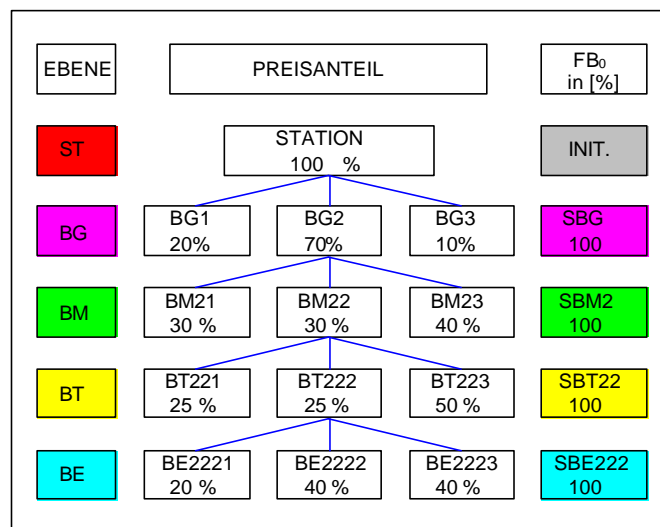


Bild 2.13 Funktionsbeitrag der jeweiligen Komponente zur Funktionserfüllung einer übergeordneten Komponente, gebildet anhand von Komponentenpreisen für den fehlerfreien Systemzustand

Die Funktionsbeitragsverteilung (FB_0) in Bild 2.13 kann für die Berechnung der aktuellen Funktionsbeitragsverteilung (FB_t) wie eine Gewichtungsmatrix aufgefasst werden. Die Berechnung des aktuellen Funktionsbeitrages für die Komponente BT222 ($FB_{222}(t)$) wird in Gl. 2.32 demonstriert. Es wurde dabei angenommen, dass die aktuellen Funktionsbeiträge der zugehörigen Komponenten die folgenden Werte besitzen: $FB_{2221}(t)=10\%$; $FB_{2222}(t)=15\%$; $FB_{2223}(t)=35\%$.

$$FB_{222}(t) = FB_{2220} \frac{\sum_{j=1}^3 FB_{222j}(t)}{100} = 25\% \frac{(10\% + 15\% + 35\%)}{100} = 15\% \quad (2.32)$$

2.4.2.4 Verknüpfung des Fuzzy-Moduls mit dem der Systemhierarchie

Wie der Funktionsbeitrag von Systemkomponenten in fehlerfreiem Systemzustand (FB_0) bestimmt werden kann, ist im vorherigen Abschnitt erklärt worden. Kennt man diese Größe und die aktuelle Zustandsverschlechterung der betrachteten Komponente, kann ihr aktueller Funktionsbeitrag durch Gl. 2.33 bestimmt werden.

$$FB_t = FB_0 \cdot \left(1 - \frac{ZVG}{100}\right) \tag{2.33}$$

wobei: FB_t \Rightarrow Aktueller Funktionsbeitrag der jeweiligen Komponente in %.
 FB_0 \Rightarrow Funktionsbeitrag einer Komponente im fehlerfreien Zustand in %.
 ZVG \Rightarrow Aktuelle Zustandsverschlechterung einer Komponente in %.

Das nachfolgende Bild 2.14 gibt die Verknüpfung des Fuzzy-Zustandsbeurteilungsmoduls mit dem Modul der Systemhierarchie für die Komponente „Isolieröl“ wider. Es zeigt, wie sich die Funktionsbeitragsverteilung in der Systemhierarchie infolge der Zustandsdegradation von drei Systemkomponenten ändert. Gemäß Gl. 2.33, bei einer Zustandsverschlechterung von 60 % beträgt der aktuelle Funktionsbeitrag des Isolieröls 10 % (vgl. Gl. 2.34). Für die anderen zwei Fett gekennzeichneten Komponenten wurden die aktuellen Werte exemplarisch angenommen.

$$FB_{t, \text{Isolieröl}} = 25 \cdot \left(1 - \frac{60}{100}\right) = 10\% \tag{2.34}$$

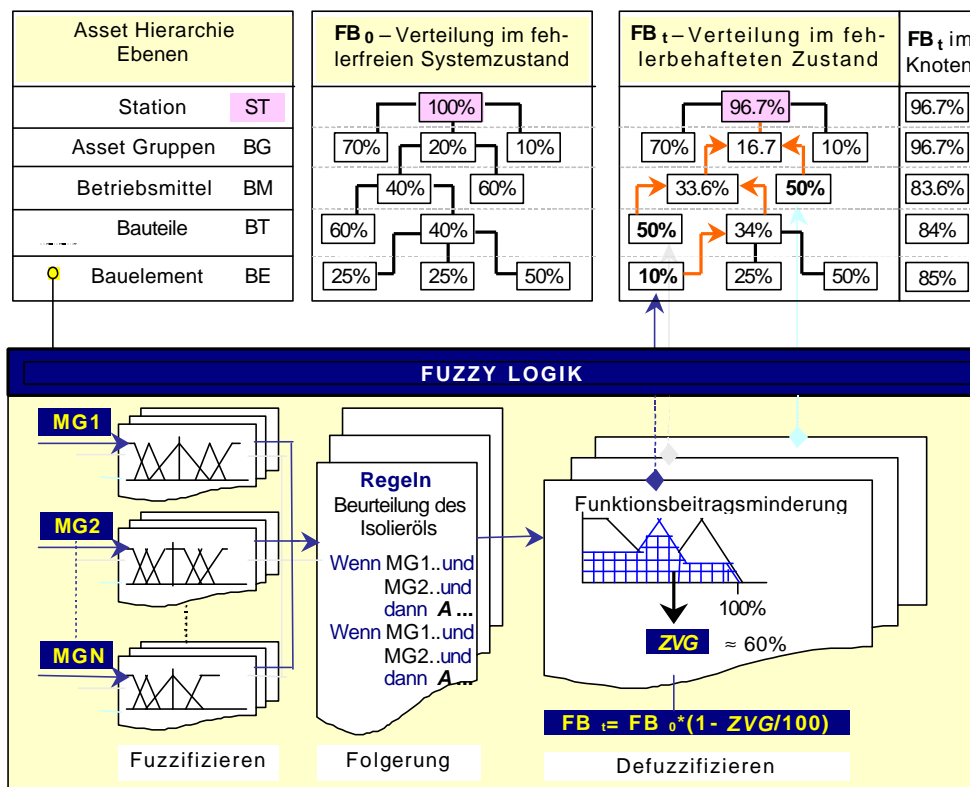


Bild 2.14 Schnittstelle zwischen Zustandsbeurteilungsmodul und dem Modul für die Systemhierarchie

Bezüglich der Genauigkeit der hierarchischen Zustandsbewertung kann man auf eine vorteilhafte Eigenschaft des vorgeschlagenen Aggregationsalgorithmus hinweisen. Infolge der Addition von Komponentenbeiträgen heben sich die positiven und negativen Fehlbeurteilungen der Zustandsverschlechterung auf, was auf der höchsten Hierarchieebene eine hohe Genauigkeit der Zustandsbewertung zur Folge hat.

2.5 Berechnung der Ausfallwahrscheinlichkeit durch die Fehlerbaumanalyse

Die Fehlerbaumanalyse (engl. Fault Tree Analysis, FTA) ist eine systematische, gut formalisierte Vorgehensweise zur Bestimmung von Ursachen, die allein oder in Kombination zu einem definierten Zustand - *meistens ist der Ausfallzustand gemeint* - des Produktes führen [Bertsche, 2004].

Die FTA dient zur Abbildung des Ausfallverhaltens und zur Quantifizierung der Ausfallwahrscheinlichkeit eines Produktes. Bei der Durchführung der Analyse wird gemäß den folgenden Schritten vorgegangen:

- Der Betriebsmittelausfall wird als unerwünschtes TOP-Systemereignis festgelegt.
- Im nächsten Schritt wird untersucht, welche möglichen Ausfälle auf der nächst tieferen Hierarchieebene zu erwarten sind und durch welche Logik diese mit dem übergeordneten Ausfall verknüpft werden können.
- Schritt zwei wird so oft wiederholt, bis die unterste Ebene der Systemhierarchie erreicht ist, so dass als Ergebnis das komplette Ausfallverhalten in Form einer Booleschen Funktion offen gelegt ist.
- Zur Quantifizierung der Ausfallwahrscheinlichkeit überführt man die boolesche Systemfunktion in eine kontinuierliche Wahrscheinlichkeitsfunktion, diese wird zum Schluss ausgewertet.

Aus der obigen Vorgehensweise ist zu erkennen, dass der erfolgreiche Einsatz dieser Analyse eine Dekomposition des Ausgangssystems in Subsysteme und Komponenten voraussetzt. Weil eine beispielhafte Systemanalyse im Abschnitt 2.4 bereits durchgeführt wurde, wird der nachstehenden Ausführung diese zu Grunde gelegt.

Der in folgenden Abschnitten präsentierte methodische Ansatz zeigt, wie das Ausfallverhalten eines Betriebsmittels durch eine der Systemanalyse entsprechende Boolesche Funktion modelliert werden kann und wie von dieser diskreten Null-Eins-Verteilung zur kontinuierlichen Wahrscheinlichkeitsfunktion für den Ausfall übergegangen wird. Bei dieser Ausführung wird auf das Ergebnis der beispielhaften Systemanalyse, repräsentiert durch Bild 2.10 in Abschnitt 2.4, Bezug genommen. Für weitere theoretische Details wird auf die Fachliteratur verwiesen [Bertsche, 2004].

2.5.1 Modellierung des Ausfallverhaltens eines Betriebsmittels

Bei der vorgenommenen Dekomposition des Beispielobjektes „Umspannstation“ wurden die Systemkomponenten so bestimmt, dass der Ausfall jeder einzelnen Betriebsmittelkomponente auf der tiefsten Hierarchieebene den Ausfall einer übergeordneten Komponente und folglich den Ausfall des Betriebsmittels selbst hervorruft. Die genannte Logik kann durch ODER-Verknüpfung von Ausfallereignissen aller überwachten Einheiten nach Gl. 2.35 beschrieben werden. Die Outputgröße dieser Verknüpfung ist dabei als das Ausfallereignis des Betriebsmittels zu betrachten.

$$\bar{y} = \bar{x}_1 \vee \bar{x}_2 \vee \bar{x}_3 \vee \bar{x}_4 \vee \bar{x}_5 \vee \bar{x}_6 \vee \bar{x}_7 \vee \bar{x}_8 \vee \bar{x}_{n-1} \vee \bar{x}_n = \bigvee_{k=1}^n \bar{x}_k \quad (2.35)$$

wobei: \bar{x}_k ein Ausfallereignis der $\bar{ÜE}_k$ ist.

Angenommen, die Ausfallwahrscheinlichkeiten von einzelnen überwachten Einheiten sind bekannt, dann lässt sich die Ausfallwahrscheinlichkeit des Betriebsmittels für

den Fall in Gl. 2.35 anhand der Negativlogik nach Gl. (2.36) bestimmen [Bertsche, 2004].

$$P_a(t) = 1 - \prod_{k=1}^n (1 - P_k(t)) \quad (2.36)$$

2.5.2 Zuverlässigkeit als Komplement zur Ausfallwahrscheinlichkeit

Der oft nur qualitativ verwendeter Begriff „Zuverlässigkeit“ als zu optimierende Zielgröße (*engl. Reliability*) kann durch die Berechnung der Ausfallwahrscheinlichkeit auch quantitativ festgelegt werden. Die erwähnte Möglichkeit ergibt sich durch die folgende Definition der Zuverlässigkeit.

Definition der Zuverlässigkeit: Zuverlässigkeit ist die Wahrscheinlichkeit dafür, dass ein Produkt während einer definierten Zeitdauer unter gegebenen Funktions- und Umgebungsbedingungen nicht ausfällt.

Es ist unschwer zu erkennen, dass die Definition der Zuverlässigkeit mit der Definition der Überlebenswahrscheinlichkeit übereinstimmt.

Weil die Summe der Ausfälle und der noch intakten Einheiten zu einem Zeitpunkt „t“ stets 100% ergibt, kann die Überlebenswahrscheinlichkeit und nach der obigen Definition auch die Zuverlässigkeit durch Gl. (2.37) beschrieben werden.

$$R(t) = 1 - P_a(t) \quad (2.37)$$

2.5.3 Bedeutung der Ausfallwahrscheinlichkeitsberechnung für diese Arbeit

Für das Asset-Management ist die regelbasierte Schätzung der Ausfallwahrscheinlichkeit von entscheidender Bedeutung. Im Gegensatz zu den statistischen Ansätzen, wo die individuellen zustandsrelevanten Einflüsse (*z.B. Belastung und IH-Strategie*) in der Ausfallwahrscheinlichkeitsverteilung nach Betriebszeit nicht nahvollziehbar sind, spiegeln sich diese bei der betriebsmittelbezogenen, zustandsbasierten Onlinemodellierung der Ausfallwahrscheinlichkeit verursachungsgetreu wider.

Die Bedeutung der Berücksichtigung der Individualität ist bei Anlagen wie Leistungstransformatoren und Leistungsschaltern ausschlaggebend, weil die Bedingungen für die statistische Auswertung bei diesen Anlagen so gut wie nicht zu erfüllen sind. Im Umkehrschluss heißt das, dass die Ergebnisse statistischer Erhebungen für die Bestimmung von operativen Instandhaltungsmaßnahmen für Anlagen hoher Komplexität und Individualität nur bedingt anwendbar sind.

Im Fallbeispiel für die risikobasierte Bestimmung der Ersatzpriorität und Instandhaltungsstrategie für Leistungsschalter in Kapitel 6. wird die Ausfallwahrscheinlichkeit als Beurteilungskriterium eingesetzt. Wie aus dem späteren Beispiel deutlich hervorgeht, variiert die Priorität der Ausfallwahrscheinlichkeit unter den jeweiligen Kriterien je nach Fragestellung. Während sie bei der Ersatzprioritätsbestimmung als Kriterium zweiter Ordnung fungiert, soll sie für die Festlegung der Instandhaltungsreihenfolge als Kriterium höchster Priorität betrachtet werden.

3. Die Säulen der Zustandsüberwachung

Für ein wirkungsvolles Asset-Management ist die Kenntnis über den aktuellen Zustand von technischen Anlagen zwingend erforderlich. Insbesondere bei Anlagen mit hoher Komplexität und strengen Verfügbarkeitsanforderungen ist es die Verantwortung des Assetmanagers, die Produktionsfähigkeit der Anlage über eine lückenlose Überwachung und Vorhersage des technischen Zustands sicherzustellen.

In diesem Abschnitt wird eine fortgeschrittene Zustandsüberwachungsphilosophie erläutert und zum Schluss ihre Anwendung anhand der Transformatorüberwachung bildhaft dargestellt.

3.1 Zustandsüberwachungsphilosophie für das Asset-Management-Konzept

Die Gestaltung des Berichtswesens hängt generell von der Aufbauorganisation des Unternehmens und der Ablauforganisation deren Prozesse ab. Eine Sonderrolle spielt dabei die bedarfsgerechte Aufbereitung von Informationen. Diese soll sich nach den individuellen Bedürfnissen von Prozessverantwortlichen richten, um die bestmögliche Entscheidungsunterstützung für sie bieten zu können.

Im Folgenden wird eine Überwachungsphilosophie dargestellt, die primär für die Überwachung von elektrischen Anlagen entwickelt worden ist, aber durch ihren allgemeinen Charakter mit gewisser Anpassung (d.h. *Zuschneiden*) auch für andere Anlagenarten angewandt werden kann.

Die zentralen Fragestellungen, die von einem Assetmanager ständig beantwortet werden sollen, sind die folgenden:

1. Wie ist der aktuelle Zustand der Anlage?
 - a. Welche Komponenten der Anlage sind für den aktuellen Zustand relevant?
 - b. Wie groß ist die Zustandsbeeinträchtigung?
2. Welche IH-Szenarien kommen für die Zustandsverbesserung in Frage?
 - a. Welches IH-Szenario entspricht dem aktuellen Zustand?
 - b. Wie hoch sind die Kosten für das vorgeschlagene IH-Szenario?
3. Wie groß ist die Restlebensdauer der jeweiligen Anlage?
 - a. Sind die lebensdauerkritischen Komponenten beeinträchtigt?
 - b. Wie groß ist die Beeinträchtigung?
 - c. Wie positioniert sich die jeweilige Anlage für einen eventuellen Ersatz im gesamten Assets-Portfolio?
 - d. Ist eine Neuerrichtung schon einzuleiten?
4. Welche Anlagenkosten sollen in das Budget aufgenommen werden?
 - a. Gerechtfertigt das von der jeweiligen Anlage ausgehende aktuelle Risiko die Budgetierung der relevanten Kosten schon jetzt oder ist die weitere Risikoüberwachung eine bessere Lösung?
 - b. Kann das Gesamtrisiko bei Verwendung des vorgegebenen Budgets ausreichend reduziert werden oder muss es erhöht werden?

3.1.1 Einführung von Alterungstypen

Ausgehend von den aufgelisteten grundsätzlichen Fragestellungen wurde die in Bild 3.1 dargestellte Zustands-Überwachungsphilosophie abgeleitet.

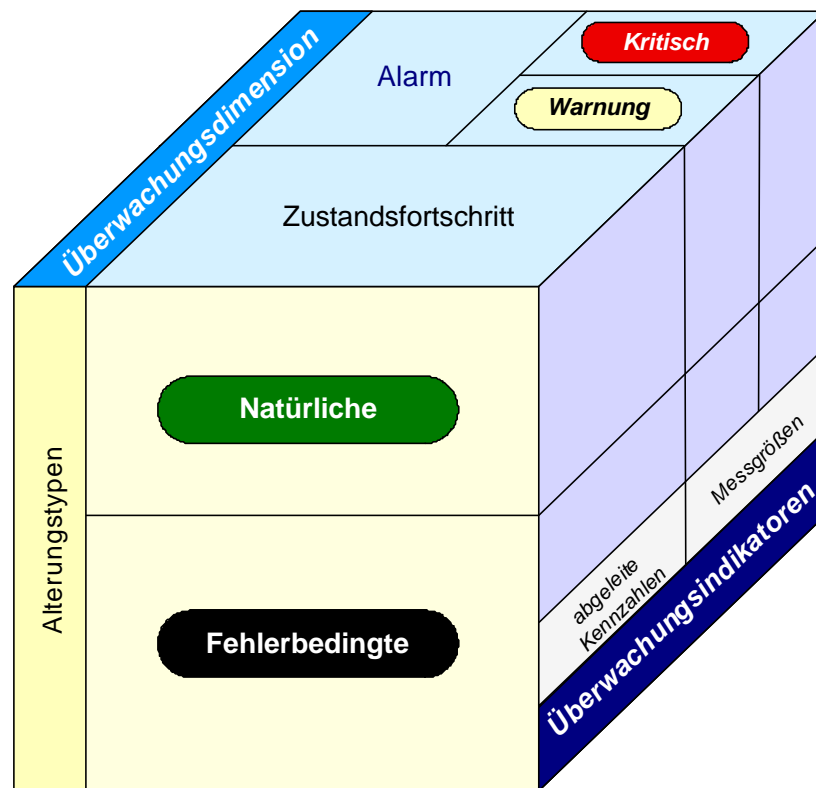


Bild 3.1 Darstellung der Überwachungsphilosophie im Kontext „Alterungstypen-Überwachungsdimensionen-Überwachungsindikatoren“

Die dargestellte Struktur ist durch die Übereinstimmung zwischen den menschlichen Alterungserscheinungen und denen von komplexen technischen Anlagen geprägt. Analog zum menschlichen Organismus, wo einige Organe als lebensdauerkritisch bezeichnet werden können (*Herz, Leber*), lassen sich solche Komponenten auch bei technischen Anlagen selektieren. Die differenzierende Eigenschaft einer lebensdauerkritischen Anlagekomponente ist, dass ihre technische Lebensdauer gleichzeitig die Lebensdauer der gesamten Anlage bestimmt. Ein Ersatz von diesen Komponenten ist nicht möglich oder wirtschaftlich nicht vertretbar. Um den Lebensdauerverbrauch auch dann verfolgen zu können, wenn sich keine ausgeprägte Fehlerart zu erkennen gibt, ist neben der fehlerbedingten Alterung auch die natürliche Alterung eingeführt worden. Weitere Gründe für die Unterscheidung zwischen den erwähnten Alterungstypen können wie folgt zusammengefasst werden:

1. Während das Phänomen der natürlichen Alterung eher mit einem Prozess langsamer Entwicklungsdynamik zu charakterisieren ist, besitzt die fehlerbedingte Alterung eine relativ kurze Entwicklungszeit, meistens mit hoher Dynamik. Dieser Unterschied soll sich auch in der Gestaltung von eigenständigen Überwachungsindikatoren widerspiegeln, weil die Handhabung von beiden Alterungstypen mittels eines einzigen Indikators die Lösungskomplexität zu sehr erhöhen würde.

2. Die natürliche Alterung einer Anlage schreitet auch ohne ausgeprägte Fehler fort. Bezüglich einer lebensdauerkritischen Komponente ist ihre Überwachung deshalb von großem Interesse, weil sie für die Restlebensdauerabschätzung wichtige Informationen liefert und die rechtzeitige Einführung von präventiven Maßnahmen zur Verhinderung der Entstehung eines ausgeprägten Fehlers unterstützt.
3. Die Überwachung der lebensdauerkritischen Komponente(n) hat eine strategische Bedeutung und liefert Inputdaten vor allem für die strategische Planung. Dahingegen ist die Überwachung aller fehleranfälligen Komponenten auf fehlerbedingte Alterung für die operativen Planungsprozesse relevant. Für lebensdauerkritische Komponenten ergänzen sich die zwei Alterungstypen gegenseitig.

Die aufgelisteten Argumente zeigen, dass eine getrennte Überwachung der eingeführten Alterungstypen sinnvoll ist. Die vorgenommene Trennung ermöglicht auch die separate Bildung zugehöriger Überwachungsmodelle, welche zur Transparenz der AM-Gesamtarchitektur einen erheblichen Beitrag leistet.

3.1.2 Überwachungsdimensionen für die Zustandsverfolgung

Die Überwachung von Alterungstypen in Bild 3.1 erfolgt in zwei Dimensionen. Während die Alarmdimension vorwiegend eine sichere Betriebsführung garantieren soll, wird die Zustandsfortschritts-Dimension eher im betriebswirtschaftlichen Bereich für die Bildung und zeitliche Verfolgung von prozesscharakterisierenden Kennzahlen (z.B. Risiko, Budget und Abschreibungen) eingesetzt. Um den Nutzvorteil der Zustandsfortschrittsdimension auch aus Sicht der Betriebsführung deutlich zu machen, wird hier auf ihre mögliche Anwendung bezüglich einer zustandsbasierten Gestaltung der Netztopologie, als präventive, betriebsmittelschonende Maßnahme hingedeutet. Im Gegensatz zur Schutzfunktion handelt es sich in den beiden genannten Dimensionen um eine Entscheidungsunterstützung für die Entscheidungsträger.

Weil die Kombination der erwähnten Dimensionen in Abhängigkeit von individuellen Gegebenheiten des zu überwachenden Objekts gravierende Unterschiede aufweisen kann, wird zum besseren Verständnis in Bild 3.2 lediglich eine richtungsweisende Vorlage zur Gestaltung der Dimensionskombination dargestellt.

Zweidimensionale Zustandsüberwachung			
Alarm-Dimension		Zustandsfortschritt-Dimension	
<ul style="list-style-type: none"> ▪ Schwellwertüberwachung von 		<ul style="list-style-type: none"> ▪ Trendanalyse für Kennzahlen ▪ Trendanalyse für Messgrößen ▪ ABC-Analyse für Anlagenamortisation ▪ Korrelationsanalyse ▪ Risikoprognose ▪ usw. 	
Kennzahlen	Zustandsrelevanten Messgrößen		
		Natürliche Alterung von lebensdauerkritischen Komponenten	
Fehlerbedingte Alterung aller fehleranfälligen Komponenten			

Bild 3.2 Dimensionen der Zustandsüberwachung

3.2 Zustandsbeurteilung durch Monitoring und Diagnose

Obwohl die Erfassung von zustandsrelevanten Messgrößen kein Gegenstand der vorliegenden Abhandlung ist, wird hier zum besseren Verständnis darauf eingegangen und auch die für die Zustandsbeurteilung relevanten gängigen Begriffe kurz erläutert.

Unter Monitoring versteht man alle Arten der Erfassung von zustandsrelevanten Messgrößen eines Vorgangs oder Prozesses mittels technischer Betriebsmittel oder anderer Beobachtungssysteme. Unter Einbeziehung der erwähnten Zustandsgrößen wird eine Diagnose (*d.h. der Befund*) durch eine geeignete Methode erstellt. Der Begriff Diagnostik fasst alle Methoden der Diagnosefindung zusammen.

Die Diagnostik von elektrischen Betriebsmitteln ist ein wichtiges Thema für das anlagennahe Asset-Management, weil die Qualität der vom Asset-Management-System gelieferten Informationen von ihrer Güte bestimmt wird. Für weitere Details über konkrete betriebsmittelbezogene Methoden der Diagnostik (*wie Feststellung einer Teilentladung, Detektieren der Wicklungsdeformation usw.*) steht nachstehend eine Auflistung von einigen Literaturstellen zur Verfügung: [Feser, 1995], [Markalous, 2003], [Rahimpour, 2000], [Schäfer, 2000], [Tenbohlen, 2000], [Waters, 1968], [Allan, 2003], [Stace, 1997]. Besondere Aufmerksamkeit verdient dabei der lebenszyklusumfassende Monitoringansatz, welcher in [Claudi, 2002] beschrieben wird.

3.3 Entscheidungsorientierte Anwendung der Überwachungsphilosophie

Theoretisch kann jede Anlagenkomponente auf die zwei Alterungstypen in beiden Dimensionen überwacht werden. In der Tat werden jedoch die obigen Überwachungsoptionen den einzelnen Komponenten nach ihrer Relevanz auf die jeweilige Entscheidungssituation bzw. Fragestellung zugeordnet.

Für Großtransformatoren empfiehlt sich die Überwachung der lebensdauerkritischen Öl-Papier-Isolierung auf beide Alterungstypen, während die Überwachung seiner restlichen überwachten Einheiten allein auf den fehlerbedingten Alterungstyp beschränkt bleiben kann. In Bild 3.3 ist die Anpassung der allgemeinen Überwachungsphilosophie an zwei für die Transformatorüberwachung wichtigen Fragestellungen dargestellt. Für ein detailliertes Beispiel bezüglich der Restlebensdauerabschätzung sei auf Abschnitt 4.4.3 hingewiesen.

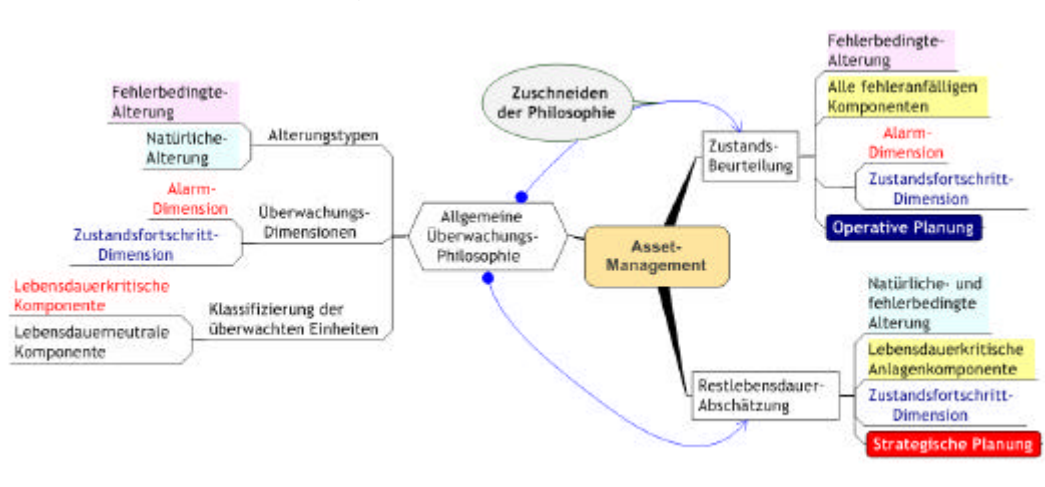


Bild 3.3 Entscheidungssituationsorientierte Anwendung der allgemeinen Überwachungsphilosophie

4. Fallbeispiel zur Entscheidungsfindung für Leistungstransformatoren

Die Elektrizitätswirtschaft zählt zu den bedeutendsten Investoren in Deutschland. Für 2006 ist ein Investitionsvolumen von ca. 4,5 Mrd. Euro geplant. Davon ist gut die Hälfte für die Stromnetze vorgesehen.

Leistungstransformatoren sind die teuersten Wirtschaftsgüter bei den Netzanlagen, deren Ersatz das Investitionsbudget erheblich dominieren kann. Um die Planung der mit dem Transformatorersatz einhergehenden Kosten bezüglich des Kostenvolumens und der zeitlichen Zahlungskoordination effizient zu gestalten, muss die Ersatzinvestitionsplanung risikobasiert und rechnergestützt erfolgen.

Die in diesem Kapitel vorgestellte Lösung soll sicherstellen, dass die einzelnen Teilpläne des übergreifenden Planungsprozesses in Bild 4.1 rechtzeitig angepasst und die heute noch existierende Zusatzkosten einer Fehlplanung dadurch beseitigt werden.

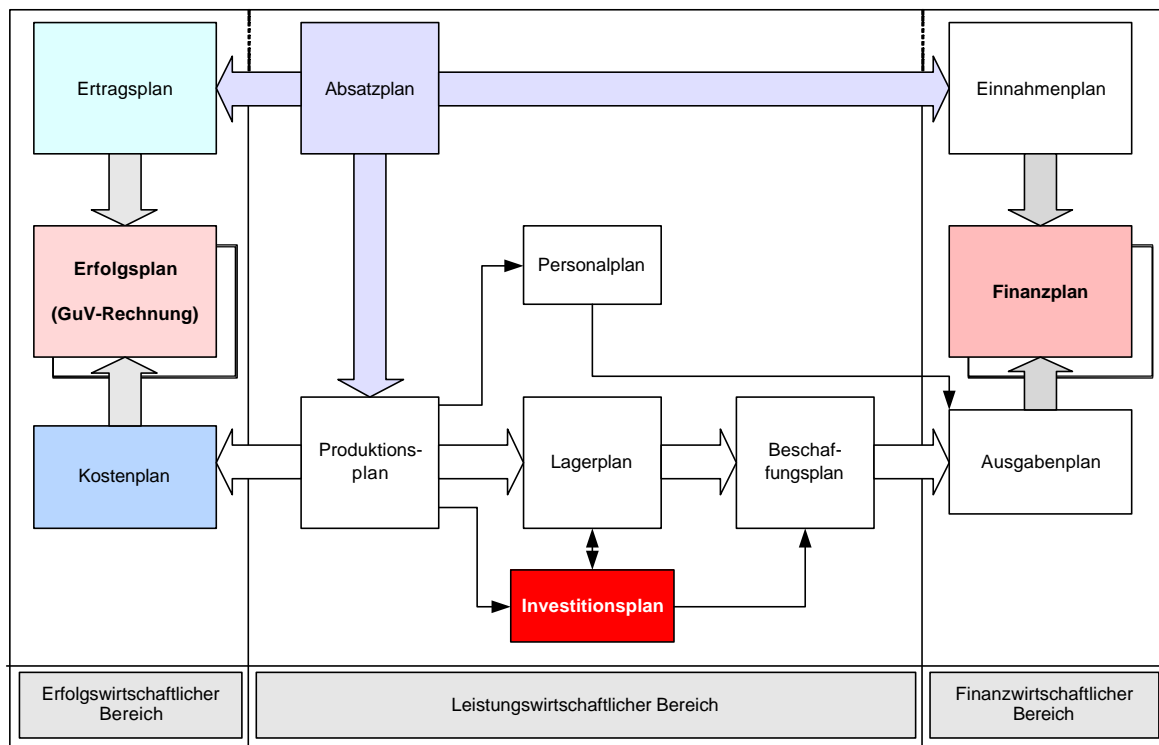


Bild 4.1 Investitionsplan als Teil des übergreifenden Planungsprozesses im Unternehmen

In den folgenden Abschnitten wird systematisch, gemäß den folgenden Einzelschritten vorgegangen:

- 4.1 Die Aufgabenstellung wird definiert.
- 4.2 Die Randbedingungen zur Lösungsfindung werden aufgelistet.
- 4.3 Der methodischer Ansatz zur Lösung der Aufgabenstellung wird dargestellt.
- 4.4 Anwendungsbeispiele gemäß der Aufgabenstellung unter 4.1 werden demonstriert. Deutung und Visualisierung der Ergebnisse werden durchgeführt.
- 4.5 Praktische Schlussfolgerungen zur Analyse von Ersatzinvestitionen für Leistungstransformatoren werden aufgelistet.

4.1 Definition der Aufgabenstellung

Die zu lösende Aufgabe kann durch die Abgrenzung des Analysegegenstandes und die Festlegung der zu erreichenden Ziele wie folgt definiert werden:

1. Risikobasierte Bestimmung der Ersatzreihenfolge unter 20 für das Investitionsbudget konkurrierenden Leistungstransformatoren.
2. Bildung einer Kennzahl für das ersatzbedingte finanzielle Risiko auf Betriebsmittelgruppenebene.
3. Abschätzung der Restlebensdauer von Anlagen durch Abweichungsanalyse.

4.2 Die Randbedingungen zur Lösungsfindung

Der Ersatz von Transformatoren wird durch den Zustand ihrer lebensdauerkritischen Komponente (*d.h. der Öl-Papier-Isolierung*) und ihre Wichtigkeit im Netz beeinflusst.

4.2.1 Bestimmung des aktuellen Zustandsverschlechterungsgrades

Dem vorliegenden Konzept nach wird die Zustandsverschlechterung der lebensdauerkritischen Einheit durch separate Fuzzy-Module für beide Alterungsdimensionen simultan und zeitkontinuierlich überwacht. Als resultierender Zustandsverschlechterungsgrad wird dabei das Maximum der errechneten Werte nach Gl. 4.1 betrachtet.

$$ZVG_{\max} = \max(ZVG_{NA}; ZVG_{FA}) \quad (4.1)$$

ZVG_{NA} - Zustandsverschlechterungsgrad berechnet anhand des natürlichen Alterungsmodells mittels Fuzzy-Logik.

ZVG_{FA} - Zustandsverschlechterungsgrad berechnet anhand des fehlerbedingten Alterungsmodells mittels Fuzzy-Logik für jede Fehlerart [vgl. Bild 4.2 auf der nächsten Seite].

Die natürliche Alterung eines Transformators ist eine seiner wichtigsten Zustandskenngrößen, weil man daraus auf dessen Restlebensdauer auch dann schließen kann, wenn sich keine ausgeprägte Fehlerart erkennen lässt. Die für die natürliche Alterung maßgebenden wichtigsten zustandsrelevanten Messgrößen sind:

- Wassergehalt des Isolieröls
- Farbzahl des Isolieröls (FZ)
- Durchschlagsspannung des Isolieröls (DS)
- Säuregehalt des Isolieröls
- Verlustfaktor des Isolieröls (Tδ)
- Grenzflächenspannung des Isolieröls
- Zelluloseabbauspezifisches Verhältnis von Fehlergasen (CO₂ zu CO)

Wie bereits erläutert wurde, werden die bekannten Fehlerarten des Transformators mittels der fehlerbedingten Alterungsdimension überwacht. Bild 4.2 zeigt diejenigen Fehlerarten, welche in Bezug auf die lebensdauerkritische überwachte Einheit (*Isolieröl (ÜE₁) und Festisolation (ÜE₂)*) für die Bestimmung des fehlerbedingten Zustandsverschlechterungsgrades betrachtet werden sollen.

Überwachte Einheiten [ÜE _k]		Fehlerarten je ÜE _k [FA _{k,i}]	Fehlerartrelevante Zustandsindikatoren						ZVG _{FA}	P _{k,max} (ZVG _{FA,k,i})	K _{km}	EK _{km} = P _k * K _{km}	EIB _n	R _n
des "n"-en TR [TR _n]		der ÜK _k							%		1000 \$		%	
ÜE ₁	Isolieröl	Degradation	O ₂	Säure	H ₂ O	Tö	DS	FZ	0,35	0,35	130,0	45,5	1719,5	13,2
ÜE ₂	Fest-isolation	Entladung	C ₂ H ₂	C ₂ H ₆					0,1	92,4	1800,0	1674,0		
		Teil-entladung (TE)	H ₂	CH ₄					92,4					
		Überhitzung	CH ₄	C ₂ H _x (x=2,4,6)		C ₃ H _y (y=4,6,8)			0,1					
		Zellulose-degradation	CO	CO ₂					0,3					
ÜE ₃	Stufenschalter							0,02	0,02	0,0	0,0			
ÜE _k	usw.							0,0	0,0	0,0	0,0			

Bild 4.2 Fehlerarten, welche der Bestimmung des fehlerbedingten Zustandsverschleierungsgrades erfahrungsgemäß zu Grunde gelegt werden können

Aus obiger Tabelle ist auch die Festlegung der dominanten Fehlerart ersichtlich, sie wird durch das Maximum der entsprechenden Zustandsverschleierungsgrade über alle zugehörigen Fehlerarten gebildet.

Um den Beispielfall von erhöhter Komplexität zu entlasten, wird nachfolgend nur die Teilentladung (TE) als alleinige Fehlerart in Betracht gezogen. Bei der Bestimmung der Ersatzreihenfolge wird davon ausgegangen, dass im betrachteten Zeitraum eine Wasserstoffentwicklung von 48 auf 150 ppm stattgefunden hat. Die diesem Anstieg entsprechenden Werte des ZVG_{FA} sind dabei durch das relevante Fuzzy-Modul berechnet worden. Für die Konfiguration und Wirkungsweise eines solchen Moduls wird auf ein anschauliches Beispiel in Kapitel 6. verwiesen.

4.2.2 Bestimmung der aktuellen Wichtigkeit von einzelnen Anlagen

Die Anlagenwichtigkeit ist eine relative Kenngröße, die erst dann bestimmt werden kann, wenn das Portfolio der zu beurteilenden Betriebsmittel und deren wichtigkeitsrelevanten Parameter bekannt sind. In der Fachliteratur listet man die genannten, meist qualitativen Wichtigkeitskriterien auf, aber die Quantifizierung der Wichtigkeit bleiben die meisten Autoren schuldig. Die Schwierigkeit dieser Quantifizierung ist dabei auf die folgenden Faktoren zurückzuführen:

1. Die relevanten Einflussparameter wie Spannungsebene, Redundanz, Netztopologie und Schadenskonsequenz beim Verbraucher im Falle eines Betriebsmittelsausfalls können zu einem betriebsmittelbezogenen Wichtigkeitsindikator auf einer nachvollziehbaren einheitlichen Basis nicht zusammengeführt werden, weil sich die Randbedingungen vom Fall zu Fall unterscheiden und einige von denen (z.B. *Topologie*) auch einer zeitlichen Änderung unterliegen.
2. Die bisherigen individuellen Lösungen für die Wichtigkeitsbestimmung sind für ein beliebiges Anlagenportfolio nicht einmal in den Grundzügen übertragbar.

Um die geschilderte Pattsituation aufzulösen, wird in dieser Arbeit ein Basisalgorithmus für die Wichtigkeitsberechnung vorgeschlagen, welcher an die jeweilige Aufgabenstellung schnell angepasst werden kann. Durch diesen Ansatz wird eine zu komplizierte Lösung für die Wichtigkeitsbestimmung umgangen.

Basisalgorithmus für die Wichtigkeit

Die Herstellungskosten von Produktkomponenten werden gemäß der Zielkostenrechnung anhand der relevanten Funktionsbeiträge bestimmt, wobei die Funktionsbeiträge selbst anhand des Nutzwertes der betrachteten Produktkomponente an der vollen Erfüllung der Gesamtfunktion quantifiziert werden. Als Folgerung aus der Zielkostenrechnung kann man die folgende Aussage treffen, welche die Wichtigkeit einer Systemkomponente anhand ihrer aktuellen Errichtungskosten ableiten lässt.

„Jedes Wirtschaftsgut ist so wichtig wie viel Nutzen dieses für das übergeordnete System hat“

Laut obiger Aussage kann man behaupten, dass die Wichtigkeit einer mit Nennlast betriebenen Systemkomponente mit deren Funktionsbeitrag im fehlerfreien Systemzustand zu charakterisieren ist. Dieses bedeutet auch, dass bei sinkender Auslastung einer Systemkomponente ihr Nutzen und dementsprechend Ihre Wichtigkeit proportional fallen wird.

Wendet man die obigen Überlegungen für die Bestimmung der Wichtigkeit eines Transformators in einer definierten Anlagengruppe an, dann kann die relative Basiswichtigkeit jeder Anlage anhand deren aktuellen Errichtungskosten (ERK_{BD}) bestimmt werden. Sollte die Anlage nicht die volle Nennauslastung haben, muss die Basiswichtigkeit durch einen geeigneten Auslastungskoeffizienten modifiziert werden.

4.3 Der methodischer Ansatz zur Lösung der Aufgabenstellung

Im folgenden werden die für die Ersatzprioritätsberechnung relevanten Indikatoren wie Risikoindikator zur Prioritätsbestimmung, Auslastungskoeffizient zur Wichtigkeitsberechnung und die Kennzahl für das ersatzbedingte finanzielle Risiko definiert.

4.3.1 Risikoindikator zur Prioritätsbestimmung

Für die Bestimmung der Ersatzreihenfolge wird der Risikoindikator (TR) zu Grunde gelegt (vgl. *Abschnitt 2.2.3*). Dieser quantifiziert das mit der Zustandsverschlechterung der lebensdauerkritischen Anlagenkomponente (*Öl-Papier-Isolation*) einhergehende Risiko für die Betriebsführung und wird in den Gl-en (4.2-4.3) definiert:

$$TR = (1-g) \cdot ZVG_{\max} + (g) \cdot W \quad (4.2)$$

$$W = W_B \cdot ALK(t) \quad (4.3)$$

W_B - Basiswichtigkeit, berechnet anhand der aktuellen Errichtungskosten.

W - Auslastungsbasierte Wichtigkeit.

$ALK(t)$ - Auslastungskoeffizient für eine dreimonatige Prognoseperiode.

g - Gewicht der Größe „Wichtigkeit“ im Risikoindikator (TR), für den Beispielfall 0.5.

4.3.2 Auslastungskoeffizient zur Manipulation der Basiswichtigkeit

Die Auslastung eines Betriebsmittels hat nach Gl. 4.3 einen direkten Einfluss auf seine Wichtigkeit und somit auf dessen Ersatzreihenfolge (vgl. Gl. 4.2).

Im Folgenden wird ein Ansatz vorgestellt, welcher den aktuellen Wert des ALK aus der Lastprognose berechnet und dadurch die auslastungskonforme Bestimmung der Wichtigkeit eines Transformators nach Gl. 4.3 möglich macht.

4.3.2.1 Anforderungen an den Auslastungskoeffizient

Die Basiswichtigkeit eines Betriebsmittels wird durch dessen relative Leistung in der zugehörigen Anlagengruppe definiert. Bei der Bestimmung der Basiswichtigkeit (W_B) wurde angenommen, dass die Nennscheinleistung von Transformatoren mit deren aktuellen Errichtungskosten (ERK_{BD}) in einem direkten proportionalen Zusammenhang steht und daher ihre Basiswichtigkeit durch relevante ERK_{BD} berechnet werden kann.

Die obige Definition der Basiswichtigkeit gibt vor, dass die genannte Basis bei einer von der Nennlast abweichenden Auslastung entsprechend modifiziert werden muss. Das heißt, dass der Auslastungskoeffizient ein relatives Maß darstellen soll, welcher durch eine Multiplikation mit der Basiswichtigkeit die aktuelle, auslastungsgerechte Wichtigkeit (W) des Betriebsmittels ergibt. Weitere Anforderung an die Ableitung des genannten Koeffizienten sind:

1. Sie soll mittels Verwendung von bereits vorhandenen Messgrößen erfolgen.
2. Der Ableitung soll eine dreimonatige Lastprognose zu Grunde liegen.

4.3.2.2 Definition und Berechnung des Auslastungskoeffizienten

In den nachfolgenden Ausführungen wird gezeigt, wie man den Auslastungskoeffizient gemäß den obigen Anforderungen für eine dreimonatige Prognoseperiode berechnen kann.

Bei der Konzipierung des Berechnungsalgorithmus stand dabei die Integration des Lastfaktors als lastcharakterisierende Größe im Vordergrund. Diese Größe ist in der Praxis weitgehend bekannt und sie wird sowohl bei der Lastplanung als auch während der Betriebsüberwachung verwendet.

Für die Beschreibung der relativen Abweichung der Auslastung von der Nennlast kann das Verhältnis der entsprechenden Energiemengen für eine Zeitperiode (Δt) nach Gl. 4.4 eingesetzt werden.

$$ALK(t) = \frac{\int_t^{t+\Delta t} S_t(t) dt}{\int_t^{t+\Delta t} S_n dt} \quad (4.4)$$

Der Lastfaktor (LF) eines Transformators wird durch das Verhältnis der aktuellen Scheinleistung und der Nennscheinleistung bzw. der entsprechenden Ströme durch Gl. 4.5 definiert.

$$LF(t) = \frac{S_t(t)}{S_n} = \frac{\sqrt{3} U I(t)}{\sqrt{3} U I_n} = \frac{I(t)}{I_n} \quad (4.5)$$

Ersetzt man die aktuelle Scheinleistung in Gl. 4.4 durch deren Berechnungsformel mittels des Lastfaktors in Gl. 4.6, dann kommt man zum Ausdruck in Gl. 4.7.

$$S_t(t) = LF(t) \cdot S_n \quad (4.6)$$

$$ALK(t) = \frac{\int_t^{t+\Delta t} S_i(t) dt}{\int_t^{t+\Delta t} S_n dt} = \frac{\int_t^{t+\Delta t} LF(t) \cdot S_n dt}{S_n \cdot \Delta t} = \frac{\int_t^{t+\Delta t} LF(t) dt}{\Delta t} \quad (4.7)$$

Gleichung 4.7 zeigt, dass der Auslastungskoeffizient für einen bestimmten Zeitraum (Δt) allein durch den Lastfaktor bestimmt werden kann. Da auch die Planlast für einen bestimmten Zeitraum durch die Angabe des Lastfaktors prognostiziert wird, ist die zeitkontinuierliche Berechnung des Auslastungskoeffizienten und folglich die Bestimmung der Wichtigkeit (W) ohne weiteres durchführbar.

4.3.2.3 Beispielberechnung für den Auslastungskoeffizient

In Bild 4.3 ist der Verlauf des Lastfaktors von TR_2 und dessen berechneter Auslastungskoeffizient für ein Jahr dargestellt.

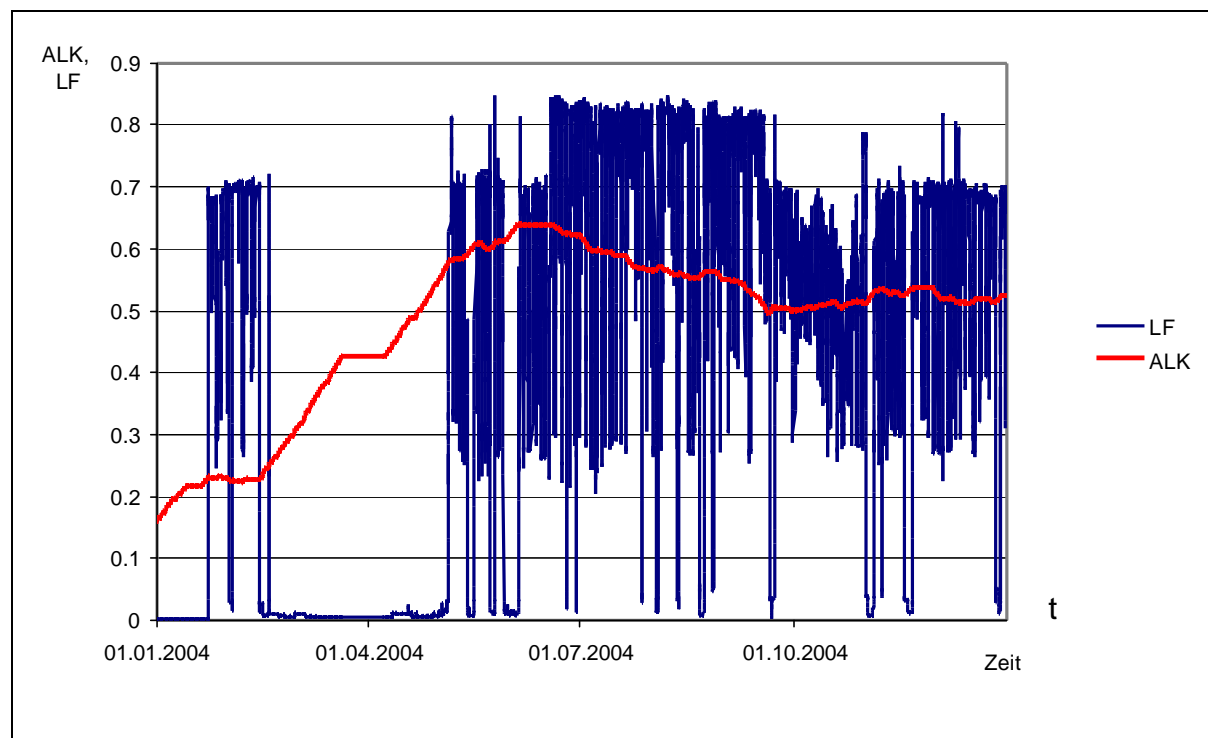


Bild 4.3 Jahresverlauf von Lastfaktor und Auslastungskoeffizient von TR_2

Als Periode (Δt) für die Prognose des ALK wurden 3 Monate angenommen, da Planlaständerungen in diesem Zeitraum als unwahrscheinlich angenommen werden können. Anhand eines Beispiels soll der Einfluss des Auslastungskoeffizienten auf die Ersatzpriorität verdeutlicht werden.

Ausgangspunkt sind vier baugleiche Transformatoren (TR_1, TR_2, TR_3, TR_4). Durch die Baugleichheit ist ein identischer Wiederbeschaffungswert bzw. eine identische Basiswichtigkeit gegeben. Zusätzlich wird von einem einheitlichen Zustandsverschlechterungsgrad ausgegangen. Die betrachteten Transformatoren unterscheiden sich also ausschließlich durch ihr aktuelles Auslastungsprofil, welches damit für die Reihenfolgebestimmung maßgebend ist. Bild 4.4 zeigt die Verläufe der Auslas-

tungskoeffizienten der Transformatoren über ein Jahr. Die quartalsmäßig erstellte Reihenfolgebestimmung ist in Tabelle a zusammengestellt.

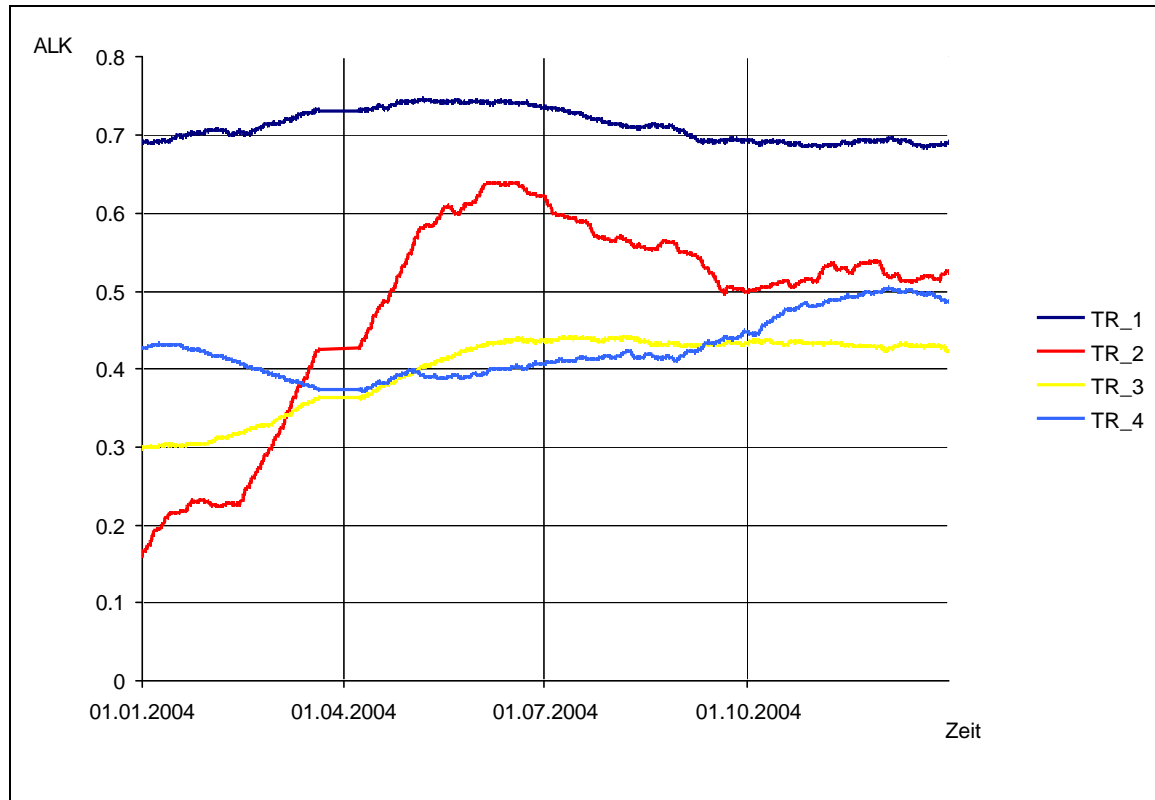


Tabelle a: Auslastungsbedingte Reihenfolge

Platz	01.01.04	01.04.04	01.07.04	01.10.04
1.	TR_1	TR_1	TR_1	TR_1
2.	TR_4	TR_2	TR_2	TR_2
3.	TR_3	TR_4	TR_3	TR_4
4.	TR_2	TR_3	TR_4	TR_3

Bild 4.4 Jahresverlauf der Auslastungskoeffizienten und die entsprechenden Ersatzreihenfolgen der Transformatoren je Quartal eines Jahres

4.3.3 Kennzahlbildung für das ersatzbedingte finanzielle Risiko

Der maximale finanzielle Schadenswert für den Fall der Durchführung eines planmäßigen Ersatzszenarios ist mit den aktuellen Kosten für eine Neuerrichtung, d.h. mit den Errichtungskosten zur aktuellen Betriebsdauer (ERK_{BD}) zu charakterisieren.

Angenommen, die Ersatzwahrscheinlichkeit eines Transformators ist mit dem Zustandsverschlechterungsgrad seiner lebensdauerkritischen Komponente positiv korreliert ($P_{er} \equiv ZVG_{max}$), dann kann man das mit dem Ersatz verbundene finanzielle Risiko mit dem entsprechenden Erwartungswert nach Gl. 4.8 beschreiben.

$$EK_i(t) = P_{er,i}(t) \cdot ERK_i(t) \quad (4.8)$$

Das ersatzbedingte finanzielle Risiko auf der Anlagengruppenebene kann dann durch die relative Kennzahl in Gl. 4.9 beschrieben werden.

$$FR_{GR} = \frac{\sum_{i=1}^n EK_i(t)}{\sum_{i=1}^n ERK_{BD}} \cdot 100 \quad (4.9)$$

4.4 Anwendungsbeispiele gemäß der Aufgabenstellung

In Hinblick auf die Verifizierung eines jeden theoretischen Ansatzes ist ein Beispiel zu dessen praktischer Umsetzung unerlässlich. Dieser Forderung wird in den folgenden Abschnitten Rechnung getragen, indem die Umsetzung der in Abschnitt 4.1 angegebenen Ziele detailliert dargelegt wird.

4.4.1 Bedingungen und Ablauf der Ersatzprioritäts-Analyse

Zu Analyse Zwecken wurde angenommen, dass sich im Zeitraum von 15. April bis 01. Juni im Isolieröl von TR2 ein Anstieg des Wasserstoffgehaltes von 48 ppm auf 150 ppm vollzogen hat. Die restlichen zustandsrelevanten Größen von TR2 wurden dabei sowohl für den natürlichen (NA) als auch für den fehlerbedingten Alterungstyp (FA) als bekannt vorausgesetzt. Die Zustandsgrößen von anderen Transformatoren aus der zugrundeliegenden Betriebsmittelgruppe nimmt man im genannten Analysezeitraum als konstant an, damit die Ersatzprioritätsänderung des TR2 allein von der Änderung ihrer teilentladungsrelevanten Messgröße abhängt.

Um die unterschiedliche Empfindlichkeit der Alterungstypen (NA, FA) auf eine fehlerbedingte Messgrößenabweichung zu demonstrieren, wurde wie folgt vorgegangen:

1. Der Zustandsverschlechterungsgrad wurde für beide Alterungstypen (ZVG_{NA} , ZVG_{FA}) durch Fuzzy-Folgerung bezüglich der drei Zeitpunkte (15. April, 03. Mai, 01. Juni) berechnet.
2. Die Wichtigkeit von Transformatoren wurde anhand der Gl. 4.3 bestimmt und darauffolgend auf 100 % skaliert. Die 100% Wichtigkeit besaß dabei der Transformator mit dem höchsten aktuellen Errichtungskosten.
3. Die empfohlene Ersatzreihenfolge wurde anhand des Risikoindikators in Gl. 4.2 für die oben festgelegten Zeitpunkte bestimmt, wobei man die höchste Ersatzpriorität dem Transformator mit dem höchsten Risikoindikator zuordnete. Die Analyseszenarien waren die folgenden:
 - a. Ersatzreihenfolge anhand der natürlichen Alterung ($ZVG_{max}=ZVG_{NA}$)
 - b. Ersatzreihenfolge anhand des Modells, in dem die Alterungstypen mittels des Maximumoperators verknüpft sind ($ZVG_{max}=\max(ZVG_{NA}; ZVG_{FA})$)
4. Um die Abhängigkeit der Anlagewichtigkeit von der Auslastung zu betonen, wurde die Ersatzprioritätsberechnung für unterschiedliche Auslastung von TR_2 durchgeführt.

Die Verknüpfung der Alterungstypen durch den Maxoperator hatte zur Folge, dass die Ersatzpriorität einer Anlage wunschgemäß durch das dominierende Alterungsphänomen bestimmt wurde.

4.4.1.1 Strukturierung von Analysedaten

Ein Datenumfang, welcher einen Transformator gemäß der Analyseziele beschreibt, besteht aus den folgenden Einzeldaten (vgl. mit Tabelle 4.1-4.6):

RF	- Reihenfolge (oder Priorität) für einen eventuellen Ersatz
BZ	- Bezeichnung
T_IB	- Zeitpunkt der Inbetriebnahme
T_GLD	- Geschätzte Lebensdauer nach Herstellerangaben
T_BD	- Betriebsdauer zum aktuellen Berichtzeitpunkt
ERK	- Errichtungskosten zu Beginn der Inbetriebnahme
ERK _{BD}	- Errichtungskosten zur aktuellen Betriebsdauer
ALK	- Auslastungskoeffizient der Anlage, berechnet durch Planlast für die nächsten 3 Monate ab aktuellem Zeitpunkt
W	- Wichtigkeit des Betriebsmittels
ZVG	- Zustandsverschlechterungsgrad des Betriebsmittels
EK	- Erwartungskosten für den Ersatz des Betriebsmittels
TR	- Risikoindikator für die Auslastungskoeffizienten 0,68; 1; 1,13
T_ZRLD	- Zustandsbasierte Restlebensdauer
T_GRLD	- Geschätzte Restlebensdauer anhand T_GLD und T_BD

4.4.1.2 Analyse für Alterungsmodellkombinationen

In den nachfolgenden Tabellen 4.2 - 4.6 wurden die einzelnen Schritte eines Analysebeispiels gemäß dem Szenarioüberblick in Tabelle 4. 1 dargestellt. Tabelle 4.7 fasst die Analyseergebnisse am Ende des Abschnitts zusammen.

Szenarioüberblick zur Ersatzprioritätsanalyse für TR_2 zum Zeitpunkt 01.06.2005							
Alterungstyp	NA			FA	NA + FA		
Auslastung (ALK)	0.68	1	1.13	1	0.68	1	variable
Priorität (RF)	15	8	6	1	3	1	Generalübersicht
Querverweis auf Tabelle	Tabelle 4.2	Tabellen 4.3 und 4.9	Tabelle 4.4	Tabelle 4.9	Tabelle 4.5	Tabelle 4.6	Tabelle 4.7

Tabelle 4.1 Szenarioüberblick zur Ersatzprioritätsanalyse für TR_2

Tabelle 4.1 zeigt, wie sich die Ersatzpriorität von TR_2 in der Transformatorengruppe bei unterschiedlicher Auslastung ändert, wenn ein für eine Teilentladung charakteristischer Wasserstoffanstieg im Isolieröl stattgefunden hat und der aktuelle Wert des Wasserstoffgehaltes zum Zeitpunkt 01.06. 150 ppm ausmacht. Um die Sensitivität der Alterungsmodelle in ihrer Kombination zu untersuchen, ist die Reihenfolgebestimmung sowohl durch das zusammengesetzte Modell (NA+FA) als auch mittels eigenständiger Modelle je Alterungstyp durchgeführt worden.

Der Bestimmung der zeitlichen Prioritätsänderung von TR_2 im nächsten Abschnitt ist das Modell mit der logischen Verknüpfung der grundlegenden Alterungstypen (NA+FA) zu Grunde gelegt worden. Bei der Prioritätsberechnung ist man dabei von einer Auslastung mit Nennlast (ALK=1) ausgegangen.

Zur Detailanalyse der Berechnungsvorschrift werden im Folgenden die bereits angekündigten Tabellen (4.2-4.6) der Reihe nach dargestellt, sie sollen die Nachvollziehbarkeit des Analysevorganges sicherstellen.

RF	BZ	Zeitbezogene Angaben			Kostenbezogene Angaben		Risikobezogene Inputs			Risikobezogene Outputs		T_ZRLD
		T_IB	T_GLD	T_BD	ERK	ERK _{BP}	ALK	W	ZVG	TR	EK	
		Datum	Jahr		T.EUR		K.A.	%		T.EUR		
1	TR 17	1970	35	35	6324	10648.865	1.13	99.99	79.00	89.49	8412.604	7.35
2	TR 18	1975	35	30	6501	10161.585	1.00	90.96	61.00	75.98	6198.567	13.65
3	TR 15	1977	35	28	3780	5735.10	1.00	52.89	85.00	68.94	4874.835	5.25
4	TR 6	1966	35	39	4600	8221.167	0.78	50.20	78.00	64.10	6412.510	7.7
5	TR 4	1990	35	15	5600	7001.30	0.89	69.73	55.00	62.37	3850.715	15.75
6	TR 5	1977	35	28	7800	11834.333	0.90	98.22	25.00	61.61	2958.583	26.25
7	TR 1	2000	35	5	7500	8079.630	0.80	83.95	30.00	56.98	2423.889	24.5
8	TR 12	1993	35	12	5780	6910.673	1.20	97.05	11.00	54.02	760.174	31.15
9	TR 10	1983	35	22	5800	8047.869	1.11	90.08	15.00	52.54	1207.180	29.75
10	TR 11	1999	35	6	6000	6560.660	1.14	95.70	6.80	51.25	446.125	32.62
11	TR 7	1978	35	27	4800	7175.041	0.90	60.44	41.00	50.72	2941.767	20.65
12	TR 16	1984	35	21	4890	6684.913	1.13	77.31	23.00	50.16	1537.530	26.95
13	TR 14	1969	35	36	2800	4785.591	1.08	42.31	58.00	50.16	2775.643	14.7
14	TR 8	1979	35	26	4700	6921.735	0.90	59.19	36.00	47.59	2491.825	22.4
15	TR 2	1995	35	10	6500	7543.515	0.68	61.84	23.50	42.67	1772.726	26.775
16	TR 3	1991	35	14	5000	6158.779	1.00	69.96	12.80	41.38	788.324	30.52
17	TR 9	1980	35	25	3500	5078.309	0.90	44.07	28.00	36.04	1421.926	25.2
18	TR 20	1989	35	16	1890	2398.383	1.00	26.44	24.00	25.22	575.612	26.6
19	TR 19	1971	35	34	2000	3317.993	1.00	27.98	19.00	23.49	630.419	28.35
20	TR 13	2003	40	2	3500	3605.788	0.66	32.32	5.60	18.96	201.924	37.76
Summe in [T.EUR]					99265.0	136871.227	Finanzielles Risiko auf Gruppenebene			38.49%		

Tabelle 4.2 Ersatzpriorität von TR_2 gemäß NA zum 01.06.2005 mit ALK=0,68

RF	BZ	Zeitbezogene Angaben			Kostenbezogene Angaben		Risikobezogene Inputs			Risikobezogene Outputs		T_ZRLD
		T_IB	T_GLD	T_BD	ERK	ERK _{BP}	ALK	W	ZVG	TR	EK	
		Datum	Jahr		T.EUR		K.A.	%		T.EUR		
1	TR 17	1970	35	35	6324	10648.865	1.13	99.99	79.00	89.49	8412.604	7.35
2	TR 18	1975	35	30	6501	10161.585	1.00	90.96	61.00	75.98	6198.567	13.65
3	TR 15	1977	35	28	3780	5735.10	1.00	52.89	85.00	68.94	4874.835	5.25
4	TR 6	1966	35	39	4600	8221.167	0.78	50.20	78.00	64.10	6412.510	7.7
5	TR 4	1990	35	15	5600	7001.30	0.89	69.73	55.00	62.37	3850.715	15.75
6	TR 5	1977	35	28	7800	11834.333	0.90	98.22	25.00	61.61	2958.583	26.25
7	TR 1	2000	35	5	7500	8079.630	0.80	83.95	30.00	56.98	2423.889	24.5
8	TR 2	1995	35	10	6500	7543.515	1.00	88.49	23.50	55.99	1772.726	26.775
9	TR 12	1993	35	12	5780	6910.673	1.20	97.05	11.00	54.02	760.174	31.15
10	TR 10	1983	35	22	5800	8047.869	1.11	90.08	15.00	52.54	1207.180	29.75
11	TR 11	1999	35	6	6000	6560.660	1.14	95.70	6.80	51.25	446.125	32.62
12	TR 7	1978	35	27	4800	7175.041	0.90	60.44	41.00	50.72	2941.767	20.65
13	TR 16	1984	35	21	4890	6684.913	1.13	77.31	23.00	50.16	1537.530	26.95
14	TR 14	1969	35	36	2800	4785.591	1.08	42.31	58.00	50.16	2775.643	14.7
15	TR 8	1979	35	26	4700	6921.735	0.90	59.19	36.00	47.59	2491.825	22.4
16	TR 3	1991	35	14	5000	6158.779	1.00	69.96	12.80	41.38	788.324	30.52
17	TR 9	1980	35	25	3500	5078.309	0.90	44.07	28.00	36.04	1421.926	25.2
18	TR 20	1989	35	16	1890	2398.383	1.00	26.44	24.00	25.22	575.612	26.6
19	TR 19	1971	35	34	2000	3317.993	1.00	27.98	19.00	23.49	630.419	28.35
20	TR 13	2003	40	2	3500	3605.788	0.66	32.32	5.60	18.96	201.924	37.76
Summe in [T.EUR]					99265.0	136871.227	Finanzielles Risiko auf Gruppenebene			38.49%		

Tabelle 4.3 Ersatzpriorität von TR_2 gemäß NA zum 01.06.2005 mit ALK=1

RF	BZ	Zeitbezogene Angaben			Kostenbezogene Angaben		Risikobezogene Inputs			Risikobezogene Outputs		T_ZRLD
		T_IB	T_GLD	T_BD	ERK	ERK _{BP}	ALK	W	ZVG	TR	EK	
		Datum	Jahr		T.EUR		K.A.	%		T.EUR		
1	TR 17	1970	35	35	6324	10648.865	1.13	99.99	79.00	89.49	8412.604	7.35
2	TR 18	1975	35	30	6501	10161.585	1.00	90.96	61.00	75.98	6198.567	13.65
3	TR 15	1977	35	28	3780	5735.10	1.00	52.89	85.00	68.94	4874.835	5.25
4	TR 6	1966	35	39	4600	8221.167	0.78	50.20	78.00	64.10	6412.510	7.7
5	TR 4	1990	35	15	5600	7001.30	0.89	69.73	55.00	62.37	3850.715	15.75
6	TR 2	1995	35	10	6500	7543.515	1.13	99.99	23.50	61.75	1772.726	26.775
7	TR 5	1977	35	28	7800	11834.333	0.90	98.22	25.00	61.61	2958.583	26.25
8	TR 1	2000	35	5	7500	8079.630	0.80	83.95	30.00	56.98	2423.889	24.5
9	TR 12	1993	35	12	5780	6910.673	1.20	97.05	11.00	54.02	760.174	31.15
10	TR 10	1983	35	22	5800	8047.869	1.11	90.08	15.00	52.54	1207.180	29.75
11	TR 11	1999	35	6	6000	6560.660	1.14	95.70	6.80	51.25	446.125	32.62
12	TR 7	1978	35	27	4800	7175.041	0.90	60.44	41.00	50.72	2941.767	20.65
13	TR 16	1984	35	21	4890	6684.913	1.13	77.31	23.00	50.16	1537.530	26.95
14	TR 14	1969	35	36	2800	4785.591	1.08	42.31	58.00	50.16	2775.643	14.7
15	TR 8	1979	35	26	4700	6921.735	0.90	59.19	36.00	47.59	2491.825	22.4
16	TR 3	1991	35	14	5000	6158.779	1.00	69.96	12.80	41.38	788.324	30.52
17	TR 9	1980	35	25	3500	5078.309	0.90	44.07	28.00	36.04	1421.926	25.2
18	TR 20	1989	35	16	1890	2398.383	1.00	26.44	24.00	25.22	575.612	26.6
19	TR 19	1971	35	34	2000	3317.993	1.00	27.98	19.00	23.49	630.419	28.35
20	TR 13	2003	40	2	3500	3605.788	0.66	32.32	5.60	18.96	201.924	37.76
Summe in [T.EUR]					99265.0	136871.227	Finanzielles Risiko auf Gruppenebene			38.49%		

Tabelle 4.4 Ersatzpriorität von TR_2 gemäß NA zum 01.06.2005 mit ALK=1,13

RF	BZ	Kostenbezogene Angaben		Risikobezogene Inputs					Risikobezogene Outputs		T_ZRLD
		ERK	ERK _{ED}	ALK	W	ZVG _{NA}	ZVG _{FA}	ZVG _{max}	TR	EK	
		T.EUR		K.A.	%					T.EUR	
1	TR 17	6324	10648.865	1.13	99.99	79.00	15.30	79.00	89.49	8412.604	7.35
2	TR 18	6501	10161.585	1.00	90.96	61.00	2.60	61.00	75.98	6198.567	13.65
3	TR 2	6500	7543.515	0.68	61.84	23.50	88.00	88.00	74.92	6638.294	4.2
4	TR 11	6000	6560.660	1.14	95.70	6.80	53.00	53.00	74.35	3477.150	16.45
5	TR 15	3780	5735.10	1.00	52.89	85.00	12.80	85.00	68.94	4874.835	5.25
6	TR 6	4600	8221.167	0.78	50.20	78.00	12.60	78.00	64.10	6412.510	7.7
7	TR 4	5600	7001.30	0.89	69.73	55.00	4.20	55.00	62.37	3850.715	15.75
8	TR 5	7800	11834.333	0.90	98.22	25.00	1.20	25.00	61.61	2958.583	26.25
9	TR 1	7500	8079.630	0.80	83.95	30.00	1.10	30.00	56.98	2423.889	24.5
10	TR 12	5780	6910.673	1.20	97.05	11.00	3.30	11.00	54.02	760.174	31.15
11	TR 10	5800	8047.869	1.11	90.08	15.00	2.40	15.00	52.54	1207.180	29.75
12	TR 7	4800	7175.041	0.90	60.44	41.00	4.70	41.00	50.72	2941.767	20.65
13	TR 16	4890	6684.913	1.13	77.31	23.00	1.36	23.00	50.16	1537.530	26.95
14	TR 14	2800	4785.591	1.08	42.31	58.00	1.87	58.00	50.16	2775.643	14.7
15	TR 8	4700	6921.735	0.90	59.19	36.00	2.50	36.00	47.59	2491.825	22.4
16	TR 3	5000	6158.779	1.00	69.96	12.80	5.20	12.80	41.38	788.324	30.52
17	TR 9	3500	5078.309	0.90	44.07	28.00	6.80	28.00	36.04	1421.926	25.2
18	TR 13	3500	3605.788	0.66	32.32	5.60	33.00	33.00	32.66	1189.910	26.8
19	TR 20	1890	2398.383	1.00	26.44	24.00	2.25	24.00	25.22	575.612	26.6
20	TR 19	2000	3317.993	1.00	27.98	19.00	2.89	19.00	23.49	630.419	28.35
Summe		99265.0	136871.227	Finanzielles Risiko auf Gruppenebene					44.98%		

Tabelle 4.5 Ersatzpriorität von TR_2 gemäß NA+FA zum 01.06.2005 mit ALK=0,68

RF	BZ	Kostenbezogene Angaben		Risikobezogene Inputs					Risikobezogene Outputs		T_ZRLD
		ERK	ERK _{ED}	ALK	W	ZVG _{NA}	ZVG _{FA}	ZVG _{max}	TR	EK	
		T.EUR		K.A.	%					T.EUR	
1	TR 2	6500	7543.515	1.00	92.55	23.50	88.00	88.00	90.28	6638.294	4.2
2	TR 17	6324	10648.865	1.13	100.00	79.00	15.30	79.00	89.50	8412.604	7.35
3	TR 18	6501	10161.585	1.00	90.97	61.00	2.60	61.00	75.99	6198.567	13.65
4	TR 11	6000	6560.660	1.14	95.72	6.80	53.00	53.00	74.36	3477.150	16.45
5	TR 15	3780	5735.10	1.00	52.90	85.00	12.80	85.00	68.95	4874.835	5.25
6	TR 6	4600	8221.167	0.78	50.21	78.00	12.60	78.00	64.10	6412.510	7.7
7	TR 4	5600	7001.30	0.89	69.74	55.00	4.20	55.00	62.37	3850.715	15.75
8	TR 5	7800	11834.333	0.90	98.24	25.00	1.20	25.00	61.62	2958.583	26.25
9	TR 1	7500	8079.630	0.80	83.96	30.00	1.10	30.00	56.98	2423.889	24.5
10	TR 12	5780	6910.673	1.20	97.06	11.00	3.30	11.00	54.03	760.174	31.15
11	TR 10	5800	8047.869	1.11	90.09	15.00	2.40	15.00	52.55	1207.180	29.75
12	TR 7	4800	7175.041	0.90	60.45	41.00	4.70	41.00	50.73	2941.767	20.65
13	TR 16	4890	6684.913	1.13	77.32	23.00	1.36	23.00	50.16	1537.530	26.95
14	TR 14	2800	4785.591	1.08	42.32	58.00	1.87	58.00	50.16	2775.643	14.7
15	TR 8	4700	6921.735	0.90	59.19	36.00	2.50	36.00	47.60	2491.825	22.4
16	TR 3	5000	6158.779	1.00	69.97	12.80	5.20	12.80	41.38	788.324	30.52
17	TR 9	3500	5078.309	0.90	44.08	28.00	6.80	28.00	36.04	1421.926	25.2
18	TR 13	3500	3605.788	0.66	32.33	5.60	33.00	33.00	32.66	1189.910	26.8
19	TR 20	1890	2398.383	1.00	26.45	24.00	2.25	24.00	25.22	575.612	26.6
20	TR 19	2000	3317.993	1.00	27.99	19.00	2.89	19.00	23.49	630.419	28.35
Summe		99265.0	136871.227	Finanzielles Risiko auf Gruppenebene					44.98%		

Tabelle 4.6 Ersatzpriorität von TR_2 gemäß NA+FA zum 01.06.2005 mit ALK=1

Um den Risikobeitrag eines Betriebsmittels zu beurteilen, die Einflussfaktoren zu erkennen und Maßnahmen zur Risikominderung generieren zu können, ist es sinnvoll, die unterschiedlichen Indikatoren wie z.B. Risiko für die ordnungsgemäße Betriebsführung (TR) und das mit einem Ersatz verbundene finanzielle Risiko (EK) gleichzeitig zu betrachten.

Aus der Tatsache allein, dass ein Betriebsmittel die höchste Priorität in der Gruppe besitzt, kann eine Ersatzmaßnahme noch nicht abgeleitet werden, dazu muss man die Ursache-Wirkungskette bis auf die zustandsrelevanten Messgrößen verfolgen und auch die Möglichkeiten der Netztopologie in Betracht ziehen.

Im vorliegenden Fall ist der Ersatz von TR_2 empfehlenswert, weil sein hoher Risikobeitrag durch eine ausgeprägte Fehlerart, nämlich Teilentladung, verursacht wurde und die Gefahr besteht, dass die Anlage für einen längeren Zeitraum ausfällt.

Reihenfolge	Kriterien für risikobasierte Reihenfolgebildung									
	W ALK=1	Alterungstyp für die Berechnung: NA					Alterungstypen für die Berechnung: NA und FA			
		T_ZRLD	ZVG	TR_ALK=Var	TR_ALK=1	TR_ALK=Var	T_ZRLD	ZVG	TR_ALK=Var	TR_ALK=1
1	TR 17	TR 15	TR 15	TR 17	TR 17	TR 17	TR 2	TR 2	TR 17	TR 2
2	TR 5	TR 17	TR 17	TR 18	TR 18	TR 18	TR 15	TR 15	TR 18	TR 15
3	TR 12	TR 6	TR 6	TR 15	TR 15	TR 15	TR 17	TR 17	TR 2	TR 17
4	TR 11	TR 18	TR 18	TR 6	TR 6	TR 6	TR 6	TR 6	TR 11	TR 6
5	TR 18	TR 14	TR 14	TR 4	TR 4	TR 4	TR 18	TR 18	TR 15	TR 18
6	TR 10	TR 4	TR 4	TR 5	TR 5	TR 2	TR 14	TR 14	TR 6	TR 14
7	TR 2	TR 7	TR 7	TR 1	TR 1	TR 5	TR 4	TR 4	TR 4	TR 4
8	TR 1	TR 8	TR 8	TR 12	TR 2	TR 1	TR 11	TR 11	TR 5	TR 11
9	TR 16	TR 1	TR 1	TR 10	TR 12	TR 12	TR 7	TR 7	TR 1	TR 7
10	TR 3	TR 9	TR 9	TR 11	TR 10	TR 10	TR 8	TR 8	TR 12	TR 8
11	TR 4	TR 5	TR 5	TR 7	TR 11	TR 11	TR 1	TR 13	TR 10	TR 13
12	TR 7	TR 20	TR 20	TR 16	TR 7	TR 7	TR 9	TR 1	TR 7	TR 1
13	TR 8	TR 2	TR 2	TR 14	TR 16	TR 16	TR 5	TR 9	TR 16	TR 9
14	TR 15	TR 16	TR 16	TR 8	TR 14	TR 14	TR 20	TR 5	TR 14	TR 5
15	TR 6	TR 19	TR 19	TR 2	TR 8	TR 8	TR 13	TR 20	TR 8	TR 20
16	TR 9	TR 10	TR 10	TR 3	TR 3	TR 3	TR 16	TR 16	TR 3	TR 16
17	TR 14	TR 3	TR 3	TR 9	TR 9	TR 9	TR 19	TR 19	TR 9	TR 19
18	TR 13	TR 12	TR 12	TR 20	TR 20	TR 20	TR 10	TR 10	TR 13	TR 10
19	TR 19	TR 11	TR 11	TR 19	TR 19	TR 19	TR 3	TR 3	TR 20	TR 3
20	TR 20	TR 13	TR 13	TR 13	TR 13	TR 13	TR 12	TR 12	TR 19	TR 12
ALK TR 2				0,68	1,00	1,13			0,68	1,00
Querverweis				Tabelle 4.2	Tabelle 4.3	Tabelle 4.4			Tabelle 4.5	Tabelle 4.6

Tabelle 4.7 Generalübersicht zur Ersatzpriorität von TR_2 zum Zeitpunkt 01.06.05

4.4.1.3 Visualisierung und Deutung der Analyseergebnisse

In der Überwachungspraxis von Großtransformatoren kommt der Erkennung von Trends eine besondere Bedeutung zu, weil sie eine gefährliche Betriebsituation schon im voraus erkennen lässt. Vor diesem Hintergrund spielt die adäquate Visualisierung der Ersatzprioritätsänderung eine entscheidende Rolle. Sie soll die Entscheidungsträger durch visuelle Warnung in die Lage versetzen, Maßnahmen zur Risikooptimierung rechtzeitig zu treffen.

Mit unveränderten Rahmenbedingungen, wie diese bereits im Abschnitt 4.1.1 beschrieben wurden, ist die Ersatzpriorität des Transformators TR_2 in drei Zeitpunkten berechnet worden. Es wurde dabei angenommen, dass die zustandsrelevante Messgröße „Wasserstoffgehalt im Isolieröl (H₂)“ im Analysezeitraum die Werte gemäß Tabelle 4.8 annimmt.

Inputs und Outputs für Sensitivitäts-Analyse	Zeitpunkte für Analyse		
	15. Apr.	3. Mai.	1. Jun.
H ₂ [ppm]	48	100	150
ZVG _{NA} [%]	19.5	20.1	23.5
ZVG _{FB} [%]	8.4	48.2	88.5
ZVG _{max} [%]	19.5	48.2	88.5
FR _{NA} [%]	41.21	41.24	41.43
FR _{NA+FA} [%]	41.21	42.80	45.00

Tabelle 4.8 Zeitliche Entwicklung von ersatzrelevanten Parametern von TR_2 mit ALK=1

Die nachfolgende Tabelle 4.9 demonstriert die Ersatzpriorität von TR_2 zu den Analysezeitpunkten jeweils für die betrachtete Modellkombination. Die praxisrelevante Konfiguration (NA+FA) zeigt den Dminierungsvorgang des am stärksten reagierenden Alterungsmodells deutlich. Demnach besitzt NA die Dominanz am 15.04, während diese am 03.05 von FA endgültig übernommen wird.

RF	Ersatzpriorität je Alterungstyp für TR_2								
	NA			FA			NA+FA		
1						X			X
2									
3									
4					X			X	
5									
6									
7									
8			X						
9	X	X					X		
10									
11									
12				X					
13									
14									
15									
16									
17									
18									
19									
20	15. Apr.	3. Mai.	1. Jun.	15. Apr.	3. Mai.	1. Jun.	15. Apr.	3. Mai.	1. Jun.

Tabelle 4.9 Ersatzpriorität von TR_2 zu den Analysezeitpunkten mit ALK= variable

Die in Bild 4.5 dargestellte Visualisierung der Ersatzprioritätsänderung für TR_2 repräsentiert die Wirksamkeit der risikobasierten online Entscheidungsunterstützung. Diese Darstellung ist durch eine lückenlose Abbildung der Ursache-Wirkungskette zu Stande gekommen und sie drückt den der Ersatzentscheidung zugrundeliegenden Sachverhalt, in komprimierter Form, leicht verständlich aus.

Bild 4.5 liefert Informationen für die strategische Anlagenplanung und dient als einheitliche Kommunikationsgrundlage für alle Entscheidungsträger in der Organisation.

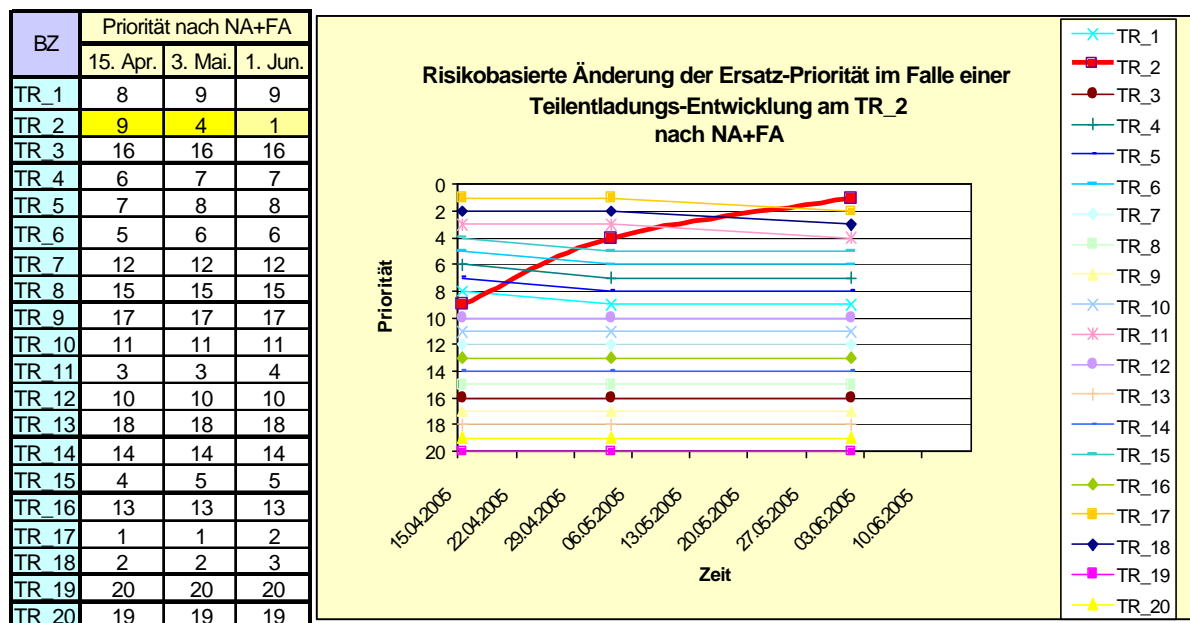


Bild 4.5 Risikobasierte Änderung der Ersatzpriorität von TR_2 im Kontext von anderen Anlagen der Transformatorengruppe, für den Fall einer ausgeprägten Teilentladung

4.4.2 Berechnung des ersatzbedingten finanziellen Risikos

Das ersatzbedingte finanzielle Risiko ist ein wichtiger Frühwarnungsindikator für das Finanzcontrolling, um die für eine bevorstehende Ersatzinvestition notwendigen Finanzmittel auf kostengünstiger Basis zu beschaffen. Dieser Indikator kann gemäß der Definition des Risikos mittels der entsprechenden Erwartungskosten berechnet werden (vgl. Abschnitt 2.2.2).

Je nach dem, ob man das relative finanzielle Risiko auf Betriebsmittelebene oder auf Betriebsmittelgruppenebene berechnen möchte, soll die Basis für die Relativierung dementsprechend gewählt werden. Im ersten Fall sollen die Wiederbeschaffungskosten des zugrundeliegenden Betriebsmittels und im zweiten Fall die Wiederbeschaffungskosten der betroffenen Anlagengruppe als Basis gewählt werden (vgl. Gl. 4.9).

In nachstehendem Bild 4.6 ist der zeitlicher Verlauf des finanziellen Risikoindikators für die Gruppenebene dargestellt. Um die Wirkung des fehlerbedingten Alterungstyps auch für diesen Indikator zu betonen, ist die Entwicklung des Indikators für beide Fälle (NA und NA+FB) aufgezeichnet worden.

Zur pauschalen Bewertung der Gruppe kann man anhand des Indikators (FR) die folgenden Aussagen treffen:

1. Durch die natürliche Alterung sind ca. 40% der aktuellen Errichtungskosten der zugrundeliegenden Anlagengruppe amortisiert worden.
2. Der jüngste Anstieg des finanziellen Risikos ist allein auf TR_2 zurückzuführen, mit dem Ersatz dieses Transformators sollte man auch aus finanzieller Sicht rechnen.

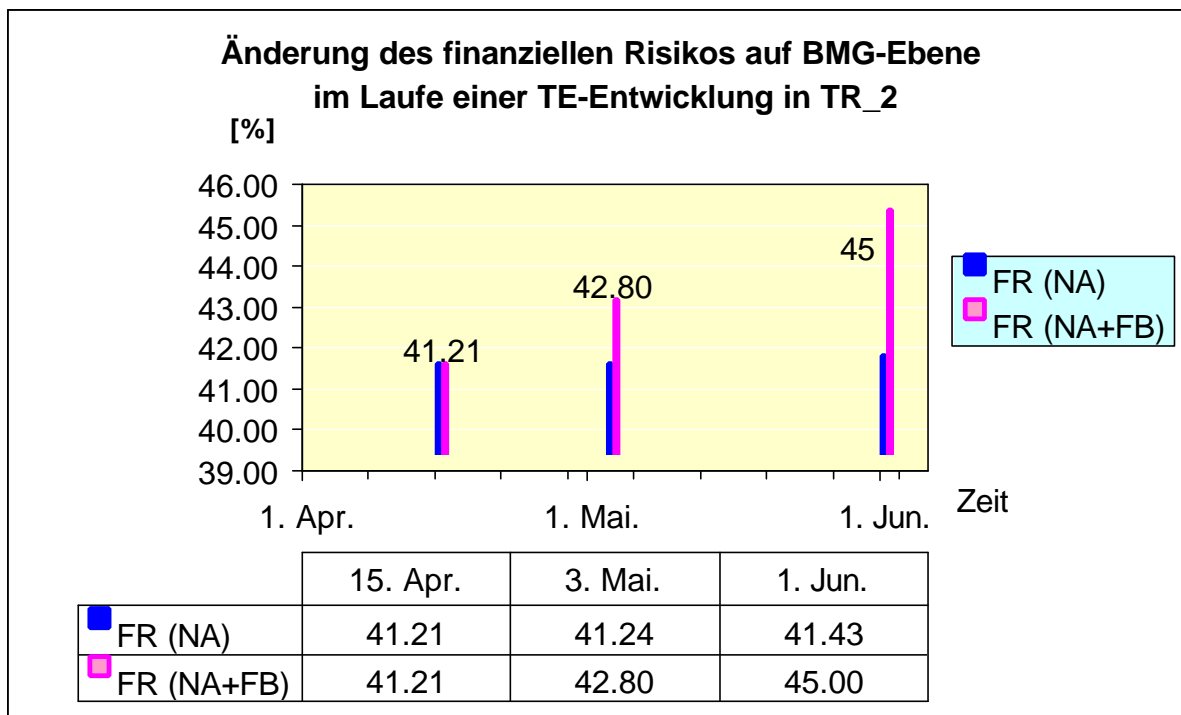


Bild. 4.6 Sensitivitätsanalyse der Ersatzpriorität und des finanziellen Risikoindikators im Falle einer teilentladungsrelevanten Wasserstoff-Entwicklung in TR_2

4.4.3 Restlebensdauerabschätzung durch Abweichungsanalyse

Wie bereits in Abschnitt 2.1.2 erklärt wurde, ist die Berechnung des Zeitwertes eines Transformators sowohl durch die lineare Abschreibung als auch mittels der zustandsbasierten kalkulatorischen Abschreibung möglich.

Während die erste Methode den genannten Zeitwert durch ein finanzmathematische Abschreibungskalkül ohne Rücksicht auf den tatsächlichen Zustand des Betriebsmittels periodisch berechnet (vgl. Gl. 2.3), findet die Berücksichtigung des Zustandes bei der zweiten Methode zeitkontinuierlich statt (vgl. Gl. 2.5).

Die nachstehenden Bilder 4.7-4.9 zeigen, dass man durch die simultane Darstellung des auf zwei Wegen berechneten Zeitwertes Rückschlüsse auf die Restlebensdauer ziehen kann. Voraussetzung für diese Darstellung ist die Berechnung des Zustandsverschlechterungsgrades der lebensdauerkritischen Anlagenkomponente für beide Alterungstypen, wie dies in den vorangehenden Abschnitten gezeigt wurde.

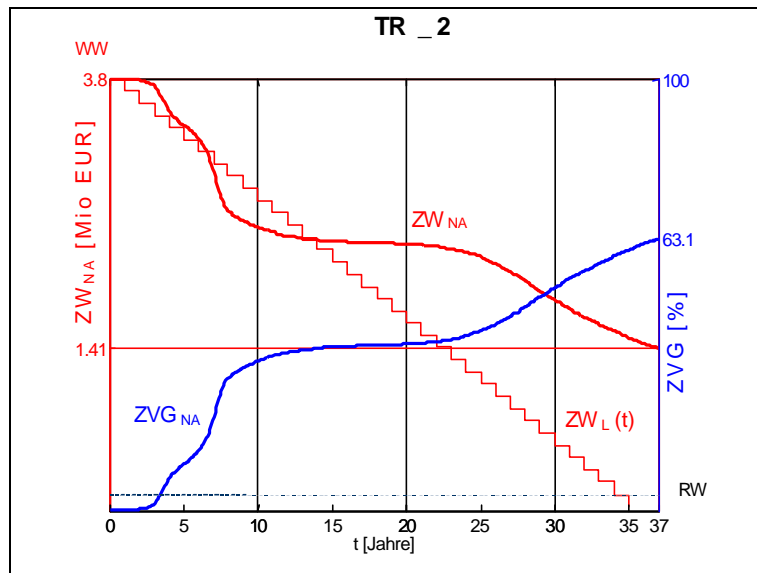


Bild 4.7 Restlebensdauerabschätzung für natürlich alternden TR nach Ablauf der geplanten Lebensdauer

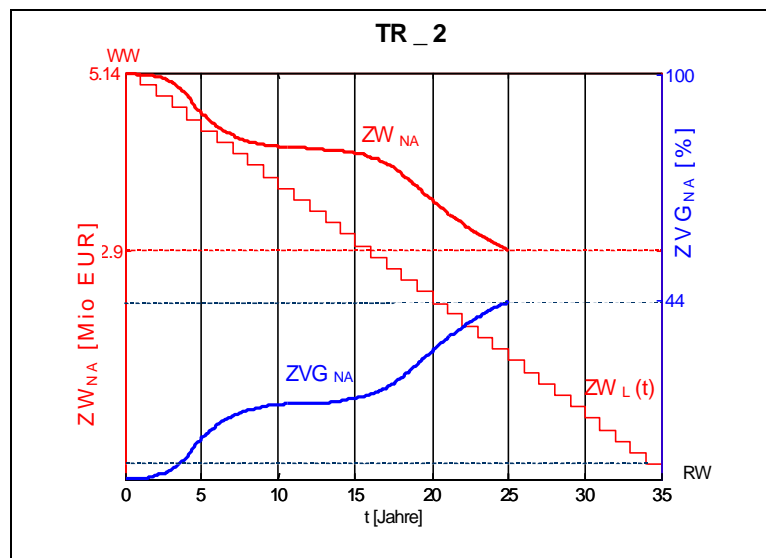


Bild 4.8 Restlebensdauerabschätzung für natürlich alternden TR während der geplanten Lebensdauer

4.5 Praktische Schlussfolgerungen zur Risikostrukturanalyse

Der vorgestellte Ansatz ermöglicht die Umsetzung der computergestützten Entscheidungsfindung. Seine Implementierung ist wegen der zugrundeliegenden einfachen Modellstruktur kostengünstig möglich und für Betriebsmittel wie Leistungstransformatoren auch nötig. Die Notwendigkeit ergibt sich dabei durch das fortgeschrittene Alter der meisten Leistungstransformatoren und die Betreiberabsicht diese aus Kostengründen über die geplante Betriebsdauer hinaus weiter zu betreiben.

Die durch den neuen Ansatz erzielte Verzahnung von Unternehmensfunktionen wie Finanzcontrolling und technischer Anlageüberwachung führt zur merkbaren Steigerung des Nutzeffektes von vorhandenen online Monitoringssystemen, deren Vorteilhaftigkeit von manchen Betreibern hin und wieder in Frage gestellt wird.

Bei dem vorgeschlagenen Risikomodel handelt es sich um ein heuristisches Eilverfahren, das eine gute Lösung auf Faustregelbasis anbietet. Die Einhaltung des n-1-Prinzips und die Tatsache, dass sich die vorliegende Applikation vor allem auf online gemessene zustandsrelevante Messgrößen stützt, rechtfertigt die Vereinfachung der Risikoabbildung. Aus praktischer Sicht reicht für Entscheidungsträger schon die Kenntnis über die grobe Risikostruktur in der Betriebsmittelgruppe aus, um diese durch Einbeziehen von weiteren entscheidungsrelevanten Informationen selbst zu präzisieren.

5. Ansatz zur Analyse eines Leistungsschalterportfolios

Gegenstand der Analyse

Ein Anlagenportfolio bestehend aus einer beliebigen Anzahl von Leistungsschaltern, deren Ersatz oder Instandhaltung nach einer vorausschauenden Planung risikoorientiert erfolgen soll.

Allgemeine Zielsetzung

Die Entscheidungsfindung zu einer optimalen Strategie der Vermögensverwaltung ist mit einer computergerechten online Berichterstattung zu unterstützen. Es sollen dabei die folgenden Zielsetzungen im Mittelpunkt stehen:

1. Risikoverfolgung aus Sicht der zu erwartenden finanziellen Belastung wegen zustandsbedingter Ersatzinvestition und ersatzbedingten Profitausfalls.
2. Risikoverfolgung aus Sicht der technischen Betriebsführung.
3. Unterstützung der Ersatzstrategiefindung durch Selektieren der zu ersetzenden Betriebsmittel und die Vorgabe ihrer Ersatzreihenfolge.
4. Unterstützung der IH-Strategiefindung durch die Reihenfolgebestimmung von IH-Aktivitäten mittels risikobasierter Instandhaltung.
5. Risikoverfolgung in Hinblick auf die zustandsbasierten Abschreibungen.

Anforderungen an den Lösungsweg:

1. Menschennahe Abbildung der Aufgabenkomplexität.
2. Einfacher mathematischer Hintergrund für die Berechnungen.
3. Hierarchische Betrachtung mit einem transparenten Lösungsweg.
4. Verursachungsgerechte Folgerungstechnik nach dem Motto:
 - a. Von fein zu grob bei der Ersatzrisikoabbildung.
 - b. Von grob zu fein bei der hierarchischen Ursachenforschung.

Formalisierung des Analyseverfahrens

Der Ablauf von Formalisierungsschritten folgt der Reihenfolge der Auflistung von oben beschriebenen Zielsetzungen. Im Vorfeld werden Umsetzungsansätze für die Zielerreichung aufgezeichnet, diese sollen die beispielhafte Zielumsetzung im Abschnitt 6. theoretisch und konzeptionell einleiten.

5.1 Quantifizierung des ersatzbedingten finanziellen Risikos

Die online Überwachung der zeitlichen Entwicklung von Ersatzerwartungskosten ermöglicht, die zu erwartende finanzielle Belastung rechtzeitig zu budgetieren und dadurch die Planungsgenauigkeit für die Geldmittelallokation zu erhöhen. Eine derartige Prozessoptimierung hat einen funktionsübergreifenden Charakter, weil sie unterschiedliche funktionale Bereiche der Anlagentechnik und Betriebswirtschaft nahtlos verbindet. Diese Besonderheit des Ansatzes ist deshalb zu betonen, weil durch sie der bisher enorme Koordinationsaufwand für die Informationsbeschaffung wesentlich gesenkt werden kann und die Transparenz der Inanspruchnahme der Geldmittel bis zu der Ursache des Finanzierungsanspruches gewährleistet wird.

5.1.1 Definition des Risikobegriffes bezüglich des Ersatzes

Das mit der Zustandsverschlechterung einhergehende finanzielle Risiko eines möglichen Ersatzes wird nach der Gl. (5.1) als Erwartungskosten (EK) eines antizipierten Schadens definiert. Es ist eine absolute Kennzahl für das finanzielle Risiko.

$$EK = P_{er} \cdot K_{max} \quad (5.1)$$

wobei: P_{er} \Rightarrow zustandsbasiert geschätzte Eintrittswahrscheinlichkeit des Ersatzes
 K_{max} \Rightarrow maximale Kosten des relevanten Ersatzszenarios

In den nächsten Abschnitten gilt es die Variablen aus Gl. (5.1) einzeln zu bestimmen.

5.1.2 Berechnung des maximalen monetären Schadens beim Ersatz

Um das ersatzbedingte finanzielle Risiko für einen Leistungsschalter zu bestimmen, ist die Vorkalkulation des antizipierten maximalen Schadens in Gl. (5.1) unerlässlich.

Die genannten, ersatzinduzierten Schadenskosten sind grundsätzlich aus den nachfolgenden zwei Posten zusammengesetzt:

1. Kosten, welche den mit nichtgelieferter Energie einhergehenden Profitverlust charakterisieren.
2. Kosten für die LS-Neuerrichtung, welche als finanzielle Konsequenz eines planmäßigen Betriebsmittlersatzes entstehen.

Dabei gilt es die nichtgelieferte Energie nicht aus der Sicht des Endverbrauchers, sondern aus der Perspektive des zugehörigen technischen Einbauortes zu bestimmen. Ob der Ersatz mit nichtgelieferter Energie einhergeht, ist anhand der zugrundeliegenden Netztopologie festzulegen.

Das Ablaufdiagramm für die Bestimmung des maximalen Schadenswertes ist in Bild 5.1 dargestellt. Der maximale Gesamtverlust (GV) kann im Falle eines Ersatzes mittels der Gl.-en (5.2 - 5.5) berechnet werden.

$$GV = PV + ERK_A \quad (5.2)$$

$$PV = S_D \cdot T_a \cdot G_m \cdot U \quad (5.3)$$

$$T_a = \min(T_R, T_S) \quad (5.4)$$

$$ERK_A = ERK_H \cdot \left(1 + \frac{IR}{100}\right)^{LD} \quad (5.5)$$

- mit: PV \Rightarrow Profitverlust durch nichtgelieferte Energie
 S_D \Rightarrow Durchschnittsleistung für eine dreimonatige Prognoseperiode
 T_a \Rightarrow Auszeit des Leistungsschalters beim Ersatz
 T_R \Rightarrow Installationszeit eines neuen Leistungsschalters
 T_S \Rightarrow ersatzbedingte Umschaltzeit auf eine neue Topologie
 G_m \Rightarrow Gewinnmarge pro kWh (in %)
 U \Rightarrow Umsatz pro kWh (in EURO)
 ERK_A \Rightarrow Barwert der historischen Errichtungskosten des LS-s
 ERK_H \Rightarrow Historische Errichtungskosten des LS-s
 LD \Rightarrow Verbrauchte Lebensdauer von dem Zeitpunkt der Inbetriebnahme
 IR \Rightarrow Durchschnittliche Inflationsrate für die verbrauchte Lebensdauer

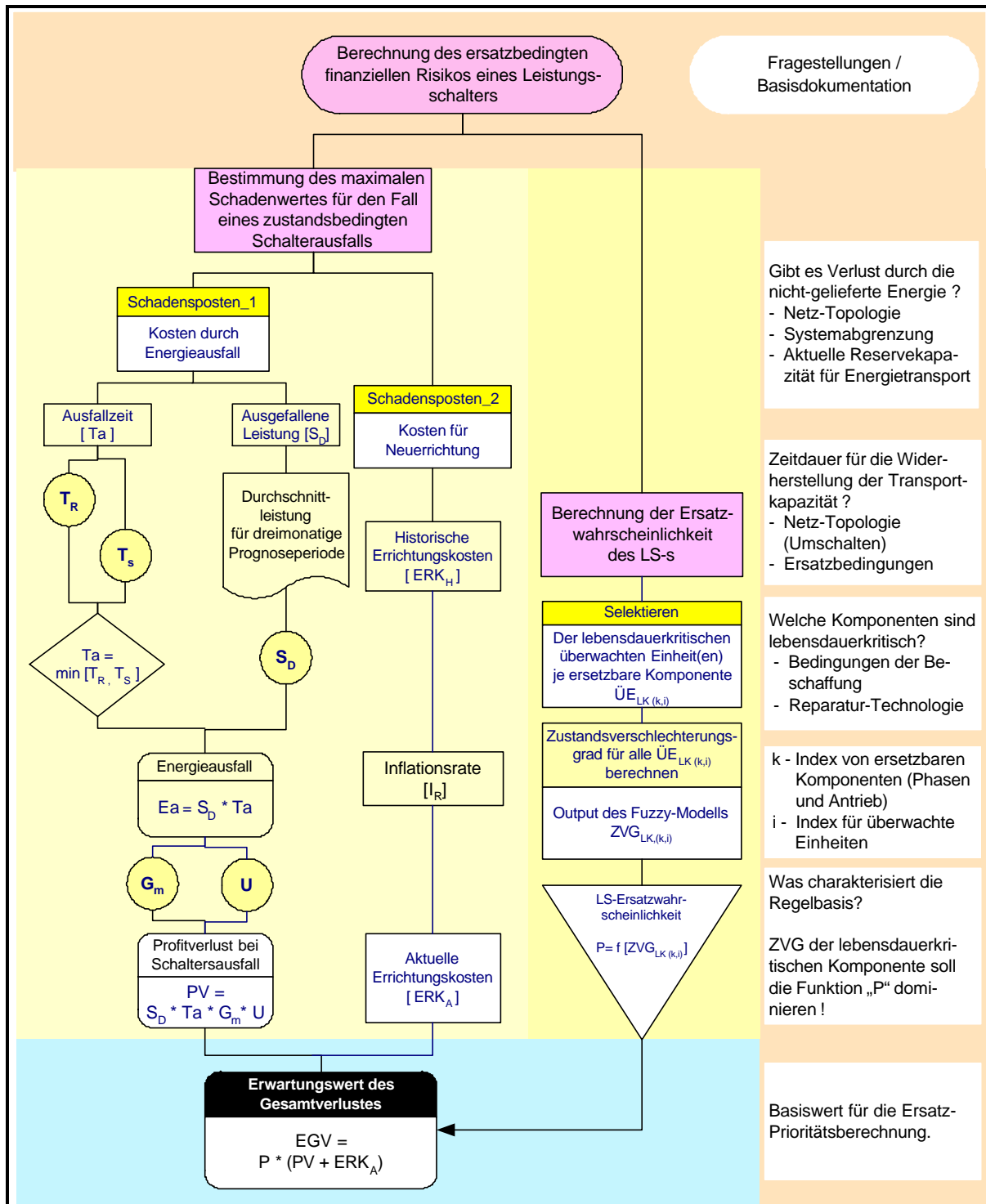


Bild 5.1 Master-Flussdiagramm für die Berechnung von Erwartungskosten des Ersatzszenario eines Leistungsschalters durch seine relevanten Schadensposten und Ersatzwahrscheinlichkeit

5.1.3 Berechnung der zustandsbasierten Ersatzwahrscheinlichkeit

Finanzinvestitionen legen Kapital in Finanzprojekten fest, die keine direkte Beziehung zum eigentlichen Produktionsprozess haben wie z.B. Wertpapiere. Die Produktionsinvestitionen binden dagegen das Kapital in Anlagen, die am Produktionsprozess beteiligt sind. Bei Produktionsinvestitionen unterscheidet man zwischen Rationalisierung-, Erweiterung- und Ersatzinvestitionen. Um die optimale Investitionsent-

scheidung unter den aufgelisteten Investitionsarten zu unterstützen, ist ein zuverlässiges Investitionsprogramm für die Ersatzinvestitionen unabdingbar.

Im folgenden wird ein zustandsbasiertes Verfahren dargestellt, welches das Aufstellen des Investitionsprogramms für eine Gruppe von Leistungsschaltern unterstützt.

5.1.3.1 Definition für die Ersatzwahrscheinlichkeit

Die Ersatzwahrscheinlichkeit einer Anlage wird wie folgt definiert:

Die Ersatzwahrscheinlichkeit gibt an, wie hoch die Wahrscheinlichkeit ist, dass das Betriebsmittel als Ganzes ersetzt werden muss.

5.1.3.2 Problemanalyse

Bevor man zu der Herleitung der geschätzten Ersatzwahrscheinlichkeit eines Leistungsschalters übergeht, muss der begriffliche Unterschied zwischen der Ersatzwahrscheinlichkeit und der Ausfallwahrscheinlichkeit zum besseren Verständnis erklärt werden.

Während zum Ausfall eines Leistungsschalters der Ausfall jeder betriebsfunktionsnotwendigen Komponente führen kann, wird dessen Ersatz durch den Verschleiß seiner lebensdauerkritischen Komponente(n) bestimmt. Die Entscheidung, ob eine Komponente als lebensdauerkritisch anzusehen ist, wird dabei vor allem durch die folgenden zwei Faktoren beeinflusst:

1. Die Ersetzbarkeit der zugrundeliegenden Komponente.
 - a. aus der Sicht der anlagenspezifischen Reparaturtechnologie
 - b. aus der Sicht der Ersatzteilbeschaffung (*Wenn sie nicht zu beschaffen ist, wird die Komponente als lebensdauerkritisch betrachtet.*)
2. Die Wirtschaftlichkeit des Ersatzes der betrachteten Komponente (z.B. das Verhältnis der Ersatzkosten einer Komponente zu den Kosten ihrer Neuerrichtung).

Auf der Suche nach einem Berechnungsverfahren für die Ersatzwahrscheinlichkeit wurden Betriebs- und Diagnostikerfahrungen, die durch den Hersteller spezifizierten Instandhaltungstechnologien, die Beschaffungsgegebenheiten von ersetzbaren Komponenten und die historisch durchgeführten Ersatzszenarien von betroffenen Leistungsschaltern analysiert, um Anhaltspunkte für die Herleitung der unmittelbaren Randbedingungen eines Ersatzereignisses typspezifisch abzuleiten. Die Untersuchung bei Betreibern hat die nachstehenden Erkenntnisse geliefert:

- a. Die eigenständig ersetzbaren Komponenten eines Leistungsschalters sind die einzelnen Phasen und der Antrieb.
- b. Das lebensdauerkritische Bauelement einer Phase ist der hauptstromführende Kontakt. Die entsprechenden Bauelemente für den Antrieb sind der Motor und die Hydraulik.
- c. Wenn der Zustandsverschlechterungsgrad (ZVG) nur eines einzigen lebensdauerkritischen Bauelementes groß ist, dann soll die zugehörige ersetzbare Komponente ausgetauscht oder repariert werden. Ein kompletter Anlagenersatz ist für dieses Zustandszenario nicht vorgesehen.

- d. Wenn das lebensdauerkritische Bauelement bei zwei Phasen einen großen Zustandsverschlechterungsgrad aufweist, dann wird ein Anlagenersatz erfahrungsgemäß bevorzugt.
- e. Wenn eine Phase und der Antrieb eine große Zustandsverschlechterung zeigen, dann wird die Ersatzwahrscheinlichkeit (P_{er_LS}) auf ca. 50 % geschätzt.
- f. Wenn allen ersetzbaren Komponenten ein großer Zustandsverschlechterungsgrad zugeschrieben werden kann, dann wird der Ersatz der gesamten Anlage eindeutig empfohlen.
- g. Die restlichen ersatzrelevanten Randbedingungen, die oben nicht beachtet wurden, sollen erst bei der Implementierung eines Lösungsansatzes für die Ersatzwahrscheinlichkeitsberechnung oder zum Zeitpunkt der ultimativen Ersatzentscheidung mitberücksichtigt werden.

5.1.3.3 Lösungsansatz

Sieht man die unter 5.1.3.2 aufgelisteten Erkenntnisse der Erfahrungsanalyse genau an, ist es leicht festzustellen, dass es sich bei der Beschreibung von relevanten Einflussgrößen um unscharfe Eingangsgrößen einer möglichen Folgerungskette für die Ersatzwahrscheinlichkeit handelt. Demzufolge bietet sich die regelbasierte Verknüpfung von ersatzrelevanten Eingangsgrößen mit der Größe Ersatzwahrscheinlichkeit als einfache, verursachungsgerechte Abbildung an.

Aus der Erkenntnis, dass der Zustandsverschlechterungsgrad des hautstromführenden Kontaktes als lebensdauerkritische Einheit auf die Ersatzwahrscheinlichkeit entscheidenden Einfluss nimmt, ergibt sich die Forderung nach seiner separaten Überwachung.

Weiterhin wird angenommen, dass der Zustandsverschlechterungsgrad der lebensdauerkritischen Komponenten von einzelnen Phasen und des Antriebes mit deren Ersatzwahrscheinlichkeit ($P_{ER, komp}$) stark korreliert. Das Gesagte gilt insbesondere für den Bereich, wo $ZVG \geq 20\%$ ist. Unter der Grenze $ZVG=20\%$ wird dabei die erwähnte Ersatzwahrscheinlichkeit wegen hoher Ungenauigkeit der Schätzung des zugrundeliegenden funktionalen Zusammenhanges aus Gründen der Zweckmäßigkeit auf „NULL“ gesetzt.

Die Ersatzwahrscheinlichkeit ist der zweite Haupteinflussfaktor für die finanzielle Risikoabschätzung. Um ihre Eingliederung in den Gesamtkontext auch visuell deutlich zu machen, ist sie in das Bild 5.1 integriert worden. Eine Beispielberechnung für diese Größe wird in Abschnitt 6.3 in Details vorgeführt.

5.1.4 Bestimmung der Erwartungskosten des Gesamtverlustes

Entsprechend den Gl.-en (5.2 - 5.5) und den Ausführungen unter den Punkten 5.1.1 - 5.1.2 gilt die Gl. (5.6) für den Erwartungswert des Gesamtverlustes.

$$EGV = P_{er_LS} \cdot (PV + ERK_A) \quad (5.6)$$

mit: $P_{er_LS} \Rightarrow$ Ersatzwahrscheinlichkeit des Leistungsschalters, berechnet anhand von zustandsrelevanten Messgrößen der lebensdauerkritischen Anlagenkomponenten.

5.1.5 Schwerpunktanalyse mittels des ersatzbedingten finanziellen Risikos

Das ersatzbedingte absolute finanzielle Risiko kann mit den Erwartungskosten des Gesamtverlustes nach Gl. (5.6) charakterisiert werden. Dieses ist eine zustandsbasierte Kennzahl auf Betriebsmittelebene, die für die Vorhersage einer Ersatzinvestition und für die zeitliche Koordination der entsprechenden Kostenbudgetierung Unterstützung bietet. Um die Betriebsmittel mit dem wesentlichen finanziellen Risikobeitrag zu dem Gesamtrisiko zu selektieren, wird die Schwerpunktanalyse eingesetzt.

Durch die genannte Untersuchung kann man zwar die Anlagen mit dem größten Risikobeitrag selektieren, aber sie ist für die Bestimmung von erforderlichen Maßnahmen zur Risikominimierung - *Ersatz oder Instandhaltung* - ohne weitere Untersuchung nicht geeignet. Deshalb müssen noch weiterführende Detailanalysen in Bezug auf die Bestimmung der Ausfallwahrscheinlichkeit von Anlagen und für die Herleitung entscheidungssituationsgerechter Methoden durchgeführt werden. Diesbezügliche Anstrengungen werden in den nachfolgenden Abschnitten unternommen.

5.2 Risikoverfolgung aus der Sicht der technischen Betriebsführung

Die technische Betriebsführung soll durch die kontinuierliche Zustandsbeobachtung von Betriebsmitteln und durch ihre Aktivitäten bezüglich einer risikoorientierten Topologiegestaltung zu einer zuverlässigen und kostengünstigen Energieversorgung wesentlich beitragen. Vor diesem Hintergrund ist eine hierarchische Einteilung von entscheidungsrelevanten Indikatoren notwendig, weil deren Informationsverdichtungsgrad der jeweiligen Ebene der Führungshierarchie entsprechen soll. Während die Leitstellen auf lokaler Ebene nur betriebsmittelbezogene Zustandsinformationen benötigen, interessiert sich die zentrale Leitstelle vor allem für systemübergreifende Zustands- und Risikoinformationen.

5.2.1 Risikoverfolgung bis auf Betriebsmittelebene

Gewöhnlich besitzt der Netzausbau ein hohes Maß an Gestaltungsflexibilität, welche im Falle eines Betriebsmittelsausfalls die Erfüllung von jeweiligen Versorgungsanforderungen mit unterschiedlichen Topologien gewährleisten kann. Bedingt durch zahlreiche Kombinationsmöglichkeiten von topologiebildenden Betriebsmitteln stellen allerdings diese alternativen Schaltzustände Risikoszenarien mit verschiedenem Gefährdungspotenzial dar. Aus diesem Grund sollte man bei einer risikobewussten Betriebsführung aus den vorhandenen Alternativen diejenige Topologie mit dem kleinsten Risikopotenzial wählen.

Um den optimalen Schaltzustand jedoch zu erkennen, bedarf es der Kenntnis über die zustandsbedingte Ausfallwahrscheinlichkeit der für die Topologiebildung infragekommenden Betriebsmittel. Zur Unterstützung der Betriebsführung in der optimalen Topologieeinstellung sollen die folgenden Indikatoren zur Verfügung gestellt werden:

1. Aktuelle zustandsbasierte Ausfallwahrscheinlichkeit des Betriebsmittels.
2. Ausprägung der Ausfallwahrscheinlichkeit unter den überwachten Einheiten des Betriebsmittels.

5.2.2 Risikoverfolgung auf Systemebene

Für die online Überwachung der zeitlichen Entwicklung des Netzzustandes auf der Systemebene können von dem Assetmanager die folgenden Kennzahlen verdichteter Art herangezogen werden:

1. Zustandsverschlechterungsgrad des abgegrenzten Systems.
2. Funktionsbeitrag auf der Systemebene.
3. Kalkulatorische Abschreibung auf der Systemebene.

Weil diese Kennzahlen das Systemrisiko in einer aggregierten Form ausdrücken, sind sie sowohl für die Früherkennung von Degradationstrends als auch für die Abschätzung von Auswirkungen der geplanten Maßnahmen zur Risikominderung gut geeignet. Unter Systemebene wird in der vorliegenden Arbeit durchgängig die LS-Gruppenebene verstanden.

5.3 Unterstützung der Ersatzstrategiefindung

Die Ersatzstrategiefindung wird hauptsächlich durch das Selektieren von zu ersetzenden Anlagen und durch die Vorgabe von deren Ersatzreihenfolge unterstützt.

Für die Selektion von Leistungsschaltern für den Ersatz wird als Kriterium erster Ordnung der im Punkt 5.1.3.3. eingeführte Indikator für die zustandsbasierte Ersatzwahrscheinlichkeit (P_{er_LS}) verwendet. Nachdem das Betriebsmittelportfolio für den Ersatz feststeht, ist zum Schluss die Ersatzreihenfolge zu bestimmen.

Auf die Bestimmung der Ersatzpriorität können u.a. die nachstehenden Indikatoren einen maßgebenden Einfluss haben:

1. Ersatzwahrscheinlichkeit des Leistungsschalters (P_{er_LS}).
2. Relativer Profitverlust eines LS-s zu dem gesamten Profitverlust (PV_R).
3. Ausfallwahrscheinlichkeit des Leistungsschalters (P_{a_LS}).

Die zu lösende Aufgabe ist eine mehrkriterielle Entscheidung, die im später aufgeführten Beispiel, durch den im theoretischen Teil demonstrierten Fuzzy-Verfahren, getroffen wird. Die Bildung von Produktionsregeln für die Ersatzwahrscheinlichkeit basiert dabei auf der vorhandenen Ersatzerfahrung. Diese lautet: *„Die Ersatz-Priorität einer Anlage ist umso höher, je größer der Wert der oben aufgelisteten Indikatoren ist“*.

Abschließend muss man bemerken, dass die Kriteriumsbasis der Ersatzprioritätsberechnung für Entscheidungssituationen mit anderen Randbedingungen einer Neuformulierung bedarf.

5.4 Unterstützung der Strategiefindung für die Instandhaltung

Im Asset-Management der elektrischen Energieversorgung wendet man sich von der periodischen Instandhaltung mit festgelegten Wartungszyklen immer mehr ab [Albeln, 2002]. Es werden zuverlässigkeitsorientierte Instandhaltungsstrategien gefordert, bei denen das von einzelnen Betriebsmitteln ausgehende Risiko für die Netzfürung den Zeitpunkt von Instandhaltungsmaßnahmen bestimmen. Diese Art der Strategieplanung ist jedoch ohne effiziente Computerunterstützung nicht zu implementieren. Die Gründe dafür sind einerseits die hohe Problemkomplexität der Zu-

standsbeurteilung und andererseits die mit hoher Dynamik einhergehende Änderung von risikorelevanten Einflussparametern.

Um Strategiefindung in der Instandhaltung online zu unterstützen, soll man:

1. Die Reihenfolge von Instandhaltungsmaßnahmen auf der Ebene von überwachten Einheiten vorhersagen.
2. Eine Prioritätsliste von IH-Maßnahmen unter der Bedingung eines limitierten IH-Budgets online generieren, wobei die genannten IH-Maßnahmen auch zu den zugehörigen Betriebsmitteln zugeordnet werden müssen.

Ansatz für die Aufgabenlösung:

1. Die IH-Reihenfolge im Portfolio wird anhand von Erwartungskosten bezüglich eines Betriebsmittelsausfalls auf der Betriebsmittelebene bestimmt. Die erwähnten Erwartungskosten werden dabei mittels der Betriebsmittelausfallwahrscheinlichkeit und des relevanten Profitverlustes bestimmt.
2. Die am meisten degradierte überwachte Einheit des Betriebsmittels mit höchster Priorität wird virtuell repariert, die Ausfallwahrscheinlichkeit des LS-s Neuberechnet und der Punkt 1. wiederholt.
3. Die Punkte 1-2. werden, solange ausgeführt bis das IH-Budget reicht. Sollte die IH-Bedürftigkeit weiter bestehen, muss man die Budgetsumme erhöhen.

5.5 Zustandsbasierte Berechnung der kalkulatorischen Abschreibung

Im Gegensatz zu den bilanziellen Abschreibungen nach § 253 HGB, wo die Berechnung des Abschreibungssatzes zustandsunabhängig erfolgt und gesetzlich geregelt wird, sind die Methoden für die kalkulatorischen Abschreibungen gesetzlich nicht vorgeschrieben. Die Letzteren dienen ausschließlich der Kostenrechnung als Hilfsmittel, um den verursachungsgerechten Werteverzehr von Betriebsmitteln zu ermitteln.

Die substanzielle Kapitalerhaltung des Unternehmens wird durch die Verbuchung des Abschreibungsbetrages als Kosten sichergestellt, wobei für die Abschreibungsbasis die aktuellen Neuerrichtungskosten des jeweiligen Betriebsmittels herangezogen werden. Das bedeutet, dass nach Ausscheiden von Betriebsmitteln wieder ein entsprechendes Objekt aus den Abschreibungsbeträgen angeschafft werden kann.

Um Fehlkalkulation bezüglich der Kostenentwicklung und folglich bei der Prognose von Gewinnaussichten zu vermeiden, gilt für das Assetmanagement u.a. auch den Abschreibungsbetrag zustandsbasiert zu bestimmen.

Nachdem der relative Werteverzehr von allen überwachten Einheiten mit Fuzzy-Folgerung in Form des Zustandsverschlechterungsgrades bestimmt und die Abschreibungsbasis festgelegt wurde, steht der Abschreibungsberechnung in der Assets-Hierarchie nichts mehr im Wege. Im Abschnitt 6.2.1.2. wird die genannte Berechnung für das Beispielportfolio demonstriert. Es wird gezeigt, wie der Abschreibungsbetrag für unterschiedliche Aggregationsebenen durch den relevanten Funktionsbeitrag berechnet werden kann. Eine historische Analyse wird in Abschnitt 6.6.1. gegeben.

6. Anwendungsbeispiel für die Leistungsschalterportfolio-Analyse

Für das Beispiel wird das Hochspannungsleistungsschalter-Portfolio eines Umspannwerkes bestehend aus 15 Schaltern untersucht. Der Beispielanalyse zugrunde liegende Netztopologie ist in Bild 6.1 dargestellt worden. Für die Randbedingungen der Beispielaufgabe gelten dabei die folgenden Annahmen:

1. Aus Gründen der Komplexitätsminderung wird auf eine umfassende Zustandsbeschreibung mittels aller möglichen Messgrößen kein Anspruch erhoben.
2. Die durchschnittliche Scheinleistung, die im Falle eines Ersatzszenarios ausfällt, wurde für eine dreimonatige Prognoseperiode aus der Lastflussprognose für alle Leistungsschalter berechnet.
3. Die Zeitangaben für die unterschiedlichen Reparaturszenarien und für das Umschalten auf eine neue Netztopologie sind für alle Leistungsschalter vorkalkuliert worden und werden im Laufe des Betriebes aktualisiert.
4. Der Analyse zugrundeliegende Zustandsbeurteilungsregeln werden gemäß den neuesten Erkenntnissen über die relevanten Zusammenhänge kontinuierlich aktualisiert.
5. Die durch das Verfahren vorgeschlagene Lösung wird von Entscheidungsträgern als Entscheidungsunterstützung und nicht als ultimative Entscheidung aufgefasst.
6. Die Leistungsschalter in Bild 6.1. sind Anlagen gleichen Typs und die zustandsrelevanten Messgrößen werden der Fuzzy-Applikation aus einer Datenbank online zur Verfügung gestellt.

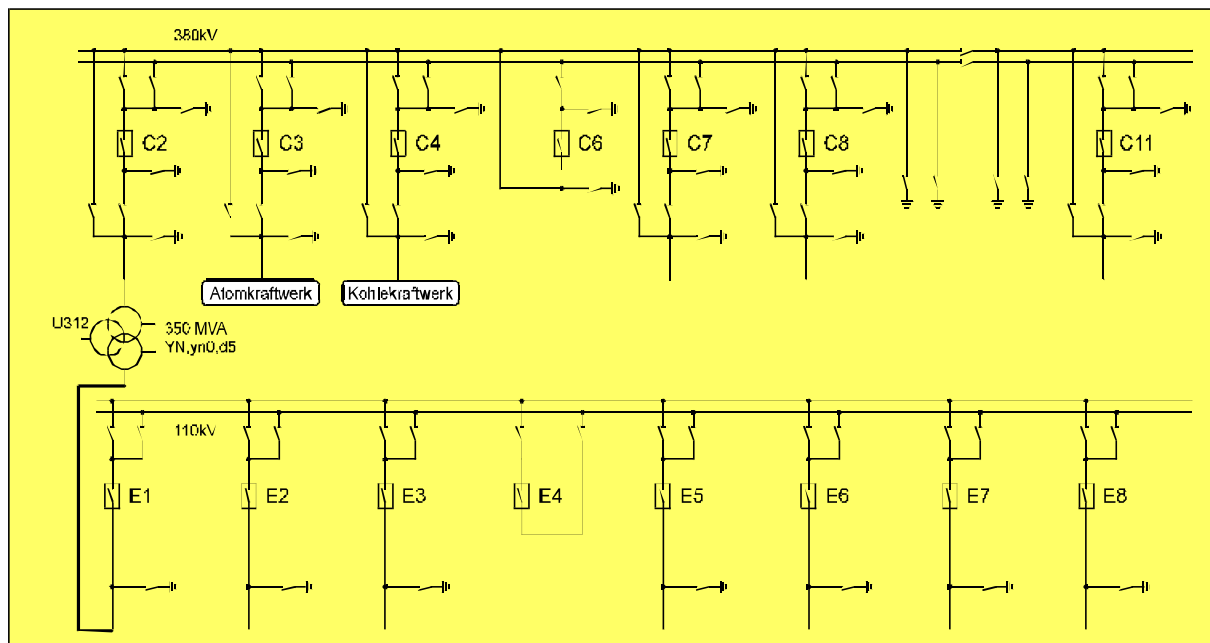


Bild 6.1 Dem Analysebeispiel zugrundeliegende Topologie eines Umspannwerkes

7. Zwecks der exemplarischen Darstellung der fuzzylogischen Zustandsabschätzung und Ersatzwahrscheinlichkeitsberechnung wird durchgängig auf den Leistungsschalter mit der Bezeichnung LS_C7 Bezug genommen. Das vorgestellte Schätzungsverfahren ist allerdings für alle Anlagen anwendbar.
8. Die überwachten Einheiten des Leistungsschalters LS_C7 und ihre zustandsrelevanten Messgrößen werden gemäß der Tabelle 6.1 festgelegt.

Ersetzbare Komponente	Überwachte Einheit (ÜE _k)		Fehlerarten je Einheit	Zustandsrelevante Messgrößen	
				Bezeichnung	Wertebereich
Phasen 1 bis 3	ÜE ₁	SF6-Isolierung	Undichtigkeit	SF ₆ -Feuchtigkeit [ppm]	50-500
				SF ₆ -Druck [bar]	4.6-6
	ÜE ₂	Hauptstrombahn (Polführung, Kontakt)	Schlechter Kontakt	Durchgangswiderstand [mikro-ohm]	25-100
	ÜE ₃	Elektronik	Heizungsfunktion aus	Funktioniert	1
Ausgefallen				0	
Antrieb	ÜE ₁	Hydraulik/Motor	Druckverlust in Hydraulik	Druckverlust [bar]	150-350

Tabelle 6.1 Zustandsrelevante Messgrößen der überwachten Einheiten eines Leistungsschalters und ihre relevanten Wertebereiche für die Zustandsbeurteilung

6.1 Zustandsbeurteilung mittels Fuzzy-Logik

Die Schätzung des Zustandsverschlechterungsgrades von einzelnen überwachten Einheiten erfolgt mittels Fuzzy-Folgerung. Es ist ein transparentes Abbildungsverfahren, welches darauf beruht, dass man sprachlich vorhandenes Expertenwissen über den Zusammenhang zwischen zustandsrelevanten physikalischen Messgrößen und dem Degradationsgrad der betrachteten Einheit in einer computergerechten Form darstellt. Dieser Transformationsvorgang ist eine wesentliche Voraussetzung für moderne online Asset-Management Applikationen, daher wird sie in den folgenden Abschnitten ausführlich behandelt.

Um im Zuge der Schritt für Schritt Darstellung den Erkennungseffekt zu steigern, ist die Komplexität der Aufgabenstellung durch die folgenden Einschränkungen reduziert worden:

1. Für den Präsentationsgegenstand ist die „SF6-Isolierung (ÜE₁)“ gewählt worden, sie ist eine der überwachten Einheiten aus der Tabelle 6.1.
2. Die betrachtete Anzahl von zustandsrelevanten Messgrößen der ÜE₁ ist auf die wichtigsten Einflussgrößen fokussiert worden. Diese sind der „SF6-Druck in der Kapselung“ und die „SF6-Feuchte“.

Im Folgenden wird ein Simulationsmodell für die Berechnung des Zustandsverschlechterungsgrades aufgestellt. Dieses in MATLAB-Simulink abgebildete Modell integriert die für die Schätzung des Zustandsverschlechterungsgrades vorgesehene Fuzzy-Maschine, deren Schritt für Schritt Konfiguration unmittelbar der Modellaufstellung folgen wird. Die genannte Parametrisierung wird dabei nach der folgenden Aufgabenliste umgesetzt:

- Datenaufbereitung für die Fuzzy-Maschine.
- Wissensrepräsentation durch Produktionsregeln.

Zum Schluss dieses Abschnittes wird die Verifizierung der Modellkonfiguration mittels einer Sensitivitätsanalyse vorgenommen.

6.1.1 Aufstellung eines Simulationsmodells

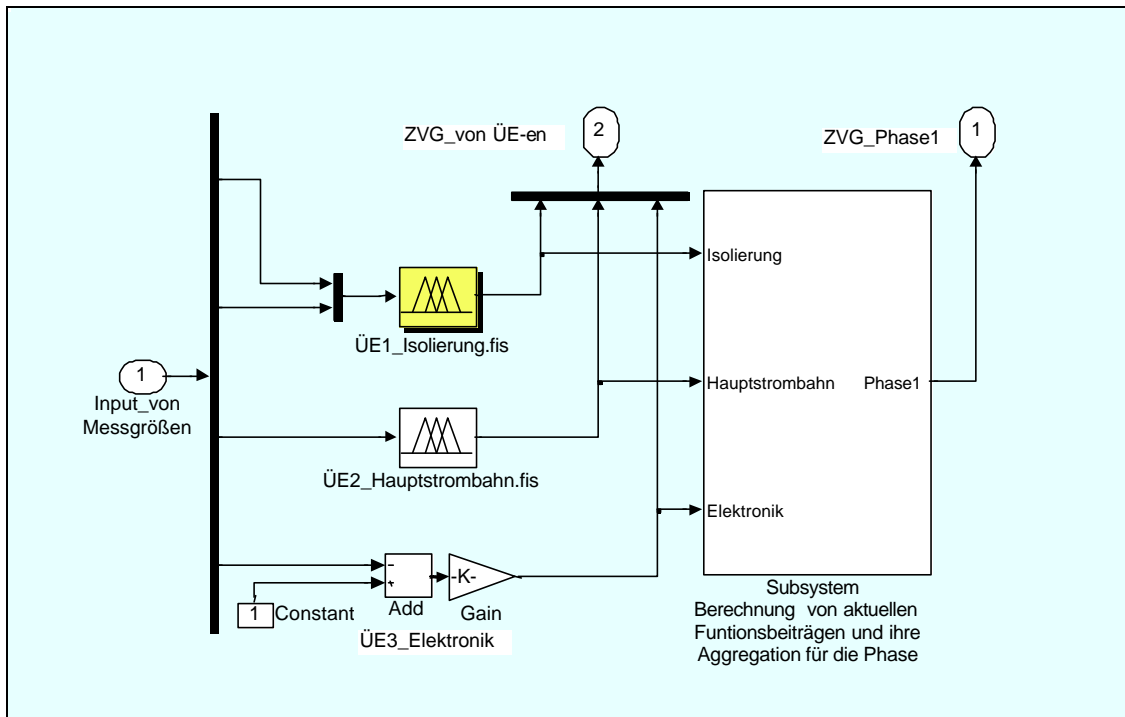


Bild 6.2 Simulationsmodell für die Berechnung des Zustandsverschleierungsgrades der LS_C7_Phase_1 anhand des Zustandsverschleierungsgrades ihrer überwachten Einheiten

6.1.2 Die Darstellung der Fuzzy-Abbildung

Fuzzy-Logik entstammt dem Versuch, ein mathematisches Modell „menschlicher Logik“ zu finden.

Sollte man den Degradationsgrad eines technischen Systems in ganz bestimmten Situationen durch verbale Regeln beschreiben können, so ermöglicht Fuzzy-Logik auch für alle real auftretenden Situationen eine Lösung aus Regeln zu bestimmen.

Die Aufgabe, den Zustandsverschleierungsgrad in Abhängigkeit von zustandsrelevanten Messgrößen zu bestimmen, ist eine steuerungstechnische Aufgabe. Die Steuerungsstrategie wird dabei u.a. durch die Expertenregeln über den Degradationsprozess zur Verfügung gestellt. Die Ermittlung der Stellgröße (d.h. ZVG) aus den genannten Messgrößen erfolgt in drei Schritten:

1. Fuzzifizierung
2. Fuzzy-Inferenz
3. Defuzzifizierung

Diese drei Stufen eines Fuzzy-Systems erlauben die Formulierung der „Steuerstrategie“ unter Verwendung umgangssprachlicher Begriffe. Im nachfolgenden Beispiel werden die ersten zwei Punkte der obigen Prozedur für die Schätzung des Zustandsverschleierungsgrades der ÜE₁ vorgeführt. Für detaillierte Informationen bezüglich der Defuzzifizierung wird aus Platzgründen auf die Literaturstelle [Traeger, 1995] verwiesen. Hierfür sei lediglich bemerkt, dass die Defuzzifizierung im späteren Beispiel mit der Schwerpunktmethode [Kahlert, 1993] umgesetzt wurde.

6.1.2.1 Fuzzifizierung

Um eine Steuerungsstrategie für den ZVG sprachlich formulieren zu können, muss man die Messwerte für die Feuchte, den Druck und den ZVG zuerst verbal interpretieren. Dies erfolgt mit Hilfe von „linguistischen Variablen“, einer Verallgemeinerung einer unscharfen Menge, in der Tabelle 6.2.

Die eigentliche Fuzzifizierung wird durch die Zuordnung von Zugehörigkeitswerten zu jedem Element einer linguistischen Variable umgesetzt. Für die Wertepaare, welche mittels Fuzzifizierung entstehen, gibt es eine Reihe unterschiedlicher Beschreibungsformen. Hier ist die parametrische Darstellung durch analytische Funktionen gewählt worden, welche in der Tabelle 6.3 parametrisiert und in den Bildern 6.3 - 6.5 abgebildet worden sind.

a. Diskretisierung von Basisvariablen durch linguistische Variable

Querverweis auf Fuzzifizierung Zustandsrelevanten Messgrößen			Diskretisierung von Wertebereichen der zustandsrelevanten Messgrößen und die Zuordnung deren Einzelbereiche zu den linguistischen Termen								
			0 – 500			0 – 6			0 – 100		
			0 - 200	30 - 370	250 - 500	0 - 5	4,5 – 5,8	5 – 6..	0 – 50	30 – 70	50 - 100
1.	Feuchte [ppm]	SF6-Isoliergas	klein μ_s	mittel μ_{ps}	groß μ_s						
2.	Druck [bar]	SF6-Isoliergas in der Kapselung				niedrig μ_s	mittel μ_{ps}	gut μ_s			
3.	ZVG [%]	ÜE ₁							klein μ_T	mittel μ_D	groß μ_T

Tabelle 6.2 Zuordnung eines linguistischen Terms und einer Funktionsklasse von Zugehörigkeitsfunktionen zu einem diskretisierten Wertebereich der Basisvariable

b. Parametrisierung von Zugehörigkeitsfunktionen

ÜEk	Basis-Variablen		Linguistische Terme	Funktionsklassen	Parametrisierung
ÜE ₁ (SF6 Isoliergas und Kapselungs-Dichte)	Eingangsgroßen	Feuchte [ppm]	klein	$\mu_s(a, c; x)$ Sigmoid	$(a, c) = (-0.08, 110)$
			mittel	$\mu_{ps}(a_1, c_1, a_2, c_2; x)$ Kombinierte-Sigmoid	$(a_1, c_1, a_2, c_2) = (0.07, 110, -0.07, 330)$
			groß	$\mu_s(a, c; x)$ Sigmoid	$(a, c) = (0.07, 330)$
		Druck [bar]	niedrig	$\mu_s(a, c; x)$ Sigmoid	$(a, c) = (-17.5, 4.8)$
			mittel	$\mu_{ps}(a_1, c_1, a_2, c_2; x)$ Kombinierte-Sigmoid	$(a_1, c_1, a_2, c_2) = (20, 4.8, -20, 5.5)$
			gut	$\mu_s(a, c; x)$ Sigmoid	$(a, c) = (15, 5.5)$
	Ausgangsgröße	ZVG [%]	klein	$\mu_T(a, b, c, d; x)$ Trapez	$(a, b, c, d) = (-50, -25, 25, 50)$
			mittel	$\mu_D(a, b, c; x)$ Dreieck	$(a, b, c) = (25, 50, 75)$
			groß	$\mu_T(a, b, c, d; x)$ Trapez	$(a, b, c, d) = (50, 75, 125, 150)$

Tabelle 6.3 Parametrisierte Zugehörigkeitsfunktionen für die linguistischen Terme der Basisvariable

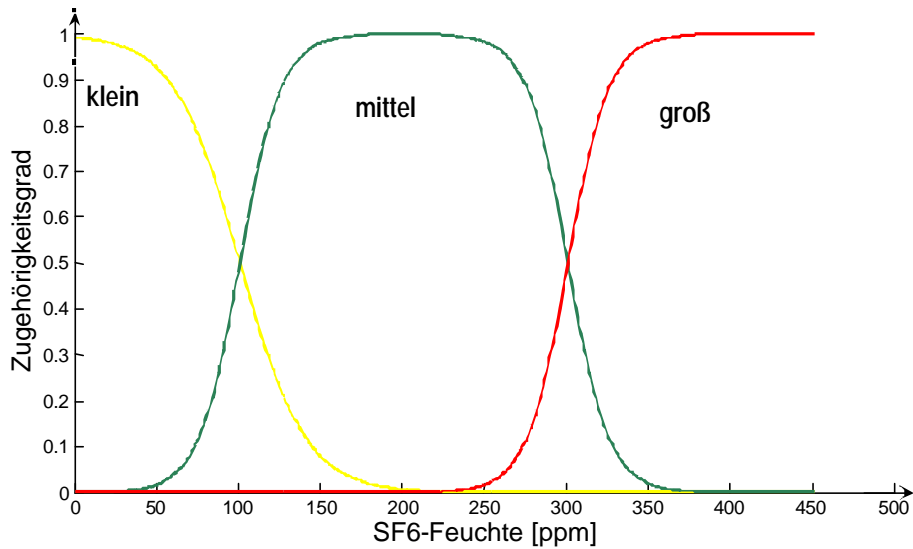


Bild 6.3 Zugehörigkeitsfunktionen für die linguistischen Terme der Basisvariable „SF6-Feuchte“

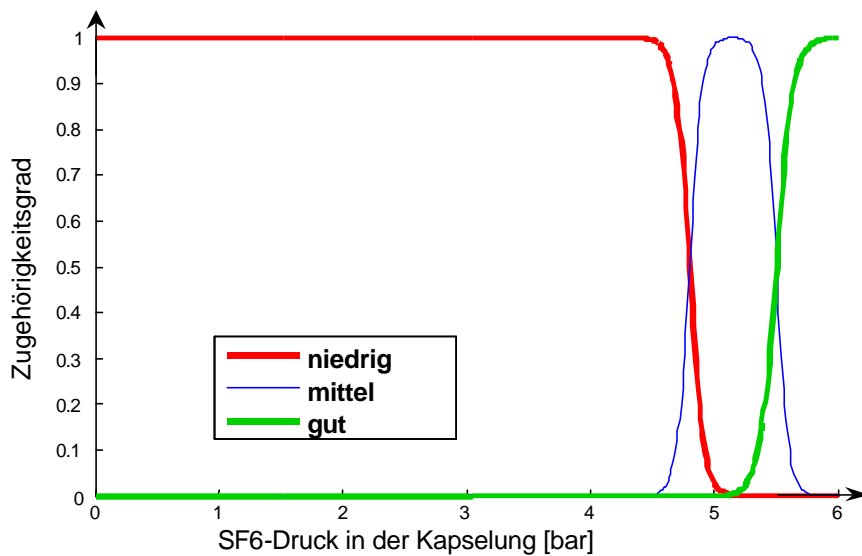


Bild 6.4 Zugehörigkeitsfunktionen für die linguistischen Terme der Basisvariable „SF6-Druck in der Kapselung“

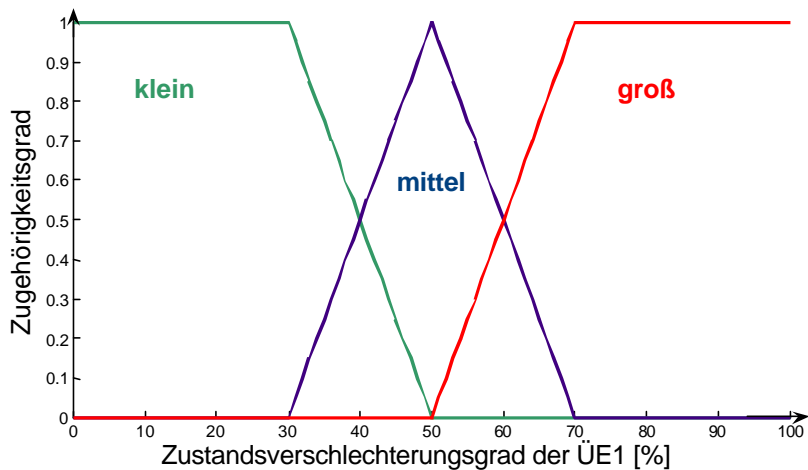


Bild 6.5 Zugehörigkeitsfunktionen für die linguistischen Terme des „ZVG der UE₁“

6.1.2.2 Fuzzy-Inferenz

Das fuzzy-logische Schließen, welches auch als Fuzzy-Inferenz bezeichnet wird, bezieht sich hier auf die Bestimmung des Degradationsgrades der SF6-Isolierung.

Weil eine Fuzzy-Regel auf unterschiedlichen Grundmengen mit einer Fuzzy-Relationmatrix abgebildet wird [Kahlert, 1993], ist die Fuzzy-Inferenz eine Verarbeitungsvorschrift für die regelrelevanten Matrizen. Sie besitzt die folgende Grundstruktur:

Implikation: Die „wenn“...„dann“-Regel.

Faktum: Der vorliegende Messwert für die Regel.

Schluss: Ergebnis des Inferenzmechanismus als eine Fuzzy-Menge.

In dem vorliegenden Fall, wo der Regelsatz aus mehreren Regeln besteht, ergeben sich als „Schluss“ mehrere Fuzzy-Mengen. Diese sind durch Max-Operator verbunden.

Nachdem man durch die Festlegung der linguistischen Variablen den Wertebereich von Basisvariablen (d.h. Fuzzy-Grundmengen) diskretisiert und durch deren nachfolgende Fuzzifizierung die Fuzzy-Mengen hergestellt hat, muss man in diesem Schritt den Degradationsprozess selbst beschreiben, dessen aktueller Zustand mit dem Zustandsverschlechterungsgrad zu charakterisieren ist. Die Beschreibung erfolgt anhand von „wenn-dann“-Regeln, die durch Fuzzy-Inferenz ausgewertet werden.

Der „wenn“-Teil beschreibt die Situation, in der die Regel gelten soll, der „dann“-Teil gibt den Grad der Degradation wieder, welcher als Reaktion auf die situationsbeschreibende Messgrößen-Konstellation an der überwachten Einheit hervorgerufen wird. In der Tabelle 6.4 ist ein Ausschnitt aus dem vollständigen Regelsatz für die SF6-Isolierung ($\ddot{U}E_1$) dargestellt.

Die Möglichkeit der Regelgewichtungsänderung spielt aus der Sicht der online Zustandsüberwachung eine wichtige Rolle, dies gilt es an dieser Stelle extra zu betonen. Durch die Regelgewichtung kann man das Regelwerk dynamisch ändern, ohne das Modell neu konfigurieren zu müssen. Das ist besonders wichtig, wenn es Betriebszustände gibt, welche von fehlerrelevanten Symptomen begleitet werden, ohne dass der Fehler vorliegt. Als Beispiel kann man die lastbedingte Hydrogenentwicklung bei Leistungstransformatoren erwähnen, welche unter normaler Last auf eine mögliche Teilentladung hinweist, bei großer Lastaufnahme jedoch als nicht fehlerrelevante, also normale Begleiterscheinung einzuordnen ist.

N ^o	Produktionsregeln für die Schätzung des ZVG-es des SF6-Isolierung [$\ddot{U}E_1$]		
	Prämisse	Konklusion	Gewichtung
1.	Wenn Feuchte ist <i>klein</i> und Druck ist <i>gut</i>	Dann ZVG ist <i>klein</i>	1.0
2.	Wenn Feuchte ist <i>klein</i> und Druck ist <i>mittel</i>	Dann ZVG ist <i>mittel</i>	0.5
3.	Wenn Feuchte ist <i>klein</i> und Druck ist <i>niedrig</i>	Dann ZVG ist <i>groß</i>	1.0
4.	Wenn Feuchte ist <i>mittel</i> und Druck ist <i>gut</i>	Dann ZVG ist <i>mittel</i>	0.5
5.	Wenn Feuchte ist <i>mittel</i> und Druck ist <i>mittel</i>	Dann ZVG ist <i>mittel</i>	1.0
6.	Wenn Feuchte ist <i>mittel</i> und Druck ist <i>niedrig</i>	Dann ZVG ist <i>groß</i>	1.0
7.	Wenn Feuchte ist <i>groß</i> und Druck ist <i>gut</i>	Dann ZVG ist <i>groß</i>	1.0
8.	Wenn Feuchte ist <i>groß</i> und Druck ist <i>mittel</i>	Dann ZVG ist <i>groß</i>	1.0
9.	Wenn Feuchte ist <i>groß</i> und Druck ist <i>niedrig</i>	Dann ZVG ist <i>groß</i>	1.0

Tabelle 6.4 Produktionsregeln zur Präsentation des vorhandenen Expertenwissens

6.1.2.3 Verifizierung der gewählten Modell-Konfiguration

Die Güte der Fuzzy-Abbildung kann durch eine Sensitivitätsanalyse beurteilt werden. Für das vorliegende Beispiel bedeutet das:

1. Den regelbasierten Zusammenhang zwischen zustandsrelevanten Messgrößen (*SF6-Druck und SF6-Feuchte*) und dem Zustandsverschlechterungsgrad der SF6-Isolierung ($\ddot{U}E_1$) grafisch darzustellen.
2. Die Empfindlichkeit des Zustandsverschlechterungsgrades auf die Änderung von Eingangsdaten zu überprüfen.

Die Fläche in Bild 6.6 stellt einen nichtlinearen Zusammenhang zwischen den Ein- und Ausgangsgrößen dar, welcher durch Fuzzy-Abbildung zu Stande gekommen ist. Es ist festzustellen, dass das Modell im kritischen Bereich der Zustandsgrößen eine ausreichend hohe Sensitivität besitzt und dass unterhalb der Schwellwerte für Druck und Feuchte -*wo man ohnehin mit einem Ausfall rechnen muss*- der Zustandsverschlechterungsgrad der zugrundeliegenden überwachten Einheit auf 100% ansteigt. Damit ist die Modellkonfiguration als bestätigt anzusehen.

Zum Schluss dieses Abschnittes sollte man jedoch bemerken, dass die Modellkonfiguration im Laufe der Zustandsüberwachung erneut verifiziert werden soll, sobald in das Regelwerk neue Erkenntnisse aufgenommen werden.

Sollte das anfängliche Regelwerk wegen unzureichender Sensitivität nicht bestätigt werden können, kann man die Anpassung der Transformation u.a. auf folgende Weise vornehmen:

- Änderung der Regelgewichtung.
- Änderung von Regeln selbst oder der Fuzzifizierung von Basisvariablen.

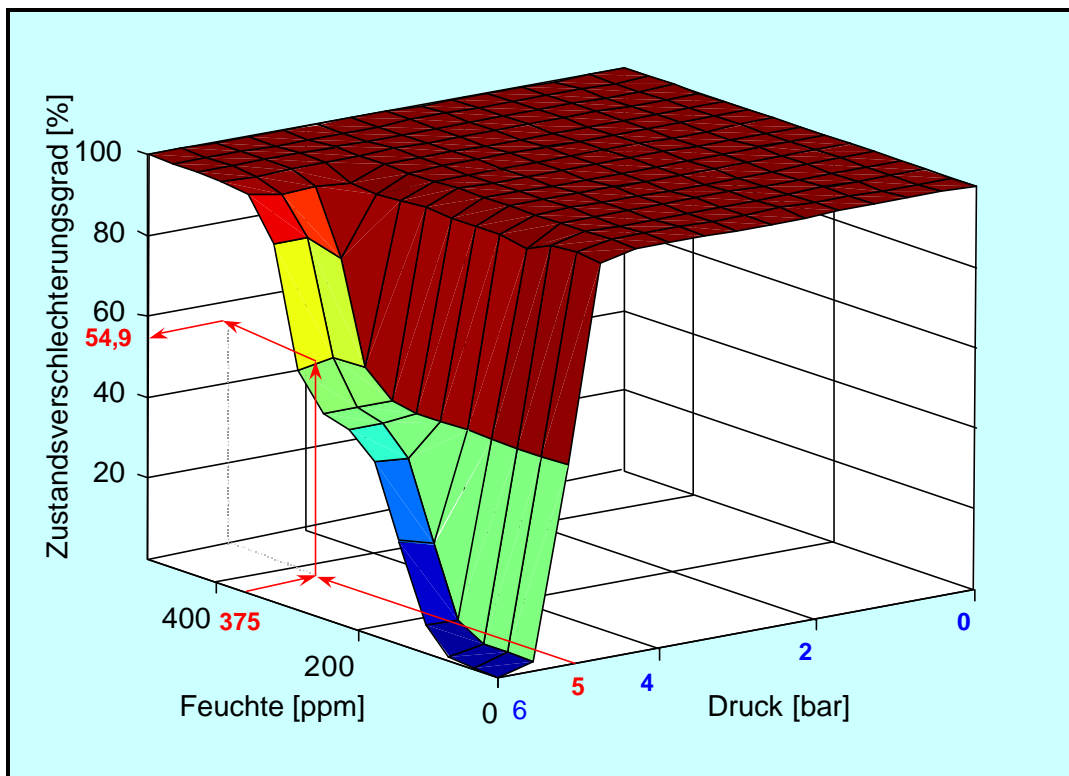


Bild 6.6 Darstellung der Fläche, welche die nicht-lineare Funktion des Zustandsverschlechterungsgrades der $\ddot{U}E_1$ in Abhängigkeit von Basisvariablen Feuchte und Druck abbildet

6.2 Zustands- und Abschreibungsberechnung in der Anlagenhierarchie

Bezüglich der Anlagenüberwachung bei vielen Energieversorgungsunternehmen hat ein Paradigmenwechsel stattgefunden. Die Absicht, von einer eher eindimensionalen Überwachung auf Betriebsmittelebene zu einer simultanen Verfolgung von anlagenrelevanten Kennzahlen auf unterschiedlichen Ebenen einer zweckmäßig aufgebauten Anlagenhierarchie zu wechseln, hat sich schon seit der Einführung der Marktliberalisierung verfestigt. Die Implementierung des neuen Ansatzes ließ jedoch bis dato auf sich warten. Dieses Warten ist hauptsächlich mit fehlender Methodenkompetenz bezüglich eines geeigneten Algorithmus für hierarchische Aggregation zu erklären.

In den nachfolgenden Abschnitten wird zuerst die hierarchische Aggregation von zustandsbeschreibenden Funktionsbeiträgen erklärt und darauf aufbauend der Berechnungsalgorithmus für die kalkulatorische Abschreibung beschrieben. Die erwähnten Kompetenzen bilden die Grundlage für eine bedarfsgerechte online Berichterstattung integrierter Art, die zum Ziel der vorliegenden Arbeit gesetzt wurde.

6.2.1 Das erarbeitete Berechnungsverfahren in Beispielen

Um die Erläuterungen zu vereinfachen, werden zunächst die Randbedingungen für die Hierarchiebildung und Kennzahlenentwicklung aufgelistet. Die Stützpfiler des Know-hows werden dabei in den folgenden Fähigkeiten gesehen:

1. Bildung einer Assetshierarchie, die den anlagenrelevanten Verantwortungsbereichen in der Aufbauorganisation entspricht.
2. Bildung von integrierten Zustandsindikatoren für unterschiedliche Hierarchieebenen, wobei der jeweilige Indikator einer Ebene die Degradation aller zugehörigen Systemkomponenten niedriger Ebenen verursachungsgerecht zusammenführen soll.

Eine sogenannte Basishierarchie, die der späteren Indikatorenaggregation zu Grunde liegt, wurde in Bild 6.7 dargestellt. Es zeigt eine zweckmäßige hierarchische Dekomposition eines Leistungsschalters und die Funktionsbeitragsverteilung seiner einzelnen Komponenten im unversehrten Zustand. Eine Hierarchie für ein beliebig großes System ist analog zu dieser Basishierarchie zu bilden, wobei die nachfolgend deklarierten Erkenntnisse bezüglich des Integrationsvorganges gültig bleiben.

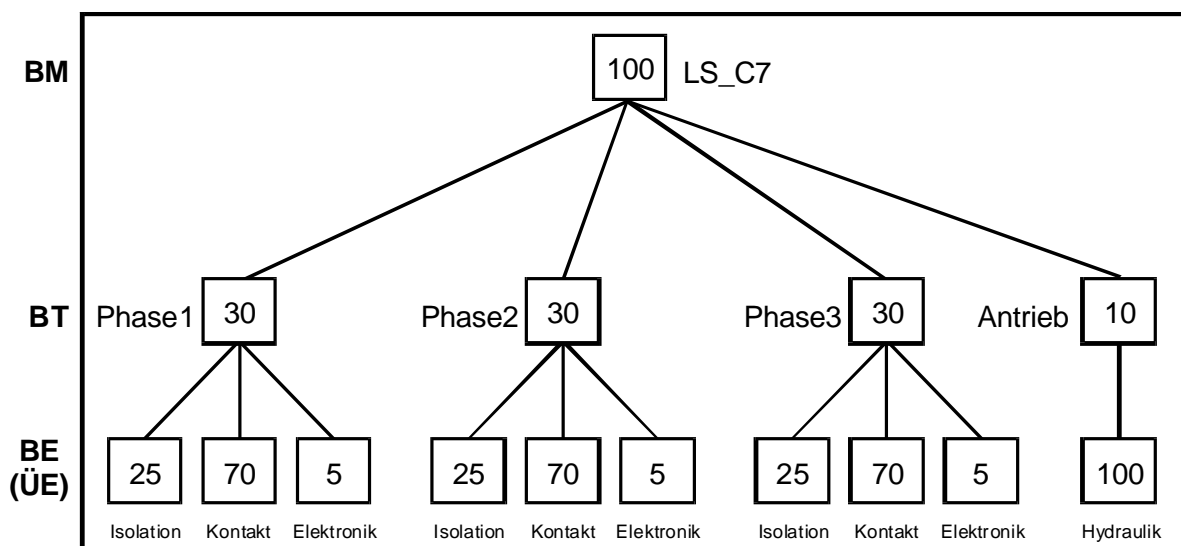


Bild 6.7 Darstellung von Funktionsbeiträgen der überwachten Einheiten im fehlerfreien Zustand

6.2.1.1 Die Methode der hierarchischen Zustandsverfolgung

Die beispiellose Entwicklung, wie sie auf dem Gebiet der Rechenanlagen stattgefunden hat, ermöglicht in dem Bereich der Analyse technischer Systeme Methoden effizient anzuwenden, welche wegen ihrer enormen Datenintensität bisher kostengünstig nicht anwendbar waren. Diese Aussage gilt insbesondere für Asset-Management-Applikationen, deren Eingangsdaten von online Monitoringssystemen bereitgestellt werden und eine quasi Echtzeitanforderung bezüglich ihrer Verarbeitung verlangen.

Der primäre Zweck der Analyse eines Energieversorgungssystems ist die Bestimmung seines aktuellen Zustandes und die Vorhersage des zu erwartenden Zustandes.

Als Basis des Grundkonzeptes hat man den Funktionsbeitrag als charakteristische Größe für die Zustandsbeurteilung gewählt. Der Zusammenhang zwischen Zustandsverschlechterungsgrad (ZVG) und Funktionsbeitrag ist nach Gl. (6.1) festgelegt, dieser Zusammenhang spiegelt den Zustandsverschlechterungsgrad als Funktionsbeitragsminderung wieder.

$$FB_t = \left(1 - \frac{ZVG}{100}\right) \cdot FB_0 \quad (6.1)$$

Bestimmt man den prozentualen Zustandsverschlechterungsgrad aus aktuellen zustandsrelevanten Messgrößen für alle ÜE-en mit Fuzzy-Logik, dann ist die Berechnung des Funktionsbeitrages von ÜE-en und ihre Aggregation in der gesamten Hierarchie durchzuführen. Das Bild 6.8 zeigt die Fortpflanzung der Zustandsdegradation anhand von Neuberechneten Werten für den Funktionsbeitrag, wobei die der Funktionsbeitragsminderung zugrundeliegenden Werte für ZVG (*auf der Ebene der überwachten Einheiten*) in der Tabelle 6.5 aufgelistet sind. Der Zustandsverschlechterungsgrad höherer Ebenen wurde dabei durch eine Rücktransformation aus entsprechenden Funktionsbeiträgen bestimmt. Die Berechnungsvorschrift dafür ist in den Gl.-en (6.2 - 6.4) festgehalten.

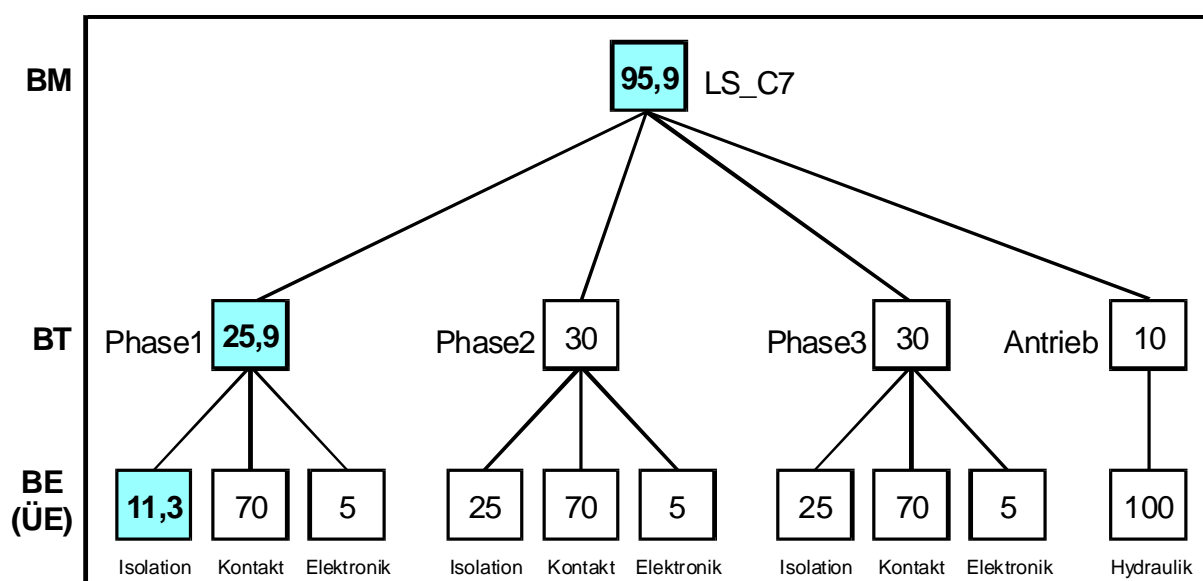


Bild 6.8 Fortpflanzung der Zustandsdegradation von LS_C7_ÜE₁ und ihre Auswirkung auf die FB-Verteilung bis zur höchsten Ebene der gebildeten Betriebsmittelhierarchie

LS_C7			Zustandsverschlechterungsgrad nach Hierarchieebenen		
			ZVG _{ÜE}	ZVG _{komp}	ZVG _{LS}
Ersetzbare Komponenten	ÜE _k	Bezeichnung	%		
Phase1	ÜE ₁	Isolation	54,9	13,7	4,1
	ÜE ₂	Kontakt	0		
	ÜE ₃	Elektronik	0		
Phase2	ÜE ₁	Isolation	0	0	
	ÜE ₂	Kontakt	0		
	ÜE ₃	Elektronik	0		
Phase3	ÜE ₁	Isolation	0	0	
	ÜE ₂	Kontakt	0		
	ÜE ₃	Elektronik	0		
Antrieb	ÜE ₁	Hydraulik/ Motor	0	0	

Tabelle 6.5 Verteilung des Zustandsverschlechterungsgrades über die Hierarchieebenen im Falle einer Isolierungsdegradation durch den Anstieg der SF6-Feuchte und Druckverlust nach Bild 6.6

Um die Fortpflanzung der Zustandsdegradation bis zur höchsten Ebene der in Bild 6.8 abgebildeten Komponentenhierarchie verfolgen zu können, wurde dem Berechnungsbeispiel die Zustandsverschlechterung der vorhin untersuchten SF6-Isolierung (ÜE₁) zugrundegelegt. Dabei wurde angenommen, dass die genannte überwachte Einheit die einzige ist, die eine Degradation erfuhr und sich alle anderen Einheiten im unversehrten Zustand befanden. Diese Annahme sollte sicherstellen, dass die unten aufgelisteten aufeinanderfolgenden Schritte der hierarchischen Zustandsaggregation in Gl.-en (6.2 – 6.4) auch bildhaft leicht nachvollziehbar sind.

1. Transformation des fuzzylogisch geschätzten Zustandsverschlechterungsgrades in den entsprechenden Funktionsbeitrag für die ÜE₁

$$FB_t = \left(1 - \frac{ZVG}{100}\right) \cdot FB_0 = \left(1 - \frac{54,9}{100}\right) \cdot 25 = 11,3\% \quad (6.2)$$

2. Die Aggregation von Funktionsbeiträgen für Phase_1 auf der Bauelementeebene der Hierarchie, wo sich die zugehörigen überwachten Einheiten befinden.

$$FB_t^{Phase_1} = \left(\frac{\sum_j^n FB_{BE,ghij}}{100} \right) \cdot FB_0^{Phase_1} = (11,3 + 70 + 5) \cdot 30 = 25,9\% \quad (6.3)$$

3. Rücktransformation des Funktionsbeitrages der Phase_1 in den entsprechenden Zustandsverschlechterungsgrad gemäß der Definition in Gl. (6.1)

$$ZVG_t^{Phase_1} = \left(1 - \frac{FB_t^{Phase_1}}{FB_0^{Phase_1}}\right) \cdot 100 = \left(1 - \frac{25,9}{30}\right) \cdot 100 = 13,7\% \quad (6.4)$$

6.2.1.2 Berechnung der kalkulatorischen Abschreibung in der Anlagenhierarchie

Die kalkulatorische Abschreibung eines technischen Gerätes kann als das Produkt seines aktuellen Wertes und dessen momentanen Zustandsverschlechterungsgrades definiert werden. Gibt man den aktuellen Wert mit dem Barwert der historischen Errichtungskosten (ERK_A) an, dann ergibt sich die Abschreibung durch die Gl.(6.5).

$$A = ERK_A \cdot ZVG \quad (6.5)$$

Die überwachten Einheiten eines Systems stellen die realen Systemkomponenten dar, die einer physikalischen Degradation unterliegen. Um die Abschreibung für einen Knoten der Leistungsschalterhierarchie auf dem Bild 6.8 zu berechnen, soll man die Abschreibungsbeträge der zugehörigen überwachten Einheiten summieren.

Die Gl.-en (6.6 - 6.7) beschreiben die genannte Aggregationsvorschrift, wobei mit Index „k“ die Knoten der Bauteilebene, mit Index „i“ die zu einem Knoten gehörenden überwachten Einheiten gekennzeichnet sind.

Es ist aus Gl. (6.7) ersichtlich, dass die aktuellen Errichtungskosten der überwachten Einheiten - *die als Basiswert für die Berechnung des Abschreibungsbetrages in Gl. (6.6) dienen* - mittels einer Multiplikation des aktuellen Wiederbeschaffungswertes des Leistungsschalters (LS_C7) mit den entsprechenden Funktionsbeiträgen im fehlerfreiem Zustand abgeleitet werden (*siehe auch Bild 6.7*).

$$A_{LS} = \sum_k \sum_i A_{\ddot{U}E_{i,k}} = \sum_k \sum_i \left(ERK_{\ddot{U}E_{k,i}} \cdot ZVG_{\ddot{U}E_{k,i}} \right) = 27450 \cdot 0,549 = 15070 \quad (6.6)$$

$$ERK_{\ddot{U}E_{k,i}} = ERK_{A,LS} \cdot FB_{0,LS} \cdot FB_{0,BT,k} \cdot FB_{0,\ddot{U}E_{k,i}} = 366 \cdot 10^3 \cdot 1,0 \cdot 0,3 \cdot 0,25 = 27450 \quad (6.7)$$

Um bei der Bestimmung der aktuellen Abschreibung die aufwendige Aggregation in Gl. (6.6) zu umgehen, kann man die bereits vorhandenen Werte des aktuellen Funktionsbeitrages und des Funktionsbeitrages „im gesunden Zustand“ für alle Knoten verwenden. Diese Möglichkeit beruht auf der Definition des Zustandsverschlechterungsgrades als Funktionsbeitragsminderung. Demnach ist der Abschreibungsbetrag im Knoten „k“ nach der Gl. (6.8) und für den LS nach Gl. (6.9) zu berechnen. Diese Form der Berechnung ist aus der Sicht der Datenverarbeitung effizienter.

$$A_k = ERK_{A,k} \cdot \left(1 - \frac{FB_k(t)}{FB_{0,k}} \right) = 366 \cdot 10^3 \cdot 1,0 \cdot 0,3 \cdot \left(1 - \frac{25,8825}{30} \right) = 15070 \quad (6.8)$$

$$A_{LS} = ERK_{A,LS} \cdot \left(1 - \frac{FB_{LS}(t)}{FB_{0,LS}} \right) = 366 \cdot 10^3 \cdot \left(1 - \frac{95,8825}{100} \right) = 15070 \quad (6.9)$$

Setzt man die entsprechenden Werte für den LS_C7 aus der Tabelle 6.5 und 6.9 in die Gl.-en (6.6 - 6.7) ein und die Werte aus der Tabelle 6.9 und Bild 6.8 in Gl. (6.8) ein, dann ergibt sich für den aktuellen zustandsbasierten Abschreibungsbetrag ein Wert von 15.070 EUR in beiden Fällen. Damit gilt die Tauglichkeit des Algorithmus nach Gl. (6.8) für die hierarchische Berechnung der kalkulatorischen Abschreibung als bewiesen.

Die vorgestellte Berechnung wird später, unter dem Punkt 6.6 für die integrierte Berichterstattung verwendet. Die historische Entwicklung des Abschreibungsindikators wird dabei auf der LS-Gruppenebene dargestellt und in die Analyse einbezogen.

6.2.1.3 Vorteile der hierarchischen Zustandsüberwachungsmethode

Um den Mehrwert der computergestützten Entscheidungsfindung zu demonstrieren, werden die wichtigsten Vorteile der ausgearbeiteten Methode nachstehend aufgelistet:

1. Eine schnelle Suche nach dem schwächsten Systemglied, welcher mit der höchsten Funktionsbeitragsminderung zu charakterisieren ist, wird unterstützt.
2. Die Ursache-Wirkungs-Kette für eine Funktionsbeitragsminderung auf der Systemebene ist anhand der oben dargestellten Visualisierungsformen leicht zu erkennen, wobei die Aussagekraft der Darstellungsform in Bild 6.8 durch eine geeignete grafische Navigation noch wesentlich erhöht werden kann.
3. Eine automatisierte Priorisierung von Hierarchiekomponenten nach Zustandsverschlechterungsgrad ist auf allen Hierarchieebenen in Echtzeit möglich.
4. Durch die zeitliche Überwachung des Funktionsbeitrages auf der LS-Gruppenebene sind anbahnende Fehlereskalationen rechtzeitig zu erkennen. Eine Trendanalyse ist auf allen Ebenen weitgehend unterstützt.
5. Der Funktionsbeitrag ist ein geeigneter Indikator für Benchmarking von vergleichbaren Betriebsmitteln und LS-Gruppen.
6. Die Auswirkung unterschiedlicher Instandhaltungsszenarien auf den Gruppenfunktionsbeitrag und seine Verteilung in der Anlagenhierarchie kann man simulieren, was die Suche nach einer optimalen Strategie wesentlich erleichtert.
7. Die Komponente SAP/R3/PM unterstützt eine objektbezogene Anlagenstrukturierung, was den praktischen Einsatz der Methode nahe liegt.
8. Der Ansatz ermöglicht die Hierarchiebildung nach geforderter Sichtweise, zum Beispiel nach Funktionen oder Spannungsebenen.
9. Die aktuelle kalkulatorische Beschreibung ist durch den Zustandsverschlechterungsgrad und die aktuellen Errichtungskosten zu jedem Zeitpunkt verfügbar. Das erhöht die Planungssicherheit für die Gewinnvorhersage.

Eine Berichterstattung mit überflüssigen Informationen ermüden den Leser, wohingegen Berichte mit geringem Informationsgehalt den für Entscheidungsträger ausschlaggebenden Überzeugungsprozess erschweren [Deym, 1977]. Wo das Optimum zwischen zu viel und zu wenig Information liegt, wird durch den Adressaten des Berichtes bestimmt. Diese Selektionsfreiheit ist durch den neuen Ansatz weitgehend unterstützt.

Durch die hierarchische online Betrachtung der Ursache-Wirkungs-Kette ist der Weg von der Globalübersicht zu Detailinformationen für Entscheidungsträger aller Organisationsebenen eröffnet worden. Die bisherige auf Papierbasis betriebene Dokumentation entfällt und die Spannweite der Informationsbereitstellung weitet sich aus. Die

Grundlage für eine entscheidungsinstanzgerechte online Berichterstattung mit kurzer Durchlaufzeit und wesentlich geringerem Kostenaufwand steht zur Verfügung.

6.3 Schätzung der Ersatzwahrscheinlichkeit eines Leistungsschalters

Im Punkt 6.1 wurden die wichtigsten Schritte der Zustandsbeurteilung detailliert erklärt. Der Ablauf der fuzzy-logischen Abbildungsprozedur bei der Schätzung der Ersatzwahrscheinlichkeit weist einen hohen Ähnlichkeitsgrad mit der für die Zustandsbeurteilung auf. Aus diesem Hintergrund um unnötige Wiederholungen zu vermeiden, werden in diesem Absatz nur diejenigen Schritte näher betrachtet die aus Verständlichkeitsgründen unbedingt notwendig erscheinen.

Nachfolgend wird zunächst die Parametrisierung der angewandten Fuzzy-Maschine und darauffolgend auch eine vereinfachte Beispielberechnung präsentiert.

6.3.1 Aufbereitung von Eingangsgrößen und der Ausgangsgröße

Gemäß der im Punkt 5.1.3.2/a-f beschriebenen Ersatzerfahrungen ist der Zustandsverschlechterungsgrad von lebensdauerkritischen überwachten Einheiten die entscheidende Größe für die Schätzung der Ersatzwahrscheinlichkeit eines Leistungsschalters. Unter der erfahrungsbasierten Annahme, dass der Zustandsverschlechterungsgrad dieser ÜE-en mit deren Ersatzwahrscheinlichkeit stark korreliert, werden für die Eingangsgrößen der Fuzzy-Maschine die folgenden Größen gewählt:

- Ersatzwahrscheinlichkeit von stromführenden Hauptkontakten der einzelnen Phasen.
- Ersatzwahrscheinlichkeit der überwachten Einheit „Hydraulik und Motor“ für den Antrieb.

Die genannten Eingangsgrößen stellen die Basisvariablen für die Bildung von unscharfen Mengen dar. Sie werden durch drei Zugehörigkeitsfunktionen für drei linguistische Terme (klein, mittel, groß) je ersetzbare Komponente fuzzyfiziert. Über die Parametrisierung von einzelnen Zugehörigkeitsfunktionen der Eingangsgrößen und der Ausgangsgröße gibt die Tabelle 6.6 Aufschluss.

Komponenten	Basis-Variablen		Linguistische Terme	Funktionsklasse	Parametrisierung
Drei Phasen und der Antrieb	Eingangs-Größen	$P_{ER, Komp.} [\%]$	klein	$\mu_{\tau}(x; a, b, c, d)$ Trapez	$(a, b, c, d) = (-40, 0, 20, 40)$
			mittel	$\mu_{\Delta}(a, b, c; x)$ Dreieck	$(a, b, c) = (10, 50, 90)$
			groß	$\mu_{\tau}(x; a, b, c, d)$ Trapez	$(a, b, c, d) = (60, 80, 100, 140)$
	Ausgangs-Größe	$P_{ER, BM} [\%]$	klein	$\mu_{\tau}(x; a, b, c, d)$ Trapez	$(a, b, c, d) = (-50, -25, 25, 50)$
			mittel	$\mu_{\Delta}(a, b, c; x)$ Dreieck	$(a, b, c) = (25, 50, 75)$
			groß	$\mu_{\tau}(x; a, b, c, d)$ Trapez	$(a, b, c, d) = (50, 75, 125, 150)$

Tabelle 6.6 Parametrisierte Zugehörigkeitsfunktionen der linguistischen Terme der Basisvariable für die Berechnung der Ersatzwahrscheinlichkeit eines Leistungsschalters

6.3.2 Darstellung der Wissensbasis durch Produktionsregeln

Die unter 5.1.3.2/a-f aufgelisteten typrelevanten Erfahrungen über Betriebsmitteler-satz bilden die Wissensbasis zur Bildung von Produktionsregeln. Für die Berechnung der Ersatzwahrscheinlichkeit stehen $k=4$ Eingangsgrößen, die jeweils $n=3$ verschiedene linguistische Terme annehmen können, zur Verfügung.

Eine vollständige Beschreibung des Ersatzverhaltens durch Produktionsregeln setzt voraus, dass alle möglichen Zuordnungen von linguistischen Termen der einzelnen Eingangsgrößen im Regelsatz abgebildet werden. Die Anzahl dieser möglichen Anordnungen für den vorliegenden Fall ergibt die maximale Anzahl von Beurteilungsregeln und kann durch die Formel für Variation mit Wiederholung (V) nach Gl. (6.10) berechnet werden. Der Regelaufbau ist in der Tabelle 6.7 dargestellt.

$$V_n^k = n^k = 3^4 = 81 \quad (6.10)$$

wo: $n \Rightarrow$ Anzahl der linguistischen Terme pro Eingangsgröße
 $k \Rightarrow$ Anzahl von Eingangsgrößen

N°	Prämissen von Produktionsregeln							P _{er_LS}	
	Wenn die Ersatzwahrscheinlichkeit:								
	Ph_1		Ph_2		Ph_3		Antrieb		
1.	ist klein	und	ist klein	und	ist klein	und	ist klein	dann	ist klein
2.	ist klein	und	ist klein	und	ist klein	und	ist groß	dann	ist klein
3.	ist klein	und	ist mittel	und	ist mittel	und	ist mittel	dann	ist mittel
4.	ist klein	und	ist klein	und	ist groß	und	ist groß	dann	ist mittel
5.	ist groß	und	ist mittel	und	ist groß	und	ist klein	dann	ist groß

Tabelle 6.7 Ausschnitt aus dem Regelsatz zur Schätzung der Ersatzwahrscheinlichkeit des LS-s

Das Ergebnis einer Beispielberechnung für die Ersatzwahrscheinlichkeit eines LS-s ist in der Tabelle 6.8 zusammengestellt. Dem theoretischen Ansatz nach wurde bei der Berechnung angenommen, dass die Ersatzwahrscheinlichkeit der ersetzbaren Komponenten eines LS-s dem ZVG ihrer lebensdauerkritischen ÜE-en gleicht.

LS_C7			ZVG nach Hierarchieebenen			Ersatzwahrscheinlichkeit	
			ZVG _{ÜE}	ZVG _{komp}	ZVG _{LS}	P _{er,komp}	P _{er,LS}
Ersetzbare Komponenten	ÜE _k	Bezeichnung	%				
Phase1	ÜE ₁	Isolation	54,90	34,67	23,1	29,93	10,35
	ÜE ₂	Kontakt	29,93				
	ÜE ₃	Elektronik	0,00				
Phase2	ÜE ₄	Isolation	0,16	20,99			
	ÜE ₅	Kontakt	29,93				
	ÜE ₆	Elektronik	0,00				
Phase3	ÜE ₇	Isolation	0,16	13,91			
	ÜE ₈	Kontakt	19,81				
	ÜE ₉	Elektronik	0,00				
Antrieb	ÜE ₁₀	Hydraulik/Motor	22,33	22,33			

Tabelle 6.8 Übersichtstabelle für die Ersatzwahrscheinlichkeit und den Zustand

6.4 Analyse des ersatzbedingten finanziellen Risikos im Anlagenportfolio

Die Verfolgung der zeitlichen Entwicklung des ersatzbedingten finanziellen Risikos und seine Bewertung im Gesamtportfolio unterstützen die Investitionsplanung. Diese Hilfestellung soll eine präzisere Planung der Investitionsgelder und folglich niedrigere Kapitalkosten ermöglichen.

Nachdem im vorangehenden Abschnitt die zustandsbasierte Ersatzwahrscheinlichkeit und der ersatzbedingte „Maximalschaden“ berechnet wurden, kann man die Risikoverteilung im Portfolio anhand der betriebsmittelrelevanten Erwartungskosten darstellen. Ziel ist es, das Augenmerk der Entscheidungsträger im Finanzcontrolling auf die Betriebsmittel zu richten, welche aus der Sicht einer möglichen Ersatzfinanzierung das höchste Risiko darstellen.

Die ABC-Analyse, auch Schwerpunktanalyse genannt, ermöglicht das gewünschte Klassifizieren von Betriebsmitteln aussagekräftig zu visualisieren. Damit wird das Ziel verfolgt, welches wie folgt zusammengefasst werden kann:

„Eine gute Visualisierung zwingt den Betrachter zu einer Unterscheidung zwischen Wesentlichem und Unwesentlichem, sie regt spontane Stellungnahme an.“

6.4.1 Beschreibung der ABC-Analyse

Um sich von der Risikoverteilung ein erstes Bild zu verschaffen, werden aufbauend auf die Pareto-Regel diejenigen Betriebsmittel gesucht, welche 80% des Gesamtrisikos ausmachen. Die 80% Grenze ist dabei willkürlich bestimmt worden, sie soll den Schwerpunktsbereich (Klasse A) abgrenzen.

Laut Erfahrung erreichen die Objekte der Klasse A bei ca. 5-10 % Mengenanteil einen Wertanteil von 65-85 %. Im Bereich der Klasse B werden etwa 10-25 % Wertanteil durch 20-40 % Mengenanteil generiert. Klasse C schließlich benötigt ca. 50-75 % Mengenanteil für 5-15 % Wertanteil [Kerth, 2005, S.3].

Aus der Sicht der vorliegenden Portfolioanalyse ist das Interesse auf die Bestimmung des Mengenanteils bei festgelegter Wertanteilgrenze gerichtet. Die Frage: „Welche Betriebsmittel tragen 80% zum Gesamtrisiko bei?“ gilt es vorrangig zu beantworten. Ein Beispiel für die Schwerpunktbildung wird dabei unter 6.4.1.2 dargestellt.

6.4.1.1 Vorgehensweise bei der Durchführung der Analyse

Es sollen die folgenden Schritte durchgeführt werden:

1. Problem definieren.
2. Erstellen einer Wert-Mengen-Tabelle.
3. Prozentuale Anteile bestimmen und kumulieren.
4. Klassengrenzen festlegen.
5. Grafische Darstellung durchführen.
6. Konsequenzen der Klassierung ableiten.

Tabelle 6.9 zeigt das Resultat der Ausführung der oben aufgelisteten Schritte. Auf dieser Tabelle - siehe Spalten für Rangfolge (RF), Bezeichnung (BZ) und kumuliertes finanzielles Risiko (FR_{kum}) - basiert die grafische Darstellung der ABC-Analyse in Bild 6.9.

RF	BZ	Primärenergie-Quelle (A, K, W, N)	Erneuerung				Nenndaten			Inputdaten						Outputdaten				
			Jahr	LD	IR	Kosten (hist.) ERK _H	Kosten (aktuell) ERK _A	Spannung Un [kV]	Ausschaltvermögen S _A [kVA]	T _R	T _S	T _A	Leistung S _b [kVA]	ZVG	P _{ER,LS} [%]	G _m	Umsatz pro kWh U	PV	EGV	FR
1	C8	N	1984	22	1.75	250	366	380	54000	94.0	0.003	0.003	40000	36.47	57.13	45.00	0.20	0.011	209.20	44.45
2	C11	N	1987	19	1.80	250	351	380	54000	100.0	0.006	0.006	49000	27.28	50.72	45.00	0.20	0.026	177.98	37.82
3	C7	N	1984	22	1.75	250	366	380	54000	94.0	0.003	0.003	40000	23.10	10.35	45.00	0.20	0.011	37.89	8.05
4	C2	N	1994	12	1.70	250	306	380	54000	93.0	0.008	0.008	38000	21.74	10.35	45.00	0.20	0.027	31.67	6.73
5	E5	N	1994	12	1.70	30	37	110	31500	92.0	0.003	0.003	19000	19.91	10.35	45.00	0.20	0.005	3.80	0.81
6	C6	N	1987	19	1.80	250	351	380	54000	96.0	0.004	0.004	42000	18.94	0.68	45.00	0.20	0.015	2.38	0.50
7	C3	A	1987	19	1.80	250	351	380	54000	22.0	K.A.	22.0	50000	11.74	0.42	50.00	0.20	110.000	1.95	0.41
8	C4	K	1984	22	1.75	250	366	380	54000	22.0	K.A.	22.0	40000	4.46	0.39	40.00	0.20	70.400	1.72	0.37
9	E6	N	1994	12	1.70	30	37	110	31500	92.0	0.003	0.003	20500	17.51	4.32	45.00	0.20	0.006	1.59	0.34
10	E4	N	1994	12	1.70	30	37	110	31500	92.0	0.003	0.003	20000	19.90	2.37	45.00	0.20	0.005	0.87	0.18
11	E3	N	1994	12	1.70	30	37	110	31500	92.0	0.003	0.003	26000	15.47	1.88	45.00	0.20	0.007	0.69	0.15
12	E1	N	2003	3	2.00	45	48	110	31500	68.0	0.003	0.003	20500	11.34	0.62	45.00	0.20	0.006	0.29	0.06
13	E7	N	1994	12	1.70	30	37	110	31500	92.0	0.005	0.005	23000	9.60	0.66	45.00	0.20	0.010	0.24	0.05
14	E8	N	1994	12	1.70	30	37	110	31500	92.0	0.006	0.006	21000	12.58	0.53	45.00	0.20	0.011	0.20	0.04
15	E2	N	1994	12	1.70	30	37	110	31500	92.0	0.008	0.008	25000	0.09	0.38	45.00	0.20	0.018	0.14	0.03

Bsp. für LS_C7 nach Gl. (4.1 - 4.5): $EGV = P_{ER,LS} * (PV + ERK_A) = P_{ER,LS} * [(S_b * T_a * G_m * U) + ERK_A] = 0,1035 * [(40000 * 0,003 * 0,45 * 0,2) + 366] = 37,89 \text{ T EUR}$

Tabelle 6.9 Risikobeitrag von Leistungsschaltern zu dem ersatzbedingten finanziellen Gesamtrisiko zum aktuellen Zeitpunkt sortiert nach absteigender Reihenfolge und der entsprechende kumulierte Risikobeitrag für die Schwerpunktanalyse

6.4.1.2 Darstellung der Schwerpunktanalyse

Es werden diejenigen Leistungsschalter selektiert, die zum Gesamtrisiko am meisten beitragen (der Schwerpunktsbereich in Bild 6.9 ist mit „A“ gekennzeichnet).

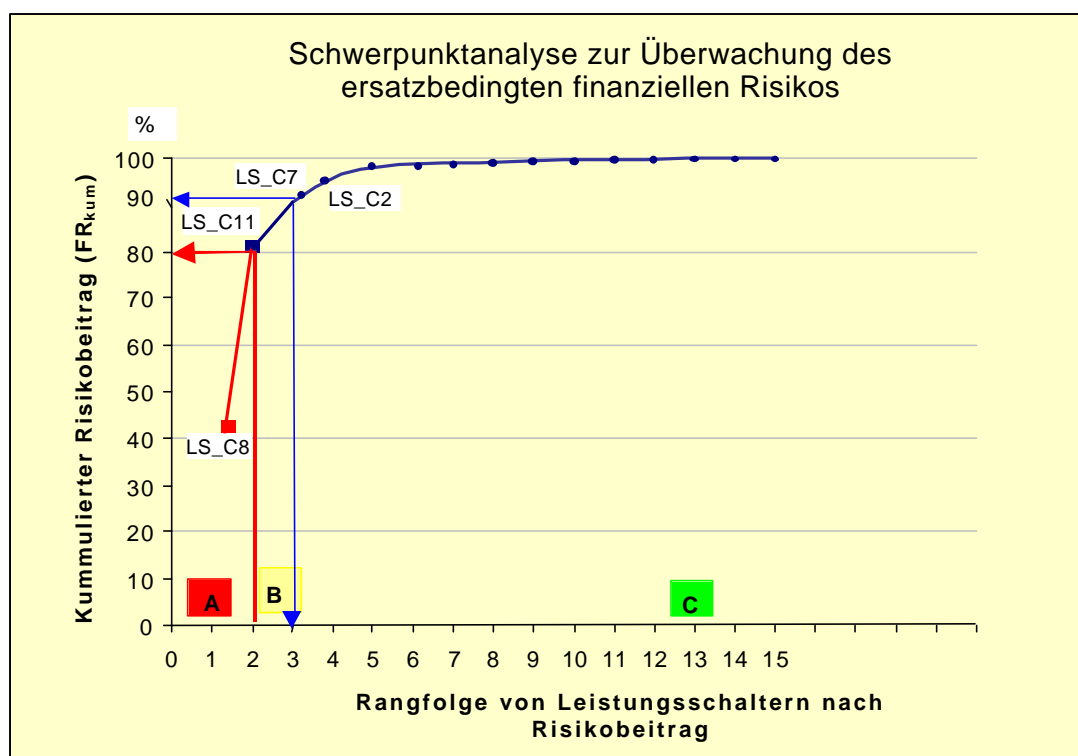


Bild 6.9 Diagramm der Schwerpunktanalyse zur Unterstützung der Budgetierung von Ersatzinvestitionen (anhand der Tabelle 5.9)

6.4.1.3 Auswertung der Analyse

Bevor die Auswertung vorgenommen wird, muss man über den Zweck, den Inhalt und über den Adressatenkreis dieses Berichtes ein paar erklärende Worte sagen.

Der Zweck der Schwerpunktanalyse ist das Management über das mit Ersatz verbundene finanzielle Risiko zu informieren und sie in die Lage zu versetzen Maßnahmen zur Risikominderung anzuregen. Weil das Ergebnis dieser Analyse für die Bestimmung von operativen Maßnahmen allein nicht ausreichend ist, wird dieser als Teilbericht, lagebeschreibende Unterlage für den Informationsaustausch angesehen.

Das Ergebnis der Beispielanalyse zeigt, dass sich im ca. 80% Schwerpunktsbereich zwei Anlagen, die LS_C8 und die LS_C11, befinden. Betrachtet man die Ersatzwahrscheinlichkeitswerte für alle Anlagen einzeln, kann man über das finanzielle Risiko hinaus auch bezüglich der Ersatzdringlichkeit grobe Aussagen treffen.

Für LS_C8 und LS_C11 sind die den finanziellen Risikobeitrag charakterisierenden hohen Erwartungskosten (EGV) bei einer Ersatzwahrscheinlichkeit ($P_{ER,LS}$) mehr als 50 % zustande gekommen. Aus dieser Parameterkonstellation kann man auf ein bevorstehendes Ersatzszenario schließen. Sollten die Erwartungskosten hoher Priorität (RF) bei einer geringen Ersatzwahrscheinlichkeit entstehen (siehe LS_C7), ist die Dringlichkeit des Ersatzes als niedrig einzuschätzen.

Zum Schluss kann man feststellen, dass die gezeigte Analyse für eine Einschätzung des ersatzbedingten finanziellen Risikos geeignet ist, nicht jedoch für die direkte Ableitung von Ersatzmaßnahmen. Diese wird später unter 6.6.2 behandelt.

6.5 Indikator für die geschätzte Ausfallwahrscheinlichkeit

Die Fehlerbaumanalyse (engl.: **Fault Tree Analysis, FTA**) ist eine strukturierte Vorgehensweise zur Feststellung von Ursachen, die alleine oder in Kombination zu einem Fehlerzustand führen [Bertsche, 2004]. Unter Fehlerzustand wird im weiteren Verlauf der Ausfall eines Betriebsmittels verstanden. Der genannten Analyse ist ein Fehlerbaum zu Grunde gelegt. Dieser ist ein Modell, dass alle Kombinationen von ausfallrelevanten Systemzuständen darstellt und logisch verknüpft.

6.5.1 Aufstellung des Fehlerbaumes und des Blockschaltbildes

Mit der Aufstellung des Fehlerbaumes kann das zugrundeliegende System nicht nur qualitativ beschrieben werden, sondern es besteht die Möglichkeit, auch eine quantitative Aussage über seine Ausfallwahrscheinlichkeit zu machen. Die Berechnung erfolgt dabei in den folgenden Schritten:

1. Ermittlung der booleschen Systemfunktion für das Ausfallereignis anhand des zugrundeliegenden Fehlerbaumes.
2. Übergang von booleschen Ausdrücken zur Beschreibung des Ausfallverhaltens mit Wahrscheinlichkeiten.
3. Berechnung der Ausfallwahrscheinlichkeit des Systems anhand der Ausfallwahrscheinlichkeiten von Systemkomponenten.

Das Bild 6.10 zeigt den Fehlerbaum und das entsprechende boolesche Modell eines Leistungsschalters. Das Modell stellt eine Reihenanzahl von überwachten Einheiten dar, weil der Ausfall jeder einzelnen Einheit zu dem Ausfall des Leistungsschalters führen kann. Dieser Aspekt spiegelt sich in der booleschen Systemfunktion in (Gl. 6.11) wieder, wo die überwachten Einheiten „ODER“- verknüpft sind.

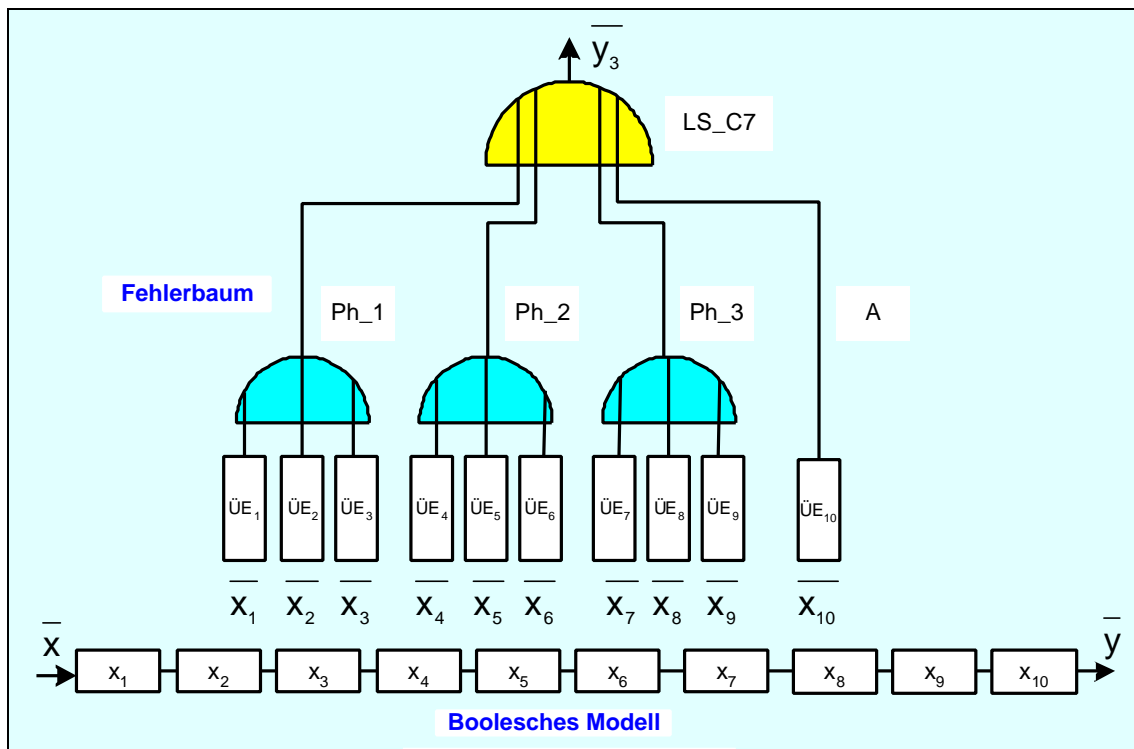


Bild 6.10 Fehlerbaum und das Blockschaltbild eines Leistungsschalters

6.5.2 Berechnung der Ausfallwahrscheinlichkeit eines Leistungsschalters

Ein technisches System lässt sich in Abhängigkeit von den Zuständen seiner Komponenten mit Hilfe der Booleschen Algebra beschreiben, wenn man dem System und dessen Komponenten nur zwei Zustände, funktionsfähig und ausgefallen zuordnet [Bertsche, 2004]. Diese Beschreibung ist für den LS in Gl. (6.11) gegeben.

$$\bar{y} = \bar{x}_1 \cup \bar{x}_2 \cup \bar{x}_3 \cup \bar{x}_4 \cup \bar{x}_5 \cup \bar{x}_6 \cup \bar{x}_7 \cup \bar{x}_8 \cup \bar{x}_9 \cup \bar{x}_{10} = \bigcup_{k=1}^{10} \bar{x}_k \quad (6.11)$$

wo: \bar{x}_k ein Ausfallereignis der ÜE_k ist.

Angenommen, die Ausfallwahrscheinlichkeiten von einzelnen überwachten Einheiten sind bekannt, dann lässt sich die Ausfallwahrscheinlichkeit des LS-s anhand der Negativlogik nach Gl. (6.12) bestimmen [Bertsche, 2004].

$$P_a = 1 - \prod_{k=1}^n (1 - P_k) \quad (6.12)$$

6.5.2.1 Grenzbedingungen

Der Ausfallwahrscheinlichkeitsberechnung werden die Schätzwerte von Ausfallwahrscheinlichkeiten der einzelnen überwachten Einheiten zu Grunde gelegt. Die Schätzung erfolgt dabei anhand des zugehörigen Zustandsverschlechterungsgrades, welcher im Abschnitt 6.1.2.2. mittels Fuzzy-Folgerung berechnet wurde.

Weil die genaue funktionale Verbindung zwischen der Ausfallwahrscheinlichkeit und dem Zustandsverschlechterungsgrad einer überwachten Einheit unbekannt ist, wird die gesuchte Funktion zunächst mit der Gl. (6.13) approximiert.

$$P_{a_üe_k} = \begin{cases} 0 & \text{für } ZVG_{üe(k)} \leq 20\% \\ ZVG_{üe(k)} & \text{für } \textit{sonst} \end{cases} \quad (6.13)$$

Die Gleichung (6.13) soll wie die erste Iteration auf dem Weg zu einer immer präziseren Approximation aufgefasst werden. Das Ignorieren der Degradationsbetrachtung in der Wahrscheinlichkeitsberechnung bis zu einer 20% Grenze des Zustandsverschlechterungsgrades ist dabei mit den zwei folgenden Gründen zu rechtfertigen:

- Die Schätzungsgenauigkeit des Zustandsverschlechterungsgrades von ÜE-en in dem unteren Bereich ist zu niedrig, was ohne die genannte Grenzbedingung eine Fehlerfortpflanzung in die Ausfallwahrscheinlichkeitsberechnung des Leistungsschalters zur Folge hätte.
- In der Gleichung (6.12) würden die mit großer Unsicherheit behafteten Terme durch die Multiplikation die quasi sicheren Terme dominieren, was zu der Untergrabung der Akzeptanz des Ergebnisses führen würde.

6.5.2.2 Iterative Funktionsanpassung

Der Bedarf nach einer iterativen Anpassung ergibt sich aus der Erfahrungszunahme über die Degradation im Laufe der Zustandsverschlechterung.

Befindet sich eine überwachte Einheit in einem - *durch ihre zustandsrelevanten Messgrößen definierten* - Fehlerzustand, ist die Beurteilung ihrer Ausfallwahrschein-

lichkeit für den nächsten Schritt der Zustandsverschlechterung wesentlich erleichtert. Um jedoch die Ausfallwahrscheinlichkeitsberechnung gemäß den neuen Erkenntnissen in jedem Zeitpunkt computergestützt durchführen zu können, muss die zugrundeliegende Funktionskorrektur antizipativ, dem Prognosezeitpunkt mindestens einen Schritt voraus angegeben werden.

Mit der zweiparametrischen Weibullverteilung kann unterschiedliches Ausfallverhalten sehr gut beschrieben werden, sie ist für die oben geforderte iterative Prognose gut geeignet. Die Ausfallwahrscheinlichkeit wird dabei durch Gl. (6.14) berechnet.

$$F(t) = 1 - e^{-\left(\frac{t}{T}\right)^b} \quad (6.14)$$

t \Rightarrow statistische Variable (Lebensdauer)

T \Rightarrow Charakteristische Lebensdauer (Lageparameter) bei $t=T$, $F(t)=63,2\%$

b \Rightarrow Formparameter oder Ausfallsteilheit, er legt die Kurvenform fest

$b < 1$ die Ausfallrate nimmt ab

$b = 1$ die Ausfallrate ist konstant

$b > 1$ die Ausfallrate steigt mit zunehmender Lebensdauer

Im Gegensatz zu Gl. (6.14) wird die Verteilungsfunktion der Ausfallwahrscheinlichkeit in dem vorliegenden Ansatz nicht über die Lebensdauer sondern in Abhängigkeit vom Zustandsverschlechterungsgrad gesucht. Das bedeutet das Ersetzen der statistischen Variable „Lebensdauer“ mit dem ZVG in Gl. (6.14). Als Ergebnis ergibt sich für die gesuchte Funktion der Ausfallwahrscheinlichkeit über den ZVG die Gl. (6.15), die im weiteren Zustandsbasierte Weibullverteilung genannt wird.

$$F(t) = 1 - e^{-\left(\frac{ZVG}{100}\right)^b} \quad (6.15)$$

Aus Gl. (6.15) ist ersichtlich, dass man mit den Parametern „ b “ die Form der Korrelationsfunktion zwischen Ausfallwahrscheinlichkeit und ZVG an den zu erwartenden Verlauf wunschgemäß anpassen kann. Durch den Gebrauch dieser Konfigurationsmöglichkeit kann man auch weiche Zustandseinflussparameter wie statistisch berechnete Ausfallrate, Betriebserfahrungen, Betriebsbedingungen und andere in den Fuzzy-Algorithmus nicht integrierte Einflussparameter miteinbeziehen, deren Einfluss jedoch von Fall zu Fall individuell abzuschätzen ist.

6.5.2.3 Sensitivitätsanalyse für die zustandsbasierte Weibullverteilung

Um die Tauglichkeit der zustandsbasierten Weibullverteilung für die Anpassung der Korrelationsfunktion zu präsentieren, ist der Verlauf der Funktion in Gl. (6.15) für unterschiedliche Werte des Formparameters „ b “ in Bild 6.11 abgebildet.

Der Abbildung 6.11 ist zu entnehmen, dass die Korrelationsfunktion auf die Änderung des Formparameters empfindlich reagiert. Für das Asset-Management ist der Bereich der Zustandsverschlechterung von ca. 40% bis 80% als effektiver Anpassungsbereich anzusehen. Über den genannten Bereich hinaus muss man jedoch damit rechnen, dass bei einer schnellen Fehlerentwicklung die Zeit für die Festlegung und Durchführung von risikominimierenden Maßnahmen nicht mehr ausreicht.

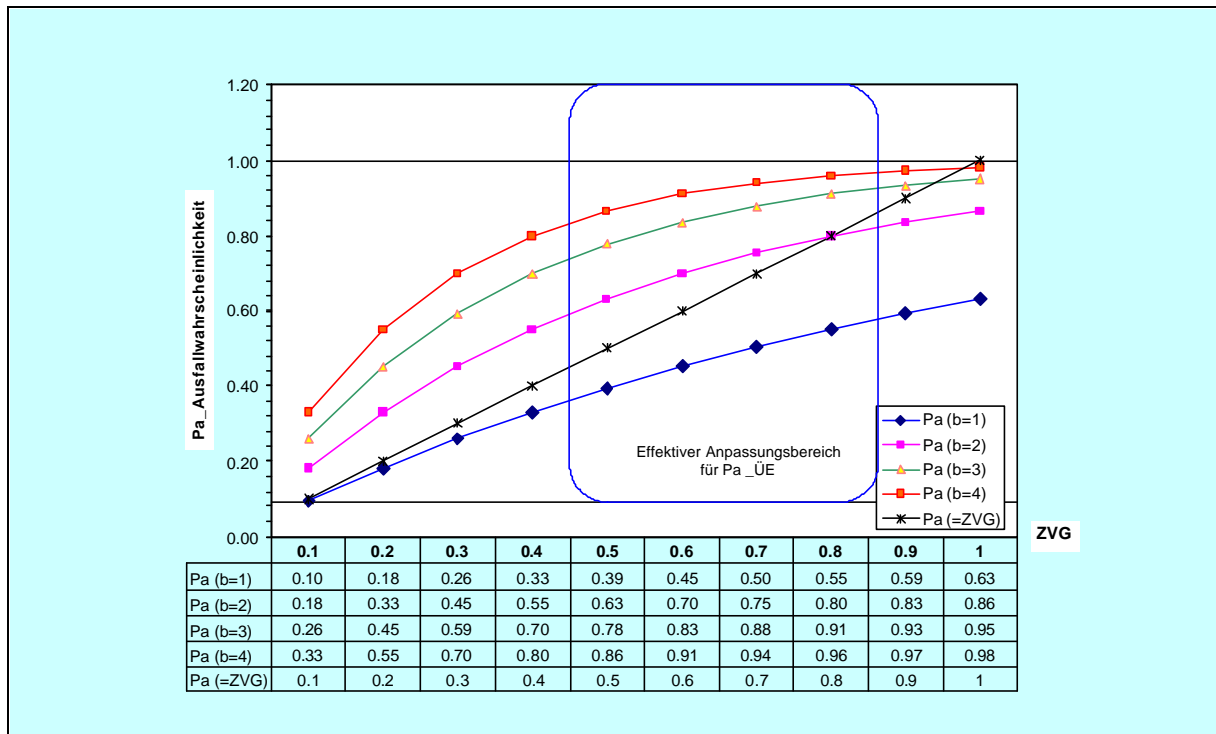


Bild 6.11 Sensitivitätsanalyse der zustandsbasierten Weibullverteilung der Ausfallwahrscheinlichkeit auf die Änderung des Formparameters „b“

Zusammenfassend muss man bemerken, dass eine iterative Anpassung der Korrelationsfunktion für die Bestimmung der Ausfallwahrscheinlichkeit der überwachten Einheiten zu empfehlen ist. Die Empfehlung gilt insbesondere für den effektiven Entscheidungsbereich.

Um die Komplexität der weiteren Erläuterungen nicht zu Lasten der Verständlichkeit zu erhöhen, wird den nachfolgenden Beispielberechnungen die Wahrscheinlichkeitsbestimmung nach der Gl. (6.13) zu Grunde gelegt.

6.5.2.4 Beispielberechnung für die Ausfallwahrscheinlichkeit

Kennt man den Zustandsverschlechterungsgrad der überwachten Einheiten eines Leistungsschalters, dann kann man unter Verwendung der Gl.-en (6.11 - 6.13) die Ausfallwahrscheinlichkeit des Leistungsschalters berechnen.

Die Eingangswerte für die Berechnung, d.h. der ZVG von ÜE-en, wurden in der Tabelle 6.10 eingetragen. Diese Tabelle enthält auch die Berechnungsergebnisse, wobei über die Ausfallwahrscheinlichkeit des Leistungsschalters hinaus auch die Ausfallwahrscheinlichkeiten von einzelnen Phasen und des Antriebes separat aufgelistet wurden. Die Ausfallwahrscheinlichkeit von ersetzbaren Komponenten (Phasen und der Antrieb) wird explizit weder für die Ersatzstrategiebestimmung noch für die Instandhaltungsstrategiefindung verwendet. Wie später zu sehen ist, wird für die Ersatzstrategiebestimmung die Ausfallwahrscheinlichkeit der lebensdauerkritischen überwachten Einheit des Leistungsschalters, für die Instandhaltungsstrategiefindung die Ausfallwahrscheinlichkeit des Leistungsschalters und seiner überwachten Einheiten verwendet. Nichtsdestotrotz ist dieser Indikator eine aussagekräftige Kennzahl für Benchmarking, die für den Vergleich der ersetzbaren Komponenten untereinander herangezogen werden kann.

LS_C7			ZVG _{ÜE (k)}		Ausfallwahrscheinlichkeit in der Hierarchie	
					P _{a,ÜE (k)}	P _{a,Komp.}
Ersetzbare Komponente	ÜE _k	Bezeichnung	%			
Phase1	ÜE ₁	Isolation	54,90	54,90	68,40	82,80
	ÜE ₂	Kontakt	29,93	29,93		
	ÜE ₃	Elektronik	0,00	0,00		
Phase2	ÜE ₄	Isolation	0,16	0,00	29,93	
	ÜE ₅	Kontakt	29,93	29,93		
	ÜE ₆	Elektronik	0,00	0,00		
Phase3	ÜE ₇	Isolation	0,16	0,00	0,00	
	ÜE ₈	Kontakt	19,81	19,81		
	ÜE ₉	Elektronik	0,00	0,00		
Antrieb	ÜE ₁₀	Hydraulik/ Motor	22,33	22,33	22,33	

Tabelle 6.10 Übersichtstabelle für den Vergleich zwischen Zustandsverschleierungsgrad und Ausfallwahrscheinlichkeit auf Komponenten- und Betriebsmittelebene

Die nachstehenden Gl.-en (6.16 - 6.20) zeigen die Berechnungsvorschrift für die Ausfallwahrscheinlichkeit mit konkreten Zahlen, die aus der Berechnung des Zustandsverschleierungsgrades mit Fuzzy-Logik entstammen.

Anhand der Ergebnisse aus der Tabelle 6.10 kann man erkennen, dass die relativ hohe Ausfallwahrscheinlichkeit des LS_C7 vorwiegend durch die hohe Ausfallwahrscheinlichkeit der Phase 1. verursacht wird. Die Beeinträchtigung dieser Phase ist wiederum eher durch die Degradation seiner Isolierung gegeben, wobei sich der aktuelle Zustandsverschleierungsgrad der Isolierung in den zustandsrelevanten Messgrößen widerspiegelt. Hierfür gibt es in Bild 6.6 weitere Detailinformationen.

$$P_{a_Ph_1} = 1 - \prod_{k=1}^3 (1 - P_{a_üe_k}) = 1 - [(1 - 0,549) \cdot (1 - 0,299) \cdot (1 - 0,000)] = 0,684 \quad (6.16)$$

$$P_{a_Ph_2} = 1 - \prod_{k=4}^6 (1 - P_{a_üe_k}) = 1 - [(1 - 0,00) \cdot (1 - 0,299) \cdot (1 - 0,00)] = 0,299 \quad (6.17)$$

$$P_{a_Ph_3} = 1 - \prod_{k=7}^9 (1 - P_{a_üe_k}) = 1 - [(1 - 0,00) \cdot (1 - 0,00) \cdot (1 - 0,00)] = 0,00 \quad (6.18)$$

$$P_{a_Antrieb} = P_{a_üe_10} = 0,223 \quad (6.19)$$

$$P_{a_LS_C7} = 1 - \prod_{k=1}^{10} (1 - P_{a_üe_k}) = 0,828 \quad (6.20)$$

6.6 Einsatz von Indikatoren zur Entscheidungsunterstützung

Während die Unterstützung der Strategiefindung bezüglich des Ersatzes und der Instandhaltung für die strategische Planung von Bedeutung ist, wird die online Risikoüberwachung vor allen bei der operativen Betriebsführung eingesetzt.

Das nachfolgende Bild 6.12 stellt die wichtigsten Bereiche der Entscheidungsunterstützung bei EVU-s dar, in denen die ausgearbeiteten Kennzahlen zum Einsatz kommen. Die Einflussparameter der jeweiligen Kennzahl sind dabei angegeben, um das Erkennen der Zusammenhänge zwischen unterschiedlichen funktionalen Bereichen wie Anlagentechnik und Anlagencontrolling zu erleichtern.

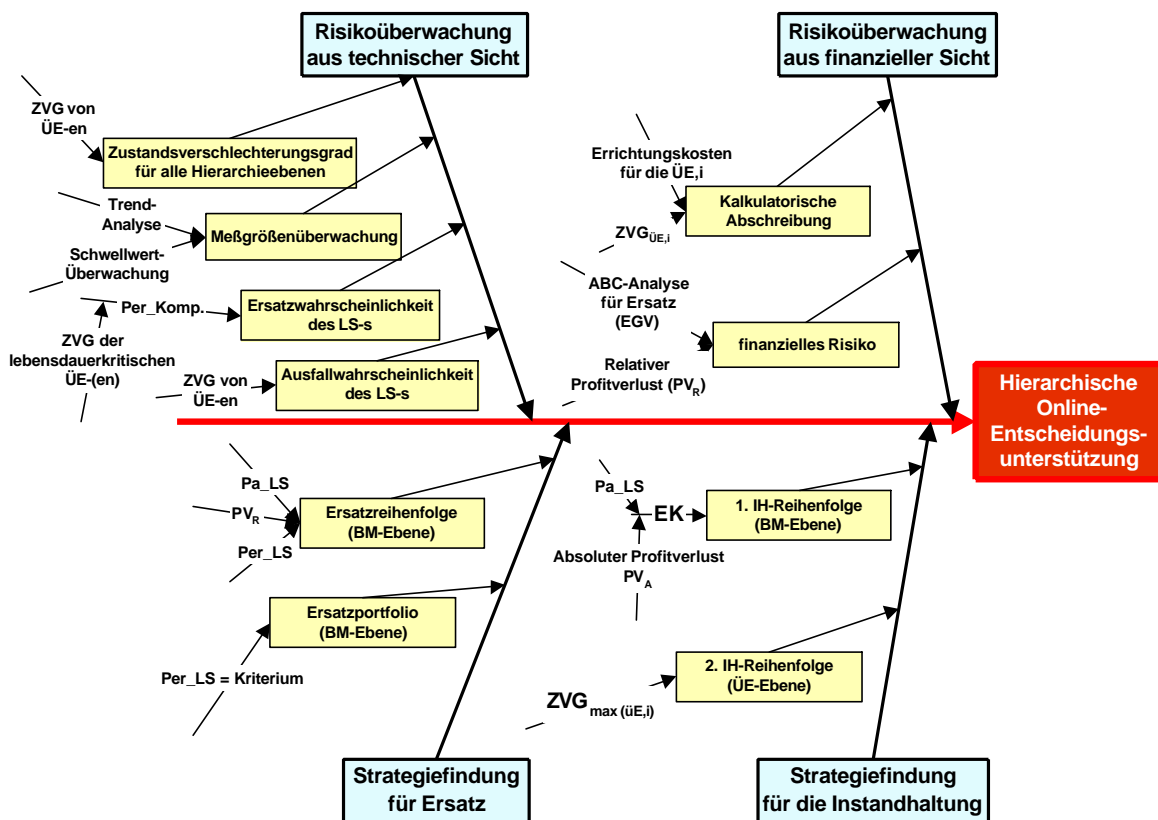


Bild. 6.12 Fischgräten-Diagramm der Entscheidungsunterstützung zum Einsatz von zustandsbasierten Indikatoren für Strategiefindung und Risikoüberwachung

6.6.1 Risikoüberwachung aus finanzieller- und technischer Sicht

Das Kostenersparnispotenzial beim Einsatz der hierarchischen Risikoüberwachung besteht vor allem in der Früherkennung und Ausschöpfung von Synergieeffekten. (Beispiel: *Simultane Degradation von Anlagen gleichen Typs.*)

Die Voraussetzung das genannte Phänomen erkennen zu können, ist die Kenntnis über die zeitliche Entwicklung von Indikatoren wie Kalkulatorischer Abschreibung (A), Funktionsbeitrag (FB_t), Ersatzbedingtes finanzielles Risiko (FR_{GR}) und der Zustandsverschlechterungsgrad (ZVG) auf der Anlagengruppenebene. Diese aggregierte Kennzahlen machen den erwähnten Effekt schon dann erkennbar, wenn er auf der Betriebsmittelebene noch als harmlos erscheint und für Kosteneinsparung keinerlei Ansatz bietet. Im Folgenden wird das Resultat einer Simulation der genannten Indikatoren auf der Gruppenebene vorgeführt. Dabei wird demonstriert, wie man die

Auswirkung eines Ersatzszenarios auf die Systemperformance durch Indikatoren abschätzen kann. Der Vorteil der gleichzeitigen Verfolgung unterschiedlicher Indikatoren wird dabei deutlich.

6.6.1.1 Simulation auf Systemebene

Um den zeitlichen Verlauf von Indikatoren für die Gruppe in Bild 6.13 abzuleiten, hat man eine Simulation mittels des hierarchischen Simulationsmodells in 18 Zeitpunkten durchgeführt. Das Resultat wurde in Bild 6.14 dargestellt. Bei der Simulation hat man angenommen, dass im Zeitpunkt 9. ein Ersatzszenario durchgeführt wurde, wobei die Leistungsschalter LS_08 und LS_11 durch identische Anlagen ersetzt worden sind.

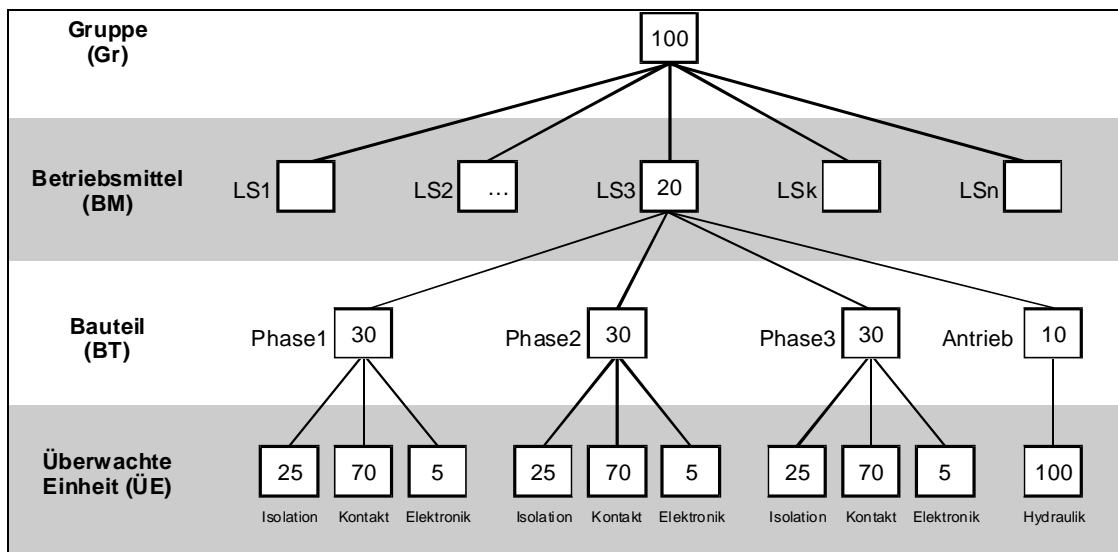


Bild 6.13 Hierarchischer Baum der durch Simulation untersuchten Leistungsschaltergruppe

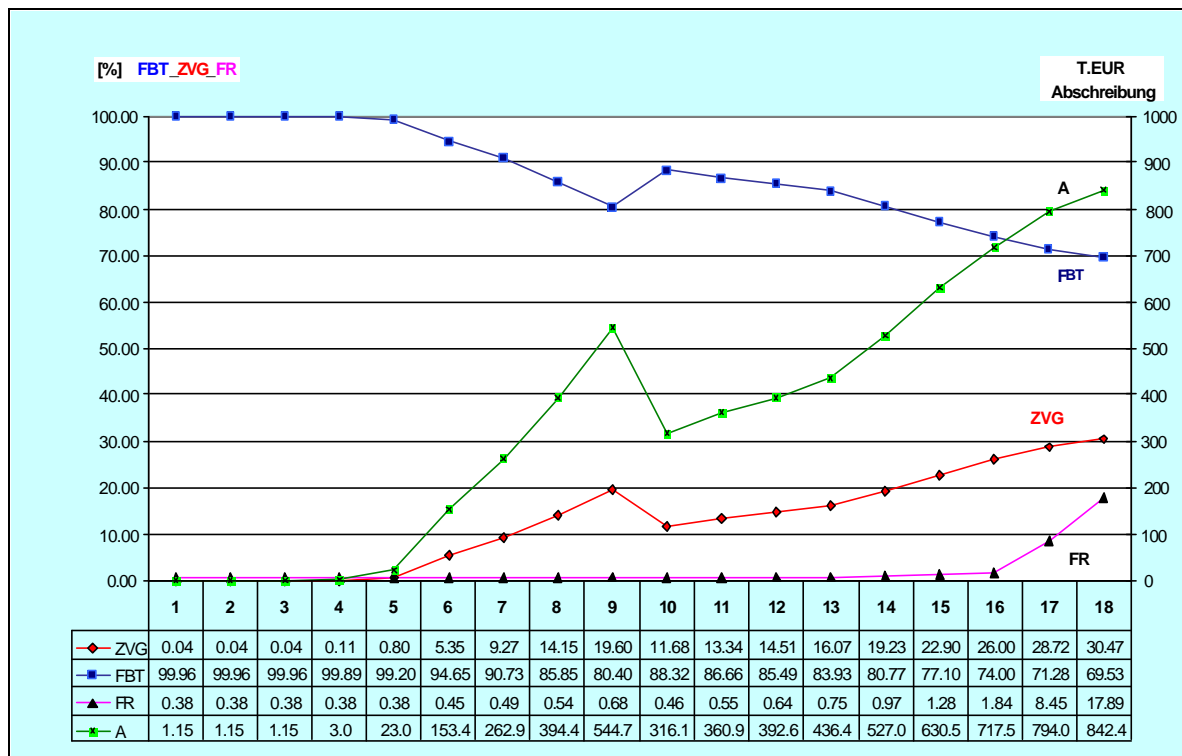


Bild 6.14 Online Überwachung von technischen und finanziellen Indikatoren auf der Gruppenebene

6.6.1.2 Deutung des zeitlichen Verlaufes von Indikatoren

Die rasante Abnahme des Funktionsbeitrages (FB_t) über die Zeitpunkte 5-8 hinweg und die große Dynamik der Steigerung der kalkulatorischen Abschreibung (A) in Bild 6.14 signalisieren die Notwendigkeit für risikominimierende Maßnahmen. Diesem Hinweis nachgegangen hat man durch Ersatzanalyse (*Abschnitt 6.6.2.1*) festgestellt, dass die LS_08 und 11 ersetzt werden sollten. Nach dem Ersatz im Zeitpunkt 9. kehrte der Funktionsbeitrag in den akzeptablen Bereich zurück. Das Restrisiko ist mit IH-Maßnahmen zu reduzieren. Über die Tragbarkeit dieses Risikos kann man erst entscheiden, wenn die Analyse auf der Ebene der ÜE-en abgeschlossen wurde.

Im Gegensatz zu dem geschilderten Fall oben zeigt die Analyse im Zeitpunkt 18. ein Zustandsszenario, in dem die Funktionsbeitragsminderung (FB_t) mit hohem ersatzbedingten finanziellen Risiko (FR_{LS_GR}) einhergeht. Die Kennzahl für FR_{LS_GR} ist hierfür durch Gl. (6.21) definiert und kann anhand der Tabelle 6.9 berechnet werden.

$$FR_{LS_GR} = \frac{\sum_i^n EGV_i}{\sum_i^n GV_i} \cdot 100 \quad (6.21)$$

Dadurch, dass in Gl. (6.21) die Summe der ersatzbedingten Erwartungskosten zu dem maximalen ersatzbedingten Gruppenverlust in Relation gesetzt wird, bringt dieser Indikator das Ausmaß der Ersatznotwendigkeit im Gesamtportfolio zum Ausdruck. Die wertmäßige Konstellation der Indikatoren im Zeitpunkt 18 deutet auf einen hohen Investitionsbedarf für Ersatz hin, was vom Controlling rechtzeitig in Betracht gezogen und näher präzisiert werden soll. Den aktuellen Geldmittelbedarf kann man dabei anhand des Wertes für die kalkulatorische Abschreibung (A) gut abschätzen.

6.6.1.3 Simulation auf der Ebene von überwachten Einheiten

Es ist die tiefste und gleichzeitig die wichtigste Ebene der Anlagenhierarchie, wo die Steuerung des Funktionsbeitrages (*auch Nutzungsvorrat genannt*) in der Tat stattfindet. Die Linie für Sollzustand und Schadensgrenze in Bild 6.15 geben den Steuerrangkorridor eines theoretischen Verlaufes an. Dieser soll für alle Betriebsmittel individuell festgelegt werden. Das Simulationsmodell unterstützt diese Festlegung.

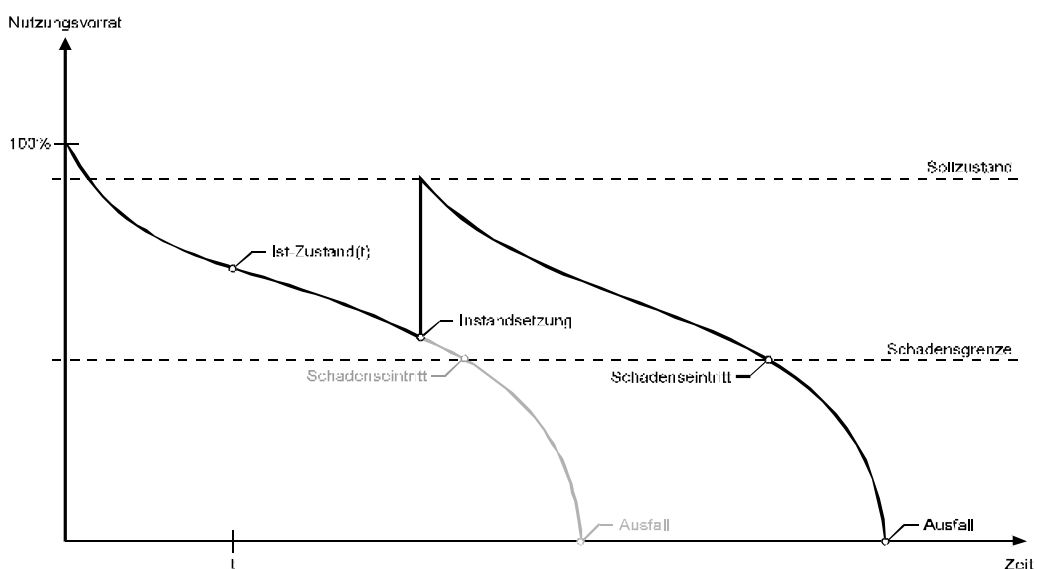


Bild 6.15 Zeitliche Verfolgung des Nutzungsvorrates und Einfluss der Instandhaltung

6.6.2 Strategiefindung für Ersatz und Instandhaltung

Ersatz, Instandhaltung und die damit eng verbundene Budgetierung sind die wichtigsten Stützpfiler einer integrierten Anlagenstrategie. Es gilt, im Spannungsfeld Wirtschaftlichkeit-Sicherheit-Systemzuverlässigkeit, die optimalen Entscheidungen zu treffen, um mit einem vordefinierten Kostenbudget die höchste Risikominderung zu erreichen. Die einzelnen Aufgabenstellungen, welche gleichzeitig als Variablen einer strategischen Entscheidung betrachtet werden können, werden im Folgenden im Kontext des Betriebsmittlersatzes und der Instandhaltung aufgelistet.

1. Bestimmung der Ersatzstrategie durch das Selektieren der zu ersetzenden Anlagen und durch die Bestimmung ihrer Ersatzreihenfolge
2. Bestimmung der Instandhaltungsstrategie durch die Festlegung von Instandhaltungsmaßnahmen auf der Ebene von überwachten Einheiten und die Festlegung deren Priorität für die Instandhaltung
3. Festlegung des Kostenvolumens von Ersatz- und Instandhaltungsmaßnahmen für unterschiedliche Zeithorizonte der Budgetierung

Ersatz- und Instandhaltungsstrategien werden nach Regeln aufgesetzt, die auf praktischen Erfahrungen beruhen. Für den Ersatz muss dabei die Ersatzpriorität, bei der Instandhaltung die Reihenfolge der Instandhaltungsaktivitäten bestimmt werden. Der Zeitpunkt des Ersatzes und die zeitliche Koordination der Ausführung von Instandhaltungsaktivitäten sollen dabei durch die Entscheidungsträger selbst getroffen werden.

Das im theoretischen Teil dargestellte Asset-Management Konzept basiert auf dem Ansatz der zuverlässigkeitsorientierten Instandhaltung, für den oft auch die englische Bezeichnung: „**Reliability Centered Maintenance (RCM)**“ benutzt wird. Unter dem Überbegriff **RCM** versteht man ein Instandhaltungskonzept, das durch die Bestimmung des optimalen Mix von nachfolgenden Basisstrategien die Senkung der IH-Kosten verspricht.

- Ausfallbehebung
- Vorbeugende Instandhaltung
- Zustandsorientierte Instandhaltung
- Vorausschauende Instandhaltung

Erkenntnisse, welche die Auswahl der richtigen Grundstrategie auf der Ebene der überwachten Einheiten unterstützen, kann man jedoch erst durch risikobasierte Instandhaltung gewinnen. Mit dieser Methode werden Entscheidungen über die genannte Auswahl getroffen. Vorbedingung dafür ist jedoch die Bereitstellung des Parameters „Ausfallwahrscheinlichkeit“ und die Berechnung der ausfallrelevanten monetären Schäden.

Aufbauend auf die Ergebnisse der hierarchischen Berechnung des Zustandverschlechterungsgrades werden nachfolgend risikobasierte Beispielanalysen für die Unterstützung der Ersatz- und Instandhaltungsstrategiefindung mit quantitativen Angaben vorgeführt. Die Entscheidung über die ultimative Instandhaltungsstrategie wird jedoch in allen Details nicht demonstriert, weil es einer langfristigen Analyse bedürfte und dadurch den Rahmen dieser Arbeit sprengen würde.

6.6.2.1 Bestimmung der Ersatzstrategie

Der erste Schritt für die Unterstützung der optimalen Strategiefindung ist die Selektion von ersatzwürdigen Anlagen aus dem gesamten Anlagenportfolio. Für das Treffen der erwähnten Auswahl ist der Einsatz der bereits berechneten Ersatzwahrscheinlichkeit als Auswahlkriterium naheliegend. In diesem Fall werden die ersatzbegleitenden Risiken wie ein möglicher Profitausfall völlig außer Acht gelassen.

Weil der Ersatz die kostenintensivste risikominimierende Maßnahme ist, muss seine Anwendung mit einem vertretbaren Schwellwert für die Ersatzwahrscheinlichkeit verbunden sein. Für das vorliegende Beispiel ist dieser Grenzwert für alle Anlagen auf 50% festgelegt worden. Damit ist die Bestimmung des Ersatzportfolios ohne weiteres durchzuführen. Das Resultat der Auswertung von Beispieldaten aus der Tabelle 6.11 wurde in Bild 6.16 dargestellt. Anhand des Diagramms in Bild 6.16 kann man erkennen, dass zu dem Ersatzportfolio nur die Anlagen LS_C08 und LS_C11 zugeordnet werden können. Die P_{er_LS} der restlichen Anlagen liegt unter der 50% Marke.

Hat man die ersatzwürdigen Anlagen selektiert, ist die Reihenfolge des Ersatzes festzulegen. Je nach Risikostrategie kann dieser Schritt nach verschiedenen Kriterien durchgeführt werden. Führt man eine risikoneutrale Strategie, kann die Ersatzwahrscheinlichkeit auch für die Aufstellung der Ersatzrangfolge *-als Sortierungskriterium in absteigender Reihenfolge-* eingesetzt werden. Möchte man jedoch eine risikobewusste Strategie anwenden, dann müssen auch die risikorelevanten Größen eines Ausfallszenarios in den Berechnungsalgorithmus einfließen. Das sind Größen, welche auf die Dringlichkeit des Ersatzes aus der Perspektive von zu vermeidenden monetären Konsequenzen eines antizipierten Ausfalls Einfluss nehmen sollen. In den nächsten Absätzen wird diese risikobewusste Strategiefindung näher erläutert.

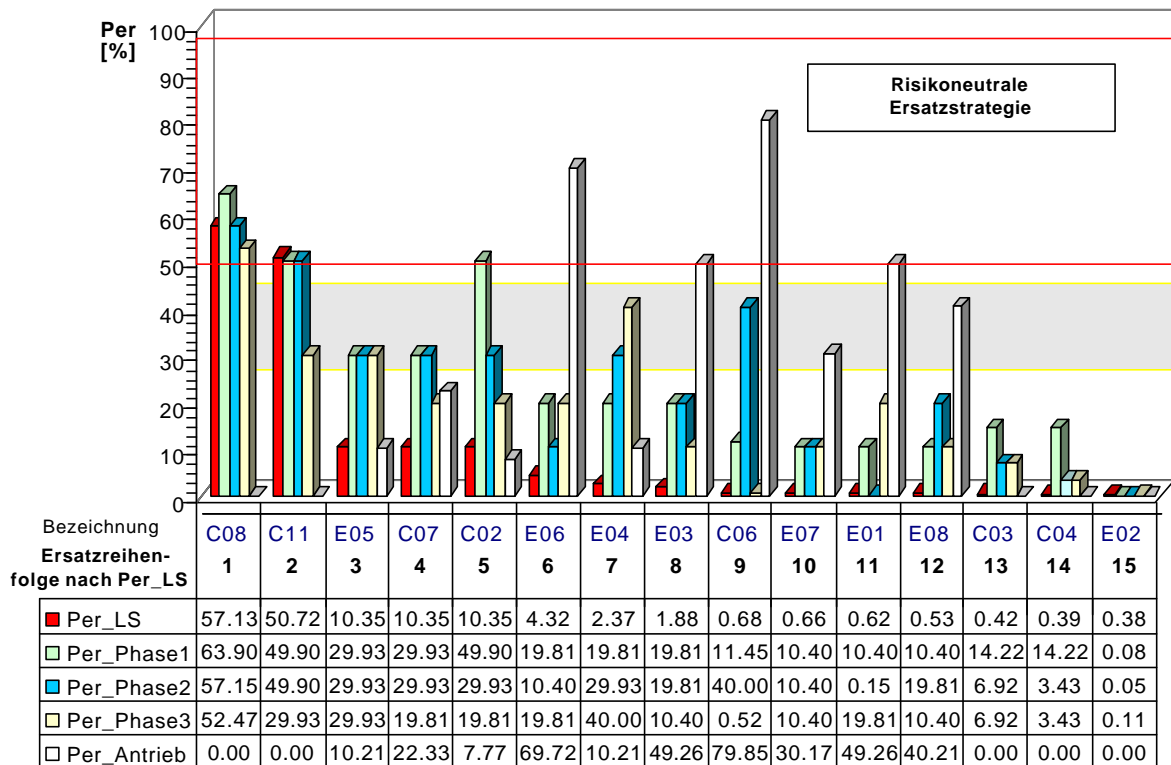


Bild 6.16 Ersatzreihenfolge von Leistungsschaltern nach dem eindimensionalen Kriterium: „Ersatzwahrscheinlichkeit auf Betriebsmittelebene (Per_LS)“ für eine risikoneutrale Ersatzstrategie

RF	Bezeichnung	Priorität	Per_LS	PV	Pa_LS	Per_Phase1	Per_Phase2	Per_Phase3	Per_Antrieb	ZVG _{max} (ÜE)	RLD	
		[%]										[Jahre]
1	C08	56.66	57.13	0.01	92.65	63.90	57.15	52.47	0.00	63.90	13.00	
2	C11	51.32	50.72	0.01	82.41	49.90	49.90	29.93	0.00	49.90	16.00	
3	C03	2.42	0.42	60.92	77.70	14.22	6.92	6.92	0.00	77.70	16.00	
4	E05	0.55	10.35	0.00	65.59	29.93	29.93	29.93	10.21	29.93	23.00	
5	C02	0.53	10.35	0.02	64.89	49.90	29.93	19.81	7.77	49.90	23.00	
6	E06	0.50	4.32	0.00	69.72	19.81	10.40	19.81	69.72	69.72	23.00	
7	C07	0.49	10.35	0.01	82.80	29.93	29.93	19.81	22.33	54.90	13.00	
8	E07	0.48	0.66	0.01	30.17	10.40	10.40	10.40	30.17	30.17	23.00	
9	E04	0.40	2.37	0.00	57.96	19.81	29.93	40.00	10.21	40.00	23.00	
10	E08	0.39	0.53	0.01	40.21	10.40	19.81	10.40	40.21	40.21	23.00	
11	C04	0.39	0.39	38.99	0.00	14.22	3.43	3.43	0.00	14.22	13.00	
12	E03	0.39	1.88	0.00	49.26	19.81	19.81	10.40	49.26	49.26	23.00	
13	E01	0.39	0.62	0.00	49.26	10.40	0.15	19.81	49.26	49.26	32.00	
14	C06	0.39	0.68	0.01	87.91	11.45	40.00	0.52	79.85	79.85	16.00	
15	E02	0.38	0.38	0.01	0.00	0.08	0.05	0.11	0.00	0.16	23.00	

Tabelle 6.11 Daten für die risikoneutrale und risikobewusste Bestimmung der Ersatzreihenfolge (RF) von Anlagen zum Zeitpunkt 9

Die risikobewusste Bestimmung der Ersatzreihenfolge bedarf einer mehrkriteriellen Entscheidung, daher wird die Anzahl von Einflussgrößen für die Ersatzpriorität über die zustandsorientierte Ersatzwahrscheinlichkeit hinaus um die zwei folgenden Parameter erweitert:

1. Profitverlust, der mit dem Ersatz einhergeht.
2. Ausfallwahrscheinlichkeit der Anlage, dessen Steigerung die Dringlichkeit des Ersatzes erhöht.

Der Aufnahme von obigen Entscheidungskriterien liegt der allgemeinverständliche Gedanke zu Grunde, dass diejenige Anlage zuerst ersetzt werden soll, durch die ein höherer Verlust mit einer größeren Wahrscheinlichkeit einzutreffen droht. Hier wird der Tatsache Rechnung getragen, dass das Ersatzszenario auch durch einen Ausfall außerplanmäßig eintreffen kann. Wie zu erkennen ist, sind die aufgelisteten Parameter als Kriterien zweiter Ordnung angewandt, welche nur die Ersatzrangordnung der vorhin selektierten Anlagen nicht jedoch die Zusammensetzung des Ersatzportfolios selbst beeinflussen sollen.

Für die Berechnung der Ersatzpriorität unter Einbezug von mehreren Kriterien ist traditionsgemäß der Ansatz der Fuzzy-Folgerung herangezogen worden. Das Ergebnis der Simulation zum Zeitpunkt 9. ist in Bild 6.17 aufgezeichnet worden. Die relevanten Datensätze für diese Simulation sind in der Tabelle 6.11 zusammengestellt.

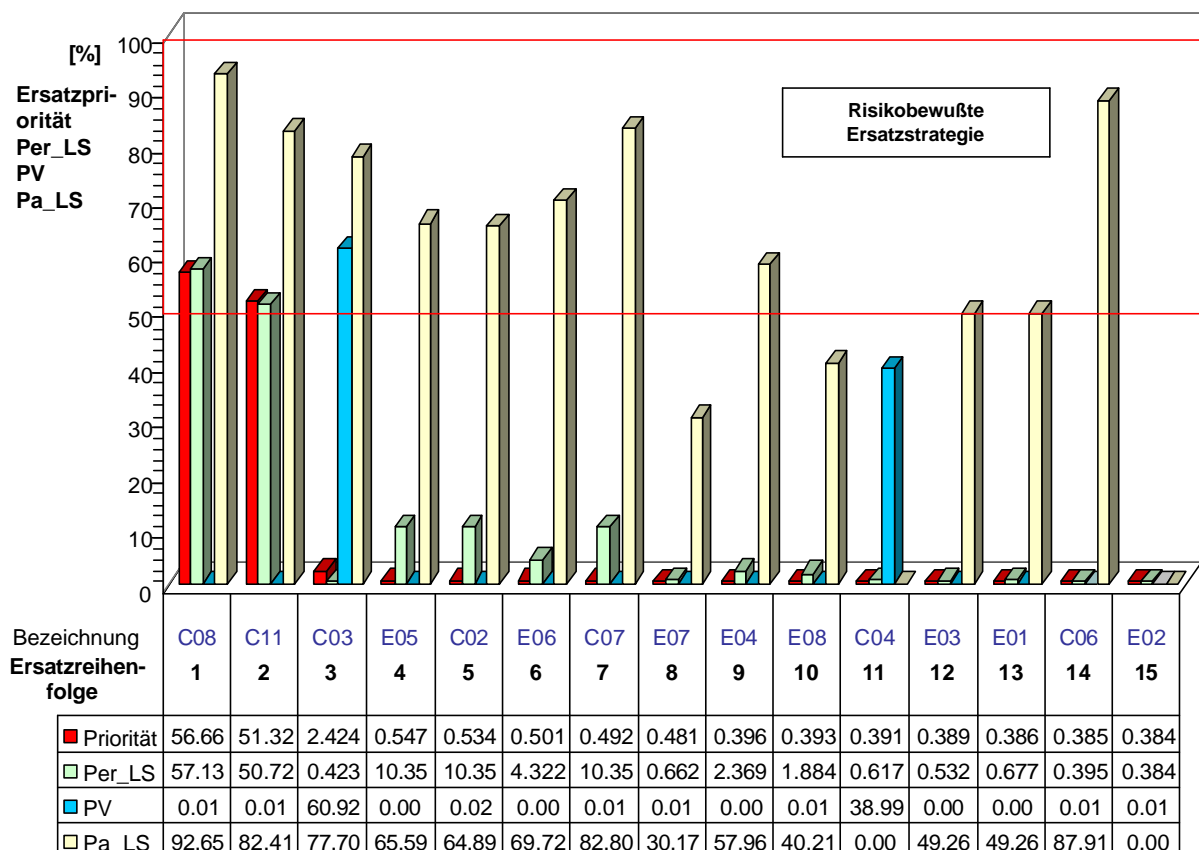


Bild 6.17 Ersatzreihenfolge von Leistungsschaltern nach dem mehrdimensionalen Kriterium: „[Priorität=f(Per_LS, PV, Pa_LS)]“, für eine risikobewusste Ersatzstrategie

Zur Deutung des genannten Ergebnisses der risikobewussten Reihenfolgebestimmung in Bild 6.17 ist das Folgende zu bemerken:

Die Ersatzreihenfolge der für den Ersatz selektierten Leistungsschalter „LS_C08 und LS_C11“ hat im Vergleich zu dem risikoneutralen Fall keine Änderung erfahren. Es ist damit zu erklären, dass die Einflussgrößen zweiter Ordnung (PV und Pa_LS) für diese Betriebsmittel fast identisch sind.

Die Rangfolgeänderung bei den für den Ersatz nicht selektierten Anlagen zeigt jedoch, dass die der Reihenfolgebestimmung zugrundegelegten Fuzzy-Regeln ihre Wirkung gemäß dem abgebildeten Expertenwissen entfaltet haben. Am deutlichsten kommt diese Wirkungseffektivität im Falle des LS_C03 zu Tage, der durch den risikobewussten Ansatz von Platz 13 auf den Platz 3 vorgerückt ist.

Um die typenspezifischen Gegebenheiten von unterschiedlichen Anlagen besser zu beachten, ist bei der Zugehörigkeitsbestimmung zu dem Ersatzportfolio von einem pauschalen Grenzwert für Per_LS abzuraten. Anhand von Simulationen kann dieser Schwellwert individuell für alle Betriebsmittel eines bestimmten Typus ermittelt werden, was die Effizienz der Ersatzoptimierung weiter steigert.

6.6.2.2 Ansatz zur risikobasierten Instandhaltung

Grundlagen für die Ermittlung des Instandhaltungsbedarfs bilden die perspektivischen Überlegungen zur Netzentwicklung und vor allem die zustandsbasierten Indikatoren, wie die betriebsmittelbezogene Ausfallwahrscheinlichkeit, der ausfallbedingte Profitverlust und die Ausfallwahrscheinlichkeit von einzelnen überwachten Einheiten. Das Ergebnis der Ersatzstrategiefindung aus dem vorangegangenen Absatz wird dabei zur Bestimmung des Instandhaltungsportfolios herangezogen, was erwartungsgemäß die Verkleinerung des ursprünglichen Anlagenportfolios um die zu ersetzenden Betriebsmittel (LS_C08 und LS_C11) zur Folge hat.

Angenommen, dass das gesamte Leistungsschalterportfolio aus „perspektivischem Aspekt“ die gleiche Bewertung erfährt, wird die Instandhaltungsreihenfolge von Betriebsmitteln unter Einbezug von Erwartungskosten ihres antizipierten, zustandsbedingten Ausfalls bestimmt. Dieser risikobasierte Ansatz bringt die in der Praxis bewährte Auffassung zum Ausdruck, dass das Betriebsmittel mit dem höchsten Verlustpotenzial zuerst gewartet werden soll. Damit ist der Leistungsschalter, bei dem man mit der Instandhaltung anfangen soll, festgelegt worden. Über den weiteren Fortgang weiß man jedoch noch nichts. Es steht aus, die Rangfolge von IH-Aktivitäten, d.h. die IH-Priorität von überwachten Einheiten, so zu bestimmen, dass das Gesamtrisiko bei einem limitierten IH-Budget am schnellsten gesenkt wird.

Zur optimalen Risikominderung wird die Reihenfolge von Instandhaltungsaktivitäten durch den in Bild 6.18 dargestellten Algorithmus berechnet. Die erste Iteration des Berechnungsvorganges ist durch die Tabellen 6.12 - 6.14 abgebildet worden. Die so bestimmte Rangfolge ist jedoch nur als theoretische Reihenfolge zu betrachten, welche aufgrund der schnellsten Risikominderung als alleiniger Bedingung bestimmt wurde. Weil eine Bündelung von Instandhaltungsaktivitäten eines Betriebsmittels sowohl aus Kostengründen als auch aus Gründen der Zweckmäßigkeit vorteilhaft sein kann, muss die genannte Liste durch den Entscheidungsträger auf die erwähnte Aspekte überprüft werden. Es bedeutet das Suchen nach Aktivitäten untergeordneter Priorität, die mit Aktivitäten höherer Priorität aufgrund ihrer Betriebsmittelzugehörigkeit gebündelt werden können. Die Entscheidung über den ultimativen Umfang von Instandhaltungsaktivitäten wird durch das Instandhaltungsbudget eingeschränkt.

Das Ablaufdiagramm für die Bestimmung der IH-Reihenfolge macht die Bedeutung der hierarchischen online Zustandsüberwachung im Instandhaltungsbereich deutlich. Um die IH-Kosten durch eine risikobewusste IH-Strategie weiter senken zu können, ist die periodische Bildung und Bewertung von IH-Szenarien unabdingbar. Auch bei Ungenauigkeiten in der Fuzzy-Folgerung wäre es falsch, auf diese Entscheidungshilfe zu verzichten. Die risikobasierte Reihenfolgeberechnung vermag den Entscheidungsprozess zu systematisieren und zu objektivieren, indem in die Berechnung sowohl monetäre als auch zustandsrelevante Faktoren einbezogen werden.

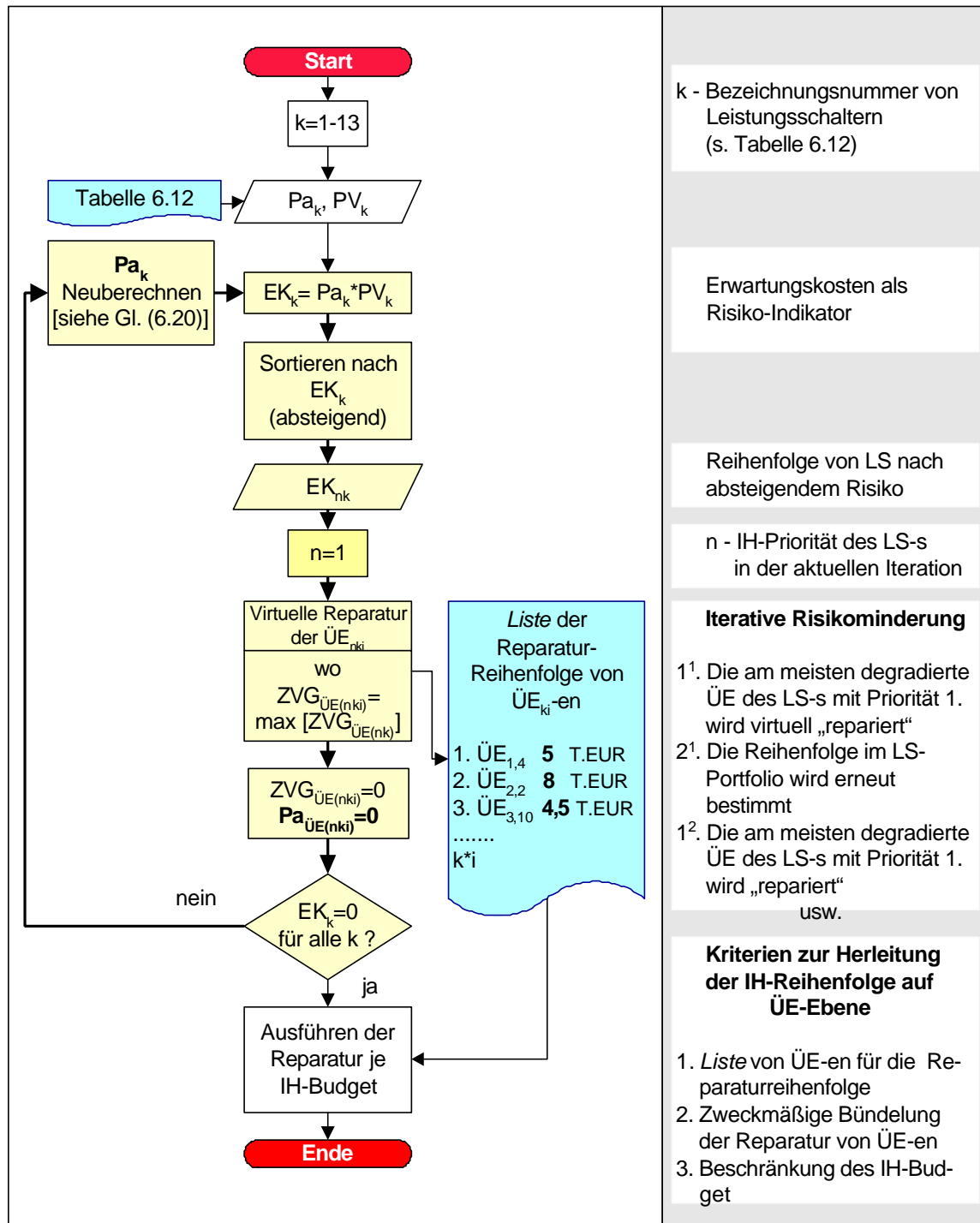


Bild 6.18 Portfolioübergreifende Bestimmung der Reparaturreihenfolge von überwachten Einheiten zur Unterstützung der Ablaufplanung in der operativen Instandhaltung

IH-Priorität n	Daten für die Betriebsmittel des IH-Portfolios			
	Bezeichnung ***.k	Pa _k	PV _k	EK _k
		[%]	[T.EUR]	
1	C03.1	77.70	110000.00	85469.35
2	C02.2	64.89	27.36	17.76
3	C06.3	87.91	15.12	13.29
4	C07.4	82.80	10.80	8.94
5	E08.5	40.21	11.34	4.56
6	E06.6	69.72	5.54	3.86
7	E03.7	49.26	7.02	3.46
8	E05.8	65.59	5.13	3.36
9	E04.9	57.96	5.40	3.13
10	E07.10	30.17	10.35	3.12
11	E01.11	49.26	5.54	2.73
12	C04.12	0.00	70400.00	0.00
13	E02.13	0.00	18.00	0.00

Tabelle 6.12 Bestimmung der Instandhaltungsreihenfolge auf Betriebsmittelebene

IH-Priorität "n"	Daten für die Betriebsmittel des IH-Portfolios			
	Bezeichnung ***.k	Komponente	ÜE _{nki}	max[ZVG _{nki}]
		Bezeichnung		über alle ÜE-en
1	C03.1	Phase 2	SF6_Isoliergas ÜE _{1,4}	77.70

Tabelle 6.13 Auswahl der am meisten degradierten überwachten Einheit als IH-Aktivität erster Priorität

IH-Priorität n	Daten für die Betriebsmittel des IH-Portfolios			
	Bezeichnung ***.k	Pa _k	PV _k	EK _k
		[%]	[T.EUR]	
1	C02.2	64.89	27.36	1775.50
2	C06.3	87.91	15.12	1329.22
3	C07.4	82.80	10.80	894.26
4	E08.5	40.21	11.34	455.99
5	E06.6	69.72	5.54	385.90
6	E03.7	49.26	7.02	345.80
7	E05.8	65.59	5.13	336.49
8	E04.9	57.96	5.40	312.98
9	E07.10	30.17	10.35	312.23
10	E01.11	49.26	5.54	272.65
11	C03.1	0.00	110000.00	0.00
12	C04.12	0.00	70400.00	0.00
13	E02.13	0.00	18.00	0.00

Tabelle 6.14 Bestimmung der Instandhaltungsreihenfolge auf Betriebsmittelebene erneut anhand der Neuberechneten Ausfallwahrscheinlichkeit für C03.1

7. Schlussfolgerungen

Es ist vor allem die unerbittliche quantitative Analyse der entscheidungsrelevanten Prozesse, die den Menschen in die Lage versetzt, richtig zu entscheiden, ohne in Gefahr zu laufen, in Wunschdenken oder Fatalismus zu verfallen [Ester, 1987]. Diese Betrachtung zeichnet das präsentierte Herangehen an die Lösung der risikobasierten online Entscheidungsunterstützung aus.

Zweck der Arbeit war eine wissenschaftlich fundierte Methode zur Entscheidungsunterstützung bezüglich der wichtigsten praxisrelevanten Entscheidungssituationen wie Ersatz- und Instandhaltungsstrategie bereitzustellen, und damit die erfolgskritische Integrationslücke zwischen der technischen Prozessebene und dem strategischen Assetmanagement zu schließen [Stiegler, 2006].

Die risikoorientierte Betrachtung der obigen Entscheidungssituationen verlangte nach der demonstrierten, multidisziplinären Lösung. Diese ist dadurch gekennzeichnet, dass Hilfsmittel der Systemanalyse wie hierarchische Modellbildung, Simulationstechnik und Szenariotechnik zusammenfließen mit funktionsübergreifender Prozessoptimierung und fuzzy-logischer Folgerungstechnik.

Im Gegensatz zu bisherigen Lösungen, bei denen der Praktiker keinen einfachen Zugang zum Verständnis und damit zur Anwendung fand, wurde das Verständnisproblem im neuen Ansatz durch die modulare, verbalkonfigurierbare Abbildung der Zustandsbewertung aus dem Wege geräumt. Die menschnahe, transparente Folgerungskette ist bis zur Ergebnisrepräsentation aufrechterhalten worden.

Die Kennzahlen zur Entscheidungsunterstützung sind bedarfsgerecht, in bezug auf eine konkrete Entscheidungssituation maßgeschneidert gebildet worden. Diese werden durch entscheidungsinstanzgerecht gestaltete Berichte online zur Verfügung gestellt. Einen Überblick über die Kennzahlen und Indikatoren bietet Bild 7.1.

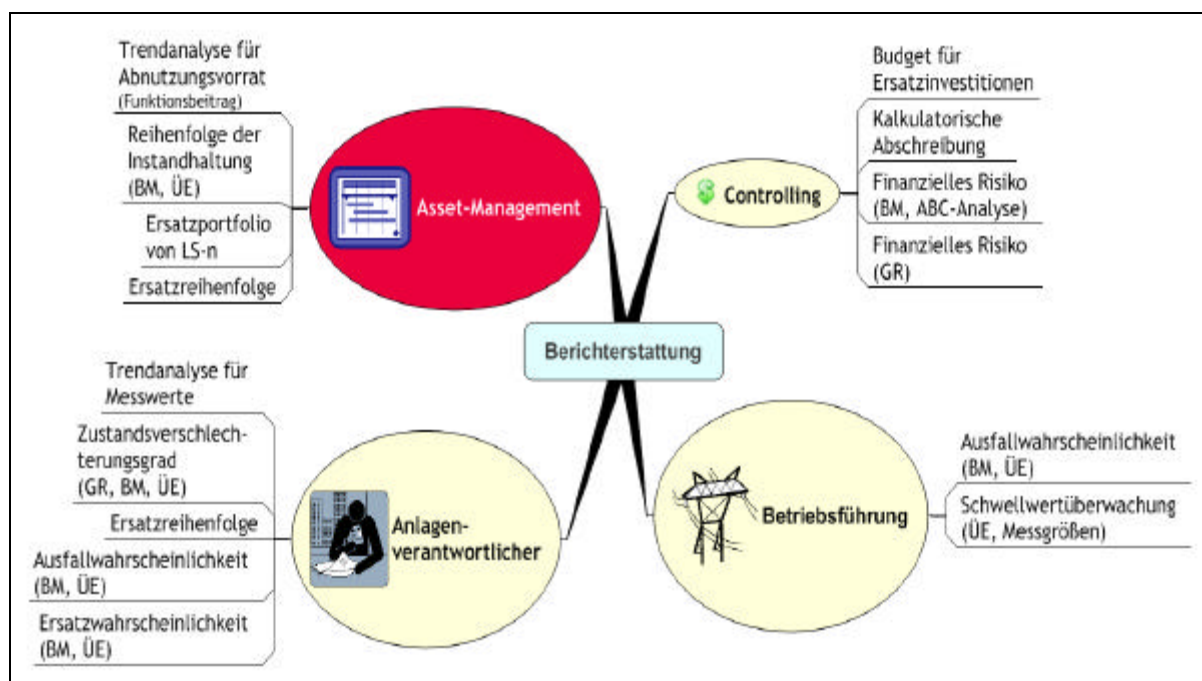


Bild 7.1 Bereichsübergreifende Berichterstattung für Anlagemanagement

8. Anmerkungen und Ausblick

Die Diskussion in der Einleitung macht deutlich, dass sich die Energieversorgungsunternehmen durch die Deregulierung des Strommarktes neuen Herausforderungen stellen müssen.

Dem Betreiberwunsch, moderne AM-Methoden zur Erreichung einer größtmöglichen Kostentransparenz zu bekommen, wurde in der vorliegenden Arbeit nachgekommen, indem man zustandsabhängige Kernprozesse funktionsübergreifend nachgebildet hat. Damit wurde exemplarisch gezeigt, wie man die Schnittstelle zwischen dem Finanzbereich und dem technischen Anlagenbetrieb durch den Einsatz unterschiedlicher Disziplinen überbrücken kann.

Ein aktives Asset-Management setzt voraus, dass die wichtigsten zustandsrelevanten Messgrößen von fehleranfälligen Betriebsmittelkomponenten online überwacht werden. Die Arbeit demonstriert, dass sogar eine lose Verzahnung der Zustandsbeurteilung mit der Szenariobildung für risikominimierende Maßnahmen wertvolle Informationen für die strategische Planung rechnergestützt liefern kann. Weil bei der Zielsetzung die Robustheit der Modellierung wegen der zu erzielenden Transparenz im Vordergrund stand, hat man für einige unbekannte Zusammenhänge Annahmen getroffen. Obwohl diese auf Erfahrung basierenden Annahmen durch ihre vorgesehene iterative Anpassung die gewonnenen Ergebnisse gar nicht in Frage stellen, besteht die Möglichkeit sie durch fundierte Berechnungen zu ersetzen. Weiterführende Arbeiten sollten daher der Frage nachgehen, ob z.B. die Annahme für die zustandsbasierte Bestimmung der Ausfallwahrscheinlichkeit von Betriebsmittelkomponenten durch eine statistische Auswertung oder durch eine andere, präzisere Methode ersetzt werden kann.

Die vorgestellte Nachbildung von ausgewählten Kernprozessen korrespondiert mit der Zielsetzung der Arbeit. Nichtsdestotrotz sei bemerkt, dass die getroffene Auswahl den vollen Umfang der unterstützungswürdigen Entscheidungssituationen bei einem Energieversorger nicht abdeckt. Um alle zustandsabhängigen Entscheidungen zu unterstützen, müssen diese erst selektiert und dann umfassend untersucht werden. Dazu muss man die Zustandsabhängigkeit der vorhin katalogisierten Entscheidungssituationen systematisch, anhand der wirkungsrelevanten Prozesse analysieren. Zur Analyse kann man dabei die in SAP/R3 bereits abgebildeten Prozesse als Grundlage heranziehen.

Weitere Verbesserungsmöglichkeiten des RB&FÜAM Ansatzes bestehen in der Ausweitung der Informationsverzahnung. Zustandsrelevante Betriebsgrößen, welche im vorliegenden Modell aus Platzgründen nicht betrachtet wurden, können in das Modell als Zustandsparameter zweiter Ordnung eingebunden werden. Für die erwähnte Einbindung kann man sich die ereignisgesteuerte Gewichtung von einzelnen Beurteilungsregeln zu Nutze machen. Der Steuerungsmechanismus kann dabei mittels des Stateflow-s von MATLAB abgebildet und darauffolgend in einem separaten Modul untergebracht werden. Die genannte Art der dynamischen Regelgewichtung erlaubt die relevante Regelbasis ereignisabhängig zu ändern, ohne dabei die bezweckte Transparenz wesentlich zu mindern. Die Implementierung dieser Vorgehensweise wäre ein weiterer Schritt zur vollautomatisierten Online-Entscheidungsunterstützung.

Das anlagennahe Asset-Management operiert im Kontext der Unternehmensfunktionen wie Netzwirtschaft, Systemführung und Netzservice und daher soll es als Informationsdrehscheibe für diese fungieren. Hat man die Entscheidungssituationen selektiert und die entsprechenden integrierten Kennzahlen zur Entscheidungsunterstützung abgebildet, muss man als nächstes die Nachvollziehbarkeit der aktuellen Indikatorwerte sicherstellen. Dafür dient in erster Ordnung die gebildete Assethierarchie, in der allerdings die Navigation z.B. durch grafische Dienste unterstützt werden sollte. Die Umsetzung auch dieser Aufgabe steht noch aus.

Die Bedeutung des Asset-Managements für Energieversorger wird auch dadurch bekräftigt, dass die CIGRE, die auf den Gebieten der Hochspannungstechnik und Energieversorgung als eine anerkannte technisch-wissenschaftliche Organisation tätig ist, eine eigenständige Arbeitsgruppe (SC C1) zur Behandlung von Themengebieten des Asset-Managements aufgestellt hat. Die vorliegende Arbeit soll einen wissenschaftlichen Beitrag zur Forschungstätigkeit dieser Gruppe leisten, indem sie einige mehrkriterielle Anwendungsbeispiele zur Lösung von grundlegenden Problemstellungen des anlagennahen Asset-Managements zur Verfügung stellt.

Durch den RB&FÜAM-Ansatz ist es erstmals möglich, den Zustand eines Systems über den Zustand seiner Komponenten so abzuleiten, dass dieser mit einer einzigen Kennzahl beschreibbar ist. Das zugrundeliegende Modell gewährt vollen Zugang zum Verständnis aller zugrundeliegenden Zusammenhänge. Die Verzahnung der einzelnen Prozesssteile ist dabei schon allein an der Hierarchie der grafischen Modellstruktur zu erkennen. Das entsprechende Simulink-Modell ermöglicht die online Simulation von unterschiedlichen Zustandsszenarien und bietet somit Hilfestellung zur Bestimmung der optimalen Instandhaltungs- und Ersatzstrategie.

Weil es keine universellen Rezepte zur Modellierung mehrkriteriellen Entscheidungssituationen gibt, sollte man den vorgestellten Ansatz als Orientierungsmethode zur Lösungsgenerierung für individuelle Fragestellungen heranziehen. Die vorgestellte Methode bietet sowohl eine theoretische als auch praktische Hilfestellung bei der Modellaufstellung. Bei der Beschreibung des Systemverhaltens kann man sich dabei auf eine einfache Beschreibungsform mit verbalen Beurteilungsregeln stützen, welche durch fortschrittliche Modellierungsapplikationen (z.B. *Fuzzy-Toolbox von MATLAB*) explizit unterstützt wird.

Es besteht die Hoffnung, dass durch dieses neue Paradigma Denkanstöße für Assetmanager zur Modellierung weiteren Entscheidungssituationen geben werden und dieser neue Ansatz bei Energieversorgern auf unterschiedlichen Gebieten der strategischen und operativen Planung eine Anwendung findet.

9. Anhang

Grundbegriffe der Wahrscheinlichkeitstheorie

Im Rahmen dieser Arbeit werden verschiedene Wahrscheinlichkeiten berechnet und abgeleitet. Um einen sicheren Umgang mit den Größen zu unterstützen, beschreibt dieses Kapitel die wichtigsten Grundbegriffe der Statistik und Wahrscheinlichkeitstheorie im Bezug auf Zuverlässigkeits- und Instandhaltungsbetrachtungen [Bertsche, 2004].

Dichtefunktion

Unterteilt man einen Betrachtungszeitraum in mehrere gleich große Intervalle, zählt die Häufigkeiten der Ausfälle für jedes Intervall n_A und trägt diese, normiert auf die Gesamtmenge n aller Ausfälle, als Balken in ein Diagramm ein, erhält man ein Histogramm nach Bild A.1. Die Höhe h des Balkens wird somit durch Gleichung A.1 berechnet.

$$h = \frac{\text{Anzahl der Ausfälle in einem Intervall}}{\text{Gesamtanzahl der Ausfälle}} = \frac{n_A}{n} \quad (\text{A.1})$$

Als grobe Näherung für die Anzahl der Intervalle n_I dient Gleichung A.2.

$$\begin{aligned} \text{Anzahl der Intervalle} &\approx \sqrt{\text{Gesamtanzahl der Ausfälle}} \\ n_I &\approx \sqrt{n} \end{aligned} \quad (\text{A.2})$$

Für den Grenzübergang $n \rightarrow \infty$ geht die Intervallbreite gegen Null und der Umriss des Histogramms nähert sich einer glatten, stetigen Kurve an. Diese Kurve stellt die Dichtefunktion $f(t)$ dar (vgl. Bild A.2).

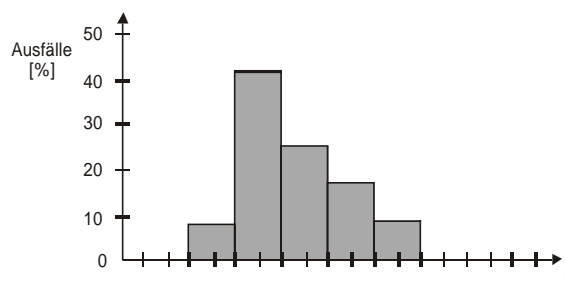


Bild A.1 Häufigkeitshistogramm der Ausfälle

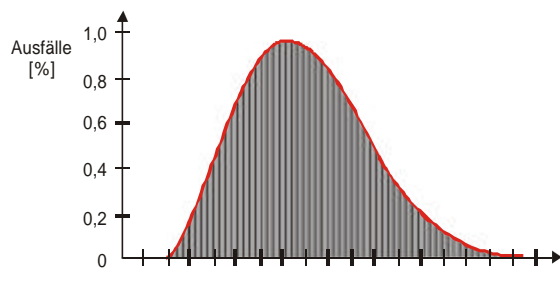


Bild A.2 Dichtefunktion der Ausfälle

Das Histogramm der Häufigkeiten beziehungsweise die Dichtefunktion beschreiben die Anzahl der Ausfälle als Funktion der Zeit. Sie stellen einfach und anschaulich das Ausfallverhalten dar. Der Streubereich und der Bereich der meisten Ausfälle sind leicht zu identifizieren.

Verteilungsfunktion bzw. Ausfallwahrscheinlichkeit

In vielen Fällen interessiert nicht die Anzahl der Ausfälle innerhalb eines Intervalls, sondern wie viele Ausfälle es bis zu einem Zeitpunkt insgesamt gab.

Diese Frage lässt sich mit dem Histogramm der Summenhäufigkeit (Bild A.3) beantworten. Die Summenhäufigkeit $H(m)$ des m -ten Intervalls (Höhe des m -ten Balkens) wird mit Gleichung A.3 bestimmt.

$$H(m) = \sum_{i=1}^m h(i); \quad i = \text{Intervallnummer} \quad (\text{A.3})$$

Für $n \rightarrow \infty$ nähert sich der Umriss des Histogramms wieder einer glatten und stetigen Funktion an. Sie entspricht der eigentlichen Verteilungsfunktion $F(t)$. Die Verteilungsfunktion beginnt stets bei $F(t)=0\%$, wächst dann monoton an und endet bei $F(t)=100\%$ wenn alle Teile ausgefallen sind (Bild A.4). Ausgehend von Gleichung (A.3) und unter Berücksichtigung des Grenzübergangs ergibt sich Gleichung (A.4).

$$F(t) = \int f(t) dt \quad (\text{A.4})$$

In der Zuverlässigkeitstheorie wird für die Verteilungsfunktion $F(t)$ der Begriff: „Ausfallwahrscheinlichkeit“ verwendet.

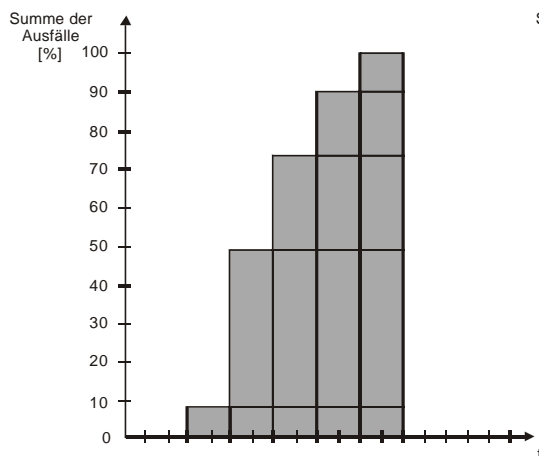


Bild A.3 Summenhistogramm der Ausfälle

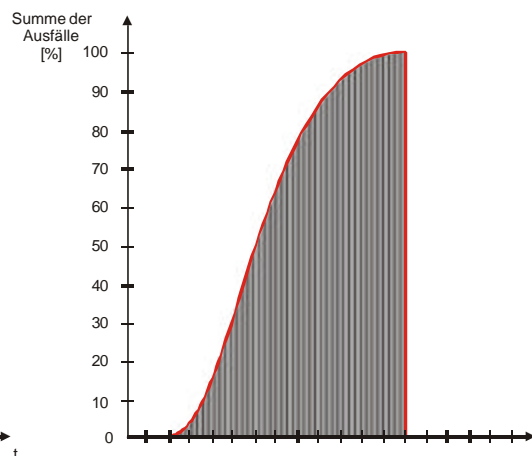


Bild A.4 Verteilungsfunktion der Ausfälle

Überlebenswahrscheinlichkeit bzw. Zuverlässigkeit

Die Überlebenswahrscheinlichkeit $R(t)$ ist das Komplement der Ausfallwahrscheinlichkeit. Sie beginnt stets bei $R(t)=1$ und endet bei $R(t)=0$ wenn kein Teil „überlebt“ hat (Gleichung A.5).

$$R(t) = 1 - F(t) \quad (\text{A.5})$$

Die Überlebenswahrscheinlichkeit wird auch als Zuverlässigkeit bezeichnet. Mit der Funktion $R(t)$ kann der oft nur qualitativ verwendete Begriff „Zuverlässigkeit“ objektiv und quantitativ festgelegt werden. Die Zuverlässigkeit ist damit die Wahrscheinlichkeit dafür, dass ein Teil während einer definierten Zeitdauer unter den gegebenen Funktions- und Umgebungsbedingungen nicht ausfällt.

Ausfallrate

Wird die Anzahl der Ausfälle zum Zeitpunkt t nicht auf die Gesamtanzahl aller Ausfälle bezogen, sondern auf die Anzahl der noch intakten Einheiten, spricht man von der Ausfallrate $\lambda(t)$. Die Dichtefunktion $f(t)$ beschreibt die Anzahl der ausgefallenen Einheiten und die Überlebenswahrscheinlichkeit $R(t)$ die Anzahl der noch intakten Einheit. Damit kann $\lambda(t)$ durch Gleichung A.6 berechnet werden.

$$\lambda(t) = \frac{\text{Ausfälle zum Zeitpunkt } t}{\text{Anzahl intakter Einheiten zum Zeitpunkt } t} \quad (\text{A.6})$$

$$\lambda(t) = \frac{f(t)}{R(t)}$$

Die Ausfallrate $\lambda(t)$ kann interpretiert werden als Risiko eines Teils auszufallen, wenn es bisher überlebt hat. Betrachtet man einen bestimmten Zeitpunkt t , dann gibt $\lambda(t)$ an, wie viele der noch intakten Teile im nächsten Zeitintervall ausfallen werden.

Ausfallquote

Die Ausfallquote q beschreibt die relative Bestandsänderung in einem betrachteten Intervall (siehe Gl. A.7).

$$q = \frac{\text{Ausfälle im Intervall}}{\text{Anfangsbestand} \cdot \text{Intervallgröße}} \quad (\text{A.7})$$

10. Literatur

- [Albeln, 2002] **G. Albeln, T. Hartmann, V. Pitz**
Zustandsmodell für ein integriertes Instandhaltungsmanagement
von 123-KV-Leistungsschaltern
ETG-Fachbericht, Berlin, Februar, 2002
- [Allan, 2003] **D. Allan**
Managing the Ageing Processes of HV Assets
CIGRÉ SC B3 Tutorial, Delft, 2003, S. 43-57
- [Altrock, 1993] **C. Altrock**
Fuzzy Logic
Band 1 Technologie, R. Oldenburg Verlag, München, 1993
ISBN 3-486-22673-8
- [Altrock, 1993] **C. Altrock**
Fuzzy Logic
Band 2 Anwendungen, R. Oldenburg Verlag, München, 1993
ISBN 3-486-22677-0
- [Balzer, 2000] **G. Balzer, M. Halfmann, C. Neumann, T. Orlowska,**
Life Cycle Management of Circuit-Breakers by Application of
Reliability Centered Maintenance
CIGRE 2000, 13-103
- [Balzer, 2003] **G. Balzer**
Ageing of the System
CIGRÉ SC B3 Tutorial, Delft, 2003, S. 23-41
- [Baus, 1995] **J. Baus**
Controlling
1. Auflage, Cornelsen-Verlag, Berlin, 1996
ISBN 3-464-49008-4
- [Bertsche, 2004] **B. Bertsche, G. Lechner**
Zuverlässigkeit im Fahrzeug- und Maschinenbau
10. Auflage, Springer-Verlag, Berlin, 2004
ISBN 3-540-20871-2
- [Bogaschewsky, 2004] **R. Bogaschewsky, R. Rollberg**
Prozessorientiertes Management
Springer-Verlag, Berlin, 2004
ISBN 3-540-64053-3
- [Brand, 2003] **K.P. Brand, V. Lohmann**
Substation Automation Handbook
Utility Automation Consulting Lohmann, Bremgarten, 2003
ISBN 3-85758-951-5

- [Claudi, 2002] **A. Claudi, W. Hauschild**
Prüfungen, Monitoring und Diagnose im Lebenszyklus eines elektrischen Betriebsmittels
ETG-Fachbericht, Berlin, Februar, 2002
- [Csernyák, 1978] **L. Csernyák**
Valószínűségyszámítás
Tankönyvkiadó Verlag, Budapest, 1992
ISBN 963-18-4689X
- [Deym, 1977] **A. Deym, M. Duttenhoffer, W. Faßnacht**
Organisationsplanung
3. Auflage, Siemens-Aktiengesellschaft, München, 1977
ISBN 3-8009-1201-5
- [Ehrlenspiel, 1995] **K. Ehrlenspiel**
Integrierte Produktentwicklung und Methoden für Prozessorganisation
Carl Hanser-Verlag, München, 2004
ISBN 3-446-15706-9
- [Ester, 1987] **J. Ester**
Systemanalyse und mehrkriterielle Entscheidung
1. Auflage, VEB Verlag Technik, Berlin, 1987
ISBN 3-341-00242-1
- [Fathi, 1995] **M. Fathi, D. Danebrock, J.P. Stöck**
Ein Konzept für Fuzzy-Logik in Online-Diagnosesystemen
VDE-Fachtagung, Dortmund, 1992
- [Feser, 1995] **K. Feser, B. Feuchter, M. Lauersdorf, T. Leibfried**
General Trends in Condition Monitoring of Electrical Insulation
IEEE Power Tech Conference, Stockholm, 1995,
paper SPT IS 05-1, Proc. pp. 104-109
- [Hiyama, 1999] **T. Hiyama, K. Tomsovic,**
Current Status of Fuzzy System Applications in Power Systems
Proceedings of the IEEE SMC99, Tokyo, Japan, October, 1999,
pp. VI 527-532.
- [Islam, 1985] **S. Islam, T. Wu, G. Ledwich**
A Novel Fuzzy Logic Approach to Transformer Fault Diagnosis
IEEE Trans. on Dielectrics and Electrical Insulation, Vol. 7, No.2,
April 2000, pp. 177-186.
- [Janssen, 2003] **A.L.J. Janssen,**
Asset Management Strategies
CIGRÉ SC B3 Tutorial, Delft, 2003, S. 11-21

- [Kahlert, 1993] **J. Kahlert, H. Frank**
Fuzzy-Logik und Fuzzy-Control
Vieweg-Verlag, Braunschweig, 1993
ISBN 3-528-05304-6
- [Kerth, 2005] **K. Kerth, R. Pütmann**
Die besten Strategietools in der Praxis
Carl Hanser Verlag, München, 2005
ISBN 3-446-40037-0
- [Koch, 2005] **M. Koch**
Improved Determination of Moisture in Oil-Paper-Insulations by
Specialized Moisture Equilibrium Charts
14th Int. Symp. on High Voltage Engineering (ISH), Beijing, 2005,
Proceedings of the ISH, paper No. H-46
- [Koch, 2005] **M. Koch, S. Tenbohlen**
Diagnostics of Oil-Paper-Insulations Using Relaxation Currents
14th Int. Symp. on High Voltage Engineering (ISH), Beijing, 2005,
Proceedings of the ISH, paper No. H-45
- [Koch, 2005] **M. Koch, S. Tenbohlen**
Dielektrische Diagnosemethoden im Vergleich
„ew“ Magazin für Energie und Wirtschaft, Heft 3, 24. Januar 2005,
S. 42-45, VWEW Energieverlag GmbH Frankfurt a. M.
- [Laerderach, 2003] **S. Laerderach**
Information Strategy to Support Utility Asset Management
CIGRÉ SC B3 Tutorial, Delft, 2003, S. 1-10
- [Macfarlane, 1964] **A.G.J. Macfarlane**
Analyse Technischer Systeme
George G. Harrap-Verlag, London, 1964
ISBN 3-540-20871-2
- [Macor, 2000] **P. Macor, G. Robert, D. Girardot, J. C. Riboud**
The Short-Circuit Resistance of Transformers: The Feedback in
France based on Tests, Service and Calculation Approaches
CIGRÉ Session, Paris, 2000, paper 12-102
- [Maier, 1990] **R. Maier, A. Kachler**
Neues Verfahren zur Beurteilung der Stoßprüfung von
Transformatoren
Elektrizitätswirtschaft, Jg. 89 (1990), Heft 18, S. 984-990
- [Malewski, 1992] **R. Malewski, R. Gockenbach, R. Maier, K. Fellmann, A. Claudi**
Five Years of Monitoring the Impulse Test of Power Transformers
with Digital Recorders and the Transfer Function Method
CIGRÉ Session, Paris, 1992, paper 12-201

- [Malewski-2, 1989] **R. Malewski, J. Douville, L. Lavalloé**
Automatic Digital Recording of Transients in EHV Substations
6th Int. Symp. on High Voltage Engineering (ISH), New Orleans,
1989, paper 50.08
- [Markalous, 2003] **S. Markalous, E. Grossmann, K. Feser**
Online Acoustic PD-Measurements of Oil/Paper-Insulated
Transformers –Methods and Results-
13th Int. Symp. on High Voltage Engineering (ISH), Delft, 2003,
Millpress, Rotterdam, 2003
ISBN 90-77017-79-8, p. 324
- [McNutt, 1970] **W. J. McNutt, W. M. Johnson, R. A. Johnson, R. E. Nelson**
Power Transformer Short-Circuit Strength - Requirements, Design
and Demonstration
IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems,
Vol. PAS-89, No. 8, Nov. 1970, pp. 1955-1963
- [Morched, 1993] **A. Morched, L. Matri, J. Ottevangers**
A High Frequency Transformer Model for the EMTP
IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 8, No. 3, Jul. 1993,
pp. 1615-1626
- [Moreau, 1999] **O. Moreau, Y. Guillot, B. Barre**
FRA Diagnostic Method: Simulation Applied to Feasibility Study
and Efficiency Improvement
IEEE Power Engineering Society, Winter Meeting, 1999,
Proc. Vol. 2, pp. 1059-1064
- [Morton, 1999] **K. Morton**
Asset management in the electricity supply industry
Power Engineering Journal, October, 1999, pp. 233-240.
- [Oechsle, 2000] **F. Oechsle, K. Feser**
Enhanced Concept for Control Systems of Electric Power Networks
IEEE PowerCon, 2000, Perth, Australia
- [Olfert, 1996] **K. Olfert**
Kostenrechnung
10. Auflage, Friedrich Kiehl Verlag, Ludwigshafen, 1974
ISBN 3-470-70400-7
- [Osztermayer, 2004] **J. Osztermayer**
Neue Ansätze im Asset-Management von elektrischen
Betriebsmitteln
Micafil Symposium, 24-25. März 2004, Stuttgart, Kap. 5, S. 1-18

- [Osztermayer, 2002] **J. Osztermayer, K. Feser,**
Enhanced Competitiveness with a Modern Asset-Management System
International Symposium Modern Electric Power Systems,
Wroclaw, Poland, pp 64-69, Sept. 2002.
- [Osztermayer, 2005] **J. Osztermayer, K. Feser, S. Tenbohlen**
Real-time Condition Assessment of Power System Assets as a
Vital Information Backbone for a Comprehensive Online Asset-
Management
Proceeding of the XIVth International Symposium on High Voltage
Engineering, Beijing, China, August 25-29, 2005 p. 458
- [Papoulis, 1962] **A. Papoulis**
The Fourier Integral and its Applications
McCraw Hill Book Company, New York, 1962
- [Rahimpour, 2000] **E. Rahimpour, J. Christian, K. Feser, H. Mohseni**
Modellierung der Transformatorwicklung zur Berechnung der
Übertragungsfunktion für die Diagnose von Transformatoren
Elektrie, Berlin 54 (2000) Heft 1-2, S. 18-30
- [Rahimpour, 2001] **E. Rahimpour, J. Christian, K. Feser, H. Mohseni**
Die Fähigkeit eines detaillierten Modells Zur Diagnose axialer
Verschiebungen in Transformatorwicklungen mit Hilfe von
Übertragungsfunktionen
Electrical Engineering, Vol. 83. No. 1-2, Feb. 2001, pp. 55-61
- [Richter, 1989] **M. Richter**
Prinzipien der künstlichen Intelligenz
1. Auflage, B.G. Teubner Verlag, Stuttgart, 1989
ISBN 3-519-02269-9
- [Rogers, 1972] **E. J. Rogers, L. E. Humbard, D. A. Gillies**
Instrumentation Techniques for Low Voltage Impulse Testing of
Power Transformers
IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems,
Vol. PAS-91, No. 3, Jun. 1972, pp. 1281-1293
- [Rüdenberg, 1962] **R. Rüdenberg**
Elektrische Wanderwellen auf Leitungen und Wicklungen von
Starkstromanlagen
Auflage, Springer-Verlag, Berlin, 1962
- [Schäfer, 2000] **M. Schäfer**
Thermische Überwachung von Transformatoren
Dissertation, Universität Stuttgart, Shaker Verlag, 2000,
ISBN 3-8265-8274-8

- [Schindowski, 1974] **E. Schindowski, O. Schütz**
Statistische Qualitätskontrolle, Kontrollkarten und
Stichprobenpläne
6. Auflage, VEB-Verlag Technik, Berlin, 1974
- [Solvang, 2001] **Solvang, L. Landward, B. Gustavsen, A O. Eggen**
Risk management, cost minimization using condition based
maintenance
Conf. Publication No. 482. CIRED, 18-21 June 2001, Amsterdam.
- [Stace, 1997] **M. Stace, M. Islam**
Condition Monitoring of Power Transformers in the Australian
State of New South Wales Using Transfer Function Measurements
5th int. Conference on Properties and Applications of Dielectric
Materials, Seoul, 1997, paper 03P13, Proc. pp. 248-251
- [Stengl, 1993] **B. Stengl, R. Ematinger**
Instandhaltung mit SAP
SAP-Press, 2006
ISBN 3-89842-289-5
- [Stiegler, 2006] **M.J. Stiegler**
Asset Management für SAP
Hochspannungssymposium, 15-16. März 2006, Stuttgart,
pp. 299-307
- [Stygar, 1982] **W. Stygar, G. Gerdin**
High Frequency Rogowski Coil Response Characteristics
IEEE Transactions on Plasma Science,
Vol. PS-10, No. 1, Mar. 1982, pp.40-44
- [Tenbohlen, 2000] **S. Tenbohlen, D. Uhde, J. Poittevin, U. Sundermann**
Enhanced Diagnoses of Power Transformers Using On- and Off-
line Methods: Results, Examples, and Future Trends
CIGRÉ Session, Paris, 2000, paper 12-204
- [Thompson, 1979] **H. A. Thompson, F. Tillery, D. U. von Rosenberg**
The Dynamic Response of Low Voltage, High Current, Disk Type
Transformer Windings to Through Fault Loads
IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems,
Vol. PAS-98, No. 3, Jun. 1979, pp. 1091-1097
- [Traeger, 1993] **D.H. Traeger**
Einführung in die Fuzzy-Logik
B.G. Teubner Verlag, Stuttgart, 1993
ISBN 3-519-06162-7

- [Tschudi, 1991] **D. J. Tschudi, A. J. Germond**
Transformer Impulse Test Failure Location Using DSP Techniques
Int. Symp. on Digital Techniques in HV Measurements, Toronto,
1991, Proc. pp. 5.13-5.17
- [Vaessen, 1992] **P. T. M. Vaessen, E. Hanique**
A new Frequency Response Analysis Method for Power
Transformers
IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 7, No. 1, Jan. 1992,
pp. 384-391
- [Vandermaar, 1997] **A. J. Vandermaar, M. Wang**
Transformer Condition Monitoring by Frequency Resonse Analysis
10th Int. Symp. on High Voltage Engineering (ISH), Montréal, 1991,
Vol. 4, pp.119-122
- [Wang, 1999] **M. Wang, A. J. Vandermaar, K. D. Srivastava**
Condition Monitoring of Transformers in Service by the LVI Test
Method
11th Int. Symp. on High Voltage Engineering (ISH), London, 1999,
paper 1.45.S3
- [Warnecke, 1990] **T. Warnecke, J. Bullinger**
Wirtschaftlichkeitsrechnung für Ingenieure
1. Auflage, Carl Hanser Verlag, München, 1991
ISBN 3-446-15963-0
- [Waters, 1968] **M. Waters, A. Stalewski, J. C. Farr, J. D. Whitaker**
Short Circuit Testing of Power Transformers and the Detection and
Location of Damage
CIGRÉ Session, Paris, 1968, paper 12-05
- [Wenzel, 1998] **D. Wenzel, H. Borsi, E. Gockenbach**
Analytical Computation of the Transfer Functions of Transformers
Int. Symp. on Electrical Insulating Materials, Toyohashi, 1998,
paper P2-48, Proc. pp. 787-790
- [Werle, 1999] **P. Werle, V. Wasserberg, H. Borsi, E. Gockenbach**
Kombinierte Verfahren zur Zustandserkennung der Isolierung von
Leistungstransformatoren
ETG-Fachbericht 79, VDE-Verlag, Berlin, 1999, S. 361-370
ISBN 3-8007-2502-9
- [Williamson, 1997] **A. Williamson**
Target and Kaizen costing
Manufacturing Engineer, February, 1997, pp. 22-24.

[Yen, 1995]

J. Yen, R. Langari, L. Zadeh

Industrial Applications of Fuzzy Logic and Intelligent Systems

IEEE PRESS, New York, 1995

ISBN 0-7803-1048-9

[Zielasek, 1995]

G. Zielasek

Projekt-Management

Springer-Verlag, Berlin, 1995

ISBN 3-540-59595-4

